

АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН  
НПО «ФИЗИКА-СОЛНЦЕ»

ACADEMY OF SCIENCES OF UZBEKISTAN  
SCIENTIFIC ASSOCIATION "PHYSICS-SUN"

**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ  
И ПРИКЛАДНЫЕ ВОПРОСЫ ФИЗИКИ**

**FUNDAMENTAL AND APPLIED  
PROBLEMS OF PHYSICS**



**ТРУДЫ  
МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

**PROCEEDINGS  
OF INTERNATIONAL CONFERENCE**

**СЕКЦИЯ-III:  
ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ И  
ГЕЛИОМАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, ИХ ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ**

**13 - 14 июня**

Ташкент-2017 г.

## АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН НПО «ФИЗИКА-СОЛНЦЕ»

### Программный комитет

- |  |                                  |
|--|----------------------------------|
| 1. Лутпуллаев С.Л.–проф, председатель    | 12. Саидов М.С. – академикАН РУз |
| 2. Юлдашев Б.С. – академик, през. АН РУз | 13. Тураев Н.Ю. – академикАН РУз |
| 3. Ашуров М.Х. – академикАН РУз          | 14. Мирзаев С.З. – д.ф.-м.н.     |
| 4. Гуламов К.Г.- академикАН РУз          | 15. Бахрамов С.А.– профессор     |
| 5. Захидов Р.А. – академикАН РУз         | 16. Атабаев И.Г. – д.ф.-м.н.     |
| 6. Мамадалимов А.Т. – академикАН РУз     | 17. Авезов Р.Р. – профессор      |
| 7. Мукимов К.М. – академикАН РУз         | 18. Абдурахманов А. – профессор  |
| 8. Муминов Р.А. – академикАН РУз         | 19. Гулямова Д.Ж. – профессор    |
| 9. Муминов Т.М. – академикАН РУз         | 20. Ашуров Х.Б. – д.ф.-м.н.      |
| 10. Мусаханов М.М. – академикАН РУз      | 21. Ташметов М. – д.ф.-м.н.      |
| 11. Расулев У.Х. – академик АН РУз       | 22. Садыков И. – д.х.н.          |

### Организационный комитет

- |  |                                     |
|--|-------------------------------------|
| 1. Лутпуллаев С.Л., Проф., пред.конф., ФТИ | 11. Баизаков Б.Б., зав.лаб., ФТИ    |
| 2. Ахатов Ж.С., зам.пред.конф., ФТИ        | 12. Цой Э., с.н.с., ФТИ             |
| 3. Атабаев И.Г., зам.пред.конф., ИМ        | 13. Авезова Н.Р., зам. дир. МИСЭ    |
| 4. Матчанов Н.А., дир. МИСЭ                | 14. Абдурахманов А.А., зав.лаб., ИМ |
| 5. Саидханов Н.Ш., учен.секр., ФТИ         | 15. Сулейманов С.Х., зав.лаб., ИМ   |
| 6. Саидов А.С., зав.лаб., ФТИ              | 16. Файзиев Ш., зав.лаб., ИМ        |
| 7. Олимов К., зав.лаб., ФТИ                | 17. Усмонов Ш., с.н.с., ФТИ         |
| 8. Разыков Т.М., зав.лаб., ФТИ             | 18. Кабулов Р., с.н.с., ФТИ         |
| 9. Каримов А.В., зав.лаб., ФТИ             | 19. Собиров Х., с.н.с., ФТИ         |
| 10. Турсунов М.Н., зав.лаб., ФТИ           | 20. Жураев Э.Т., секр.конф., ФТИ    |

### Партнеры:

- NUS-CBIS: National University of Singapore, Center for BioImaging Science. Singapore
- Научно-технический центр "ТАТА", Саров, Россия
- MITI: Бранденбургский Институт по поддержке развития технологий и инноваций, Германия
- Институт Материаловедение НПО "Физика-Солнце" Академии наук Республики Узбекистан
- ООО "Solar Energy Product", Ташкент, Узбекистан

### Partners:

- NUS-CBIS: National University of Singapore Center for BioImaging Science. Singapore
- Scientific-Technical Center "TATA", Sarov, Russia
- MITI: Märkisches Institut für Technologie- und Innovationsförderung , Germany
- Institute of Materials Science, SA "Physics-Sun" Academy of Sciences of Uzbekistan
- "Solar Energy Product" Co. Ltd., Tashkent, Uzbekistan

## **ВВЕДЕНИЕ**

Научно-техническая революция, вызванная бурным ростом фундаментальных и прикладных наук, прежде всего наук о природе, открыла широчайшие возможности перед человечеством. Она породила также ряд новых проблем, решение которых вряд ли будет возможно без дальнейшего развития всех отраслей науки. Очевидно, что фундаментальная и прикладная физика и в дальнейшем будет оказывать значительно влияние на развитие человеческой цивилизации.

Физика является наукой, изучающей наиболее простые, общие законы природы и сыграла основную роль в развитии современной техники и технологии, передовых отраслей экономики, промышленности, производства.

Физика в Узбекистане, как и в научных центрах других стран мира, имеет прочную и принципиальную основу. Достижения наших ученых в этой области нашли и находят международное признание, отражены в многочисленных публикациях, как в отечественных, так и в зарубежных журналах, проводятся совместные исследования с зарубежными научными центрами. На основе научных разработок осваивается и осуществляется выпуск новых видов наукоемкой продукции в республике.

В целях подведения итогов научно-исследовательской деятельности, критического осмысления результатов фундаментальных и прикладных исследований, определения приоритетов на ближайшие годы в Физико-техническом институте НПО «Физика-Солнце» АН РУз традиционно проводится конференция «Фундаментальные и прикладные вопросы физики». В этом году конференция проводится в международном формате, что даст возможность ученым Узбекистана, работающим в различных направлениях физической науки, не только обсудить результаты своей научно-исследовательской деятельности в более широкой и, мы надеемся, в более критичной международной аудитории, но и сопоставить их с тенденциями мировой науки, а также воспользоваться международной экспертизой при планировании будущих фундаментальных и прикладных исследований и разработок.

*Редакционная коллегия*

## **INTRODUCTION**

The scientific and technological revolution caused by rapid growth of fundamental and applied researches, first of all in natural sciences opens wide opportunities for the development. It also creates a number of new problems which solution will be hardly possible without further development of all branches of science. It is obvious that development of researches in fundamental and applied physics will impact considerably the development of a human civilization.

The physics is the science studying the simplest and general laws of the nature and it had played the significant role in the development of the modern techniques and technologies, all branches of economy, industry and the production.

The physics in Uzbekistan, as well as in scientific centers of other countries of the world, has a strong basis. Achievements of our scientists have found the international recognition, and they are reflected in numerous publications in international scientific journals. We are collaborating with many international scientific centers. We believe that scientific results will be reflected in development of new types of the knowledge-intensive production in our republic.

The conference "Fundamental and applied problems of physics" is traditionally organized by Physical-technical institute of Scientific Association "Physics-Sun" of Academy of Sciences of Uzbekistan to summarize the newest results of scientific researches in Uzbekistan in the field of physics and to define the most promising directions of their development. Now our conference has an international format and we believe that participation of our colleague from different scientific centers and countries not only intensifies our future collaborations but also bring more courage to discussion on the conference.

*Editorial board*



## III. ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ И ГЕЛИОМАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, ИХ ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ

### УЧЁТ ОРИЕНТАЦИИ ОТАПЛИВАЕМЫХ ПОМЕЩЕНИЙ ПРИ РАСЧЕТЕ ИНСОЛЯЦИОННЫХ ПАССИВНЫХ СИСТЕМ ОТОПЛЕНИЯ

Р.Р. Авезов<sup>1,2</sup>, Н.Р. Авезова<sup>1,2</sup>, Э.Ю. Рахимов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Международный институт солнечной энергии

Узбекистан 100084, г. Ташкент, ул. Бодомзор йули, д. 2б, корпус 2

Тел.: (+998) 71 235-40-90 Факс: (+998) 71 235-03-77 E-mail: [avezov@uzsci.net](mailto:avezov@uzsci.net)

<sup>2</sup>Физико-технический институт НПО «Физика-Солнце» АН РУз

Узбекистан 100084, г. Ташкент, ул. Б одомзор йули, д.2б

Тел.: (+998) 71 235-42-42 Факс: (+998) 71 233-12-71 E-mail: [avezov@uzsci.net](mailto:avezov@uzsci.net)

#### Аннотация

В тезисе приводится методика расчета времени начала, завершения, и продолжительности освещенности прямыми солнечными лучами и определение суммарного солнечного излучения (СИ), падающего на фронтальную поверхность светопрозрачного ограждения (СПО) отапливаемых помещений (ОП). Для получения конечных результатов расчётных исследований была проведена обработка 4-х летних обобщенных данных метеорологической станции Паркент.

**Ключевые слова:** интенсивность потока солнечного излучения, инсоляционные пассивные система отопления, длительность освещённости.

#### 1. Введение

Изыскание путей увеличения доли нетрадиционных и возобновляемых источников энергии в топливно- энергетическом балансе является одной из актуальных задач мировой энергетики. В последние десятилетия энергия солнечного излучения (СИ), отличающаяся экологичностью и доступностью, во многих странах мира рассматривается как дополнительный источник энергии, который в ближайшей перспективе может дать ощутимую экономию традиционных топливно-энергетических ресурсов.

Системы отопления (СО), основанные на использовании солнечной энергии, подразделяются на активные и пассивные СО. Последние получили наиболее широкое практическое применение в силу своей относительной дешевизны и простоты реализации.

В практике определено, что в общем объеме солнечной энергии, поступающей на поверхности систем пассивного отопления, большая часть приходится на южно-ориентированные поверхности. Некоторые топографические особенности (структура города, расположение дорог) представляют собой помехи при возведении помещений в нужном направлении, частично или полностью исключая возможность их юго-ориентированного расположения. В этой ситуации надежность исходных данных о располагаемых ресурсах солнечной энергии является одним из определяющих факторов энергетической и экономической эффективности разработки и практического использования инсоляционных пассивных систем отопления (ИПСО). Для Узбекистана с ее территорией и с различными климатическими зонами достоверная оценка потенциала солнечной энергии в конкретном географическом районе является крайне важной задачей.

#### 2. Теоретическая часть

В зависимости от направления распространения, солнечное излучение условно подразделяется на прямое и рассеянное (диффузное). Для расчета интенсивности потока солнечного излучения, поступающего на наклонную лучепоглощающую поверхность, необходимо знать углы падения солнечных лучей на нее. Положение некоторой точки на земной поверхности относительно солнечных лучей в данный момент времени определяется тремя основными углами: широтой местности  $\varphi$ , часовым углом  $\omega$  и склонением Солнца  $\delta$ .

Склонение Солнца в данный день

$$\delta = 23.45 \cdot \sin(0.9863 \cdot (248 + n)), \quad (1)$$

где  $n$ - порядковый номер дня.

Угол падения солнечных лучей на произвольно ориентированную поверхность, имеющую азимут  $\gamma$  (характеризует отклонение поглощающей плоскости коллектора от южного направления, при ориентировании солнечного коллектора точно на юг  $\gamma = 0^\circ$ ) и угол наклона  $\alpha$  (образуется между горизонтальной плоскостью и солнечной панелью) к горизонту, определяется по формуле:

$$\cos i = \sin \alpha (\cos \delta (\sin \varphi \cos \gamma \cos \omega + \sin \gamma \sin \omega) - \sin \delta \cos \varphi \cos \gamma) + \cos \alpha (\cos \delta \cos \varphi \cos \omega + \sin \delta \sin \varphi) \quad (2)$$

Это соотношение имеет важное практическое значение, что необходимо учитывать при проведении тепловых расчетов солнечных коллекторов [1].

Если в формуле (2) заменить значение угла  $\alpha$  на  $0^\circ$  и учитывать  $\omega = \omega_0(Z_0 - Z)$ , тогда получится выражение для определения угла падения солнечных лучей на горизонтальную поверхность:

$$\cos i = \cos \delta \cos \varphi \cos \omega_0(Z_0 - Z) + \sin \delta \sin \varphi \quad (3)$$

где  $\omega_0 = 15 \frac{\text{град}}{\text{час}}$  - часовой угол вращения Земли вокруг своей оси;  $Z_0$  - момент времени истинного полудня для данной местности по среднему солнечному времени;  $Z$  - текущий момент времени (также по среднему солнечному времени) рассматриваемого характерного дня года.

На основе выражения (3) для данной местности с географической широтой  $\varphi$  из условия  $i = \pm 90^\circ$  определяются моменты восхода

$$Z_{\text{вс}} = Z_0 - \frac{1}{\omega_0} \arccos(-tg \delta tg \varphi), \quad (4)$$

и захода Солнца

$$Z_{\text{зх}} = Z_0 + \frac{1}{\omega_0} \arccos(-tg \delta tg \varphi), \quad (5)$$

а также продолжительность светового дня

$$\Delta Z_{\text{дн}} = Z_{\text{зх}} - Z_{\text{вс}} = \frac{2}{\omega_0} \arccos(-tg \delta tg \varphi) \quad (6)$$

для выбранных характерных дней года [2].

Момент времени истинного полудня  $Z_0$ , для данной местности по среднему солнечному времени определяется по формуле:

$$Z_0 = 12 + \frac{E}{60} + \frac{1}{\omega_0} (L_{\text{ср}} - L_{\text{м}}), \quad (7)$$

где  $L_{\text{ср}}$ -долгота среднего меридиана местного часового пояса (для Узбекистана  $L_{\text{ср}} = 75^\circ$ );  $L_{\text{м}}$ -восточная долгота местности;  $E$ - уравнение времени в минутах — это эмпирическое уравнение, учитывающее поправку на эксцентриситет земной орбиты и наклон земной оси.

Параметр  $E$  определяется по формуле:

$$E = 229.2 \cdot (0.000075 + 0.001865 \cdot \cos(B) - 0.014615 \cdot \cos(2 \cdot B) - 0.032077 \cdot \sin(B) - 0.04089 \cdot \sin(2 \cdot B))$$

где  $B = (n - 1) \frac{360}{365}$ .

Далее, заменив значение угла  $\alpha$  на  $90^\circ$  в формуле (2) и учитывая  $\omega = \omega_0(Z_0 - Z)$ , получаем выражение для определения угла падения солнечных лучей на вертикальную поверхность:

$$\cos i = \cos \delta (\sin \varphi \cos \gamma \cos \omega_0(Z_0 - Z) + \sin \gamma \sin \omega_0(Z_0 - Z)) - \sin \delta \cos \varphi \cos \gamma \quad (8)$$

На основе выражения (8) по условию  $i = \pm 90^\circ$  определяются моменты начала

$$Z_{\text{нач}}^{\text{осв}} = \max \left\{ \begin{array}{l} Z_0 - \frac{1}{\omega_0} \arccos(-tg \delta tg \varphi); \\ Z_0 - \frac{1}{\omega_0} \arccos \left[ \frac{0.25 \sin 2\delta \sin 2\varphi \cos^2 \gamma + \cos \delta \sin \gamma \sqrt{\cos^2 \delta - \cos^2 \varphi \cos^2 \gamma}}{\cos^2 \delta (1 - \cos^2 \varphi \cos^2 \gamma)} \right] \end{array} \right\}, \quad (9)$$

завершения

$$Z_{\text{зав}}^{\text{осв}} = \min \left\{ \begin{array}{l} Z_0 + \frac{1}{\omega_0} \arccos(-tg \delta tg \varphi); \\ Z_0 + \frac{1}{\omega_0} \arccos \left[ \frac{0.25 \sin 2\delta \sin 2\varphi \cos^2 \gamma - \cos \delta \sin \gamma \sqrt{\cos^2 \delta - \cos^2 \varphi \cos^2 \gamma}}{\cos^2 \delta (1 - \cos^2 \varphi \cos^2 \gamma)} \right] \end{array} \right\} \quad (10)$$

освещения поверхности СПО ОП прямыми солнечными лучами и его дневная продолжительность-

$$\Delta Z_{\text{дн}}^{\text{осв}} = Z_{\text{зав}}^{\text{осв}} - Z_{\text{нач}}^{\text{осв}}. \quad (11)$$

Из уравнения,

$$i = \arccos(\cos\delta(\sin\varphi\cos\gamma\cos\omega_0(Z_0 - Z) + \sin\gamma\sin\omega_0(Z_0 - Z)) - \sin\delta\cos\varphi\cos\gamma) \quad (12)$$

полученного на основе выражения (8), определяются дневные ходы среднечасовых значений угла падения прямого СИ на плоскость вертикальную поверхность СПО ОП.

На основе актинометрических данных определяются дневные ходы среднечасовых значений температуры наружного воздуха ( $t_o$ ), поверхностных плотностей потоков прямого СИ, падающего на нормальную к прямым солнечным лучам поверхность ( $q_{\perp}$ ), диффузного СИ на горизонтальную поверхность - ( $q_{падг}^{диф}$ ) и, суммарного - ( $q_{падг}^{\Sigma} = q_{падг}^{пр} + q_{падг}^{диф}$ ) СИ на горизонтальную поверхность.

На основе значений  $q_{\perp}$  и  $\cos i$  по выражению:

$$q_{падсно}^{пр} = q_{\perp} \cos i \quad (13)$$

определяются дневные ходы среднечасовых значений поверхностной плотности потока прямого СИ, падающего на поверхность СПО ОП.

По выражениям

$$q_{падсно}^{диф} = 0,5 q_{падг}^{диф} \quad (14)$$

и

$$q_{падсно}^{отр} = 0,5 \rho_o q_{падг}^{\Sigma} \quad (15)$$

определяются дневные ходы среднечасовых значений поверхностных плотностей потоков диффузного и отраженного от окружающих предметов суммарного СИ, падающего на фронтальную поверхность СПО ОП.

Суммируя значения  $q_{падсно}^{пр}$  по (13),  $q_{падсно}^{диф}$  по (14) и  $q_{падсно}^{отр}$  по (15) на основе выражения

$$q_{падсно}^{\Sigma} = q_{\perp} \cos i + 0,5 [q_{падг}^{диф} + \rho_o q_{падг}^{\Sigma}] \quad (16)$$

определяются дневные ходы среднечасовых значений поверхностной плотности потока суммарного (прямого, диффузного и отраженного от окружающей предметов, имеющих коэффициент альбедо  $\rho_o$ ) СИ, падающего на поверхность СПО ОП.

### 3. Экспериментальная часть

В табл. 1. приведены полученные результаты среднемесячных значений времени начала, завершения, и продолжительности освещенности прямыми солнечными лучами горизонтальной поверхности и поверхности СПО ОП, ориентированных в южном ( $\gamma = 0^0$ ), юго-восточном ( $\gamma = -45^0$ ), юго-западном ( $\gamma = 45^0$ ), восточном ( $\gamma = -90$ ) и западном ( $\gamma = 90^0$ ) направлениях для г. Ташкента ( $\varphi = 41,26^0$  и  $L_m = 69,21^0$ ).

Табл. 1. Среднемесячные значения времени начала, завершения, и продолжительности освещенности прямыми солнечными лучами горизонтальной поверхности и поверхности СПО ОП для г. Ташкента ( $\varphi = 41,26^0$ ,  $L_m = 69,21^0$ ).

Месяц	Значение времени	Горизонтальная поверхность	Южная ориентация	Юго-восточная ориентация	Юго-западная ориентация	Восточная ориентация	Западная ориентация
II	Восход	7:13:26	7:13:26	7:13:26	9:56:07	7:13:26	12:36:15
	Заход	17:59:04	17:59:04	15:16:22	17:59:04	12:36:15	17:59:04
	Продолжительность	10:45:37	10:45:37	8:02:55	8:02:55	5:22:48	5:22:48
IV	Восход	5:36:41	7:25:38	5:36:41	10:43:50	5:36:41	12:23:53
	Заход	19:11:04	17:22:07	14:03:55	19:11:04	12:23:53	19:11:04
	Продолжительность	13:34:23	9:56:28	8:27:14	8:27:14	6:47:11	6:47:11
VII	Восход	5:21:46	7:55:23	5:21:46	11:01:35	5:21:46	12:28:08
	Заход	19:34:30	17:00:53	13:54:41	19:34:30	12:28:08	19:34:30
	Продолжительность	14:12:43	9:05:30	8:32:54	8:32:54	7:06:22	7:06:22
IX	Восход	6:32:22	6:40:04	6:32:22	9:54:34	6:32:22	12:18:15
	Заход	18:04:09	17:56:26	14:41:57	18:04:09	12:18:15	18:04:09
	Продолжительность	11:31:47	11:16:22	8:09:34	8:09:34	5:45:53	5:45:53
XII	Восход	7:42:26	7:42:26	7:42:26	9:06:22	7:42:26	12:19:00
	Заход	16:55:34	16:55:34	15:31:37	16:55:34	12:19:00	16:55:34
	Продолжительность	9:13:08	9:13:08	7:49:11	7:49:11	4:36:34	4:36:34

На рис. 1. показаны результаты, полученные из уравнения (11), зависимость дневной продолжительности освещенности прямыми солнечными лучами от дней года для горизонтальной поверхности и поверхности СПО ОП, имеющих различные направления, для г. Ташкента.

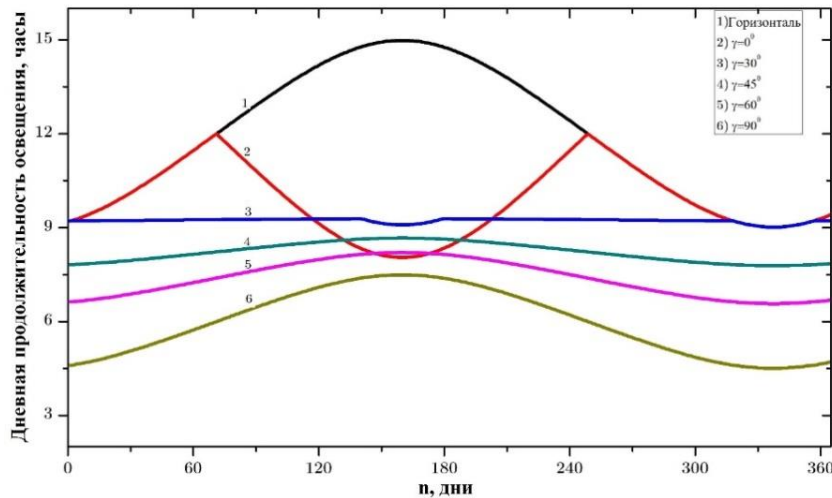


Рис. 1. Зависимость дневной продолжительности освещенности прямыми солнечными лучами от порядкового номера дня для г. Ташкента ( $\varphi = 41,26^{\circ}$  и  $L_M = 69,21^{\circ}$ ). 1) горизонтальная поверхность; 2) южно-ориентированная поверхность СПО ОП; поверхность СПО ОП, отклоненная от южного направления: 3)  $\gamma = \pm 30^{\circ}$ ; 4)  $\gamma = \pm 45^{\circ}$ ; 5)  $\gamma = \pm 60^{\circ}$ ; 6)  $\gamma = \pm 90^{\circ}$ .

Для определения суммарной СИ  $q_{\text{пад,спо}}^{\Sigma}$  в (16), использованы обобщенные результаты обработок 4-х летних (январь 2013- декабрь 2016) актинометрических данных от Паркентской метеостанции (1 из 6 станций, установленных в рамках проекта Азиатского банка развития ТА 8008 «Развитие солнечной энергетики в Узбекистане»), основывающихся на измерениях  $GHI$  (суммарная солнечное излучение на горизонтальную поверхность),  $DNI$  (прямая солнечное излучение на нормальную поверхность),  $DHI$  (диффузное солнечное излучение на горизонтальную поверхность), параметры измерялись с периодичностью в каждый час [3].

В табл. 2-4. приведены дневные ходы среднечасовых значений поверхностных плотностей потоков прямого СИ, падающего на нормальную к прямым солнечным лучам поверхность ( $q_{\perp}$ ), диффузного СИ на горизонтальную поверхность ( $q_{\text{пад}_2}^{\text{диф}}$ ) и суммарного СИ на горизонтальную поверхность ( $q_{\text{пад}_2}^{\Sigma}$ ), по обработанным данным, полученным от метеостанции Паркент (г. Ташкент).

Табл. 2. Дневные ходы среднечасовых значений поверхностных плотностей потоков прямого СИ, падающего на нормальную к прямым солнечным лучам поверхность ( $q_{\perp}$ , Вт/м<sup>2</sup>) для города Ташкент.

Месяцы Часы	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
4-5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5-6	0,00	0,00	0,00	4,27	60,19	95,68	53,11	12,50	0,00	0,00	0,00	0,00
6-7	0,00	0,00	8,24	155,75	306,44	452,64	412,86	295,55	97,80	2,38	0,00	0,00
7-8	0,01	19,46	143,39	344,02	461,81	582,29	567,71	521,69	444,94	214,76	33,02	0,07
8-9	107,04	362,28	331,88	456,15	545,49	663,62	648,98	637,69	600,10	443,98	266,01	175,49
9-10	245,97	466,33	388,38	502,38	588,74	718,24	714,24	715,64	684,35	533,12	364,85	331,92
10-11	326,08	540,34	414,25	540,99	627,50	753,96	730,90	748,42	682,19	554,31	399,16	373,46
11-12	373,29	567,42	432,70	551,76	620,30	764,28	753,18	762,45	718,11	586,80	417,61	406,01
12-13	372,06	560,64	394,75	528,63	616,12	776,21	774,28	765,86	742,46	587,46	414,48	414,09
13-14	354,19	544,21	364,54	472,47	597,05	742,63	779,92	745,37	722,73	546,28	389,22	392,99
14-15	302,04	494,90	326,69	412,69	557,07	718,24	757,30	731,80	690,90	491,56	354,80	349,51
15-16	234,53	425,69	264,03	371,50	526,07	663,17	724,14	697,01	630,05	413,48	251,75	277,05
16-17	114,43	296,67	195,67	302,84	480,36	592,31	663,04	611,60	531,87	289,42	92,68	81,54
17-18	2,41	90,98	95,30	200,52	372,75	490,93	569,34	481,24	295,99	53,04	0,09	0,00
18-19	0,00	0,00	4,68	54,92	205,08	347,04	388,95	207,40	27,54	0,00	0,00	0,00
19-20	0,00	0,00	0,00	0,00	3,34	31,93	43,58	3,32	0,00	0,00	0,00	0,00

Табл. 3. Дневные ходы среднечасовых значений поверхностных плотностей потоков диффузного СИ на горизонтальную поверхность ( $q_{\text{над.}}^{\text{диф}}$ , Вт/м<sup>2</sup>) для города Ташкент.

Месяцы Часы	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
4-5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15	0,80	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5-6	0,00	0,00	0,00	2,90	18,80	28,34	18,49	5,34	0,24	0,00	0,00	0,00
6-7	0,00	0,03	5,49	42,01	64,81	72,85	63,82	49,94	23,49	4,68	0,05	0,00
7-8	1,10	12,16	47,21	96,38	106,44	109,04	100,18	89,95	71,62	44,46	12,93	1,89
8-9	31,99	63,05	100,43	153,13	139,91	138,66	131,51	118,80	107,61	84,26	55,48	30,74
9-10	80,10	107,70	158,83	210,39	177,18	162,11	157,00	142,26	135,58	119,65	95,01	67,98
10-11	122,58	143,05	202,54	241,45	198,16	175,40	177,59	160,66	117,91	148,48	125,68	103,39
11-12	146,28	165,76	234,65	256,40	221,46	186,49	182,29	170,44	162,01	166,03	147,53	129,35
12-13	162,19	191,59	243,91	261,08	230,05	186,36	181,82	176,46	173,04	167,90	153,29	142,05
13-14	160,13	195,65	236,42	253,40	234,66	184,02	175,80	182,63	170,93	156,01	141,71	126,27
14-15	136,15	174,11	213,27	239,20	204,83	178,52	163,52	169,32	153,72	141,12	115,37	97,91
15-16	90,21	133,83	172,85	202,39	175,32	160,71	147,92	149,38	130,75	103,93	77,00	63,04
16-17	38,43	82,07	111,84	149,16	141,78	135,95	126,01	124,79	96,37	61,54	26,08	17,27
17-18	2,11	23,44	50,62	87,15	105,01	107,40	94,21	89,57	41,15	15,00	0,34	0,05
18-19	0,00	0,15	5,17	27,80	54,21	65,13	60,13	43,05	9,06	0,03	0,00	0,00
19-20	0,00	0,00	0,00	0,37	7,94	18,01	16,05	3,64	0,00	0,00	0,00	0,00

Табл. 4. Дневные ходы среднечасовых значений поверхностных плотностей потоков суммарного СИ на горизонтальную поверхность ( $q_{\text{над.}}^{\Sigma}$ , Вт/м<sup>2</sup>) для города Ташкент.

Месяцы Часы	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
4-5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,80	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5-6	0,00	0,00	0,00	3,25	26,89	43,31	25,39	6,41	0,24	0,00	0,00	0,00
6-7	0,00	0,03	6,51	70,02	147,68	205,96	171,56	107,42	38,19	4,91	0,05	0,00
7-8	1,11	14,88	78,98	213,58	311,15	381,17	346,57	280,95	199,66	89,66	17,38	1,90
8-9	48,11	144,00	219,84	387,44	470,00	555,10	519,44	459,54	380,04	238,31	114,04	57,15
9-10	143,83	280,78	356,12	540,27	615,13	709,85	685,11	628,43	543,64	377,09	221,61	153,87
10-11	242,31	404,71	460,36	654,53	728,67	827,46	795,02	751,39	622,44	472,00	302,88	236,64
11-12	309,46	482,60	537,04	714,15	783,54	895,79	869,01	823,45	720,38	541,37	352,78	298,63
12-13	332,39	520,60	528,91	709,56	797,49	918,79	903,80	847,93	751,44	548,36	359,14	319,43
13-14	314,11	504,06	490,48	639,63	765,12	863,19	882,71	814,56	708,25	487,78	319,64	281,76
14-15	246,62	423,24	415,88	544,26	656,45	783,00	796,09	734,79	609,82	395,61	247,70	209,56
15-16	151,44	300,63	306,52	432,31	540,19	644,24	672,59	606,96	468,07	265,34	139,70	119,96
16-17	54,52	156,60	181,22	290,44	403,82	483,43	511,42	434,95	298,56	129,89	37,79	25,32
17-18	2,23	34,60	69,66	146,05	245,62	314,22	331,13	251,34	109,28	21,51	0,35	0,06
18-19	0,00	0,16	5,59	35,85	96,54	151,37	154,28	80,87	12,06	0,04	0,00	0,00
19-20	0,00	0,00	0,00	0,38	8,29	22,28	21,53	3,91	0,00	0,00	0,00	0,00

В табл. 5-6. приведены значения суммарного  $q_{\text{пад.спо}}^{\Sigma}$  СИ, падающего на лучевоспринимающую поверхность СПО ОП, ориентированную в южном и восточном направлении для условий г. Ташкента, полученных на основе формулы (16) (при значении коэффициента альbedo окружающих предметов  $\rho_o = 0,3$ ).

Табл. 5. Дневные ходы среднечасовых значений поверхностных плотностей потоков суммарного (прямого, диффузного и отраженного от окружающих предметов) СИ, падающих на лучевоспринимающую поверхность СПО ОП, ориентированную в южном ( $\gamma = 0^{\circ}$ ,  $\rho_o = 0,3$ ) направлении ( $q_{\text{пад.спо}}^{\Sigma}$ , Вт/м<sup>2</sup>) для условий г. Ташкента.

Месяцы Часы	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
4-5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,52	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5-6	0,00	0,00	0,00	2,95	32,91	54,97	30,10	6,05	0,16	0,00	0,00	0,00
6-7	0,00	0,02	5,99	93,92	201,75	299,27	255,22	147,05	34,11	3,08	0,03	0,00
7-8	0,72	13,67	96,20	268,82	387,58	491,15	454,10	351,44	209,47	66,59	10,37	1,23
8-9	49,24	194,74	263,70	440,34	545,03	661,43	621,23	528,82	381,10	198,60	88,00	53,60
9-10	141,12	315,50	376,80	567,06	668,56	797,95	765,53	676,63	521,38	312,59	173,70	141,78
10-11	216,31	407,42	448,16	654,98	758,81	886,87	837,31	761,72	559,16	381,05	232,26	200,75

11-12	254,95	441,15	487,19	682,76	777,07	915,51	870,52	789,20	623,52	423,11	262,78	236,24
12-13	249,83	428,83	446,84	645,21	758,69	901,42	861,60	765,84	621,64	408,96	254,70	234,53
13-14	211,25	372,28	386,51	549,92	695,97	807,26	797,02	686,73	546,28	338,98	209,69	186,76
14-15	141,85	270,23	303,28	439,63	573,52	695,37	674,29	572,20	427,69	246,71	141,73	115,64
15-16	67,82	151,41	201,29	327,64	449,54	538,98	525,32	422,91	281,21	133,93	60,06	49,51
16-17	27,39	64,52	101,51	201,26	314,46	374,10	356,38	253,01	128,94	50,25	18,71	12,43
17-18	1,39	16,91	35,76	86,92	171,59	216,87	190,02	99,24	36,97	10,73	0,22	0,03
18-19	0,00	0,10	3,42	19,28	54,68	83,89	55,60	33,66	6,34	0,02	0,00	0,00
19-20	0,00	0,00	0,00	0,24	5,21	12,35	11,25	2,41	0,00	0,00	0,00	0,00

Табл. 6 . Дневные ходы среднечасовых значений поверхностных плотностей потоков суммарного (прямого, диффузного и отраженного от окружающих предметов) СИ, падающих на лучевоспринимающую поверхность СПО ОП, ориентированную в восточном ( $\gamma = -90^0$ ,  $\rho_o = 0,3$ ) направлении ( $q_{\text{пад,спо}}^{\Sigma}$ , Вт/м<sup>2</sup>) для условий г. Ташкента.

Месяцы Часы	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
4-5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,52	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5-6	0,00	0,00	0,00	6,07	69,35	108,09	62,93	15,89	0,16	0,00	0,00	0,00
6-7	0,00	0,02	11,29	173,19	323,33	455,95	419,41	311,92	109,38	5,27	0,03	0,00
7-8	0,72	23,11	148,12	351,68	453,40	545,49	529,96	498,89	431,07	211,21	35,00	1,28
8-9	83,97	260,78	281,98	415,06	468,68	537,88	519,95	516,33	498,68	369,29	212,80	128,78
9-10	148,63	257,70	277,07	386,36	414,55	458,05	442,95	441,72	441,96	356,65	239,34	188,41
10-11	135,37	184,55	219,41	302,72	311,98	322,66	301,60	295,94	274,92	263,81	191,42	149,56
11-12	119,56	155,27	197,88	235,32	228,26	227,61	221,50	208,74	189,06	164,22	126,68	109,47
12-13	130,95	173,89	201,29	236,97	234,65	231,00	226,48	215,42	199,24	166,20	130,52	118,94
13-14	127,18	173,43	191,78	222,64	232,10	221,49	220,31	213,50	191,70	151,17	118,80	105,40
14-15	105,07	150,54	169,02	201,24	200,88	206,71	201,17	194,88	168,33	129,90	94,84	80,39
15-16	67,82	112,01	132,40	166,04	168,69	176,99	174,85	165,73	135,59	91,77	59,45	49,51
16-17	27,39	64,52	83,10	118,15	131,46	140,49	139,72	127,64	92,97	50,25	18,71	12,43
17-18	1,39	16,91	35,76	65,48	89,35	100,83	96,77	82,49	36,97	10,73	0,22	0,03
18-19	0,00	0,10	3,42	19,28	41,59	55,27	53,21	33,66	6,34	0,02	0,00	0,00
19-20	0,00	0,00	0,00	0,24	5,21	12,35	11,25	2,41	0,00	0,00	0,00	0,00

#### 4. Выводы

В статье представлены результаты расчётов группы параметров, включающих в себя время начала, завершения и продолжительность освещённости прямыми солнечными лучами, а также среднечасовых значений поверхностной плотности потока суммарного СИ, падающего на поверхность СПО ОП. Расчёты выполнены на основе изложенной в статье методики. Было выявлено, что при ориентации здания в юго-восточном и юго-западном направлениях ( $\gamma = \pm 45^0$ ) на поверхность СПО приходится 75-95% солнечного излучения, попадающего на аналогичное помещение при его южной ориентации; данный показатель варьируется в диапазоне от 50 до 86% для восточно- и западно-ориентированных ( $\gamma = \pm 90^0$ ) помещений. Использование выявленных параметров позволит учитывать влияние ориентации помещения СПО ИПСО по сторонам света и выбрать наиболее рациональные объемно-планировочные решения для отапливаемых с помощью ИПСО зданий.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бекман У., Клейн С., Даффи Дж. Расчет систем солнечного теплоснабжения// – М. – Энергиоздат, 1982. – с 80. [2] Аvezова Н.Р., Аvezов Р.Р., Рузиев О.С., Вахидов А., Сулейманов Ш.И. Ресурсные показатели плоских солнечных Водонагревательных коллекторов в системах горячего водоснабжения. Часть I. Методика расчета теплопроизводительности коллектора// Гелиотехника. 2013. №1. – С. 10-23. [3] UZBTA 8008 АБР «Развитие использования солнечной энергии в Узбекистане», 2013-2017 гг.-с.109-121.

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕЛИОУСТАНОВОК ДЛЯ ОТОПЛЕНИЯ И ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ В УЗБЕКИСТАНЕ

А.Г. Страхов<sup>1</sup>, А.В. Чемезов<sup>2</sup>

1 - Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск

2 - Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск

Email: strakhov.net@inbox.ru

Анализ многолетних данных сети актинометрических станций Республики Узбекистан показал, что продолжительность солнечного сияния для Республики в различных регионах составляет в пределах от 2410 до 3090 часов в год, с колебаниями в течении суток в зависимости от времени года 11 часов летом, и 4 часа зимой. По количеству солнечных дней Узбекистан превосходит южную Испанию, в которой солнечная энергетика имеет существенное развитие. Только треть года может считаться холодным временем года, с небольшим уровнем солнечного излучения, иногда снегом. Остальное время года отличается высоким уровнем солнечного излучения. Потенциал оседающей радиации на территорию Узбекистана, значителен и превышает энергетический потенциал всех разведанных запасов страны.

Таблица 1 Потенциал Солнечной энергетики по регионам в Узбекистане

Область	млн. т н. э.
Андижанская	129
Бухарская	4747
Ферганская	215
Джизакская	2090
Кашкадарьинская	3027
Хорезмская	542
Наманганская	241
Навийская	14388
Самаркандская	1703
Сырдарьинская	327
Сурхандарьинская	2554
Ташкентская	1462
Каракалпакстан	19548
<b>Всего:</b>	<b>50973</b>

Энергоэффективность в настоящее время является одной из приоритетных задач любого развивающегося государства. Стоимость энергоресурсов со временем неуклонно растёт, в связи с тем, что они подходят к концу. Так же следует уделить внимание проблемам экологии возникающим из за нецелесообразного применения ресурсов.

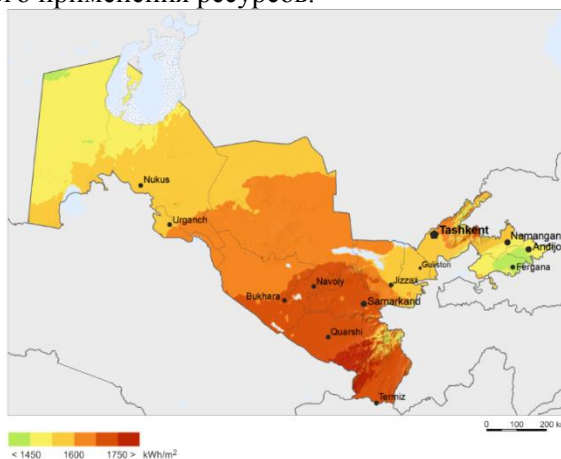


Рис. 1. Среднесуточное значение солнечной радиации

В основном задачей электроэнергетической системы состоит в том, что бы производить электроэнергию и доставлять её потребителям, с наименьшими потерями. Система включает в се-

большое количество электростанций, нагрузок а так же передающих и распределительных сетей соединяющих эти звенья, расположенные на значительном удалении.

### Тепловые солнечные коллекторы

Тепловые солнечные коллекторы превращают энергию солнечного излучения непосредственно в тепло, нагревая теплоноситель – воду, воздух. Ключевым достоинством солнечных коллекторов является высокий уровень КПД который достигает 45-60% и относительно малая стоимость. Гелио коллекторы занимают сравнительно небольшую площадь и используются в энергоэффективных зданиях в основном для горячего водоснабжения.

Обзор показал что работа установки осуществляется как по схемам естественной, так и принудительной циркуляции теплоносителя. Установка снабжена системой автоматики, в состав которой входят электромагнитный клапан (нормально закрытый), термореле, датчик. Для обеспечения ручного слива воды из установки имеются вентили.

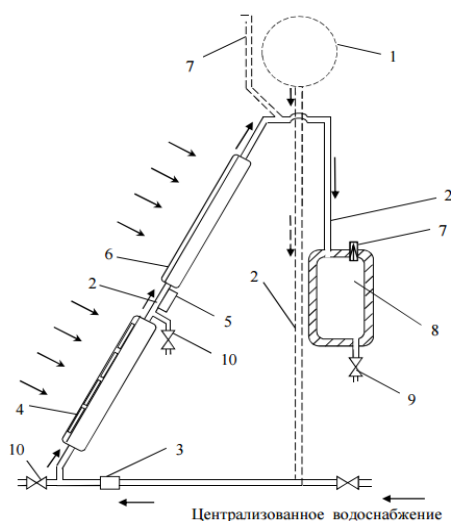


Рисунок 2– Функциональная схема солнечной когенерационной установки:

1 – напорный бак; 2 – трубопровод; 3 – электромагнитный клапан; 4 – ФЭТМ; 5 – термореле; 6 – СК; 7 – воздушный клапан (воздушник); 8 – бак-аккумулятор; 9, 10 – вентили

### Применение солнечных коллекторов.

Большое количество высотных зданий города Ташкент представляет собой здания серии 1-335-АКи Серия 1-447С-12 в народе «Хрущёвки». Здание представляет собой 5-этажное строение прямоугольной формы, состоящее из 4 секций. Отапливаемая площадь здания — 4121,6 м<sup>2</sup>, (площадь квартир — 2555,9 м<sup>2</sup>). Общее количество квартир — 64. Строительный объем здания — 13 506 м<sup>3</sup>. Так как большинство этих зданий были построены в 60х-80х годах 20го века, им необходим плановый, ремонт. Во время планового ремонта предлагается не только достичь стандартных показателей для этого типа построек, но и повысить энергоэффективность зданий за счёт применения солнечных коллекторов горизонтального типа на крыше.

В заключении хотелось бы заметить, что при повышении энергоэффективности зданий, наблюдается:

- существенное снижение выброса парниковых газов в атмосферу г. Ташкент.
- Уменьшение нагрузки на сети централизованного теплоснабжения.
- Возможность полного вывода из эксплуатации тепловых сетей в летнее время на плановый ремонт и техническое обслуживание.
- Независимость каждого здания от поломок теплоснабжающей сети.
- Уменьшение потерь тепловой энергии.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК:

- [1] «Возобновляемые источники энергии» - Н.И. Воропай, З.А. Стычинский Магдебург- Иркутск 2010г. [2] «Определение Альтернативных вариантов по выработке (ВИЭ)» - FITCHER2015г. [3] «Методы по повышению энергетической эффективности существующих зданий» - Попова М.В. Яшкова Т.Н. Владимир 2014г. [4] «Перспективы развития возобновляемой энергетики в Узбекистане»заключительный отчёт ПРООН Ташкент 2007г.



## ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМИ РЕЖИМАМИ В ОТОПИТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ ЗДАНИЯ ОТ ТОПЛИВНО-СОЛНЕЧНЫХ СИСТЕМ

М. Короли<sup>1</sup>, Р.А.Захидов<sup>2</sup>, А. Анарбаев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ташкентский государственный технический университет  
Ташкент, 100002, Узбекистан, mkoroly@list.ru

<sup>2</sup>ООО «Научно-технический центр АО Узбекэнерго»  
Ташкент, 100125, Узбекистан, anizan6004@mail.ru

### Аннотация.

В статье выполнен сравнительный анализ результатов моделирования температурных режимов в здании при теплоснабжении от топливно-солнечной системы для случаев управления подачей прямого потока и также регулирования температуры в термостате теплоносителя в отопительном контуре помещения. Данный вопрос рассмотрен в плане улучшения замещения тепловой нагрузки солнечной частью установки.

**Ключевые слова:** регулирование температурных режимов, топливно-солнечные системы, замещения тепловой нагрузки солнечной энергией.

### 1. Введение

Представляется важным проверить, как в двух подходах к системе управления топливно-солнечными комбинированными системами изменяются режимные параметры в помещении при моделировании поверхности нагревающих труб. Это моделирование позволит проверить предположение о лучшей эффективности управления потоком прямой подачи теплоносителя комбинированной системы по сравнению с тем, какое может быть достигнуто в традиционном варианте регулирования температуры в помещении термостатом. В качестве основного критерия выбрано замещения тепловой нагрузки солнечной частью установки, показывающем объемы экономии энергии от вспомогательного источника при варьировании возможного диапазона размеров отопительного контура.

### 2. Описание схемы топливно-солнечной установки

На рис.1 показана схема подключения к отопительной системе здания топливно-солнечной системы теплоснабжения, а также управление поддержания требуемой температуры.

Нагретый в солнечных коллекторах (СК) теплоноситель проходит через опускной трубопровод и поступает в нижний теплообменник бака-аккумулятора (БА), где охлаждается, передавая тепло расходной воде бака. После выхода из бака теплоноситель по трубопроводу поступает через насос в нижнюю часть СК.

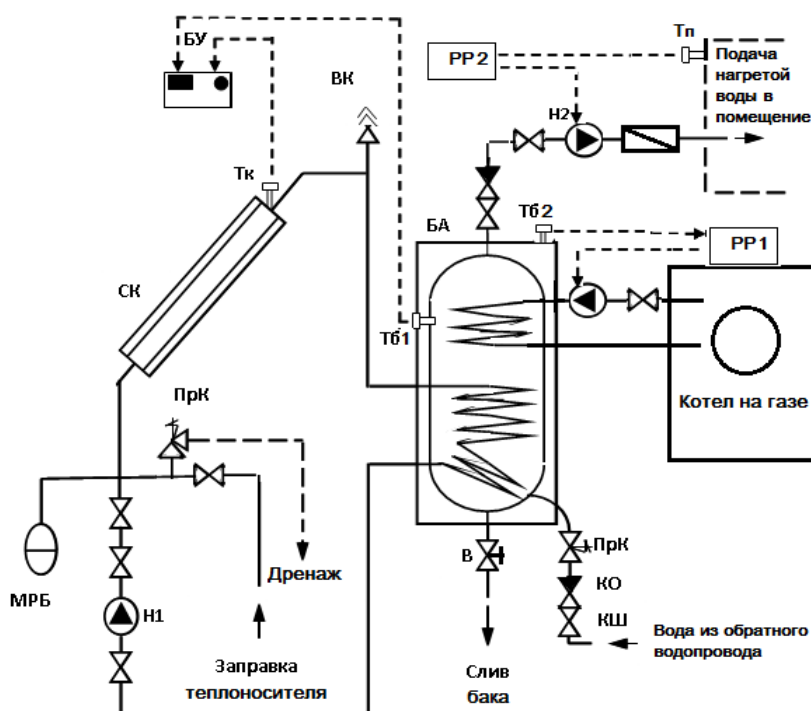


Рис. 1. Схема теплоснабжения здания от топливно-солнечной системы теплоснабжения.

Верхний теплообменник БА подключен к отопительному котлу, соединенному с отопительным контуром здания. Циркуляция горячей воды из котла для нагрева БА осуществляется с помощью отдельного насоса.

Отбор расходной горячей воды из БА выполняется в верхней точке бака подачей снизу в бак холодной воды (то есть всегда расходуется самая горячая вода, имеющаяся в баке). Эта вода по магистрале подается в отопительную систему. Для обеспечения постоянного наличия в точках отбора горячей воды в систему может быть включена циркуляционная магистраль со своим насосом. БА всегда находится под давлением водопроводной сети.

Включение циркуляционного насоса коллекторного контура производится блоком управления, который по своей функции является дифференциальным реле, сравнивающим показания двух датчиков температуры: датчика, установленного на выходе теплоносителя из СК, и датчика, установленного в БА. Место установки датчика в баке может быть различным по высоте, и это влияет на параметры работы регулятора, а следовательно, на теплопроизводительность системы и ее безопасность работы.

Если температура теплоносителя на выходе из СК выше, чем температура воды в баке, то включается циркуляционный насос и тепло передается воде в баке. При использовании современных насосов при работе может производиться регулировка частоты вращения насоса, чтобы, по возможности, поддерживать постоянной установленную разность температур управляющих датчиков.

Обозн.	Наименование оорудования
МРБ	мембранный расширительный бак
Н1,Н2	циркуляционные насосы
В	вентиль
ВК	клапан - воздухоотводчик
ПрК	предохранительный клапан
КО	клапан обратный
КШ	клапан шарнирный
БУ	блок управления
РР	регулятор расхода
СК	солнечный коллектор
БА	бак-аккумулятор
Тк	датчик температуры в коллекторе
Тб	датчик температуры в баке
Тп	датчик температуры в помещении

Блоки управления имеют функции защиты установки от перегрева. Если температура СК превышает установленный уровень, то блок управления принудительно включает насос, пока температура коллекторов не понизится на 10 °С, несмотря на то что сам бак будет разогреваться выше установленной предельной температуры. Но при достижении в баке максимальной температуры 95 °С насос выключается обязательно. При управлении подаваемой тепловой мощности в помещение при системе с прямым потоком подачи теплоносителя управляется массовый расход насоса в отопительном контуре

### 3. Результаты моделирования

Большая разница между двумя подходами к регулированию теплового режима от комбинированной топливно-солнечной установки состоит в том, что первом случае управление осуществляется по такому параметру как расход теплоносителя через отопительный контур помещения, а в другом осуществляется управление путем поддержания температуры через термостат. При этом важный момент заключен в величине температуры подаваемого теплоносителя на обратном трубопроводе. Так при регулировании массового расхода теплоносителя удается достичь значительно меньших температур теплоносителя при её возвращении к теплоисточнику, обеспечиваемых регулированием скорости подачи насоса в контуре отопления.

Выполнено сравнение полной эффективности системы для двух подходов управления тепловыми процессами в отопительном контуре. Функция экономии сравнивается для двух схем автомати-

ки тепловых режимов в помещении. Выбранные параметры - для обеих систем определяют основные модели. Из-за минимальной возможности оптимизации не сделаны изменения.

Следующее уравнение описывает тепловую мощность нагрева от системы теплоснабжения при заданных температурах подачи и расхода теплоносителя в отопительном контуре.

$$\dot{Q}(l_{\text{труб}}) = \left( T_{\text{отоп}} - T_{\text{комн}} - (T_{\text{отоп}} - T_{\text{комн}}) \cdot \exp\left(-\frac{d_{\text{труб}} \cdot \pi \cdot l_{\text{труб}} \cdot K_{\text{труб}}}{\dot{m} \cdot c_p}\right) \right) \cdot c_p \cdot \dot{m}$$

где:  $T_{\text{отоп}}$  : температура подачи воды на входе в отопительный контур,  $^{\circ}\text{C}$

$T_{\text{комн}} = 20^{\circ}\text{C}$  : температура в помещении с теплообменом

$l_{\text{труб}} = 100 \text{ м}$  : длина трубы

$d_{\text{труб}} = 0.025 \text{ м}$  : диаметр трубы

$K_{\text{труб}} = 25 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ : коэффициент тепловых потерь в трубе

$c_p = 4.190 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$ : удельная теплоемкость воды

$\dot{m}$  : массовый расход в насосе отопительного контура, кг/ч.

На рис. 1 показана зависимость температуры возвращаемого к тепловому источнику теплоносителя от массового расхода насоса и температуры подачи. В этом случае температурой подачи теплоносителя в отопительный контур непосредственно не управляют, т.к. она зависит от выбранной величины максимальной температуры на входе в нагревающие трубы помещения (как базовая выбрана величина  $55^{\circ}\text{C}$ ). Если температура воды в баке-аккумуляторе ниже чем установленная температура на термостате, то в этом случае температура подачи - просто температура на выходе из баке-аккумулятора.

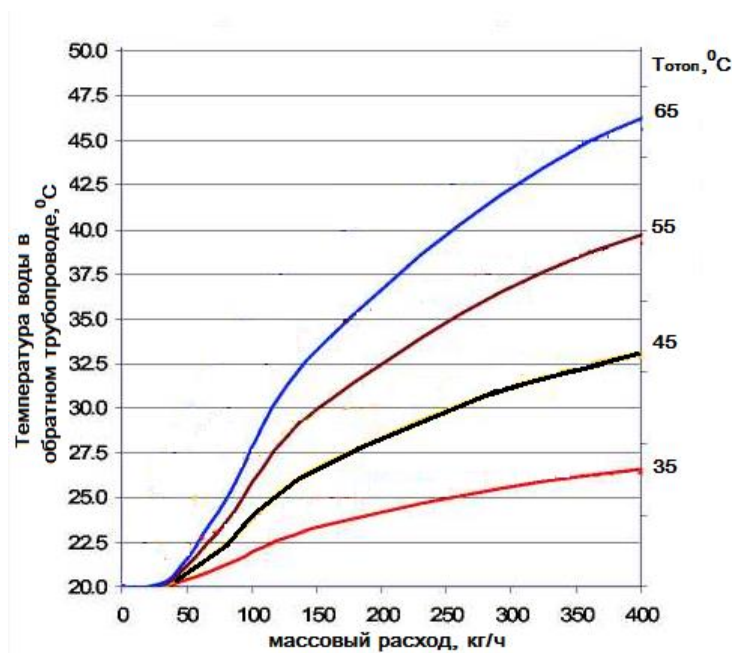
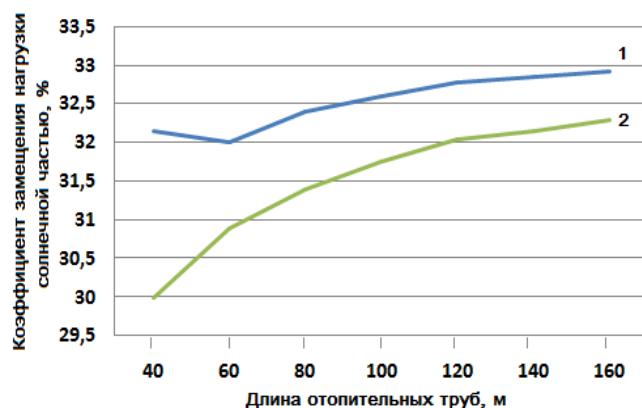


Рис.1. Зависимость температуры возвращаемого теплоносителя от величины температуры на подаче и массового расхода в насосе отопительного контура.

Температура обратной воды в отопительном контуре при задаваемых различных температурах подачи для системы автоматического управления по расходу может быть меньше чем при традиционной системы управления до  $10^{\circ}\text{C}$ . Это положительно сказывается на общей эффективности топливно-солнечной системы теплоснабжения.

Другой важный момент касающийся модели управления прямого потока подачи, определяются тем фактом, что для более высокой температуры подачи в отопительный контур необходимо получить еще более низкую температуру обратки (рис.1).



**Рис. 2:** Солнечное замещение предлагаемой и традиционной автоматики управления как функции длины труб отопительного контура: 1 – при регулировании массового расхода теплоносителя; 2 – при регулировании температуры в термостате отопительной системы здания.

Как следствие этого изменения в температуре возврата теплоносителя приводят к различию эффективности в котле и солнечной части установки. Обеспечение более низкой температуры возврата в нижнюю часть бака-аккумулятора приводит к более высокой эффективности системы. Вследствие этого вода на подаче на вход в контур котла имеет более низкую температуру, приводящую к более высокой эффективности вспомогательного нагревателя. Также происходит снижение средней температуры воды в солнечных коллекторах, увеличивая солнечное замещение тепловой нагрузки. Коэффициент тепловых потерь в трубах отопительного контура при моделировании меняется так, чтобы смоделировать различные условия изоляции между нагреваемым элементом и точкой регулирования температуры в отопительном контуре. Результаты моделирования показывают, что примерно на 2,4% эффективность топливно-солнечной системы выше для автоматической схемы с регулированием расхода потока теплоносителя в отопительном контуре, чем в схеме управления посредством изменения температуры термостатом и позволяет сэкономить примерно 305 кВтч в год энергии от дополнительного источника – газового котла. Также по результатам моделирования сделан вывод, что бак-накопитель, который заполняют непосредственно через солнечные коллектора и подавая теплоноситель без использования любых теплообменников обеспечивает значительно более высокую эффективность системы. Капитальная стоимость также уменьшается, потому что любые дополнительные затраты на теплообменники исключаются.

### Вывод

Результаты моделирования показывают, что автоматика управления подачей прямого потока теплоносителя в отопительном контуре, имеет хороший потенциал для усовершенствования эффективности топливно-солнечной комбинированной системой по сравнению с традиционным управлением. Это происходит за счет управления нагревом теплоносителя путем изменения массового расхода по сравнению с традиционными системами, где изменяется температура подаваемого теплоносителя.

В результате температура возвращаемого теплоносителя по отопительному контуру может быть значительно понижена. В некоторых случаях это достигает величины равной температуре воздуха в комнате. Этот эффект позволяет увеличить эффективность работы котла и получить лучшую отдачу от солнечной установки, таким образом понижая потребность в сжигании топлива в котле. Другой аспект в пользу управления подачей прямого потока теплоносителя в отопительном контуре - более низкая капитальная стоимость в целом системы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Р.А.Захидов, А.И.Анарбаев, Р.Р.Авезов.Схемно-параметрическая оптимизация солнечно-топливных котельных. Международный журнал "Гелиотехника".№1, 2008.с.с.28-33.[2] А.И.Анарбаев, А.Утепова, М.А.Короли Вопросы оптимизации режимов работы комбинированной солнечно-топливной котельной. Республиканская научно-техническая конференция «Современные проблемы энергетики и использование возобновляемых источников энергии. ТГТУ. 15-16 октябрь. 2010 Ташкент. с.с.138-142.

## ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ ПЛОСКИХ СОЛНЕЧНЫХ ВОДОНАГРЕВАТЕЛЬНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ В НАТУРНЫХ КВАЗИСТАЦИОНАРНЫХ УСЛОВИЯХ

Н.Р. Авезова<sup>1,2</sup>, Р.Р. Авезов<sup>1,2</sup>, М. Куралов<sup>2</sup>, А. Вохидов<sup>1,2</sup>, Д. Абдухамидов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Физико-технический институт НПО «Физика-Солнце» АН РУз

<sup>2</sup>Международный институт солнечной энергии

100084, Тошкент, Бодомзорйўликўчаси 2Б,

e-mail: [avezov@uzsci.net](mailto:avezov@uzsci.net)

*В статье приведена принципиальная схема испытательного стенда для тестирования плоских солнечных водонагревательных коллекторов с разомкнутым контуром теплоносителя в натуральных квазистационарных условиях.*

**Ключевые слова:** испытательный стенд, плоский солнечный водонагревательный коллектор, принципиальная схема.

Испытательные оборудования, позволяющие определить физические, теплотехнические и эксплуатационные характеристики солнечных технологий, импортируемых или выпускаемых для нужд внутреннего рынка, проводить их сертификацию на сегодняшний день в Республике отсутствуют. Это в свою очередь сдерживает разработки новых поколений и конструкций солнечных технологий в том числе плоских солнечных водонагревательных коллекторов и ставит задачу оценки их эффективности и степени теплотехнического совершенства.

С целью решения данной задачи нами развита методика и порядок теплового испытания и определения основных теплотехнических параметров и комплексов плоских солнечных водонагревательных коллекторов и абсорберов для нагрева жидкого теплоносителя [1].

В данной работе представлена принципиальная схема испытательного стенда для реализации предложенной методики теплового тестирования плоских солнечных водонагревательных коллекторов и абсорберов в натуральных квазистационарных условиях.

Как известно, в мировой практике испытательные стенды могут иметь замкнутый или разомкнутый контуры для обеспечения циркуляции теплоносителя через испытуемый коллектор. Как показывают результаты анализа конструктивных решений испытательных стендов плоских солнечных коллекторов [2], основным преимуществом разомкнутой системы является возможность поддержания стабильного (постоянного) расхода теплоносителя на входе в коллектор.

Тепловое тестирование плоского солнечного коллектора для нагрева жидкого теплоносителя должно проводиться на специальном стенде, конструкция которого позволяет надежное крепление коллектора с возможностью изменения их угла наклона к горизонту (от 20 до 40°) и азимутальной ориентации (до ±5°). Принципиальная рабочая схема простейшего испытательного стенда для теплового тестирования плоского солнечного коллектора с разомкнутым контуром теплоносителя представлена на рис. 1.

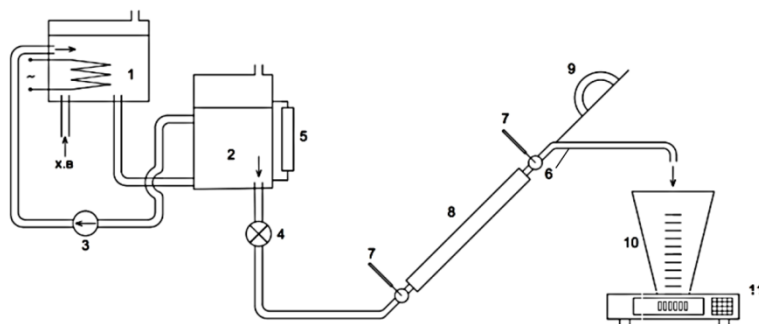


Рис.1. Принципиальная рабочая схема простейшего испытательного стенда для теплового тестирования плоского солнечного коллектора с разомкнутым контуром теплоносителя: 1-бак-накопитель с регулируемым электронагревателем; 2-бак-накопитель, обеспечивающий постоянство расхода теплоносителя; 3-циркуляционный насос; 4-регулирующий вентиль; 5-смотровое стекло; 6-камеры смещения теплоносителя; 7-стеклянные ртутные термометры; 8-тестируемый плоский солнечный коллектор; 9-пиранометр; 10-мензурка; 11 – электронные весы

Постоянный расход теплоносителя через плоский солнечный коллектор ( $G_f$ ) обеспечивается двумя баками-накопителями (1, 2), снабженными на верхней части патрубками обеспечивающими баки атмосферным давлением. Для обеспечения постоянства температуры теплоносителя (воды) на входе в коллектор ( $t_{f_{вх}}$ ) удельный объем бака-накопителя (1) должен быть не менее 100 л на 1 м<sup>2</sup> площади фронтальной поверхности коллектора ( $F_{фр}$ ), а бака-накопителя (2) 15л/м<sup>2</sup>.

Изменение расхода теплоносителя, как правило, осуществляется с помощью регулировочного вентиля, установленного на трубопроводе между баком-накопителем (2) и коллектором (8). Температуры теплоносителя на входе в коллектор ( $t_{f_{вх}}$ ) и на выходе ( $t_{f_{вых}}$ ) из него измеряются ртутными термометрами с погрешностью  $\pm 0,1 \div 0,2^\circ C$ . Температура окружающей среды ( $t_o$ ) также измеряется ртутным термометром с погрешностью  $\pm 0,2 \div 0,5^\circ C$ , которые должны располагаться в защищенном от прямого и диффузного солнечного излучения и хорошо вентилируемом месте на высоте 1,5 м от земной поверхности. Поверхностная плотность потока суммарного солнечного излучения, падающего на поверхность светопрозрачного покрытия плоского солнечного коллектора измеряется с помощью пиранометра 1-класса с основанием, установленном на одинаковой плоскости с плоскостью поверхности светопрозрачного покрытия. Скорость ветра на площадке проведения теплового тестирования коллектора измеряется с помощью чашечного анемометра с погрешностью не более  $\pm 0,2 м/с$ .

Расход теплоносителя через плоский солнечный коллектор измеряется весовым способом погрешностью не более 1%.

Наряду с указанными выше контрольно-измерительными приборами в целях усовершенствования стенда и автоматизации измерения могут быть использованы термометры сопротивления, термодатчики (в т.ч. дифференциальные), калориметрические расходомеры (погрешностью не более 0,2 %).

Порядок проведения тепловых испытаний плоских солнечных водонагревательных коллекторов в натуральных квазистационарных условиях.

Для запланированных дней проведения теплового тестирования плоского солнечного коллектора на основе выражения

$$z_{мне}^{und} = z_{ссв}^{und} + E + 4(L_{ср} - \lambda_m), ч.м.$$

определяются моменты истинного полудня ( $und$ ) для данной местности по местному поясному (т.е. стандартному) времени ( $z_{мне}^{und}$ ), в котором  $z_{ссв}^{und} = 12ч$  – момент истинного полудня по среднему солнечному времени ( $ссв$ );  $L_{ср}$  – долгота среднего меридиана рассматриваемого местного часового пояса в градусах;  $\lambda_m$  – долгота данной местности в градусах восточной долготы;  $E$  – поправка к уравнению времени.

При проведении теплового тестирования плоского солнечного коллектора в промежутке времени  $z_{мне}^{und} \pm 10 мин.$ , как показывают результаты визуальных наблюдений, наряду с обеспечением квазистационарного режима (т.е.  $q_{пад}^{\Sigma} \cong const, t_o \cong const$ ), достигается минимизация влияния вертикальных затенений поверхности лучепоглощающей теплообменной панели боковыми стенками корпуса плоского солнечного коллектора. Для минимизации влияния горизонтальных затенений поверхности лучепоглощающей теплообменной панели необходимо установить плоские солнечные коллекторы под углом к горизонту  $\alpha = 90 - h_{\odot}$  при строго южной ориентации ( $h_{\odot}$  – высота стояния Солнца в момент  $z_{мне}^{und}$ ). При обеспечении этих условий общая продолжительность времени тестирования может составлять 20 мин., в том числе 10 мин. до истинного полудня и 10 мин. после него. Однако, для того чтобы обеспечить стабильный тепловой режим тестируемого коллектора к моменту начала контрольных замеров, его необходимо запускать не позднее 10 ч. утра. Каждая серия теплового тестирования плоского солнечного коллектора продолжительностью не более 3 мин. включает в себя измерения удельного расхода теплоносителя через него ( $\dot{m}_f$ ), температур теплоносителя на входе ( $t_{f_{вх}}$ ) в коллектор и на выходе ( $t_{f_{вых}}$ ) из него, а также значение суммарной поверхностной плотности солнечного излучения ( $q_{пад}^{\Sigma}$ ) и  $t_o$ . Значение поверхностной плотности потока суммарного солнечного излучения ( $q_{полгп}^{\Sigma}$ ) определяется на основе лабораторных измерений значений коэффициента поглощения солнечного излучения поверхности



лучепоглощающей теплообменной панели ( $\alpha_p$ ) и коэффициента пропускания солнечного излучения светопрозрачного покрытия ( $\tau_{сп}$ ).

Таким образом разработанный испытательный стенд для теплового тестирования плоского солнечного коллектора с разомкнутым контуром теплоносителя существенно сократит сроки проведения тепловых испытаний для определения их основных теплотехнических показателей.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Аvezова Н.Р., Аvezов Р.Р. Методика ускоренного определения основных теплотехнических параметров плоских солнечных коллекторов для нагрева жидкого теплоносителя // Гелиотехника. – Ташкент: 2016. №2. – стр. 9-13. [2] Аvezов Р.Р. Кахаров Н.А. К определению приведенной теплоемкости ограждающей конструкции низкотемпературных солнечных установок // Гелиотехника. 1978. №5, -С.62-69.

## INDUSTRIAL PROCESS HEAT GENERATION BY SOLAR THERMAL AND PHOTOVOLTAICS: A COMPARATIVE ECONOMIC ASSESSMENT

S. Meyers, B. Schmitt, K. Vajen

*Institute of Thermal Engineering, University of Kassel, Kassel, Germany*  
Kurt-Wolter-Str. 3, 34109 Kassel, Germany  
e-mail: [solar@uni-kassel.de](mailto:solar@uni-kassel.de)

### Abstract

*The interest in photovoltaic heating has grown in recent years due to falling technology costs and ease of installation, though mainly in the residential sector. A study was conducted to determine under which conditions photovoltaic heating may become less expensive than solar thermal in low temperature industries (e.g. food and beverage). A broad parametric simulation study was conducted in TRNSYS which determined specific energetic yields for solar thermal and photovoltaic heating systems. A comparative analysis followed suit, conducted in a way to generate an assessment tool which functions for nearly every industrial, climatic, or economic setting. Results indicated that for lower temperature applications, solar thermal will remain a preferred choice in most climates. For higher temperature industrial process heat requirements, photovoltaic heating may already provide a lower cost solution in low and medium solar irradiation climates.*

**Keywords:** renewable heat, solar thermal, photovoltaic, process heat

### 1. Introduction

In the wake of COP 21, nations across the world agreed to begin reducing their carbon emissions, namely through renewable electricity and lower carbon transport. While important, it overlooks an equally relevant carbon emitting sector, industrial manufacturing, which consumes mainly thermal energy. Lower carbon heat can be achieved through a few mechanisms, but solar offers the nearest term and most complete solution for the quickest reduction. Solar thermal (ST) collectors are an obvious choice for obtaining thermal energy, but in some niche markets photovoltaic (PV) heating systems are now being offered. The choice for PV resistance heating is easy to understand. The costs continue to drop year after year, installation is nearly fail proof, and its thermal energy generation capability is nearly independent of the process temperature level. Until now, minimal research (Fannee and Dougherty, 1997; Le Berre et al., 2014) has been done to compare the thermal energy generation costs of ST and PV at various temperature levels. Therefore, an assessment was conducted to determine their specific energy generation capabilities, paying close attention to their cost competitiveness for various climates, industrial process temperatures, load profiles and storage tank sizes.

### 2. Methodology

Two simulation decks were constructed in TRNSYS 17 to obtain the energetic yield potential of solar thermal and solar photovoltaic heating systems under various boundary conditions. Specific energy yields (per  $m^2$  for ST and per  $W_p$  for PV) were then used to calculate the Levelized Cost of Heat (LCOH), subsequently used to determine the Cost Ratio (CR), an inflection point which indicated a preferred heating technology.

#### 2.1. Solar Thermal Heating Model

The TRNSYS thermodynamic model was constructed around the popularly used collector model Type 832 (v5.01), shown in Fig. 1. A constant speed pump in the solar loop operated between an upper and lower deadband of 7 K and 3 K between the collector ( $T_{coll}$ ) and the bottom storage tank temperature ( $T_{0,1}$ ), respectively. Connected pipes, insulation, charging/discharging heat exchangers and pump flow

rates in the loops were sized in accordance to VDI 6002 (VDI, 2014). A storage tank was included (Type 534) to allow for flexibility in heat storage and delivery. For the charging loop, the storage tank had two inlet valves, located at a relative height of 0.9 and 0.6 from the bottom, allowing for stratification, as well as an outlet at 0.1. A constant speed pump in the charging loop was activated using the same deadband as the solar loop, though comparing temperatures between the heat exchanger ( $T_{solarHX}$ ) and the bottom storage tank temperature ( $T_{0,1}$ ). The process discharge loop was activated when the temperature difference between storage tank ( $T_{0,9}$ ) and process return ( $T_{processreturn}$ ) was greater than 10 K and deactivated at 5K. Temperature controls were put into place for the collector and storage tank, protecting both from stagnation and overheating. The discharge flowrate ( $\dot{m}_{discharge}$ ) was regulated by a Type 805 heat exchanger (Heimrath and Haller, 2007), controlling the process flow temperature ( $T_{process\ flow}$ ) to its set temperature when possible. If not achievable due to insufficient stored energy, the pump was operated at its maximum flow rate, which was set at 90% of the maximum flow rate of the process.

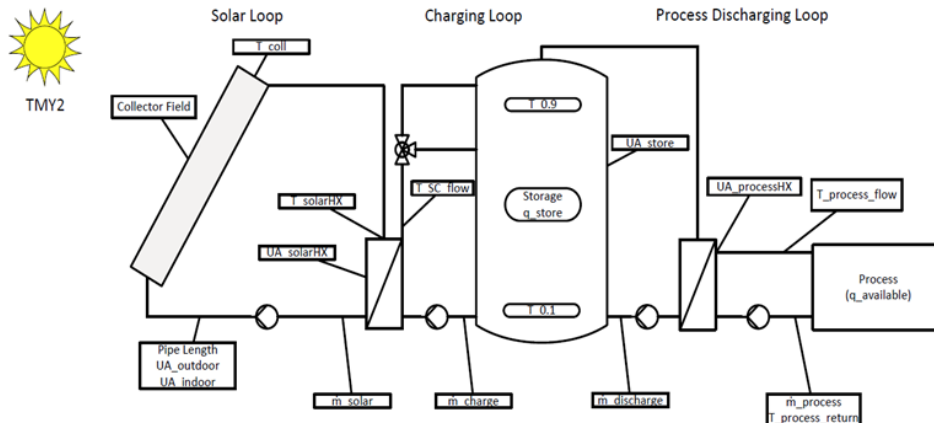


Fig.1: The design of the solar thermal heating model in TRNSYS

## 2.2. Photovoltaic Heating Model

The solar loop for the PV heating model was built using Type 562, with inputs modelled after a high efficiency mono-silicon module. Two resistance heaters were implemented to directly heat the process fluid or water in the storage tank with an assumed efficiency of 98%. If the process load heating requirement ( $q_{available}$ ) was greater than the available energy produced by the PV solar loop ( $q_{pv}$ ), all electrical energy was directed to the process resistance heater. If excess energy was available, it was sent to the charging loop (storage) resistance heater. The charging loop variable speed pump adjusted the flow rate ( $\dot{m}_{charge}$ ) to store the heat (Type 534) with high stratification. The discharge mass flow rate ( $\dot{m}_{discharge}$ ) of the storage tank was controlled by determining the difference between  $q_{available}$  and  $q_{pv}$ . If there was a deficit, the mass flow rate was calculated to heat the difference. This only occurred when there was a 10 K or greater difference between the upper storage tank temperature ( $T_{0,9}$ ) and the process return temperature ( $T_{processreturn}$ ). If the storage tank ever became full while the process load was completely heated by the PV system, any excess energy produced was considered wasted.

## 2.3. Simulation Parameters and Cases

A large parametric study was conducted to include geographical and industrial manufacturing conditions found all over the world. Quantities have been normalized to allow for easily scalability for specific conditions. For each parametric case, both a ST and PV simulation was conducted and subsequently compared.

### 2.3.1 Process Load and Profile

The process load quantity and temporal (daily, weekly) profile are two key parameters which have a significant influence on the overall performance of the industrial solar heating system. The load was defined as the daily energetic demand of the process divided by the gross area ( $A_g$ ) of the installed solar collector area (eq. 1). For instance, if the process has a daily flow of 30 m<sup>3</sup> from 45.75 °C with 125 m<sup>2</sup> of installed collectors, the specific daily load was calculated at 8.2 kWh/m<sup>2</sup>d. Three various load quantities were simulated for this study, at 4, 6, and 10 kWh/m<sup>2</sup>d, which represent a low, medium and high load demand. A load of 20 kWh/m<sup>2</sup>d was also simulated to determine an ideal case which all thermal energy was immediately transferred to the load, thus eliminating the need for a storage tank.

$$q_{available} = \dot{V}_{process} \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta T / A_g = 8.2 \frac{kWh}{m^2d} \quad (1)$$



Multiple daily and weekly load profiles have been recommended by Lauterbach (2014) for various cases found in industry. The best case scenario (highest efficiency) for a solar plant was a constant daily load profile which operates seven days a week (minimal heat losses). The hourly energy load, used in the TRNSYS simulations, was then determined by multiplying the hourly share of daily demand by specific daily load ( $q_{available}$ ).

### 2.3.2 Storage Tank Size

The available specific storage tank capacity ( $q_{store}$ ) was defined by the stored thermal energy between the maximum rated storage tank temperature and the process load return temperature divided by the gross area of the ST system. Lauterbach (2014) recommended a specific storage tank capacity between 3 and 9 kWh/m<sup>2</sup> for low temperature solar thermal systems in central European climates. Due to higher process temperatures and simulations conducted in higher solar resource regions, the specific storage tank sizes were 3, 5, 7, 9, and 11 kWh/m<sup>2</sup>. The storage tank specific volume ( $v_{store}$ ) was subsequently calculated (eq.2), which determined the storage tank size capacity, in l/m<sup>2</sup>. A typical non-pressurized storage tank had a  $T_{0.9max}$  of 95 °C. If the  $T_{processreturn}$  was 25 °C and a large  $q_{store}$  was desired (9 kWh/m<sup>2</sup>), the calculated storage tank specific volume was 112.6 l/m<sup>2</sup>.

$$v_{store} = q_{store} / c_p \cdot \rho \cdot (T_{0.9max} - T_{processreturn}) = 112.6 \frac{l}{m^2} \quad (2)$$

### 2.3.3 Solar Collectors

Four solar thermal collectors (Flat Plate [FPC], Evacuated Tube [ETC], Compound Parabolic Concentrator [CPC], Parabolic Trough [PTC]) and one photovoltaic collector were selected for simulation. Each thermal collector was simulated at three temperature ranges, fitting for their potential applications in industry while the single PV collector covered all noted temperature ranges, as is the nature of electric heating. The ST collector model (Type 832V5.01) implemented the quasi-dynamic testing method for the parameters used by TRNSYS. The PV model parameters (Type 562) were provided by the manufacturer, having a reference efficiency of 19%.

### 2.3.4 Locations

It was critical to select simulation sites whose results can provide analysis for nearly every location in the world. The two main factors which affected the performance of ST and PV systems were the daytime ambient temperature ( $T_{amb,day}$ ) and annual irradiation (H). Nine sites were selected from the extended weather database in TRNSYS to conduct the parametric study with a mix of high, medium, and low values of annual temperature and irradiation.

### 2.3.5 Simulation Setup and Key Results

The ST and PV parametric simulations were conducted using TRNEdit, once the TRNSYS simulation deck was finalized. Completed annual simulations recorded key variables such as the specific annual system yield (eq.3) and the annual system utilization ratio (eq.4). The specific annual system yield was defined by the total energy delivered to the process load from the ST or PV system, taking into account thermal losses of the hydraulics and storage tank. The annual utilization ratio was determined by dividing the specific annual system yield by the quantity of useable solar irradiation on the collector surface during the year (total or beam).

$$Q_{yield}^{ST,PV} = \sum_0^{8760} \Delta Q_{process} \quad (3)$$

$$\eta_{system}^{ST,PV} = Q_{yield}^{ST,PV} / H_{t,b} \quad (4)$$

## 2.4. Energetic and Cost Comparisons

The Levelized Cost of Heat (LCOH) is a standard metric used when comparing two or more technology types to determine which has the lowest heat generation cost over a certain time period. Absolute LCOH values are important to determine when building solar systems, but for a comparison study relative costs are more insightful and allow for flexibility for multiple cost conditions. When the cost of heat is equal ( $LCOH_{ST} = LCOH_{PV}$ ), a new term is defined as the Cost Ratio (CR) (eq. 5), which is the  $CapEx_{ST}$  divided by  $CapEx_{PV}$ .

$$CR = \frac{CapEx_{ST}}{CapEx_{PV}} \left( \frac{W_p}{m^2} \right), \text{ when } LCOH_{ST} = LCOH_{PV} \quad (5)$$

The advantage of the CR is that it allows the comparative analysis in any currency to be flexible for the ever changing  $CapEx_{ST,PV}$ , whether it is from technology/system improvements or changes in local subsidies. It is used when one CapEx is known and the other is determined using the calculated CR in this work, which indicates the highest specific technology cost to be competitive. For example, the

CapEx<sub>PV</sub> tends to be less variable than that of ST, due to the commoditization of PV panels and is for example purposes, set at 1.3 €/W<sub>p</sub>. Assuming a calculated CR of 384 W<sub>p</sub>/m<sup>2</sup>, these two values are multiplied together to determine the maximum cost of a comparable ST system (500 €/m<sup>2</sup>) for it to be financially competitive with the PV system. Graphical representation of the CR as a function of solar irradiation and ambient temperature were constructed per simulation case to serve as an easy to use guide to determine which industrial solar heating system has the lowest cost.

### 3. Simulation Results

#### 3.1. Comparison Graphs

To graphically compare ST and PV heating systems, plots were constructed with the CR on the x-axis and the respective available solar irradiation on the y-axis for the nine sites during one parametric simulation (one collector, process temperature, load, and storage tank size). Sites with similar ambient daytime temperatures (Low~10°C, Medium~18°C, High~28°C) were connected with lines, which represents points when the LCOH of both technologies are the same. The CR and GHI cases above this line represents situations when heat generated by a ST system is less expensive, and the contrary below said line. Fig. 2 shows a lower temperature case with FPC. The previously mentioned sites are circled in each figure as a reference.

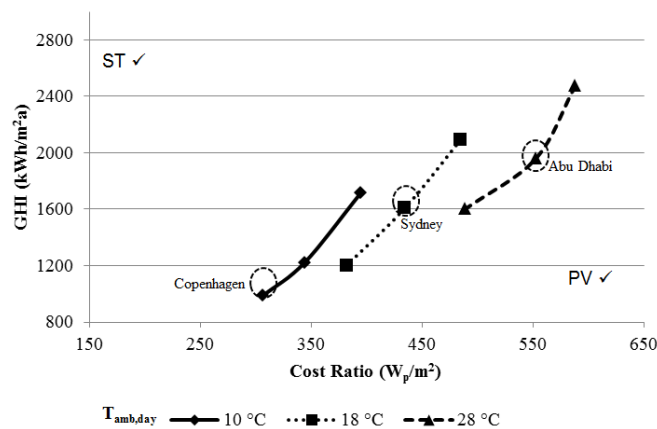


Fig. 2: Solar Thermal and PV comparison graph for a FPC with a process of 45..75 °C, specific load of 6 kWh/m<sup>2</sup>d, and specific store of 9 kWh/m<sup>2</sup>

#### 3.2. Use of Comparison Graphs

The use of the comparison graphs provided a powerful yet easy to understand tool to determine which industrial solar heating technology can provide a lower cost of heat. As an example, Fig. 3 detailed two ST collectors (FPC, CPC) for one case (process temperatures 60..90 °C, load 6 kWh/m<sup>2</sup>d, store 7 kWh/m<sup>2</sup>); something which may happen in reality when deciding between different collectors for a system. Tab.1 highlighted four technology comparisons for two different locations along with the determined CR by using Fig. 3. This was done per site by drawing a horizontal line from the y-axis at the corresponding GHI to the fitting temperature line (or interpreted between two lines) of the desired ST technology.

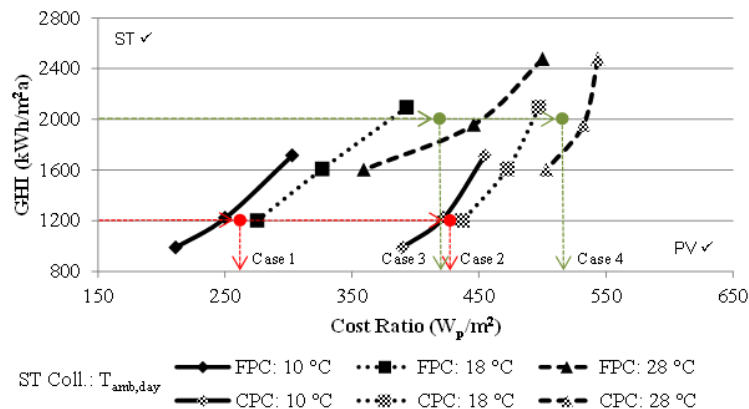


Fig. 3: An example of how to use the comparison graphs to determine the Cost Ratio for specific locations and system cases. These plots are valid for process temperatures 60..90 °C, load 6 kWh/m<sup>2</sup>d, and store 7 kWh/m<sup>2</sup>

From this point, a vertical line was drawn to the x-axis, which determined the CR for that case. The CR was then used to determine the competitive maximum cost of a ST system by simply multiplying the known PV cost (€/W<sub>p</sub>) by the Cost Ratio (W<sub>p</sub>/m<sup>2</sup>) (Tab.1). If a Cost Ratio was already known through

local ST and PV costs, the comparison can be done in reverse. A vertical line could be drawn up from the x-axis and a horizontal line right from the y-axis (given the local solar irradiation). The intersection point of these two lines was compared to the local temperature line (the equivalent LCOH line). If this point was above the line, ST was a better choice (indicated by the ST check mark in the upper left hand corner). If below the curve, PV was selected (PV check mark in the lower right hand corner).

Tab.1: Input parameters and results for use in the comparison graph example in Fig. 3

ase	ite	GHI (kWh/m <sup>2</sup> a)	T <sub>amb,day</sub> (°C)	ST Technology	CR (W <sub>p</sub> /m <sup>2</sup> )	PV Cost (€/W <sub>p</sub> )	ST Max. Cost (€/m <sup>2</sup> )
		1200	14	FPC	265	1.2	318
		1200	14	CPC	430	1.2	516
		2000	23	FPC	420	1.5	630
		2000	23	CPC	515	1.5	773

#### 4. Discussion

The results shown in Fig.2 demonstrated the goals of this research, to create an easily understood graph which helps determine the preferred renewable solar heating technology; no matter where it is geographically located, when it may be built, and which currency is used. Analysis of this graph determined clear trends which are supported by other simulations not detailed in this paper. The best conditions for ST systems are exhibited in Fig.2, for a lower temperature heating process load met using relatively inexpensive FPC. In higher temperature regions with high solar irradiation like Abu Dhabi, given present and future PV costs, it does not seem likely that PV would ever overtake ST. In lower temperature and solar regions like Copenhagen, PV heating may pose a near term threat. This was mainly due the location's numerous cold and cloudy days in which no energy was produced by ST while PV still could, actually benefiting from the colder temperatures and having a lower minimum solar irradiance requirement for energy production. The contrary situation where PV may soon, if not already, overtake ST as the preferred industrial solar heating choice is for higher temperature processes requiring a concentrating collector. If PV costs were assumed to be 1 €/W<sub>p</sub>, then even in regions with a DNI resource of greater than 2000 kWh/m<sup>2</sup>a, the installed cost of a PTC system must be less 400..500 €/m<sup>2</sup>, difficult given their current estimated costs (Frank et al., 2013).

#### 5. Conclusion and Future Work

Through energetic simulations and comparative financial analysis, it was shown that for lower temperature process heat cases, solar thermal systems will most likely remain the preferred technology choice. The contrary was true for higher temperature applications, especially in colder, lower solar resource locations, where PV may already be a competitive choice for heat generation. The opportunity cost of not using PV energy for offsetting local electricity consumption was not considered. This is one avenue of future work, along with the assessment of industrial heat pumps working together with ST and PV to provide the lowest carbon emission heat source for industrial applications.

#### 6. Acknowledgements

The authors wish to acknowledge the European Union for funds received through the People Programme (Marie Curie Actions) of the Seventh Framework Programme FP7/2007-2013/ under REA grant agreement n° 317085 (PITN-GA-2012-317085), commonly known at the SHINE (Solar Heat INtegration Network) Program (<https://www.uni-kassel.de/projekte/solnet-shine/home.html>).

#### REFERENCES

- [1] Fanne, A. H. and Dougherty, B. P., 1997. A Photovoltaic Solar Water Heating System, *J. Sol. Energy Eng*, 119, 126–133, doi:10.1115/1.2887891 [2] Frank, E., Feuerstein, M., Minder, S, N. S.: Parabolrinnenkollektoren für Prozesswärme in Schweizer Molkereien, 2013. [3] Heimrath, R. and Haller, M., 2007. The Reference Heating System, the Template Solar System. A technical report of Subtask A.A Report of IEA-SHC Task 32. Institute of Thermal Engineering, Division Solar Energy and Thermal Building Simulation, Graz University of Technology, Graz, Austria [4] Lauterbach, Christoph, 2014. Potential, system analysis and preliminary design of low-temperature solar process heat systems. PhD Dissertation, University of Kassel [5] Le Berre, R., Dupeyrat, P., Plotton, A., Doucet, J.-F., and Lindsay, A., 2014. PV Domestic Hot Water System, EuroSun Proceedings, Aix-les-Bains, France [6] Shah, V. and Booream-Phelps, J., 2015. Crossing the Chasm: Solar Grid Parity in a Low Oil Price Era, Deutsche Bank [7] Verein Deutscher Ingenieure (VDI), 2014.6002 - Solar heating of potable water, Basic principles

## ВЛИЯНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ НА ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС СОЛНЕЧНОЙ ТЕПЛИЦЫ С АККУМУЛИРОВАНИЕМ ТЕПЛА

Ж.С.Ахатов, А.С.Халимов, Э.Т.Жураев, Д.У.Турапова

*Физико-технический институт*

### **Аннотация**

*В данной работе приведены результаты исследований влияния динамической вентиляции на общий тепловой баланс дополнительно отапливаемой солнечной теплицы. Согласно результатам, если не учитывать динамическую вентиляцию в общий тепловой баланс, то погрешность в расходе тепла составляет в среднем 11%. Найдена оптимальная температура плавления фазопереходного материала (в данном случае парафина) используемого в качестве теплового аккумулятора, при которой расход тепловой энергии достиг своего минимального значения, и в результате расход тепловой энергии уменьшен на 18%.*

**Ключевые слова:** динамическая вентиляция, фазопереходный материал, скорость вентиляции

### **ВВЕДЕНИЕ**

Вентиляция в теплицах является ключевой функцией контроля параметров теплицы, таких как температура воздуха, влажность воздуха и концентрация CO<sub>2</sub>, и она оказывает сильное влияние на рост и развитие сельскохозяйственных культур. Несмотря на это, особенно в регионах с резко континентальным климатом, имеющиеся знания о вентиляции парниковых газов недостаточны. Воздушный поток, обмениваемый между внутренней и внешней сторонами, по-прежнему прогнозируется с большой неопределенностью, связанной с трудностями проведения точных измерений. Среди немногих работ, опубликованных в литературе, некоторые из них связаны с экспериментами в аэродинамической трубе на небольших теплицах с крышами и боковыми отверстиями (Kozai et al [1], Sase et al. [2]). В других отчетах об измерениях полномасштабных многопролетных теплиц, оборудованных вентиляторами на крыше, использовались методы трассирующего газа, предложенные Bot [3] de Jong [4] Fernandez и Bailey [5] Boulard [6].

Модели, полученные с использованием этих различных подходов, часто противоречивы, поэтому Kozai и др. [1] и Sase и др. [2] связывают вентиляцию со средним давлением вокруг теплицы, в то время как де Йонг и Бот [7] и Болард [6] постулируют, что вентиляция пропорциональна разнице давлений в отверстиях. Для решения задач количественного и систематического анализа в работе (Lee et al. [7]) использовалось моделирование с использованием численных методов вычислительной гидродинамики (CFD). CFD с аэродинамическим подходом может искусственно управлять различными климатами и структурами и анализировать полученные результаты количественно и визуально. CFD позволяет вычислять воздушный поток, учитывая микрометеорологические условия в любом месте, в то время как модель обычного теплового баланса может вычислять только средние показатели вентиляции в теплице. Однако, такой подход эффективен когда объект исследования рассматривается в узком интервале времени, так как расчеты требуют очень большого времени.

Модель теплового баланса теплиц становится сложная, когда учитывается динамическая вентиляция (скорость вентиляции воздушного потока при регулярно или нерегулярно открытии и закрытии форточек, окон и дверей теплицы с учетом скорости ветра). Благодаря модели созданной группой исследователей [8] в программе Modelica (<https://github.com/RWTH-EBC/AixLib>) для оценки влияния динамической вентиляции на общий тепловой баланс в различных жилых и нежилых помещениях.

В данной работе впервые приводятся результаты расчетных исследований по оценке влияния тепловых аккумуляторов различной температуры плавления на динамическую вентиляцию солнечной теплицы и выбора оптимального теплового аккумулятора из фазопереходных материалов.

### **Материалы и методика**

*Расчет скорости вентиляции: традиционный метод*

Традиционный метод рассчитывает скорость вентиляции с учетом размеров вентиляционного отверстия и массового расхода в каждом вентиляционном отверстии. Этот метод измеряет среднюю скорость потоков воздуха через все отверстия, такие как вентиляционные отверстия на

крышах и боковых вентиляционных отверстиях, умножая каждую скорость на площадь открытой области, соответственно, с учетом объема теплицы. Формула выглядит следующим образом

$$ACH = \frac{\sum v_i A_i}{V_a} \times 3600 = \frac{\sum v_o A_o}{V_a} \times 3600 \quad (1)$$

где  $ACH$  – скорость вентиляции ( $ч^{-1}$ ),  $v_i$  – скорость ( $м/с$ ) воздушного потока через открытые окна теплицы площадью  $A_i$  ( $м^2$ ) и объемом  $V_a$  ( $м^3$ ). Индексы  $i$  и  $o$  означают входящий и выходящий воздушный поток, соответственно.

#### Стандарт DIN-EN-15242 (2007)

Для более точного расчета обмена воздушным потоком через окна и отверстий теплицы использован европейский стандарт DIN-EN-15242 (2007). Этот стандарт предлагает общий подход к моделированию обмена воздушным потоком через окна при любом угле открытия окна. Объемный поток ( $q_V$ ) воздуха при обмене моделируется на основании уравнения 2: параметр  $C_t$  отражает влияние турбулентности ветра ( $C_t = 0,01$ ), параметра  $C_w$  - влияние скорости ветра ( $C_w = 0,001$ ), параметра  $C_{st}$  - влияние выталкивающих сил из-за теплового движения ( $C_{st} = 0,0035$ ).  $v_{Wind}$  обозначает скорость метеорологического ветра в  $м/с$ , измеренную на высоте 10 м.  $H_{Window}$  указывает высоту окна, термин  $A_{OW}$  указывает свободную область прохода окна (уравнение 2.1) и зависит от угла открытия  $\beta$  и фактора  $C_k$  ( $\beta$ ), определяемого уравнением 2.2).

$$q_V = 1800 A_{OW} (C_t + C_w v_{wind}^2 + C_{st} H_{window} abs(T_{amb} - T_o)^{0.5}) = V_a \cdot ACH, \quad (2)$$

$$A_{OW} = C_k(\beta) A_{window}, \quad (2.1)$$

$$C_k(\beta) = 2.6 \cdot 10^{-7} \beta^3 - 1.19 \cdot 10^{-4} \beta^2 + 1.86 \cdot 10^{-2} \beta, \quad (2.2)$$

#### Уравнение теплового баланса

Динамика внутренней энергии воздуха ( $\rho_a, V_a, c_a$  и  $T$ , соответственно плотность, объем, удельная теплоемкость и температура воздуха) в теплице описывается следующим образом

$$Q(t)_{solar} + Q(t)_{store} + Q(t)_{loss} + Q(t)_{ventilation} + Q(t)_{HL} = \rho_a V_a c_a \frac{dT}{dt} \quad (3)$$

где,  $Q(t)_{solar}$  (Вт) -поток тепла солнечной радиации, зависящий от времени, соответственно определяется следующим уравнением

$$Q(t)_{solar} = (I_{GHI} + I_{DHI}) \sum A, \quad (3.1)$$

здесь  $\sum A$  ( $м^2$ ) суммарная площадь поверхности теплицы, где падает солнечное излучение.  $I_{GHI}$  и  $I_{DHI}$  ( $Вт/м^2$ ) соответственно плотности потока глобальной и диффузионной солнечной радиации.

$Q(t)_{store}$  (Вт) в уравнении (3) является поток тепла, выделяемого при отвердевании или плавлении фазопереходного материала, используемого в качестве теплового аккумулятора, который описывается следующим образом

$$Q(t)_{store} = m_{pcm} c_{pcm}(T) \frac{dT_{pcm}}{dt}, \quad (3.2)$$

где,  $c_{pcm}(T) = \frac{\Delta h}{\pi[(T_{pcm} - T_{mp}) C_{MR}]^2 + 1} + c_{solid}$ , удельная теплоемкость фазопереходного материала,

значение которой является функцией от температуры самого материала согласно [10].  $\Delta h$  (Дж/кг) - удельная теплота плавления;  $C_{MR}$  -диапазон фазового перехода;  $T_{mp}$  ( $^{\circ}C$ ) температура плавления;  $c_{solid}$  (Дж/(кг $\cdot^{\circ}C$ ))-удельная теплоемкость фазопереходного материала в твердом состоянии.

$Q(t)_{HL}$  поток тепла, отдаваемого нагревателем при снижении температуры воздуха в теплице ниже  $10^{\circ}C$ .

$Q(t)_{loss}$  (Вт) является тепловой поток из-за тепловой потери, который имеет следующий вид.

$$Q(t)_{loss} = \frac{T_{amb} - T}{\sum R_i}, \quad (3.3)$$

где,  $\sum R_i$  ( $^{\circ}C/Вт$ ) -суммарное тепловое сопротивление ограждений теплицы .

Таким образом, следует отметить, что тепловой поток ( $Q(t)_{ventilation}$ ) из-за вентиляции играет существенную роль в тепловом балансе, исключение из уравнения теплового баланса которого приводит к расхождению результатов расчетов и экспериментов. Однако, необходимо отметить, что вентиляция имеет динамический характер, который зависит не только от поведения пользователя, но и от параметров окружающей среды.

$$Q(t)_{ventilation} = \frac{qv}{3600} \rho_a c_a (T_{amb} - T) = V_a \cdot \frac{ACH}{3600} \rho_a c_a (T_{amb} - T), \quad (3.4)$$

Тем не менее, мы рассматриваем четыре случая динамической вентиляции (рис 1):

- 1) В первом случае (NoACH) динамическая вентиляция отсутствует в течение суток;
- 2) Во втором случае (ACH 1) динамическая вентиляция имеет очень маленькое значение, т.е. за сутки каждый три часа достигает до  $0.5 \text{ ч}^{-1}$  с длительностью 20 минут;
- 3) В третьем случае (ACH 2) динамическая вентиляция имеет большое значение, т.е. за сутки каждый три часа достигает до  $10 \text{ ч}^{-1}$  с длительностью 20 минут;
- 4) В четвертом случае (ACH 3) динамическая вентиляция за сутки каждый три часа достигает до  $10 \text{ ч}^{-1}$  с длительностью 10 минут.

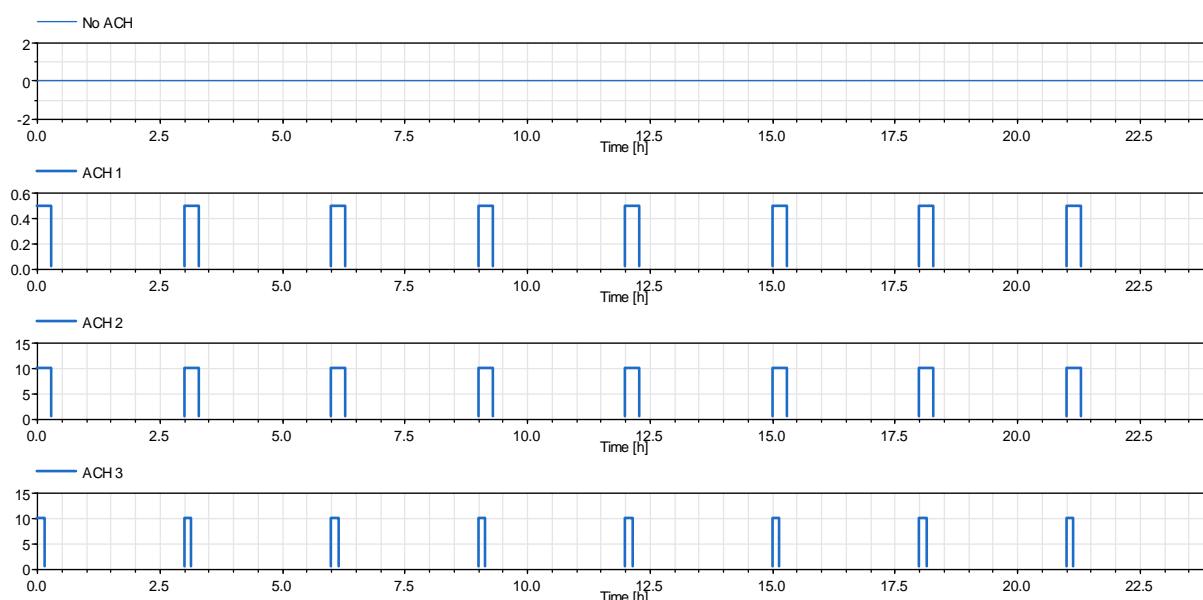


Рис 1. Профили вентиляции в течение суток

### Описание модели

Модель, созданная в среде Modelica, состоит из следующих основных частей:

- Параметры окружающей среды, включая температуру окружающей среды, скорость ветра, глобальную и диффузионную солнечные радиации;
- Вентиляционная система, в которой задан профиль вентиляции;
- Теплицы, с и без теплового аккумулятора, состоящая каждая из следующих узлов: фундамент из бетона, металлоконструкция, в которой прикреплены светопрозрачные покрытия, состоящие из двухслойного поликарбонатного листов толщиной 6 мм, имеющего воздушную прослойку между двумя слоями. Северная стена сделана из кирпичей, размер и толщина которой соответственно равны на  $2,0 \times 4,0$  м, и 0,4 м. Фронтальная поверхность уклонена на  $39,53^\circ$  относительно горизонтальной поверхности для максимального падения солнечной радиации на ее поверхность. Сделаны отверстия на боковых покрытиях камеры для вентиляции, щебень толщиной 20 см рассыпан на полу установки для теплоизоляции;
- Система отопления с терморегулятором, которая работает в том случае, когда температура воздуха в теплице становится ниже  $10^\circ\text{C}$ . Описание такой системы отопления приводится в (<https://github.com/RWTH-EBC/AixLib>);
- Система регистрации расходов тепловой энергии осуществляется системой счетчиков.

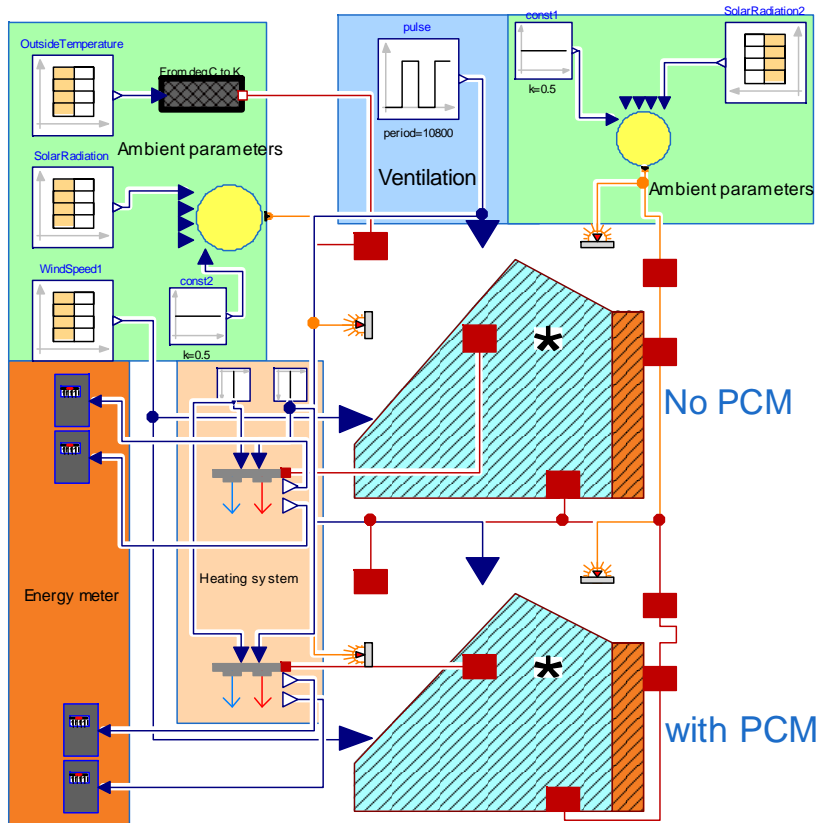


Рис 2. Схематическое описание модели в среде Modelica

**Исходные данные**

Для проведения расчетных исследований были учтены метеорологические данные в Ташкенте за январь 2016 (рис 3.).

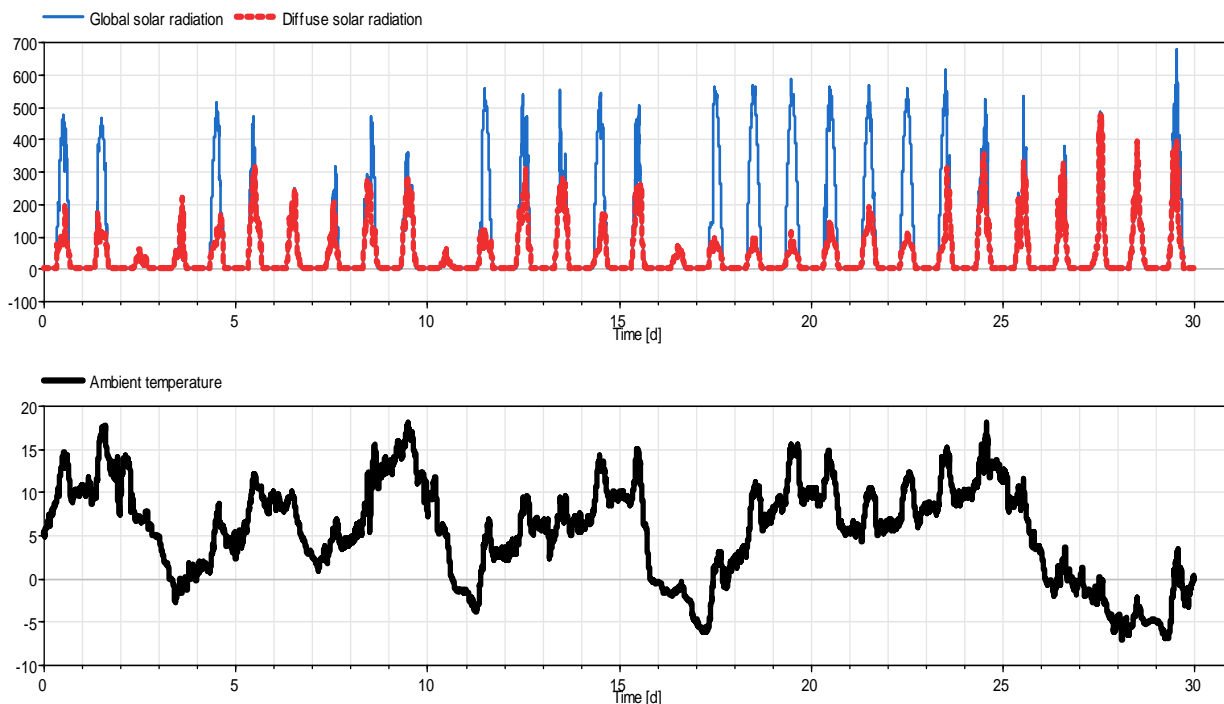


Рис 3. Плотности потока глобальной и диффузионной солнечной радиации, и температура окружающей среды за январь 2016 в Ташкенте.



Как видно из рис 3, что в среднем максимальное значение плотности потока глобальной солнечной радиации достигает до 500 Вт/м<sup>2</sup>. Температура окружающей среды в течение суток изменяется до 10÷12°C. Зафиксированная минимальная температура была -8.0°C, и соответственно, максимальная температура 18°C. Исходя из этих показателей следует отметить, что средняя температура за январь 2016 составляет 5.0°C, которая ниже требуемой температуре внутри теплицы. Минимальная температура поддерживаемая в теплице должна быть 10°C. Следовательно, терморегулятор установлен на значение 10°C, ниже которого терморегулятор активизируется.

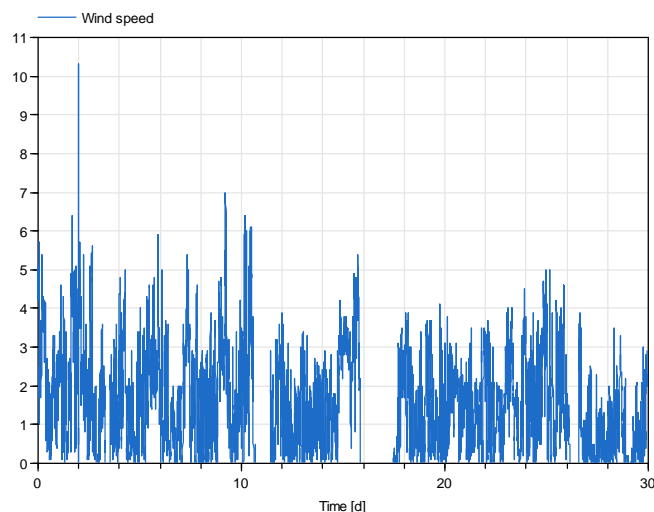


Рис 4. Динамика скорости ветра в течение января 2016.

Из-за ветра естественным образом возникает вентиляция, значение которой в среднем составляет 0.3 ч-1. Исходя из этого, в расчетах мы учли естественную вентиляцию.

В качестве теплового аккумулятора были использованы три вида парафина, имеющие следующие тепловые свойства (Таблица 1).

Таблица 1. Тепловые свойства фазопереходных материалов.

Материалы	PCM 1	PCM 2	PCM 3
Температура плавления (°C)	10	11	12
Удельная теплоемкость в твердом состоянии (кДж/(кг·°C))	1.3	1.31	1.31
Удельная теплоемкость в жидком состоянии (кДж/(кг·°C))	1.32	1.33	1.33
Удельная теплота плавления (кДж/кг)	160	158	160
Коэффициент теплопередачи в твердом состоянии, (Вт/(м·°C))	0.31	0.3	0.3
Коэффициент теплопередачи в жидком состоянии (Вт/(м·°C))	0.3	0.3	0.3

### Результаты и обсуждение

Динамика температур окружающей среды и воздушной среды в теплице в случае (No АСН) отсутствия динамической вентиляции приведена на рис 5а. При этом температура воздуха в теплице приведена в четырех случаях, т.е. отсутствия теплового аккумулятора (No PCM), использования теплового аккумулятора на основе трех видов парафина с температурой плавления 10°C (PCM 10), 11°C (PCM 11) и 12°C (PCM 12). Несмотря на то, что сдвиг снижения температуры воздуха в случае использования теплового аккумулятора PCM12 большой, однако, тот не является оптимальным тепловым аккумулятором, так как, расход тепловой энергии в данном случае не минимален, как это показано на рис 5б.



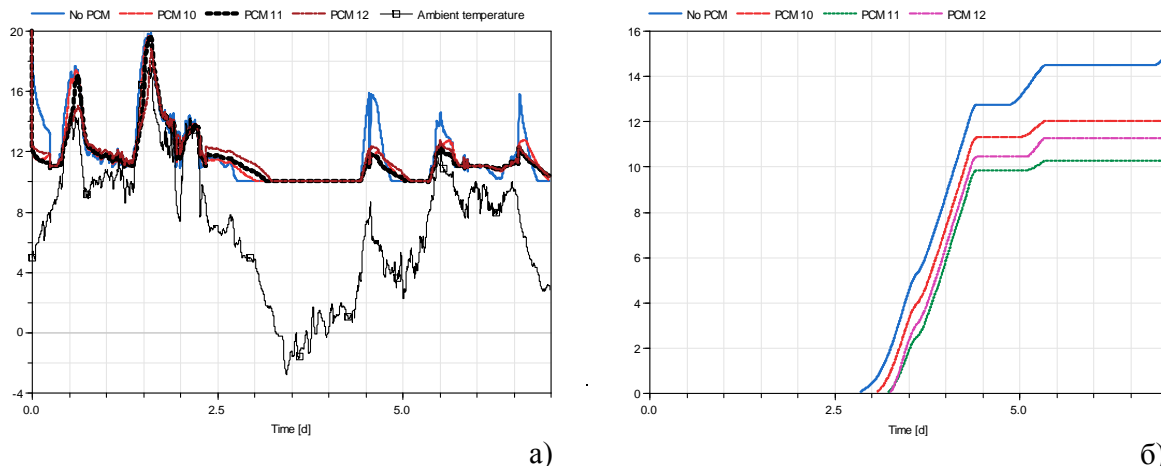


Рис 5. а) Динамика температур окружающей среды и воздушной среды в теплице в случае (No АСН) отсутствия динамической вентиляции за первые 7 дней января 2016; б) Расход тепловой энергии.

Как видно из рис 5б, в случаях, No PCM, PCM10, PCM11 и PCM12, расход тепловой энергии за первые 7 дней января 2016, соответственно составляет, 15, 12, 10.2 и 11.3 кВт.ч. Таким образом, приводя результаты для случая динамической вентиляции (АСН 1), мы получим следующие (рис 6а,б).

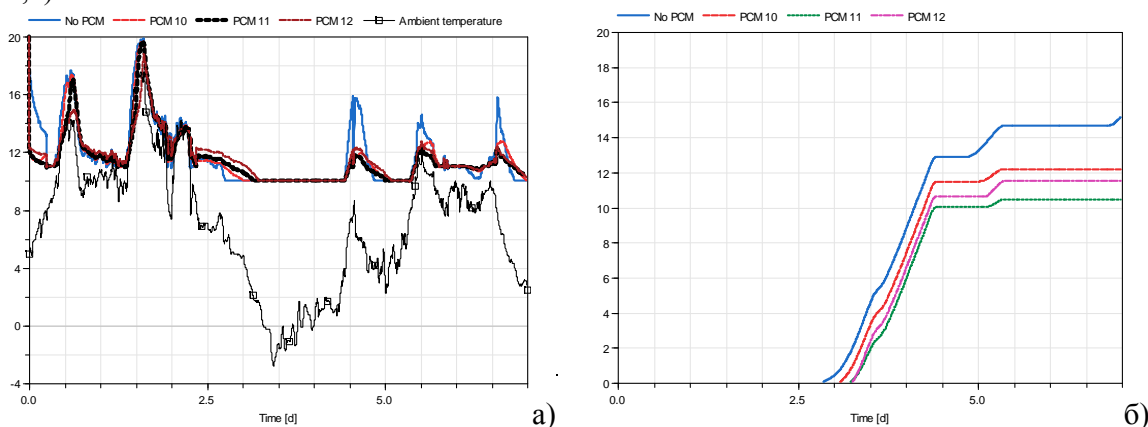


Рис 6. а) Динамика температур окружающей среды и воздушной среды в теплице в случае динамической вентиляции АСН 1 за первые 7 дней января 2016; б) Расход тепловой энергии.

Нетрудно видеть из рис 6б, что, в случаях, No PCM, PCM10, PCM11 и PCM12, расход тепловой энергии за первые 7 дней января 2016, соответственно составляет, 15.1, 12.2, 10.3 и 11.6 кВт.ч. Следовательно, для случаев АСН 2 и АСН 3, результаты приведены на рис 7 и 8.

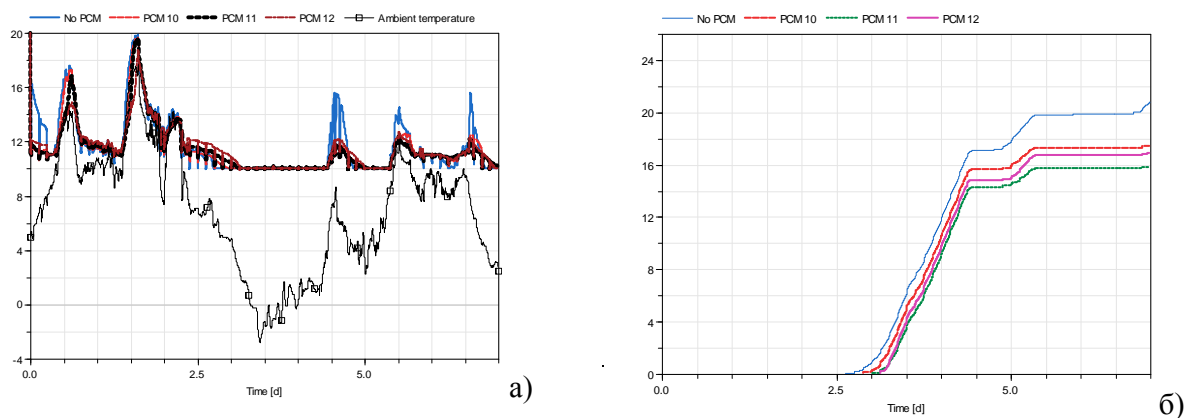


Рис 7. а) Динамика температур окружающей среды и воздушной среды в теплице в случае динамической вентиляции АСН 2 за первые 7 дней января 2016; б) Расход тепловой энергии.

Расход тепловой энергии при динамической вентиляции АСН 2 в случаях, No PCM, PCM10, PCM11 и PCM12, соответственно составляет, 21.0, 17.8, 16.0 и 17.0 кВт.ч.

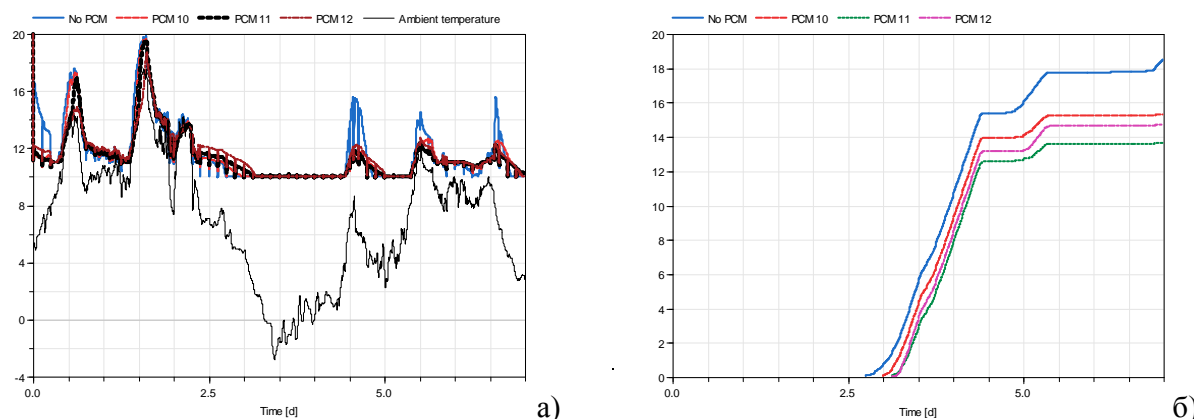


Рис 8. а) Динамика температур окружающей среды и воздушной среды в теплице в случае динамической вентиляции АСН 3 за первые 7 дней января 2016; б) Расход тепловой энергии.

Таким образом, как видно из рис 8б, в случаях, No PCM, PCM10, PCM11 и PCM12, расход тепловой энергии, соответственно составляет, 18.8, 15.5, 13.8 и 14.9 кВт.ч.

Проводя аналогичные расчеты в течение всего месяца января 2016, мы получаем следующий график (рис 9.).

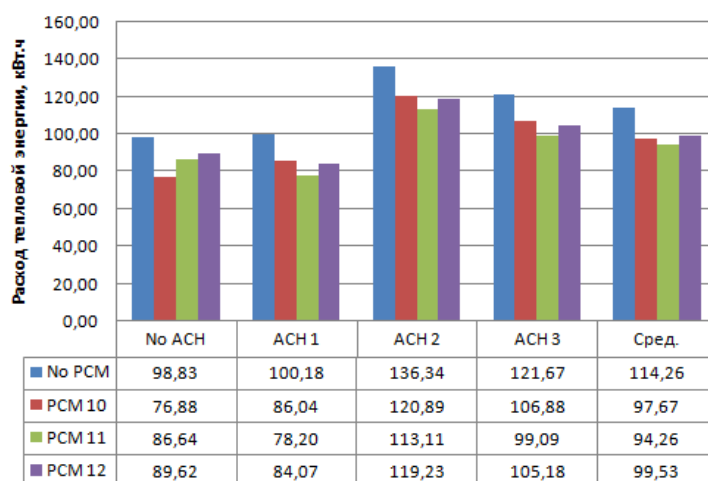


Рис 9. Расход тепловой энергии в течение всего месяца (по вертикальной оси кВт.ч) для различных случаев вентиляции и использования теплового аккумулятора на основе разных парафинов.

Учет теплового потока из-за динамической вентиляции существенно влияет на общий тепловой баланс отопляемых систем. Например, если не учитывать динамическую вентиляцию расход тепловой энергии в случае No PCM, PCM10, PCM11 и PCM12, составляет, 98.83, 76.88, 86.64 и 89.62 кВт.ч., однако, в среднем (рис 9), расход тепловой энергии будет 114.26, 97.67, 94.26 и 99.53 кВт.ч, в результате чего погрешность, соответственно, составляет 13.5%, 11.3%, 8.8%, и 10%.

Исходя из исходных данных и заданных значений динамической вентиляции появилась возможность определить подходящий тепловой аккумулятор из фазопереходных материалов с оптимальной температурой плавления для данной теплицы, обеспечиваемая дополнительным теплом (нагреватель) при снижении температуры воздуха в теплице ниже 10°C. Анализируя полученные результаты нетрудно видеть, что оптимальная температура плавления фазопереходного материала (в данном случае парафина) составляет 11°C, так как, при этой температуре расход тепловой энергии достиг своего минимального значения. Таким образом, при использовании теплового аккумулятора из фазопереходного материала с температурой плавления 11°C в среднем, можно сэкономить тепловую энергию на 18%.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Kosai T; Sase S; Nara M A modelling approach to greenhouse ventilation control. Acta Horticulturae. 1980, 106: 125-136. [2] Sase S; Takakura T; Nara M Wind tunnel testing on airflow and temperature distribution of a naturally ventilated greenhouse. Acta Horticulturae 1984, 148: 329-336 [3] Bol G P A Greenhouse climate: from physical processes to a dynamic model. Thesis, Agricultural University, Wageningen, The Netherlands, 1983 \* de Jong T Natural ventilation of large multi-span green houses. Thesis, Agricultural University Wageningen, 1990. [4] Fernandez J E; Bailey B J Measurement and prediction of greenhouse ventilation rates. Agricultural and Forest Meteorology 1992, 58: 229-245 e Boulard T Etude experimentale et modélisation de la ventilation naturelle des serres (Measurements and modelling of greenhouse natural ventilation). Recapitulatif des résultats des études conduites de 1988 à 1992. Note Interne I.N.R.A. 93-1; Station de Bioclimatologie de Montfavet 84140 France, 1993 [5] de Jong T; Bol G P A Flow characteristics of one-side-mounted windows. Energy in Buildings, 1992; 19: 105-112. [6] Boulard T; Bailie A; Mermier M; Vilette F Mesures et modélisation de la résistance stomatique foliaire et de la transpiration d'un couvert de tomate de serre (Measurements and modelling of the stomatal resistance and transpiration of a greenhouse tomato crop). Agronomie 1991, 11: 259-274. [7] In-Bok Lee et al. Study on Ventilation Efficiencies of Naturally-Ventilated Multi-Span Greenhouses in Korea Article in Acta Horticulturae 719(719):341-348 September 2006 DOI: 10.17660/ActaHortic.2006.719.38 [8] AixLib - An Open-Source Modelica Library within the IEA-EBC Annex 60 Framework. Müller D., Lauster M., Constantin A., Fuchs M., Remmen P.. BauSIM 2016, p.3-9, September 2016.

## CALCULATION THERMAL EFFICIENCY COEFFICIENT SOLAR WATER-HEATING COLLECTORS OF THE RECEIVER WITH GROUND ABSORPTION OF SOLAR RADIATION

F. Sh. Kasimov

Physical-Technical Institute, SPA "Physic-Sun"  
Academy of Sciences of Uzbekistan,  
e-mail: [fahri2002@mail.ru](mailto:fahri2002@mail.ru)

The main heat-technical parameters of flat-plate solar water-heating collectors with ground absorption of solar radiation characterizing a level of their energetic perfection as well as at traditional collectors, are the coefficient of summary losses reduced to unit area of their frontal surface -  $K_{redfil-s}$  and thermal efficiency coefficient of their light absorbing heat-exchanging panels (LAHEP) -  $\eta_{tl}$ .

Thermal efficiency coefficient of a heat receiver collectors of the considered type in which there is an absorption and transformation of solar radiation to heat characterize efficiency of transfer of heat from its blackened bottom to the water heated in it.

For derivation of estimated expression by determination,  $\eta_{tl}$  we use the schematic calculation diagram of components of its heat balance (figure).

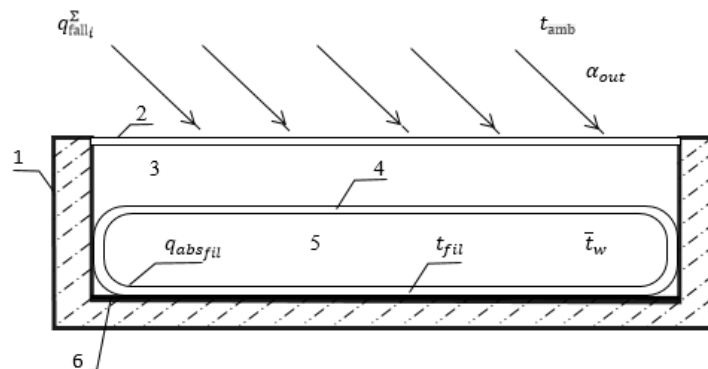


Fig. 1-heat isolated casing; 2-translucent covering; 3-closed interlayer between an outside surface of plastic bag and an internal surface of the translucent covering (Translucent coverings TC); 4-plastic bag for the heating water; 5 – a layer of the heating water; 6 – blackened collector bottom.

According to the schematic calculation diagram given on a figure, balance equations for determination of specific heat productivity of the considered water-heating collector  $q_{us}$  can be presented in the form.

$$q_{us} = \alpha_{K_{redfil-s}} (\bar{t}_{fil} - \bar{t}_w), \quad (1)$$

$$q_{us} = q_{abs_{fil}}^{\Sigma} - K_{red_{fil-s}}(\bar{t}_{fil} - t_{amb}) \quad (2)$$

where  $q_{abs_{fil}}^{\Sigma}$  – flux density of summary solar radiation of the collector bottom casing absorbed by blackened surface;  $\bar{t}_w$  – average water temperature in the plastic bag;  $\bar{t}_{fil}$  – average temperature of a lightabsorbing surface of a bottom;  $\alpha_{out}$  – heat exchange coefficient between the outside surface of the casing and the ambient.

$$\bar{t}_{fil} = \bar{t}_w + \frac{q_{us}}{\alpha_{k_{p-w}}} \quad (3)$$

Adding value  $\bar{t}_{fil}$  from (3) in the equation (2) we will receive

$$q_{us} = \frac{q_{abs_{fil}}^{\Sigma} - K_{red_{fil-s}}(\bar{t}_w + \frac{q_{us}}{\alpha_{k_{p-w}}})}{1 + \frac{K_{red_{fil-s}}}{\alpha_{k_{fil-w}}}} \quad (4)$$

If to designate through

$$\eta_{tl} = \left(1 + \frac{K_{red_{fil-s}}}{\alpha_{k_{ins}}}\right)^{-1} \quad (5)$$

that decision (4) can be presented in the form

$$q_{us} = \eta_{tl} \left[ q_{abs_{fil}}^{\Sigma} K_{red_{fil-s}} (\bar{t}_w - t_{amb}) \right] \quad (6)$$

$$\text{Where } \eta_{tl} = \left(1 + \frac{K_{red_{fil-s}}}{\alpha_{k_{fil-w}}}\right)^{-1} \quad (7)$$

- thermal efficiency coefficient of LAHEP collector consisting of a plastic bag which outside surface of a ground part is accompanied by a surface of blackened bottom of the collector casing.

In case of values  $\alpha_{k_{fil-w}}$  in (7) for horizontal sheets of water when their heat-release (i.e. blackened) surface is converted up, can be defined from [2]

$$\overline{Nu} = 0,54 Ra_{\ell}^{0,25}, \quad \text{at } Ra_{\ell} = 200 \div 8 \cdot 10^6 \quad (8)$$

and

$$\overline{Nu} = 0,15 Re_{\ell}^{0,33}, \quad \text{at } Ra_{\ell} = 8 \cdot 10^6 \div 3 \cdot 10^{10} \quad (9)$$

where

$$\overline{Nu}_{\ell} = \frac{\bar{\alpha}_{k_{in}} \ell}{\lambda_w} \quad (10)$$

- Nusselt's criterion;

$$Ra_{\ell} = \frac{\beta_w g (t'_{fil2} - t_w) \delta_{wc}^3}{\nu_w a_w} \quad (11)$$

- Rayleigh criterion, in which  $\lambda_w$ ,  $\beta_w$ ,  $\nu_w$  and  $a_w$  – respectively, coefficients of volume expansion of kinematic viscosity and temperature conduction water in case of  $\bar{t}_w$ ,  $\ell = \frac{2ab}{a+b}$  – the defining size ( $a$  and  $b$  – respectively, length and width of blackened collector bottom).

## LITERATURE

[1] Avezov R.R., Orlov A.Yu. Solar systems of heating and hot water-supply. Tashkent. FAN.1988.-288 pages.[2] Martynenko O. G., Sokovishkin Yu. F. Free convective heat exchange: Reference manual. – Minsk: Science and technology, 1982.-400 pages.

## ГЕЛИОИССИКХОНАДА ҚУЁШ ЭНЕРГИЯСИДАН ФОЙДАЛАНИШ САМАРАДОРЛИГИНИ ОШИРИШ

Д.У.Туропова<sup>1</sup>, Э.Т.Жураев<sup>1</sup>, Т.Д.Жўраев<sup>2</sup>, Х.Х.Саидов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НПО “Физика-Солнце”, Физико-технический институт

<sup>2</sup>ТИМИ Бухоро филиали

e-mail: [ejuraev@gmail.com](mailto:ejuraev@gmail.com)

Халқ хўжалигида гелиоиссиқхоналар самарадорлигини ошириш учун уларнинг шаффоф тўсиқларининг оптикавий ва иссиқлик–техникавий сифатларини яхшилаш билан бир қаторда мазкур турдаги иссиқхоналар учун асосий энергия манбаи бўлган қуёш нурланиши энергияси ва атроф-муҳит ҳароратининг ҳар қандай ўзгаришлари шароитида уларнинг ичида ўсимликларнинг нормал ривожланиши учун меъёрий ҳарорат режимларини таъминлашга эришиш зарур. Иссиқхоналар сабзавотчилиги амалиётида бу муаммони ҳал қилишда вақтга боғлиқ равишда узгарувчан ташқи метеорологик факторлар таъсирида шаклланадиган уларнинг ички реал иссиқлик режимларини ҳисоблаш учун илмий асосланган услубларни ишлаб чиқиш ва тадбиқ қилиш ва шу асосда уларнинг конструктив ва иссиқлик-техникавий параметрларини оптималлаштириш маълум даражадаги имкониятларга эга. Шу боисдан иссиқхоналарда кечадиган иссиқлик жараёнларининг суткавий нобарқарорлигини ҳисобга олган ҳолда уларнинг асосий параметрларини оптималлаштириш орқали қуёш энергиясидан фойдаланиш самарадорлигини оширишга йўналтирилган илмий тадқиқотлар иссиқхоналар сабзавотчилигини ривожлантириш ва мазкур соҳадаги энергия тежамкорлигини таъминлашнинг долзарб масалалардан биридир.

Республикамиз иқлимий шароитида иссиқхоналар қуёш нурланиши мавжудлигида юқори самарадорликка эга булсада, қуёш нурланиши бўлмаганда бу кўрсаткич кескин камаяди, шу ҳолатни эътиборга олиб иссиқлик аккумуляторига эга булган иссиқхона қурилмасини яратиш буйича илмий тадқиқот ва амалий ишлар олиб борилмоқда. Иссиқхонада иссиқлик аккумуляторини қўллаш қуёш нурланиш бўлмаган вақтларда қурилма самарадорлигини оширишга имкон беради. Ўзбекистон ФА Физика-техника институти ЁАЗ–ФА–0–20602 «Мавсумий ишлатиш имкониятли фазавий ўзгарувчи иссиқлик аккумуляторига эга қуёш қуритгични ишлаб чиқиш» лойиҳаси бажарилди. Лойиҳанинг асосий мақсади, анаъанавий энергия турларидан фойдаланмасдан қайта тикланадиган энергия манбалари орқали қишлоқ хужалик маҳсулотларини қуритиш, қишда мева сабзавот кўчатларини етиштириш.

Лойиҳа асосида Физика-техника институти гелиопалигониди қуйидаги параметрларга эга бўлган иссиқхона қурилмаси яратилди; яратилган иссиқхона қурилмасининг асосий қисмини бетон пойдевор нур ўтказувчи сирт сифатида орасида ҳаво қатламли, 6 мм қалинликка эга поликарбонатдан ясалган тиниқ қоплама металл конструкция ташкил этади; қуёш нурларининг энг кўп миқдорда тушиши учун фронтал сирт горизонтал сиртга нисбатан  $39,53^0$  қиялатиб ўрнатилган; баландлиги 2,0 ва узунлиги 4,0 м ўлчамли орқа шимол томон девор ғиштдан ясалган ва теплоизоляция билан копланган; қурилмага ташқаридан ҳаво оқими кириш учун олдинги қопламада, ичкаридаги нам ҳаво оқимини чиқариб юбориш учун эса қурилманинг юқори қисмида тешиқлар қуйилган.



1-расм. Қурилмани умумий кўриниши қуйидаги расмда тасвирланган

Иссиқлик аккумуляцияси сифатида қурилма полига 15-20 см қалинликда тош ташланган [3]. Тош (солиштира иссиқлик сиғими  $0,75 - \text{Кж} / \text{кг} \cdot \text{К}$ ) ташланишдан мақсад у узига иссиқликни яхши ютади. Маълумки гелиоиссиқхонада ҳам қиш ойларида ўсимлик ўстириш учун, албатта дублёр сифатида электро колорифер ёки органик ёкилги ёндириладиган иситиш тизимларидан фойдаланилади.

Куёш энергияси ҳисобига иситиладиган иссиқхоналарда очик об-ҳаво шароитида кундузги пайтларда уларнинг энг катта иссиқлик сиғимига эга булган қисми, яъни тупрогида табиий равишда жуда куп микдорда иссиқлик жамланади. Кечкурунлари эса шу жамланган иссиқлик иссиқхонанинг иссиқлик йукотишларини қисман коплайди. Агар куёш нурланиши оркали иссиқхонага кираётган иссиқлик микдори унинг тупрогида жамланган ва атроф-муҳитга йукатаётган иссиқлик микдорлари йигиндисидан катта булса, мазкур иссиқхонада кизиш ҳолати руй беради. Шу боис, гелиоиссиқхоналарда ҳароратнинг кўтарилиб кетиш ҳолатининг олдини олиш учун одатда турли хилдаги қушимча иссиқлик жамлагич қурилмалари ишлатилиб, улар кундузги пайтларда иссиқхона шаффоф тусиқлари оркали ичкарига кирган ва унинг усимликлар, тупрок сирти ва бошка ички қисмлар томонидан ютилган йигинди иссиқлик энергиясини куннинг совуган вақтларида ишлатиш ва шу асосда гелиоиссиқхона ичидаги ҳароратнинг суткалик узгариш графигини маълум даражада силлиқлаш имкониятларини беради. Қаралаётган иссиқхонада январь ойида гул ва сабзавот уруғлари экилди. 2017 йил 2016 йилнинг қиш ойларига нисбатан ҳарорат паст булганлигини кузатдик, аммо, мисол қилиб келтириладиган гелиоиссиқхонада куннинг куёшли вақтларида ўсимликлар учун қулай ҳароратга эга бўлинганлигини қуйидаги графигдан кўриш мумкин.



2-расм. 2017 йил январь ойининг 18-19-20 кунларидаги атроф-муҳит ва иссиқхона ичидаги температура микдори  
3-расмда январь ойининг 18-19-20 кунларида радиация микдори графигда келтирилган.



3-расм. 2017 йил январь ойининг 18-19-20 кунларидаги радиация микдори

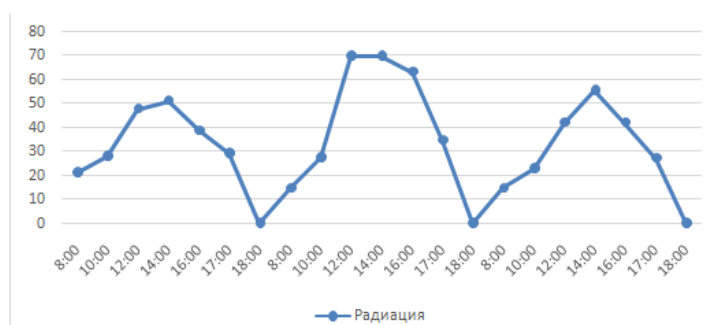
4-расмда февраль ойининг 6-7-8 кунларидаги иссиқхона ичида ва атроф-муҳит ҳарорати узгариши графиги келтирилган.



4-расм. 2017 йил февраль ойининг 6-7-8 кунларидаги атроф-муҳит ва иссиқхона ичидаги температура микдори



5-расмда февраль ойининг 6-7-8 кунларида куёш радиацияси миқдори графиги келтирилган.



5-расм. 2017 йил февраль ойининг 6-7-8 кунларидаги радиация миқдори

Юқоридагиларни инобатга олган ҳолда шуни таъкидлаш лозимки, мазкур турдаги, куёшли иссиқхоналарни мукамал лойиҳалаштириш ва қисқа муддатли аккумулятордан фойдаланиш ҳисобига, уларни куннинг совуқ вақтларида иситишга сарфланадиган бирламчи энергия ресурсларини 50-60 % гача тежаш имконини беради.

### Фойдаланилган адабиётлар

[1] Абдуллаев Абдурахмон. Ярим цилиндр шаклдаги плёнкали куёш иссиқхоналарининг нобарқарор ҳарорат режимлари ва асосий параметрларини оптималлаштириш // Автореферат. Тошкент 2007. 11-17 бетлар. [2] Н.Р. Аvezова, К.А. Самиев, А.Р. Хаётов, И.М.Назаров, З.Ж.Эргашев,М.О.Самиев, Ш.И. Сулейманов Моделирование нестационарного температурного режима гелиотеплиц с краткосрочным водяным аккумулятором тепла и его экспериментальная проверка //Гелиотехника. 2010. №1. 7-10 бетлар. [3] Жураев Эркин. Куёш нурланиш иссиқлигидан фойдаланиб муқобил энергия олиш жараёнларини бошқарув тизимини ишлаб чиқиш // Магистрлик диссертацияси. Тошкент 2015. 37-41 бетлар.

## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕПЛООВОГО НАСОСА ДЛЯ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ОДНОЭТАЖНОГО СОЛНЕЧНОГО СЕЛЬСКОГО ДОМА С ГЕЛИОТЕПЛИЦОЙ

А. Вардияшвили<sup>1</sup>, Р.А. Захидов<sup>2</sup>, Г. Узаков<sup>3</sup>,М.Муродов<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Каршинский государственный университет, E-mail: [vardi73@mail.ru](mailto:vardi73@mail.ru),

<sup>2</sup>Институт Энергетики и автоматики

<sup>3</sup>Каршинский инженерно-экономический институт

<sup>4</sup>Каршинский филиал ТУИТ

### Аннотация

В статье приведены схемы применения теплового насоса для теплоснабжения одноэтажного сельского дома с гелиотеплицой в условиях Кашкадарьинской области. Предлагаемая схема использования солнечных коллекторов с тепловыми насосами позволяют повысить эффективность и экологическую безопасность существующих систем теплоснабжения.

**Ключевые слова:** Энергосбережение, теплоснабжение, отопление, тепловой насос, эффективность, сельский солнечный дом, энергетический баланс, энергетический ресурс, горячее водоснабжение, теплоснабжение, холодный источник, горячий теплоноситель.

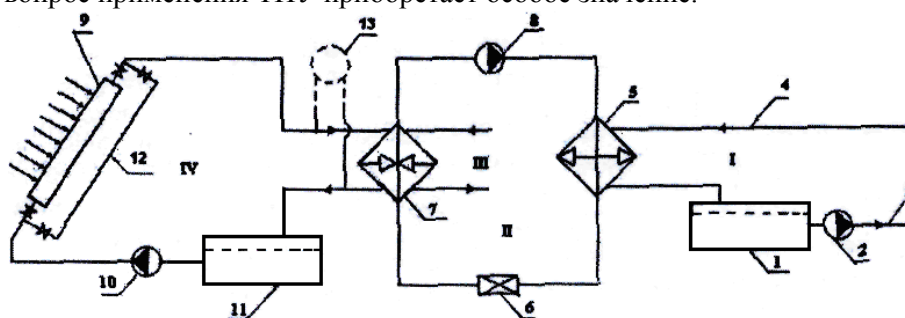
Благодаря своему уникальному географическому расположению Узбекистан располагает практически всеми видами нетрадиционных источников энергии. В связи с этим, одной из приоритетных задач, поставленной перед правительством республики, считается постепенный переход к возобновляемым источникам энергии с целью экономии традиционных энергетических ресурсов для будущего поколения. Технический потенциал альтернативных источников энергии в Узбекистане, составляет 180 млн. т.н.э. в год и в три раза превышает его ежегодную потребность в энергоресурсах.

Проблема энергосбережения в системах теплоснабжения и устойчивого энергообеспечения промышленных, сельскохозяйственных и жилых зданий является одной из первостепенных про-

блем в теплоэнергетике. Одним из решений этих проблем является создание систем отопления сельских домов с применением тепловых насосов на базе нетрадиционных источников энергии. Тепловые насосы в экономически развитых странах используются достаточно широко и доказали свою энергетическую и экологическую эффективность. Это единственные устройства, которые осуществляют процесс переноса теплоты с низкотемпературного уровня на более высокий температурный уровень, вовлекая в полезный оборот неиспользуемую природную и техногенную теплоту, соответственно снижая потребность в добываемом топливе и сокращая выбросы «парникового» углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) и других вредных продуктов сжигания органического топлива.

Одним из перспективных направлений, обеспечивающих сокращение использования энергоресурсов на нужды теплоснабжения, а также снижение загрязнения окружающей среды, является применение теплонасосных установок (ТНУ). Энергетическая эффективность ТНУ оценивается коэффициентом трансформации теплоты, представляющим отношение теплопроизводительности к затраченной извне механической работе. Обычно этот коэффициент равен 3-5 (т.е. на 1 кВт затрачиваемой электрической мощности может быть получено 3-5 кВт теплоты за счет использования низкопотенциальных источников). На практике этот коэффициент не превышает 2,2, что не позволяет конкурировать с централизованным водоснабжением.

В настоящее время в Узбекистане тепловые насосы не получили широкого распространения в связи с низкой стоимостью органического топлива для котельных и высокой стоимостью оборудования ТНУ. Однако, в связи с изменением «замыкающих» затрат на органическое топливо и обострением экологических проблем, связанных с загрязнением окружающей среды продуктами сгорания тепла, вопрос применения ТНУ приобретает особое значение.



**Рис. 1.** Принципиальная схема системы солнечного теплоснабжения с низкотемпературными солнечными коллекторами в комбинации с тепловым насосом: 1 - бак-аккумулятор; 2 - циркуляционный насос; 3,4-подающий и обратный теплопроводы; 5 - конденсатор ТНУ; 6- дроссель; 7 - испаритель; 8 - компрессор; 9 -низкотемпературный СК; 10 - насос; 11 - грунтовый теплообменник для аккумуляции низкопотенциального -тепла; 12 - контур холодоснабжения; 13 - обводной байпасный трубопровод; I- контур циркуляции теплоносителя; II - контур циркуляции хладагента в ТНУ; III - контур подачи воды из грунтового аккумулятора в испаритель ТНУ; IV- система утилизации солнечной энергии с солнечными коллекторами.

Принципиальная схема комбинированной солнечной теплонасосной системы теплоснабжения для отопления многоэтажных зданий приведена на рис.1. Первый контур включает в себя бак-аккумулятор 1, циркуляционный насос 2, подающий 3 и обратный 4 теплопроводы, соединенные с внутренней системой жилых зданий конденсатором 5 ТНУ второго контура. Во втором контуре источника тепла в состав ТНУ, кроме конденсатора 5, входят дроссель 6, испаритель 7 и компрессор 8. Четвертый контур - это система утилизации солнечной энергии с низкотемпературным солнечным коллектором 9, насосом 10 и грунтовым теплообменником 11 для аккумуляции низкопотенциального источника тепла, обводным байпасным трубопроводом 12.

В летние месяцы охлаждение здания 13 производится путем применения метода ТНУ «naturalcooling». Это особый энергосберегающий метод охлаждения помещений, т.к. в этом случае, отбирая низкопотенциальное тепло земли от грунтового аккумулятора ( $8 \div 12^\circ\text{C}$ ), потребляется лишь незначительное количество электроэнергии для работы циркуляционных насосов. При недостаточном охлаждении помещений включается ТНУ.

Принцип работы комбинированной солнечно-теплонасосной системы теплоснабжения следующий. В часы солнечного сияния теплота радиации при помощи солнечных коллекторов передается теплоносителю - воде или рассолу ( $\text{NaCl}$ ) в зимнее время. Нагретый в солнечных коллекторах теплоноситель охлаждается в испарителе ТНУ и возвращается в бак-аккумулятор для последующего нагрева. В ночные и пасмурные часы вода или рассол проходит через байпасную линию,



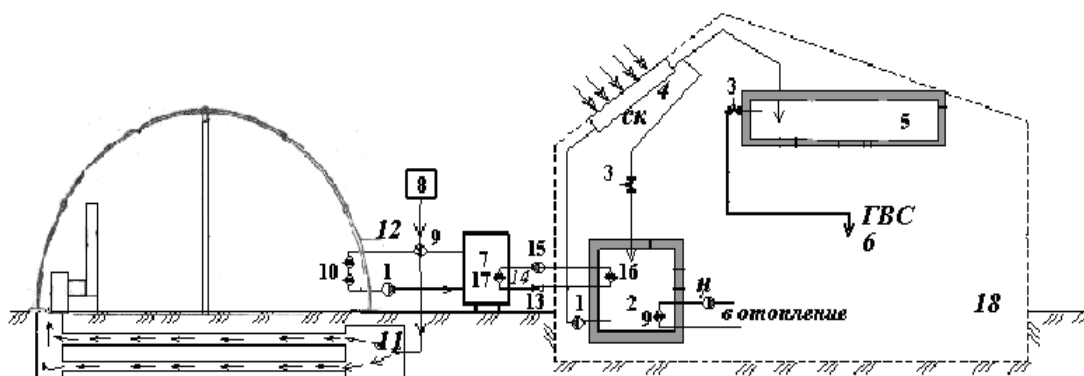
минуя солнечные коллектора, для сокращения тепловых потерь. За счет низкопотенциального тепла, передаваемого от пластиковых солнечных коллекторов, в испарителе 7 хладагент испаряется, и пары поступают в компрессор 8. Сжатые пары хладагента с температурой 80-85°C обеспечивают нагрев теплоносителя первого контура. Нагретый до 65°C теплоноситель поступает в бак-аккумулятор 1 и далее подается к жилым зданиям микрорайона [2, 3].

Использование подогретой в гелиоконтуре воды в качестве низкопотенциального источника в зимний период обеспечивает достаточно высокие значения коэффициента преобразования ТНУ, а следовательно, повышает и ее эффективность в целом. Переход к значениям рабочих температур теплоносителя приводит к увеличению средних значений КПД гелиоконтура в 1,5-2 раза. Оптимальные значения температуры теплоносителя в гелиоконтуре для летнего периода находятся в интервале 25-35°C. При этом тепловой насос поддерживает требуемый температурный потенциал для отопления, холода и ГВС.

В режиме охлаждения для оценки эффективности применяется холодильный коэффициент, равный отношению холодопроизводительности теплового насоса к мощности, потребляемой компрессором. Когда в тепловых насосах одновременно используются тепло и холод (например, охлаждение холодильных камер и нагрев офисных помещений), то суммарный коэффициент преобразования теоретически может достигать 12,7, что характеризует высокую энергетическую эффективность теплового насоса. В абсорбционных тепловых насосах коэффициент преобразования ниже, чем в компрессионных из-за больших потерь в элементах абсорбционного контура. Так, при использовании грунтового аккумулятора с температурой 281,16 К (8°C) и температурой полезного тепла 323,16 К (50°C), коэффициент преобразования абсорбционного ТН составит всего 1,45 [4, 5]. Температура полезного тепла в абсорбционных тепловых насосах зависит также от температуры нагрева генератора. При вышеприведенных температурах нагрев генератора должен быть не меньше 150°C. Для решения вопроса о целесообразности создания теплонасосной станции должен быть проведен технико-экономический расчет сопоставления вариантов котельной с ТНУ и без него с учетом стоимостных показателей, степени дефицитности топлива и электроэнергии и экологических факторов в каждом конкретном случае.

Целью работы является -разработка принципиальной схемы солнечного дома с гелиотеплицами, солнечными батареями и солнечной водонагревательной установки

Наиболее приемлемым вариантом с позиции энергетического анализа является режим одновременно существующей потребности в охлаждении и отоплении оба потребителя могут быть соединены друг с другом посредством теплового насоса. Периоды кондиционирования воздуха в солнечном сельском доме и эксплуатации теплиц хорошо сочетаются, так как один из них- теплица является потребителем тепла а другой - требует охлаждения (рис.3).



**Рис. 3.** Принципиальная схема системы тепло- и холодоснабжения солнечного сельского дома с гелиотеплицами. 1-циркуляционный насос; 2-аккумулирующий бак горячей воды; 3-электромагнитные вентили; 4-солнечный водонагреватель; 5-бак горячей воды для теплицы; 6-потребитель горячей воды; 7-бак горячей воды для системы отопления; 8-малая котельная – источник тепла дымовых газов; 9-водяной теплообменник; 10-отопительный прибор; 11-внутрипочвенный теплоаккумуляторный канал; 12-солнечная теплица; 13-регулирующий вентиль теплового насоса; 14-теплонасосная установка; 15-компрессор теплового насоса; 16-испаритель теплового насоса; 17-конденсатор теплового насоса; 18-солнечный сельский дом.



В совместной системе тепло – и хладоснабжения теплиц и солнечного сельского дома 18 тепловой насос (ТН) 14 устанавливается между солнечным домом 18 и теплицей 12. Солнечный дом 18 охлаждается с ТН 14, тепло вентиляционных выбросов отнимается испарителем ТН 16. Затем пары хладагента сжимаются в компрессоре 15 и становятся перегретым. Конденсатор ТН 17 погружен в бак – аккумулятор 2, где происходит конденсация паров хладагента и вода нагревается до  $50\div 60^{\circ}\text{C}$ . С помощью циркуляционного насоса 1 горячая вода из бака – аккумулятора 2 проходит через водяной теплообменник 9, где вторично нагревается отходными дымовыми газами 8 до температуры  $90\div 100^{\circ}\text{C}$  и поступает в отопительный прибор 10 теплицы. При необходимости охлажденные продукты сгорания 8 можно подавать через внутрпочвенный теплоаккумулирующий канал 11, а затем в теплицу для подкормки растений углекислым газом. Солнечный водонагреватель 4 предназначен для отопления солнечного дома и регулируется вентилями 3 и 13.

В целях энергосбережения и создания автономного теплоснабжения сельского жилого дома нами предложена теплонасосная система. Как и холодильная машина, тепловой насос потребляет энергию на реализацию термодинамического цикла (привод компрессора). Коэффициент преобразования теплового насоса - отношение теплопроизводительности к электропотреблению - зависит от уровня температур в испарителе и конденсаторе и колеблется в различных системах в диапазоне от 2,5 до 5, т.е. на 1 кВт затраченной электрической энергии тепловой насос производит от 2,5 до 5 кВт тепловой энергии. Температурный уровень теплоснабжения от тепловых насосов  $35\div 55^{\circ}\text{C}$ . Экономия энергетических ресурсов достигает до 70%.

Предлагаемая схема использования солнечных коллекторов и с тепловыми насосами позволяют повысить эффективность и экологическую безопасность существующих систем теплоснабжения.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] И.А. Каримов Указ «О мерах по дальнейшему развитию альтернативных источников энергии», газета «Народное слово» 2013г 2-марта. №43(5717). [2] Р.А.Захидов, А.И.Анарбаев// Международный журнал «Гелиотехника», 2014, №3. С.62-73. [3] Хайнрих Г., Найорн Х. Нестлер В. Теплонасосные установки для отопления и горячего водоснабжения. Москва. Стройиздат 1985.-351стр. [4] И. З.Аронов, Сигал А. И. Установки контактных экономайзеров с целью снижения выбросов оксидов азота с дымовыми газами // Химическая технология. -1988. - № 1. - С.68-70. [5] Э. Бубялис, В. Макарявичюс Процессы энергопереноса в тепловых насосах. Вильнюс. Максслас. 1990. -184 с.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ДВУХКОНТУРНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ВОДОНАГРЕВАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ В ХОЛОДНЫЙ ПЕРИОД ГОДА

А.У.Вохидов<sup>1</sup>, Ф.Ш.Касимов<sup>1</sup>, Э.Ю. Рахимов<sup>1</sup>, М.А. Куралов<sup>1</sup>,  
А.Э.Хайтмухамедов<sup>1</sup>, А.Ю. Усмонов<sup>1</sup>, Б.Б.Болиев<sup>1</sup>, Б.А. Мухамедов<sup>2</sup>, Р.Х.Файзиев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО «Международный институт солнечной энергии»

2 Корпус, 2Б, ул. Бодомзор йули, Ташкент, 100084, Республика Узбекистан  
тел.: (+998) 71 235-40-90; факс: (+998) 71 235-03-77; e-mail: [avezov@uzsci.net](mailto:avezov@uzsci.net)

<sup>2</sup>Компания «ARTEL»

2, ул. Тараккиёт, Ташкент, 100069, Республика Узбекистан  
тел.: (+998) 71 155-99-88; факс: (+998) 71 148-88-88; e-mail: [info@artelgroup.org](mailto:info@artelgroup.org)

### Аннотация

*В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований двухконтурной солнечной водонагревательной установки с проточным баком-аккумулятором (БА) для определения теплопроизводительности в холодный период года.*

**Ключевые слова:** система горячего водоснабжения, плоский солнечный коллектор, бак-аккумулятор, теплопроизводительность.

В освоения нетрадиционных возобновляемых источников энергии (НВИЭ) в Узбекистане важное историческое значение имеет Указ первого Президента Республики Узбекистан И.А.Каримова от 1 марта 2013г № УП-4512 «О мерах по дальнейшему развитию альтернативных источников энергии», как Программный документ в планировании и выполнении фундаментальных и прикладных исследований, направленных на расширение масштабов использования альтернативных источников энергии, прежде всего солнечной энергии (СЭ) [1].

В области теплового преобразования и использования СЭ в Республике накоплен значительный опыт и создан достаточный научно-технический задел:

- организовано мелкосерийное производство основного элемента солнечных систем горячего водоснабжения (СГВС) – плоский солнечный водонагревательный коллектор (ПСВК) для нагрева жидкого теплоносителя со светопрозрачными покрытиями корпуса;

- созданы экспериментальные индивидуальные и коллективные двухконтурные солнечные СГВС и определены их основные эксплуатационные характеристики;

- разработаны солнечно-топливные котельные для СГВС одно-и многоэтажных домов и промышленных предприятий, а также небольших поселков и микрорайонов, позволяющих экономить традиционные топливно-энергетические ресурсы;

Несмотря на имеющийся положительный опыт и научно-технический задел, эффективность материальных затрат и результаты усилий специалистов, направленных на разработку гелиотехнического оборудования в целях широкомасштабного использования СЭ в СГВС, весьма скромны в производстве и потреблении горячей воды. В силу ряда объективных и субъективных причин объем производства ПСВК и других комплектующих оборудования остаются ограниченными, а их цены – высокими.

Реальные масштабы использования солнечной энергии в системах горячего водоснабжения зависят от технико-экономических показателей их основного элемента – ПСВК. Последние, как правило, наряду с приведенными затратами на них зависят от их удельной (отнесенной к единице площади фронтальной поверхности) годовой (сезонной) производительности, которая при прочих равных условиях, зависит от их теплотехнических параметров и температуры получаемой из них горячей воды. Очевидно, что для расширения масштабов практического применения ПСВК в сфере коммунальной теплоэнергетики и других отраслях экономики Республики в первой очереди требуется научно-обоснованная информация об их удельной теплопроизводительности и других технико-экономических показателей в зависимости от режима их эксплуатации.

На сегодняшний день в республике существует ряд коммерческих компаний, которые занимаются установкой под ключ СГВС на основе ПСВК: ООО «MIRSOLAR», ООО «YasenGroup», ООО «AllSolar», НПП «ЭНКОМ», ООО «SOLARENERGYPRODUCTS», Компания «ARTEL» и др. Например, производительная мощность ООО «MIR SOLAR» который производит алюминиевые и медные ПСВК составляет 1000 м<sup>2</sup>/год (установлены солнечные СГВС более в 200 объектах). Данные предприятия являются основными производителями солнечных водонагревательных коллек-

торов (СВК) в Республике. За последние годы в Республике установлено несколько тысяч м<sup>2</sup> СВК с различной конструкцией (вакуумно - трубчатый и плоский листотрубный).

В текущем году компанией «ARTEL» планируется запуск серийного производства высокоэффективных плоских солнечных водонагревательных коллекторов с медной лучепоглощающей теплообменной панелью в объеме 150000 м<sup>2</sup>/год.

Обобщение опыта эксплуатации экспериментальных объектов с системами солнечного горячего водоснабжения в Республике показывает, что более 60% теплопотребности жилых и коммунально-бытовых объектов на горячее водоснабжение в теплый период года может быть покрыта за счет использования солнечной энергии, что в свою очередь позволяет обеспечить ежегодную экономию природного газа в количестве около 0,9 млрд. м<sup>3</sup>.

Теплопроизводительность ПСВК в СГВС может быть определена путем проведения их соответствующих тепловых испытаний в натуральных условиях в характерных регионах Республики. Однако, одновременность и неодинаковость условий проведения испытаний в натуральных условиях затрудняет установить достоверную взаимосвязь теплопроизводительности рассматриваемых коллекторов от долгосрочных метеорологических данных регионов и температурного режима их эксплуатации.

Несмотря на то, что суммарная площадь ПСВК в различных странах мира к 2016г. составляла 622 млн. м<sup>2</sup>, а мощность – 435 ГВт, до настоящего времени общепризнанная методика по определению их годовой (сезонной) теплопроизводительности в зависимости от температуры, получаемой из них горячей воды отсутствует [2].

Данная работа посвящена экспериментальным исследованиям солнечных СГВС, целью которой является определение их производительности в холодный период года и использования полученных данных для подготовки предложения на серийное производство солнечных коллекторов с оптимизированными параметрами для круглогодичного использования.

В связи с этим, с декабря 2016 года по февраль 2017 года в пасмурные, малооблачные и ясные солнечные дни проводились испытания двухконтурной солнечной водонагревательной установки в испытательном полигоне Международного института солнечной энергии. Двухконтурная солнечная водонагревательная установка, установленная в полигоне, состоит из следующих комплекующих: ПСВК и проточный БА (рис. 1).

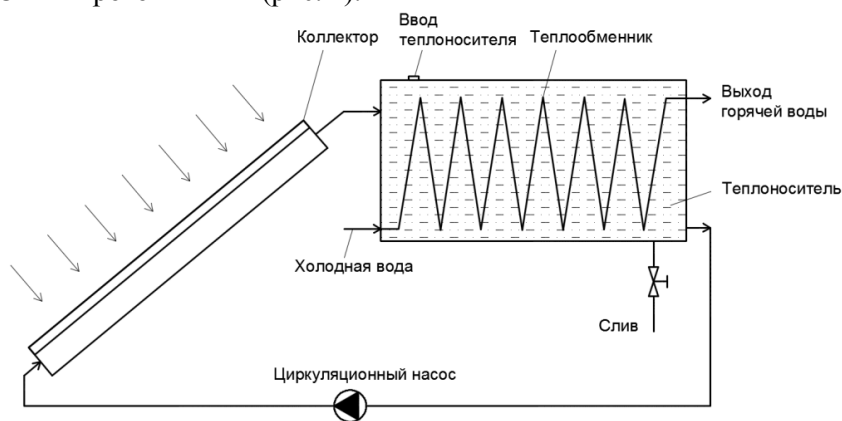


Рис.1. Принципиальная схема двухконтурной солнечной водонагревательной установки.

На рис. 1 показана принципиальная схема двухконтурной солнечной водонагревательной установки с проточным БА.

Площадь фронтальной поверхности ПСВК составляет 2,42 м<sup>2</sup>, светопрозрачное лучепоглощающее покрытие – закаленное стекло с низким содержанием железа толщиной 4 мм, абсорбер листотрубного типа площадью поверхности – 2,23 м<sup>2</sup>, изготовлен из высокоселективного алюминиевого материала Almesco-Tinox, теплоотводящие каналы – медные с диаметром 10 мм, а коллекторный – 18 мм, коэффициент поглощения – 0,95, материал теплоизоляции корпуса – минеральная вата плотностью 50 кг/м<sup>3</sup>, толщиной 40 мм. Вес ПСВК – 44 кг (18,2 кг/м<sup>2</sup>).

БА горячей воды емкостью 180 л, теплоизоляция БА – полиуретан, тепловые потери – 2,5 Вт/К, теплообменник внутри БА емкостью 7,4 л. изготовлен из нержавеющей стали AISI 316 L. Теплоноситель в БА является пропиленгликоль – прозрачная вязкая жидкость, является хорошим

растворителем, плотность –  $1,0363 \text{ г/см}^3$ , удельная теплоемкость –  $2483 \text{ Дж/(кг*К)}$  и теплопроводность –  $0,218 \text{ Вт/(м*К)}$ .

Данная система дает возможность устранения осадков и накипей, которые появляются в традиционных БА [3], в отличие от них, емкость, устанавливаемая в двухконтурных системах наполнена антифризом, а в теплообменнике протекает нагреваемая вода.

В ходе испытаний проточной солнечной СГВС измерялись падающая солнечная радиация на поверхности коллекторов  $q_{\text{пад}}$ , температура окружающей среды  $t_{\text{oc}}$ , температура воды на входе в коллектора  $t_{\text{вх}}$ , температура воды на выходе из него  $t_{\text{вых}}$  (рис. 2). Из БА отбор воды производился в промежутком 30 л/час в течении светового дня.

В декабре 2016 года было 13 ясных солнечных дней, что составляет 42% от общего количества дней за месяц. Анализ полученных экспериментальных данных по определению теплопроизводительности системы в ясные солнечные дни показывает, что при средневенной температуры окружающей среды –  $4,9^\circ\text{C}$ , падающей солнечной радиации на наклонную поверхность ПСВК ( $\alpha=43^\circ$ ) –  $470 \text{ Вт/м}^2$ , средневенная температура горячей воды на выходе из БА составило  $40,8^\circ\text{C}$  с объемом 200 л. за световой день.

В январе 2017 года (при средневенной температуры окружающей среды  $5,5^\circ\text{C}$ , падающей солнечной радиации на наклонную поверхность –  $708 \text{ Вт/м}^2$ ) средневенная температура горячей воды на выходе из БА составляет  $45,4^\circ\text{C}$  с объемом 210 л. за световой день.

В феврале 2017 года (средневенная температура окружающей среды  $9^\circ\text{C}$ , падающая солнечная радиация на наклонную поверхность –  $880 \text{ Вт/м}^2$ ) средневенная температура горячей воды на выходе из БА составляет  $52,7^\circ\text{C}$  с объемом 180 л. за световой день.



Рис. 2. Процесс измерения падающей на наклонную поверхность солнечной радиации в натуральных условиях в полигоне МИСЭ.

На рис.3 приведен результат экспериментального исследования в ясный солнечный день в холодный период года

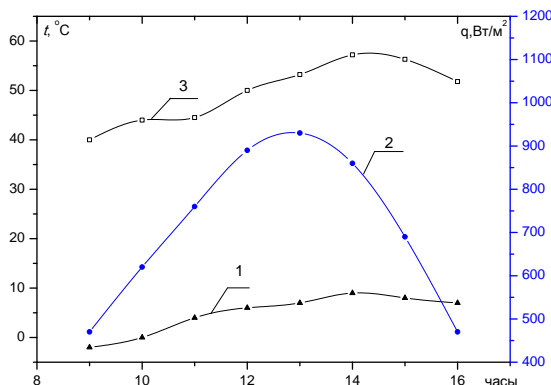


Рис. 3. График показателей двухконтурной солнечной водонагревательной установки в ясный солнечный день холодного периода года (25.01.2017): 1-температура окружающей среды,  $t_{\text{oc}}$ ; 2-падающая радиация на площадь поверхности коллектора,  $q_{\text{пад}}$ ; 3-температура воды на выходе из бака аккумулятора,  $t_{\text{вых}}$ .

Анализ графика показывает, что в ясный солнечный день 25 января в 13<sup>00</sup> дня при суммарной падающей солнечной радиации на наклонную поверхность  $900 \text{ Вт/м}^2$  и температуре окружающей



среды 7°C температура получаемой горячей воды на выходе из БА составляет 53,2°C и соответственно, КПД системы равно 42 %.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Указ Президента Республики Узбекистан «О мерах по дальнейшему развитию альтернативных источников энергии» № УП-4512 от 1 марта 2013г. [2] Solarheat worldwide. Markets and Contribution to the Energy Supply 2014.2016 Edition. AEE INTEC AEE - Institute for Sustainable Technologies A-8200 Gleisdorf, Austria. – 2016. 74 p. [3] Аvezова Н.Р., Аvezов Р.Р., Рустамов Н.Т., Исаков А.Ж., Сулейманов Ш.И., А.У. Вохидов Техничко-экономические показатели плоских солнечных водонагревательных коллекторов в системах горячего водоснабжения// Труды международной конференции, посвященной 70-летию Физико-технического института НПО «Физика-Солнце» «Фундаментальные и прикладные вопросы физики». – ФТИ НПО «Физика-Солнце» АН РУз., Ташкент, 2013г. – с. 293-295.

## ПРИМЕНЕНИЕ АБСОРБЦИОННЫХ УСТАНОВОК В СОЛНЕЧНОМ ОХЛАЖДЕНИИ ЗДАНИЙ

Р.А. Захидов<sup>1</sup>, А. Анарбаев<sup>1</sup>, Ш.Файзиев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО «Научно-технический центр АО Узбекэнерго»

Ташкент, 100125, Узбекистан, anizan6004@mail.ru

<sup>2</sup>Ташкентский государственный технический университет

Ташкент, 100002, Узбекистан, umferuza2003@mail.ru

### Аннотация

*В статье выполнен анализ существующих схем солнечного охлаждения зданий на основе абсорбционных холодильных машин на основе опыта ведущих фирм. Показаны гибридные схемы, а также оптимальные параметры температуры генерации в АБХМ от солнечных коллекторов. Выполнено сравнение основных типов абсорбентов применяемых в тепловых насосах данного типа. Представлена экономическая оценка использования АБХМ в теплохладоснабжении здания.*

**Ключевые слова:** абсорбционная холодильная машина, солнечные коллекторы, гибридные схемы.

### Введение

Наибольший эффект от использования солнечной энергии в теплохладоснабжении может быть получен в районах республики, где периоды охлаждения по продолжительности соизмеримы с отопительными периодами и возможно комплексное решение систем отопления и охлаждения зданий с применением абсорбционных холодильных машин (АБХМ) [1]. Такие установки высокой производительности (более 50 кВт) используются в современной технике кондиционирования. Установки небольшой мощности до 2 кВт могут использоваться, например, в пропановых автономных холодильниках для кемпинга. Для эффективного использования АБХМ в среднем диапазоне мощности пока оптимальных решений нет.

В настоящее время в мире в основном применяются закрытые бромистолитиевые машины. Известны открытые абсорбционные машины и гибридные компрессионно - абсорбционные машины (рис.1). Последние отличаются большей эксплуатационной гибкостью, меньшей зависимостью холодопроизводительности от поступления солнечной радиации, меньшими площадями поверхности теплообменников.

Относительным недостатком абсорбционных холодильных машин являются их повышенные в 1,5-2 раза габариты по сравнению с парокомпрессионными. Однако при этом удельная потребляемая мощность снижается в 5 и более раз. Энергетической характеристикой АБХМ служит коэффициент трансформации, представляющий собой отношение тепло- или холодопроизводительности к количеству теплоты, подведенной от греющего источника. В настоящее время технически достижимое значение коэффициента трансформации лежит в пределах 20÷60%. Практически это означает, что такая доля обычно теряемой низкопотенциальной теплоты преобразуется в полезную энергию для использования в солнечном охлаждении.

Т.к. солнечные системы охлаждения отличаются наличием гелиоприемников (коллекторов), аккумуляторов тепла, дополнительных циркуляционных насосов и средств автоматического регулирования, поэтому капитальные затраты на их установку всегда выше (до 50%) капитальных за-

трат на традиционные системы. Для того, чтобы снизить капитальные и эксплуатационные затраты требуется проектировать солнечные системы охлаждения зданий в тесной увязке с проектированием систем горячего водоснабжения и отопления, что в ряде случаев позволяет, так как в различные сезоны можно использовать одни и те же гелиоприемники, аккумуляторы и циркуляционные насосы. В Германии в 80-х годах прошлого столетия был проведен экономический анализ применения абсорбционных тепловых насосов индивидуального назначения. Их использование позволило на 30% сократить расход топлива по сравнению с отоплением газомазутной котельной. Цена оборудования АТНУ колеблется в пределах от 0,7 до 1,0 тыс. марок на киловатт проектной мощности. При этом капиталовложения на моновалентную схему (отопление только за счет ТНУ) и бивалентную схему (ТНУ и газовый котел в пиковом режиме) практически одинаковы. Срок окупаемости тепловых насосов составил не более 10 лет, а их расчетный физический износ 20 и более лет. В Германии строят солнечные системы, в которых вместо остекленных коллекторов применяют неостекленные абсорберы солнечной радиации и теплоты окружающего воздуха. Абсорберами служат массивные наружные стены, стены из панелей типа "сэндвич", покрытия ("энергетические крыши"), штабеля из плоских теплообменников, подобных стальным штампованным радиаторам, металлические заборы из труб и штампованных элементов, ограды балконов [2]. Через абсорберы циркулирует незамерзающий теплоноситель.

Достоинства абсорберов: поглощение теплоты не только в дневное, но и в ночное время, компактность. Стены и бетонные подпорные стенки одновременно выполняют функции тепловых аккумуляторов. Съем теплоты с 1 м<sup>2</sup> бетонного абсорбера достигает 90 Вт, а с 1 м<sup>2</sup> панели типа "сэндвич" 100 Вт, в том числе часть теплоты поступает из помещения. На основании экспериментов [2] показано, что коэффициенты теплопоглощения абсорбера, Вт/ (м<sup>2</sup>·°С), присоединенного к холодильной машине, могут достигать следующих значений:

Таб. 1: Коэффициенты теплопоглощения абсорбера солнечных систем теплохладоснабжения, Вт/ (м<sup>2</sup>·°С).

Параметр $\Delta t = t_n - (t_1 + t_2)/2$	1	2	4	6	8
Энергетическая крыша, легкая, вентилируемая снизу	80	60	40	10	-
То же, массивная, невентилируемая.	45	40	35	30	25

Здесь  $\Delta t$  — разность температуры наружного воздуха и средней температуры в солнечных абсорберах. Теплосъем с энергетической вентилируемой крыши в ночное время, Вт/м<sup>2</sup>, при наружной температуре 0°С равен 125, при +10°С - 190 Вт/м<sup>2</sup>.

В Галле (Германия) при испытании системы с энергетической крышей и АБХМ [2] установили, что с ее помощью удастся извлекать в 3 раза больше теплоты, чем при остекленном коллекторе. По сравнению с обычными испарителями холодильных машин применение абсорберов позволяет извлекать из окружающей среды на 10÷15% больше теплоты, без использования вентиляторов и устройств для оттаивания инея, при этом возрастает коэффициент преобразования.

В мире ежегодное производство составляет 10000 штук. Наибольшего успеха в развитии солнечного охлаждения с абсорбционными машинами добилась Япония. С прошлого века в Японии действует национальная программа под названием «Лунный свет». Уже в 1988 году на предприятиях Японии работало более 30 крупных абсорбционных бромистолитиевых теплонасосных установок. Ряд крупных АБХМ (тепловой мощностью от 5 до 25 МВт) японского производства используется в Европе в системах теплохладоснабжения зданий.

Практически для уменьшения теплотеря коллекторов целесообразно встраивать их непосредственно в ограждения зданий. При этом коллекторы одновременно обеспечивают теплоизоляцию ограждений. Панели коллекторов соединяются трубопроводами по попутной схеме (с параллельным движением теплоносителя по магистралям). Трубопроводы по возможности прокладывают в техническом этаже (чердаке) и обязательно покрывают тепловой изоляцией. Это необходимо, т.к. с увеличением перепада температур между теплоносителем и окружающим воздухом КПД коллектора снижается. Это обстоятельство затрудняет ее использование в солнечных системах теплоснабжения, оборудованных абсорбционными бромисто- и хлористолитиевыми машинами. С уменьшением температуры теплоносителя, поступающего в генератор абсорбционной холодильной машины, снижается ее холодопроизводительность (рис. 3) [3] и изменяется удельная площадь поверхности солнечного коллектора, приходящаяся на единицу холодопроизводительности (табл. 2).



Выбор площади солнечного коллектора и расчетной производительности АТНУ представляет собой решение оптимизационной задачи для условий каждого отдельно проектируемого объекта. В переходный период года и частично холодный период абсорбционные холодильные машины могут работать в режиме отопления. В этом случае отключается градирня и система отопления питается водой, проходящей через абсорбер и конденсатор. Поскольку температура воды не превышает  $70^{\circ}\text{C}$ , то для предотвращения перерасхода металла, в качестве отопительных теплообменников целесообразно использовать обогреваемые полы, вентиляторные и эжекционные доводчики.

В Японии 1977 г. в г. Хираката были проведены испытания установки теплохладоснабжения в жилом двухэтажном доме площадью  $118,5 \text{ м}^2$  [3]. На его крыше были размещены солнечные трубчато-вакуумированные коллектора общей площадью  $46,6 \text{ м}^2$  а на южной стене — коллектор из таких же труб площадью  $7,4 \text{ м}^2$ . Получаемая теплота используется в холодный период года для отопления и горячего водоснабжения, а в теплый период года — для горячего водоснабжения и кондиционирования воздуха (рис. 2). В системе установлены: электрический теплогенератор 4, работающий в пасмурные и холодные дни, экспериментальная абсорбционная бромистолитиевая холодильная машина фирмы "Санио", вентиляторные конвекторы с электроприводами, работающие зимой на воде с температурой  $45^{\circ}\text{C}$ , а летом на воде с температурой  $10^{\circ}\text{C}$ . Применение вентиляторных конвекторов вызвано стремлением интенсифицировать теплообмен при низкой температуре горячей воды ( $45\div 50^{\circ}\text{C}$ ). К генератору абсорбционной машины подводится вода от солнечных коллекторов со сравнительно низкой температурой от  $75^{\circ}\text{C}$  до  $95^{\circ}\text{C}$ . КПД коллектора имеют значения, приведенные в табл. 2.

Таб.2. КПД солнечных трубчато-вакуумированных коллекторов [3].

Период года	Разность температур воды и воздуха, $^{\circ}\text{C}$				
	0	0,25	0,5	75	100
Лето	0,75	0,74	0,7	0,6	0,45
Зима	0,68	0,61	0,61	0,5	0,3

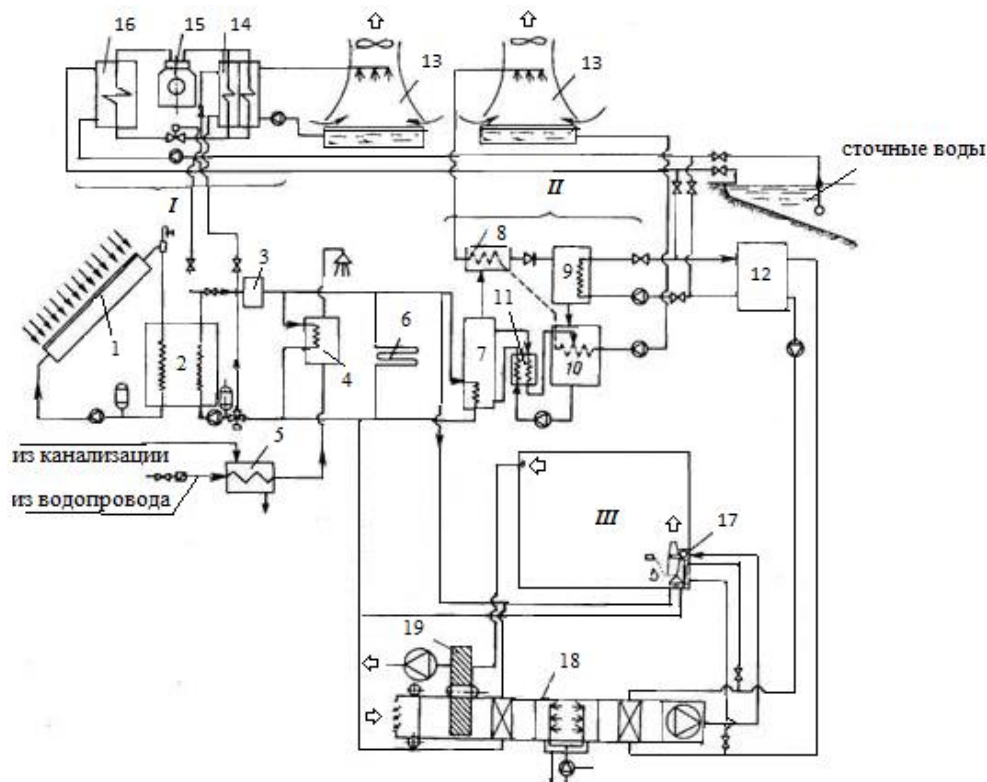
В другом случае [3] была разработана система теплохладоснабжения с плоскими солнечными коллекторами. Генератор бромистолитиевой холодильной машины питается горячей водой от коллектора с температурой  $75^{\circ}\text{C}$  и выше. Температура охлажденной воды, поступающей в кондиционер,  $9^{\circ}\text{C}$ . Экспериментальные данные по изменению производительности и холодильного коэффициента машины приведены в таблице 3.

Таб.3. Энергетические характеристики АБХМ [3]

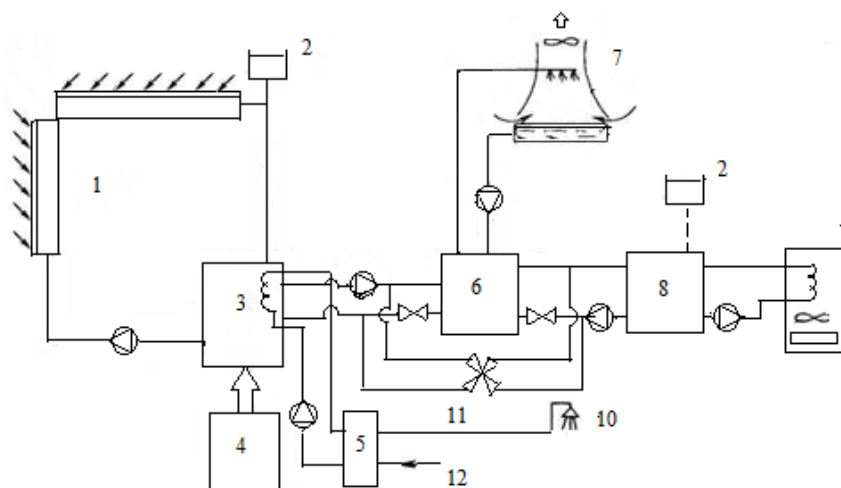
Температура подводимой воды, $^{\circ}\text{C}$	75	85	95
Производительность, кВт	4	6	6,8
Коэффициент трансформации	0,55	0,65	0,6

Таб. 4. Изменение холодопроизводительности абсорбционных холодильных машин и удельной площади солнечного коллектора в зависимости от температуры воды, питающей генератор [3].

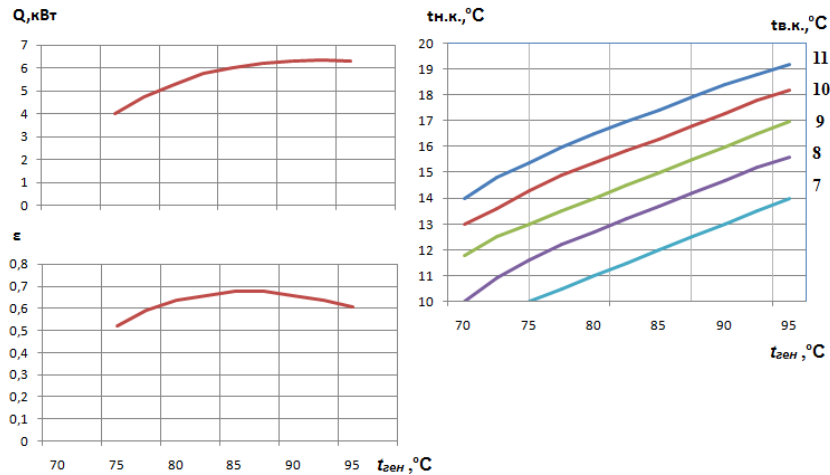
$t_{\text{ген}}, ^{\circ}\text{C}$	$q_x, \%$		$f_x, \%$	
	БЛХМ	ВАХМ	БЛХМ	ВАХМ
120	—	100	—	121
110	—	101	—	113
100	—	102	—	105
90	—	102	—	100
85	100	—	100	—
80	99,5	96,8	100	125
75	88,4	—	100	—
70	86,5	76,6	103	200
65	72,4	50	112	—
60	48,2	—	180	—



**Рис. 1.** Принципиальная схема солнечной гибридной системы теплоснабжения: I — компрессионная холодильная машина — тепловой насос; II — абсорбционный теплотрансформатор; III — помещение; 1 — солнечный коллектор; 2 — тепловой аккумулятор; 3 — дополнительный генератор тепла (может быть включен и параллельно солнечному коллектору); 4 — теплообменник горячего водоснабжения (может питаться теплом и от собственного коллектора); 5 — утилизатор тепла сточных вод для подогрева воды из водопровода; 6 — система отопления; 7 — генератор абсорбционной холодильной машины; 8 — конденсатор абсорбционной холодильной машины; 9 — испаритель; 10 — абсорбер; 11 — теплообменник; 12 — аккумулятор холодной воды; 13 — радиаторы; 14 — двухкорпусный конденсатор водяного охлаждения; 15 — компрессор; 16 — испаритель компрессионной холодильной машины — теплового насоса, использующего тепло сточных вод; 17 — эжекционный доводчик; 18 — центральный кондиционер; 19 — регенеративный вращающийся утилизатор тепла и холода удаляемого воздуха



**Рис. 2.** Схема солнечной системы теплоснабжения с абсорбционной бромистолитиевой холодильной машиной: 1 - солнечный коллектор (температура воды летом 90°C, зимой 60°C); 2 - расширительный бак; 3- тепловой водяной аккумулятор первой ступени вместимостью 1 м<sup>3</sup>; 4 - электрический теплогенератор мощностью 10 кВт; 5 - теплогенератор для догрева воды в системе горячего водоснабжения, 6 - абсорбционная бромистолитиевая холодильная машина (охлаждающая воду от 15 до 10°C, расход воды 1200 л/ч, расход воды через радиаторно 3820 л/ч,  $t_{вк} = 35 \div 31^\circ\text{C}$ ; расход воды через коллектор 1850 л/ч, ( $t_{н1} = 85 \div 80^\circ\text{C}$ ); 7 - вентиляционная радиатор; 8 - тепловой аккумулятор второй ступени, вместимостью 8 м<sup>3</sup>; 9-вентиляторный конвектор; 10 - сеть трубопроводов системы горячего водоснабжения; 11- четырехходовой клапан; 12-подводка водопроводной воды



**Рис. 3.** Типичные характеристики бромистолитиевой холодильной машины закрытого типа *a* — холодопроизводительность и холодильный коэффициент в зависимости от начальной температуры воды  $t_{в.н.}$ , °С, и температуры теплоносителя, поступающего в генератор  $t_{ген.}$ , °С (расход охлаждающей воды - 3200 л/ч; расход воды, поступающей в генератор - 1650 л/ч; расход охлажденной воды - 1200 л/ч); *б* — зависимость температуры охлажденной воды  $t_{в.к.}$  от ее начальной температуры  $t_{в.н.}$  и  $t_{ген.}$  (конденсатор охлаждается водой с температурой 24°C)

Удельная площадь плоских коллекторов  $f_k$  имеет оптимальное значение при  $t_{ген} = 85 \pm 90^\circ\text{C}$ . При низшей температуре возрастают капитальные затраты и на коллектор, и на холодильную машину, а при более высокой температуре снижаются затраты на холодильную машину, но возрастают на коллектор, так как возникает потребность в увеличении его прочности и в дооборудовании устройствами для слежения за солнцем.

**Таб. 5:** Реальные и идеальные холодильные коэффициенты абсорбционных машин с солнечными коллекторами [3].

Солнечный коллектор	$t_{ген}, ^\circ\text{C}$	$t_0, ^\circ\text{C}$	$t_{э.к.}, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon_p$ машины		$\varepsilon_k$ по Карно
				БЛХМ	ВАХМ	
Плоский	77	4	38	0,5	0,1	0,9
			16	0,7	0,1÷0,2	4,4
С концентратором	104	4	38	0,6	0,2	1,4
			16	0,6	0,2	5,9

Из таблиц 4 и 5 видны теплотехнические преимущества бромисто-литиевых холодильных машин (БЛХМ), для работы которых требуется более низкая температура теплоносителя после коллектора и меньшая площадь коллектора, чем для водоаммиачных машин (ВАХМ). Кроме того БЛХМ можно располагать внутри обслуживаемых зданий, в то время как ВАХМ нужно выносить в отдельные здания или пристройки, соблюдая повышенные санитарно-гигиенические и противопожарные требования. БЛХМ свойственны повышенные холодильные коэффициенты и меньшие затраты электрической энергии на насосы. К недостаткам этих машин относится опасность кристаллизации раствора при высоких концентрациях (температура конденсации должна составлять не менее 24°C) и повышенная стоимость, вызванная изготовлением их из высококачественной стали и сравнительно высокой стоимостью бромистого лития.

**Таб. 6.** Техничко-экономическое сравнение различных систем теплоснабжения [4]

Топливо для обогрева	Тип оборудования	Коэффициент использования первичного топлива	Стоимость единицы топлива	Стоимость 30 кВт час тепловой энергии
Нагревание тепловым насосом				
Электрическая энергия	ПТНУ с источником тепла от грунта	КОП = 3.5	\$ 0.085 / kWh	\$0.729
Электрическая энергия	ПТНУ с источником тепла от наружного воздуха	КОП = 2.2	\$ 0.085 / kWh	\$1.159
Солнечная энергия	Абсорбционная холодильная машина с солнечными коллекторами	КОП = 0.75	\$ 0.000 / kWh	\$ 0.000
Нагревание электричеством				
Электрическая энергия	Нагреватель сопротивления	КОП = 1.0	\$ 0.085 / kWh	\$2.550

Нагревание природным газом				
Газ природный	Печь или котел	КПД = 80%	\$0.055 / м <sup>3</sup>	\$2.074
Нагревание жидким топливом				
Мазут	Печь или котел	КПД = 80%	\$0.063 / литр	\$2.333

Абсорбционный тепловой насос для выработки 100 кВт час потребляет не более 1.5 кВт час электрической энергии. Эта энергия расходуется на привод насоса раствора, и двух водяных циркуляционных насосов. Указанное количество электроэнергии можно получить за световой день от фотоэлектрической солнечной панели мощностью 100-120 Ватт.

Экономическая целесообразность применения тепловых насосов показана на примере сравнения различных систем нагревания (таблица 6). Расчет произведен для жилого дома площадью 235 м<sup>2</sup>. Требуемое количество теплоты для обогрева (охлаждения) такого дома – 30 кВт час.

Как видно из данной таблицы, использование абсорбционного теплового насоса с источником солнечной тепловой и электрической энергии позволяет полностью отказаться от углеводородного топлива и сетевой электроэнергии. Тепловую и электроэнергию получают с помощью комбинированного солнечного коллектора. Стоимость абсорбционного теплового насоса производительностью 30 кВт, содержащего градирню для охлаждения воды, составляет \$8,000. Стоимость одного комбинированного солнечного коллектора вместе с аккумуляторами тепловой и электрической энергии составляет \$600-700. Система обогрева (охлаждения) с аппаратами для нагрева (охлаждения) воздуха для дома площадью 235 м<sup>2</sup> стоит \$1,000-1,200.

Применение абсорбционного теплового насоса с источником от солнечной энергии окупается за 4-4.5 года. При этом срок службы составляет 25 лет.

Как показывает приведенный анализ применение в республике энергоэффективной технологии солнечного охлаждения с абсорбционными холодильными машинами в плане экономии органических энергоресурсов весьма перспективно в жилом комплексе.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Р.А.Захидов, А.И.Анарбаев. Перспективы развития солнечных систем кондиционирования воздуха в зданиях. Международный журнал "Гелиотехника". №4. 2013. сс. 69-74. [2]. Böbel A. Energydach. -Fassade.-Zaun.-Stapel.Systeme, Stand und Trend der Entwicklung, Beispiele, Wirtschaftlichkeitsfragen. Heizung, Lüftung, Haustechnik Klimatisierung. 1982. №6. S. 203-209. [3]. Ward D.S., Lof G.O.G., Uesaki T. Cooling subsystems design in CSU solar house 111. Solar Energy, 1978, v. 20. [4]. Wilbur J, Mancini T. R. A comparison of solar absorption air conditioning systems. — Solar Energy, 1976, v. 18. pp. 251-263.

## АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ СОЛНЕЧНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПОРЦИОННОЙ ПОДГОТОВКИ ГОРЯЧЕЙ ВОДЫ

Р.Х.Рахимов<sup>1</sup>, С.Ф.Эргашев<sup>2</sup>, Ю.Мамасодиков<sup>2</sup>, У.Ригматов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт материаловедения научно-производственного объединения «Физика-Солнца» Академии наук Республики Узбекистан.

<sup>2</sup>Ферганский политехнический институт Министерства высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан.

Автоматизированное солнечное устройство для порционной подготовки горячей воды применяются в системах горячего водоснабжения жилых домов, объектов административно-бытового, производственного и сельскохозяйственного назначения.

Основными недостатками существующих солнечных устройств являются не эффективное использование аккумуляции тепла в течение суточной активности Солнца и интенсивное накопление накипи на внутренних поверхностях теплоприёмников солнечных тепловых коллекторов в процессе эксплуатации.

Техническим результатом использования автоматизированных солнечных устройств для порционной подготовки горячей воды является повышение эффективности и надежности. Повышение эффективности устройства достигается путем улучшения режима тепловой аккумуляции, так как не используемая потребителем порция горячей воды, совершая повторный цикл поступления в солнечный тепловой коллектор, передаёт часть своей энергии аккумулятору теп-

ла. Повышение надёжности солнечного устройства достигается за счёт увеличения скорости периодического съёма теплосолнечного излучения порциями, путём применения отбора воды по автоматически заданным показателям температур, обеспечивающим предотвращение накопления накипи во внутренних поверхностях рабочих каналов солнечного теплового коллектора.

Автоматизированное солнечное устройство для порционной подготовки горячей воды работает следующим образом.

Солнечная радиация одновременно воздействуют на солнечный коллектор теплоты *СКТ* и фотоэлектрическую батарею *ФЭБ*. Энергия солнечной радиации, падающая на фоточувствительную поверхность фотоэлектрической батареи *ФЭБ* преобразуют её в электрическую, которая передаётся через зарядное устройство *ЗУ* в аккумулятор электрической энергии *АЭЭ*. Аккумулярированная электрическая энергия от фотоэлектрической батареи *ФЭБ* питает систему управления *СУ*. Когда температура воды в солнечном тепловом коллекторе *СКТ* достигает заданного максимального значения  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  датчик температуры горячей воды *ДТ* формирует соответствующий сигнал, который подаётся на вход системы управления *СУ*. В результате, которого на первом выходе системы управления *СУ* формируется управляющий сигнал и подаётся на вход первого электрического клапана *ЭК 1*. Под действием управляющего сигнала электрический клапан *ЭК 1* открывается и поток холодной воды, под воздействием давления системы городского водоснабжения, поступает через *Смеситель* в солнечный коллектор теплоты *СКТ*, одновременно перемещая нагретую, до заданного значения температуры, порцию горячей воды к накопителю потребителя *ПГВ*.

В процессе смешивания горячей и холодной воды, температура воды в солнечном тепловом коллекторе начинает снижаться и когда она достигает заданного минимального значения  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ , датчик температуры горячей воды *ДТ* формирует соответствующий сигнал, который подаётся на вход системы управления *СУ*. В результате, которого на первом выходе системы управления *СУ* формируется управляющий сигнал и подаётся на вход первого электрического клапана *ЭК 1*. Под действием управляющего сигнала электрический клапан *ЭК 1* закрывается, и поступление потока холодной воды прекращается. Температура горячей воды в солнечном тепловом коллекторе *СКТ* начинает возрастать. Когда температура воды в солнечном тепловом коллекторе *СКТ* достигает заданного максимального значения  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  датчик температуры горячей воды *ДТ* формирует соответствующий сигнал, который подаётся на вход системы управления *СУ*. В результате, которого на первом выходе системы управления *СУ* формируется управляющий сигнал и подаётся на вход первого электрического клапана *ЭК 1*. Под действием управляющего сигнала электрический клапан *ЭК 1* открывается и поток холодной воды, под воздействием давления системы городского водоснабжения, поступает через *Смеситель* в солнечный коллектор теплоты *СКТ*, одновременно перемещая нагретую, до заданного значения температуры, порцию горячей воды к накопителю потребителя *ПГВ*. Далее цикл повторяется.

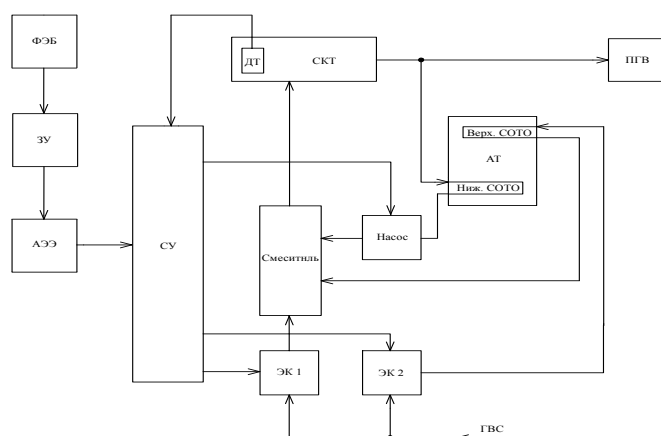


Рис.1. Принципиальная схема автоматизированного солнечного устройства для порционной подготовки горячей воды.

С целью эффективного использования энергии солнечного излучения в систему управления *СУ* устройства дополнительно введены специальные команды для двух режимов.

Когда скорость роста показателей температура воды в солнечном тепловом коллекторе *СКТ* начинает превышать заданную датчик температуры воды *ДТ* формирует соответствующий сигнал, который подаётся на вход системы управления *СУ*. В результате, которого на третьем выходе системы управления *СУ* формируется управляющий сигнал и подаётся на вход циркуляционного *Насоса* и запускает его на заданный промежуток времени. Нагретая порция горячей воды начинает поступать в нижний теплообменник *Ниж. СОТО* аккумулятора тепла *АТ*. Далее работа циркуляционного *Насоса* прекращается, а порция нагретой воды, которая находится в нижнем теплообменнике *Ниж. СОТО* передает часть своего тепла аккумулятора тепла *АТ*. Затем опять по сигналу системы управления *СУ* происходит запуск циркуляционного *Насоса* и порция воды находящаяся в нижнем теплообменнике *Ниж. СОТО* проходя через *Смеситель*, опять подаётся в солнечный тепловой коллектор *СКТ*.

В тех случаях, когда скорость роста показателей температура воды в солнечном тепловом коллекторе *СКТ* становится меньше заданной, датчик температуры воды *ДТ* формирует соответствующий сигнал, который подаётся на вход системы управления *СУ*. В результате, которого на втором выходе системы управления *СУ* формируется управляющий сигнал и подаётся на вход второго электрического клапана *ЭК 2*. Под действием управляющего сигнала электрический клапан *ЭК 2* открывается и поток холодной воды, под воздействием давления системы городского водоснабжения, поступает в верхний теплообменник *Верх. СОТО*. Нагретая в аккумуляторе тепла *АТ* порция холодной воды через *Смеситель* поступает в солнечный тепловой коллектор *СКТ*. Далее цикл повторяется.

В зависимости от нагрузки потребителя подбираются следующие основные элементы АСУППГВ: накопитель потребителя, площадь солнечного теплового коллектора (коллекторов), аккумулятор тепла, площадь верхнего и нижнего теплообменника.

Результаты измерений отображаются и регистрируются в трендах системы специальной компьютерной программы «TRACE MODE» (рис.2).

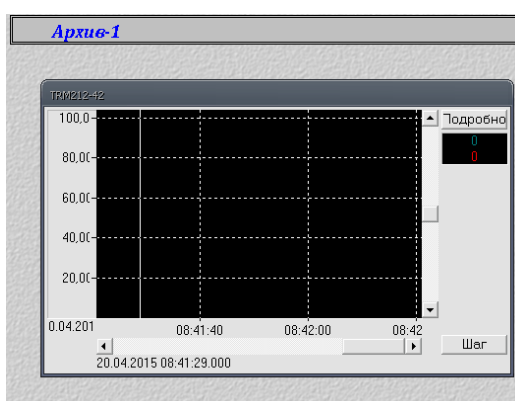


Рис. 2. Тренды автоматизированной системы по архивным данным.

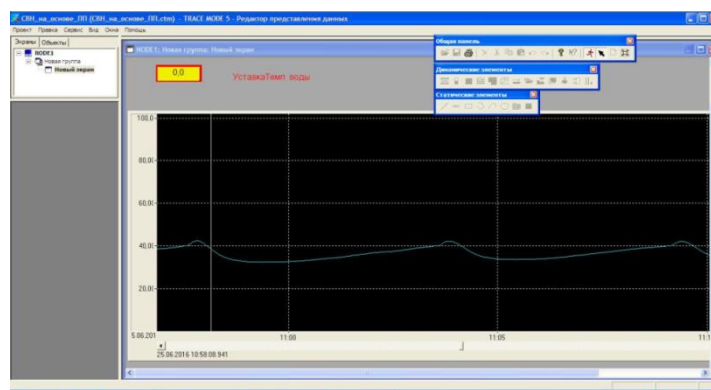


Рис. 3. Окно просмотра результатов эксперимента.

На рис. 3 показана диаграмма температурных изменений теплоносителя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение данной системы даёт возможность значительного снижения интенсивного накопления накипина внутренних поверхностях теплоприёмников солнечных тепловых коллекторов в процессе их эксплуатации.

Позволяет эффективно и оптимально использовать энергию солнечной радиации.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Аллаяров О.Н., Сургучёв А.В., Абдурахмонов С.М., Хен В.П. Применение TRACE MODE для создания автоматизированной системы контроля работы промышленных компрессоров. Журнал Промышленные контроллеры АСУ. №3, 2003 г. (Россия), стр. 27-28. [2] Абдурахмонов С.М. О методах обработки экспериментальных данных в физических измерениях. Сборник тезисов III-Международной конференции по оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро- и наноструктурах, 14-15 ноября 2014 год, Фергана. стр. 90-92. [3] Мамасадилов Ю., Абдурахмонов С.М., Умаралиев Н. Оптоэлектронное двухволновое устройство для измерения концентрации метана. ФерПИИТЖ 2014, №4, стр. 130-132.

## СИСТЕМЫ ТЕПЛОВОГО АККУМУЛИРОВАНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В СОЛНЕЧНО-ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ

А.Э.Хаитмухамедов, А.Ю.Усманов, Б.Б.Болиев

*Международный Институт Солнечной Энергии*

*Из-за мирового роста численности населения и индустриализации, резко возрастает спрос на энергию. Возобновляемые источники энергии, которые могут быть получены из природных ресурсов, таких как ветер, солнечная энергия, биомасса и геотермальная энергия, поощрялись многими странами из-за преимуществ быть устойчивым и не способствовали мировым выбросам парниковых газов CO<sub>2</sub>. Тем не менее, существует несоответствие между большинством поставок возобновляемых источников энергии и спроса со стороны потребителей. Простая интеграция аккумуляции тепловой энергии (АТЭ) делает концентрирующую солнечную энергию (КСЭ) диспетчеризованной и уникальной среди всех других возобновляемых энергогенерирующих альтернативных источников. Технология КСЭ вырабатывает электроэнергию за счет концентрации пучка солнечного излучения на небольшой площади, где теплоноситель нагревается, и эта энергия в конечном счете передается в пар.*

*На сегодняшний день солнечно-топливные электростанции (СТЭС) с параболоцилиндрическими концентрирующими (ПЦК) установками являются наиболее перспективными в условиях дефицита органического топлива в мировом энергетическом балансе. В данной работе рассмотрены технико-экономические параметры аккумуляции тепловой энергии (АТЭ) на основе 4 различных материалов и выявлен наиболее оптимальный материал для аккумуляции тепловой энергии в СТЭС в климатических условиях нашей Республики.*

В предыдущих работах, нами были проанализированы СТЭС на основе ПЦК без системы АТЭ для климатических условий нашей страны [1]. Продолжая работу в этой области, мы рассмотрели несколько вариантов СТЭС на основе ПЦК с системой АТЭ, сравнили их и предложили наиболее оптимальный для нашей Республики.

Технология АТЭ решает временное несоответствие между потреблением солнечной энергии и спросом на электроэнергию, что обеспечивает явное преимущество для станций СТЭС на основе ПЦК по сравнению с другими возобновляемыми источниками энергии. Кроме того, аккумуляция электрической энергии с использованием батареи не оказалось экономически выгодным. В зависимости от суточного и годового изменения солнечной радиации и профиля спроса на электроэнергию, СТЭС, интегрированные с системами аккумуляции тепла, могут иметь различные операционные стратегии, а система хранения может предлагать следующие функции [2,3]: (1) смягчение коротких колебаний во время переходных погодных условий, например пасмурные периоды; (2) смещение периода генерации от пиковых часов солнечной инсоляции до пиковых часов потребности в мощности; (3) расширение периода генерации когда солнечная энергия недоступна, что улучшает годовой коэффициент мощности и требует большего солнечного поля, чем система без хранения.



Ниже представлена таблица, которая отражает различие цен при строительстве СЭС на основе ПЦК с системой аккумуляции и без.

Таблица 1. Цены СЭС с использованием ПЦК

С аккумуляцией	Без аккумуляции
1 МВт - 10 млн USD	1 МВт - 6/7 млн USD
3 МВт - 23 млн USD	3 МВт - 19/20 млн USD
10 МВт - 60 млн USD	10 МВт - 50 млн USD
50 МВт - 250 млн USD	50 МВт - 180 млн USD
100 МВт - 400 млн USD	100 МВт - 320 млн USD

Исследования и спроектированные приложения определили ряд потенциальных жизнеспособных подходов системы АТЭ для солнечных электростанций. Все различные подходы обладают технологиями, производительностью и соотношением затрат, которые необходимо учитывать при исследованиях системного проектирования и оптимизации. На рис. 1 показана принципиальная схема непрямой (косвенной) двухрезервуарной системы аккумуляции тепловой энергии. В случае косвенной классификации система требует два теплоносителя, первая поглощает энергию от солнечного света в солнечном поле, а вторая жидкость, передает поглощённую и накопленную энергию в традиционные парогенерирующие теплообменники на силовом блоке. Для передачи энергии от солнечного поля теплоносителю к силовому блоку и теплоносителю АТЭ требуется другой теплообменник или набор теплообменников. Эти дополнительные теплообменники повышают стоимость и снижают общую эффективность установки, но в то же время относительно легко контролируются. Опция краткосрочного теплового аккумуляции для ПЦК технологий распространяет теплоноситель "горячее масло", например, Therminol VP-1, в солнечном поле и передаёт собранное тепло через теплообменники другому теплоносителю (например, расплавленная соль) используемая в двух резервуарной системе теплового аккумуляции. «Холодный» бак хранит и буферизирует более низкотемпературную текучую среду после блока питания и питает сторону подачи солнечного поля. После поглощения солнечной энергии она либо подается непосредственно в теплообменники силового блока, либо / и хранится (через промежуточный теплообменник типа «масло-соль») в «горячем» резервуаре для последующего использования, когда это требуется. Этот тип косвенной, двухрезервуарной системы была использована на солнечной электростанции SolarTwo, построенной и эксплуатируемой в середине 1990-х годов. [4]

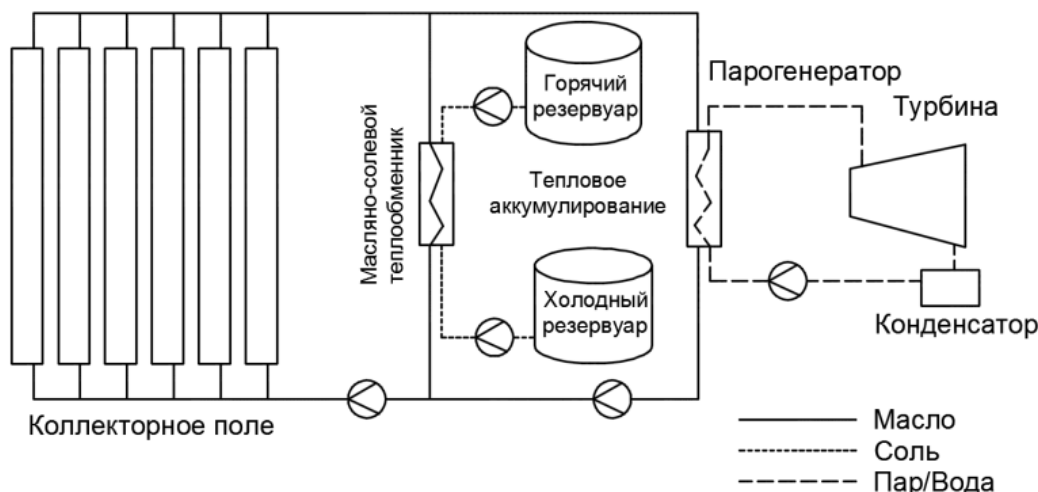


Рисунок 1 - Непрямая (косвенная) схема аккумуляции тепловой энергии с двумя резервуарами

Текущая базовая конструкция станций Солнечных Электрических Систем Генерации (СЭСГ) используют теплоноситель Therminol VP-1 в коллекторном поле. Therminol VP-1 имеет низкую температуру замерзания ( $12^{\circ}\text{C}$ ) и стабилен до примерно  $400^{\circ}\text{C}$ , что позволяет станциям использовать более высокое давление, более высокую температуру и более эффективные турбины Ренкина. Однако, трудно использовать этот теплоноситель в качестве среды для аккумуляции тепла, потому что его давление пара слишком велико, для того, чтобы практически аккумулятировать его в любом значительном количестве при более высоких температурах. Therminol VP-1 является относительно дорогим, и представляет собой проблему окружающей среды, при утечки.

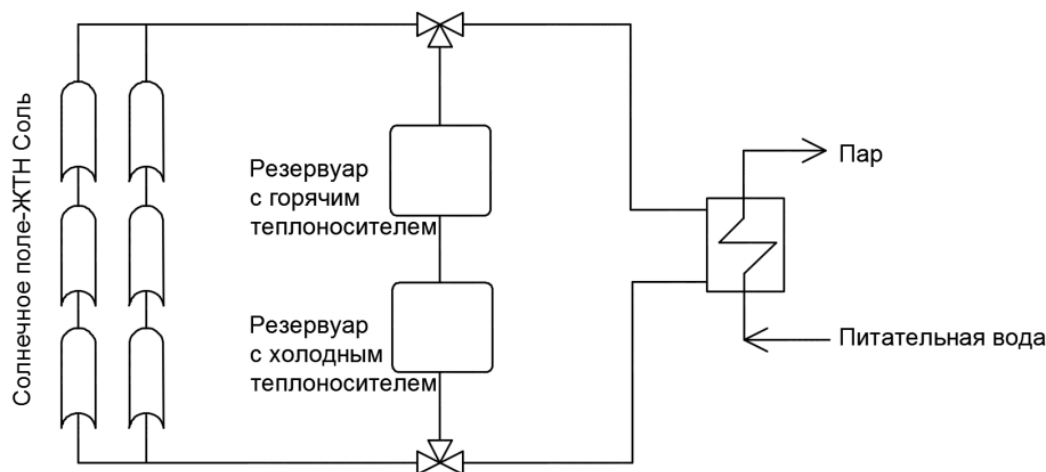


Рисунок 2 - Прямая двухрезервуарная схема АТЭ

Вместо использования косвенной конфигурации системы АТЭ, другой вариант - создание «прямой» двухрезервуарной системы АТЭ (рис. 2). Это позволяет использовать одну и ту же жидкость как в солнечном поле, так и в системе аккумулирования тепла, что устраняет необходимость в дорогостоящих теплообменниках. В рамках Инициативы Trough USA, отраслевая / лабораторная команда во главе с Kearney and Associates [5,6] оценила возможность использования неорганических расплавленных солей как в теплоносители солнечного поля, так и в среде АТЭ в ПЦК станциях. Такой подход исключает использование дорогостоящих теплообменников типа «масло-соль». Кроме того, солнечное поле может эксплуатироваться при более высоких температурах на выходе (от 450 до 500 °С), чем это возможно в настоящее время с Therminol VP-1, что увеличивает эффективность энергетического цикла и дополнительно снижает стоимость аккумулирование тепла. Основным недостатком большинства составов расплавленных солей являются относительно высокие точки замерзания. В связи с этим необходимо проявлять большую осторожность, чтобы убедиться, что теплоноситель соль не замерзает в солнечном поле. Более высокая температура на выходе также имеет некоторые негативные последствия, в том числе более высокие потери тепла на солнечном поле, опасения по поводу долговечности селективного покрытия на приемниках ПЦК и необходимость в более дорогих трубопроводах и материалах, чтобы выдерживать повышенные рабочие температуры. В целом, первоначальные результаты для этого прямого расплавленного теплоносителя соли и концепции аккумулирования тепла выглядят обнадеживающими, главным вопросом является относительно высокая точка замерзания расплавленных солей.

Другим вариантом потенциально значительного снижения затрат на тепловую энергию является использование прямой, однорезервуарной термоклинной системы аккумулирования с расплавленными нитратами солей в качестве прямого теплоносителя (рис. 3). В термоклинной системе аккумулирования используется один резервуар, который лишь незначительно больше, чем один из резервуаров в двухрезервуарной системе аккумулирования тепла (например, использующийся в SolarTwo [4]). При использовании горячей и холодной текучей среды в одном резервуаре система термоклинного аккумулирования полагается на тепловую плавучесть для поддержания термической стратификации. В качестве основной среды для аккумулирования среды выступает недорогой материал наполнителя, который используется для уплотнения данного резервуара. Наполнитель вытесняет большую часть расплавленной соли, которую можно использовать в сопоставимой двухрезервуарной системе. Исследования показали, что однорезервуарные термоклинные системы аккумулирования могут предложить вариант с наименьшими затратами энергии, которые дают потенциально уменьшенные капитальные затраты на строительство резервуара (и связанные с ними расходы на насосы, клапаны и трубопроводы). [5,6,7]

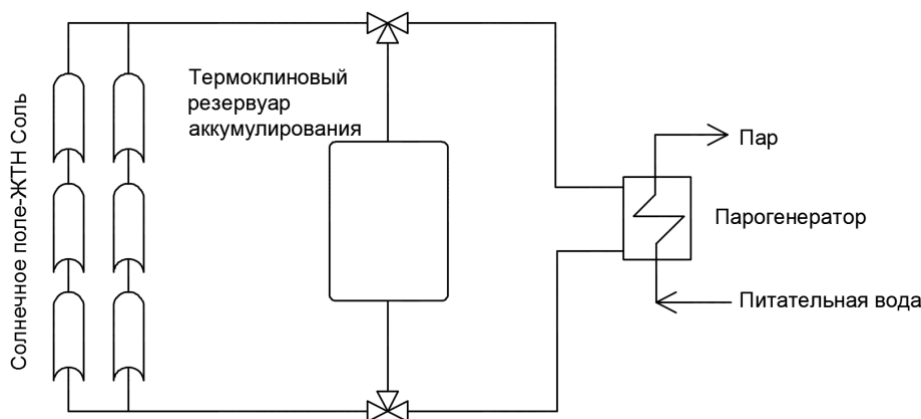


Рисунок 3 - Схема прямого термоклинного АТЭ

В настоящее время, в Республике планируется строительство как Фотоэлектрических Станций (ФЭС), так и СТЭС на основе ПЦК с АТЭ и без. Опираясь на выше приведенный анализ, можно утверждать, что для Республики Узбекистан строительство СТЭС на основе ПЦК с АТЭ с однорезервуарной термоклинной системой аккумуляции является экономически более привлекательнее, так как затраты, связанные со строительством данной системы оцениваются на 35% ниже систем аккумуляции с двумя резервуарами.

#### ЛИТЕРАТУРА

[1] Н.Р.Авезова, А.Э. Хаитмухамедов, А.Ю. Усманов, Б.Б. Болиев Солнечно-тепловые электростанции в мире: опыт разработки и эксплуатации//Гелиотехника, 2016, №4, стр. 63-69. [2] U.S. Department of Energy. 2014 SunShot initiative portfolio book: concentrating solar power. Washington, DC: Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, U.S. Department of Energy; 2014. [3] Kuravi S, Trahan J, Goswami DY, Rahman MM, Stefanakos EK. Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants. Prog Energy Combust Sci 2013; 39:285–319. [4] Kelly, B., “Lessons Learned, Project History, and Operating Experience of the Solar Two Project,” SAND2000-2598, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, November 2000. [5] USA Trough Initiative, “Task 2 Report: Thermal Storage for Rankine Cycle Power Plants,” Nexant LLC under Task Order Authorization Number KAF-9-29765-09, San Francisco, California, February 8, 2000. [6] Kearney & Associates, “Engineering Evaluation of a Molten Salt HTF in a Parabolic Trough Solar Field, Task 6 Report: Final System Performance and Cost Comparisons,” NREL Contract No. NAA- 1-30441-04, August 20, 2001. [7] Price, H., “A Parabolic Trough Solar Power Plant Simulation Model,” Proceedings of ISES 2003: International Solar Energy Conference, March 2003.

## РАСЧЕТ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АКТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА САМОДРЕНИРУЕМОГО ГЕЛИОКОНТУРА ОТОПИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Ю. Рашидов

Ташкентский архитектурно-строительный институт,  
г.Ташкент, 100011, ул.Навои, д.13, Республика Узбекистан, [rashidov\\_yus@mail.ru](mailto:rashidov_yus@mail.ru)

#### Аннотация

Проведены экспериментальные исследования гидродинамических характеристик активного элемента самодренируемого гелиоконтра отопительной системы, выполненного в виде сужающего устройства - трубы Вентури с высокой степенью сужения потока от 2 до 5 в области со значительным проявлением вязкостного сопротивления. Результаты экспериментов обработаны в критериальной форме, общий вид которой получен на основе метода анализа размерностей, и сопоставлены с данными других авторов. Полученные критериальные зависимости могут быть использованы для расчёта гидродинамических характеристик активного элемента самодренируемого гелиоконтра отопительной системы.

**Ключевые слова:** самодренируемый гелиоконтур, активный элемент, труба Вентури, гидравлическое сопротивление, коэффициент местного сопротивления, опытный образец, гидравлического стенд, критерий подобия, результаты испытаний, критериальная зависимость.

В работах(Рашидов, 2013, 2014, 2017)для защиты солнечных коллекторов от замерзания в зимний период приведено описание, принцип работы, энергетическая эффективность и расчёт самодренлируемого гелиоконтра водяной отопительной системы с активным элементом в виде сужающего устройства - трубы Вентури.

Цель настоящей работы – получение зависимостей для расчета гидродинамических характеристик активного элемента самодренлирующегося гелиоконтра отопительной системы.

Расчет гидравлического сопротивления активного элемента - трубы Вентури при известных ее геометрических размерах является сложной задачей. Механизм действия сил сопротивления настолько сложен, что до настоящего времени не удалось найти точного метода вычисления коэффициента сопротивления  $\zeta$ ; в технических расчетах чаще всего приходится пользоваться значениями коэффициентов сопротивления, приводимыми в литературе в виде средних цифр или в виде таблиц опытных данных для различных сочетаний геометрических размеров перехода. Единственно возможный способ расчета  $\zeta$  для трубы Вентури в подобном случае состоит в экспериментальном определении необходимых данных с последующим обобщением результатов в критериальной форме.

Выведем критериальное уравнение для потерь давления в трубе Вентури методом анализа размерностей.

Потери давления в трубе Вентури можно представить в виде степенной функции от следующих независимых переменных:

$$p_n = \varphi(W^a, \rho^b, \mu^c, d^d, D^e, \delta^f, \ell^K). \quad (1)$$

Выразим размерности переменных зависимости (1) в системе трех величин  $MLT$  (Шенк, 1972):  $M$ -масса,  $L$ -длина,  $T$ -время, таб. 1.

Таб. 1: Наименование и размерности переменных зависимости (1)

Наименование переменной	Обозначение	Формуларазмерности
Потери давления	$p_n$	$L^{-1}MT^{-2}$
Скорость потока	$W$	$LT^{-1}$
Плотность	$\rho$	$ML^{-3}$
Коэффициент динамической вязкости	$\mu$	$ML^{-1}T^{-1}$
Диаметргорловины	$d$	$L$
Диаметр трубопровода	$D$	$L$
Диаметр боковых отверстий	$\delta$	$L$
Длина вставки	$\ell$	$L$

Подставим в зависимость (1) вместо символов переменных их размерности:

$$(L^{-1}MT^{-2}) = \varphi[(LT^{-1})^a, (ML^{-3})^b, (ML^{-1}T^{-1})^c, L^d, L^e, L^f, L^K]. \quad (2)$$

Чтобы уравнение (2) было однородным относительно размерностей, должны выполняться следующие соотношения между показателями степени:

$$\left. \begin{aligned} \text{для } M: & \quad 1 = b + c \\ L: & \quad -1 = a - 3b - c + d + \ell + f + K \\ T: & \quad -2 = -a - c \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Упростим соотношения (3) и выразим их через  $a, b, d$ :

$$\left. \begin{aligned} a &= 2 - c \\ b &= 1 - c \\ d &= -c - e - f - K \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

С учетом соотношений (4) зависимость (1) примет вид:

$$p_n = \varphi(W^{2-c}, \rho^{1-c}, \mu^c, d^{-c-e-f-K}, D^e, \delta^f, \ell^K). \quad (5)$$

Объединив члены с одинаковыми показателями степени, получим зависимость из пяти безразмерных комплексов:

$$\frac{p_n}{\rho W^2} = \varphi \left[ \left( \frac{\rho W d}{\mu} \right)^{-c}; \left( \frac{D}{d} \right)^e; \left( \frac{\delta}{d} \right)^f; \left( \frac{\ell}{d} \right)^k \right]. \quad (6)$$

Безразмерные комплексы зависимости (6) представляют собой общеизвестные критерии Эйлера ( $Eu$ ) и Рейнольдса ( $Re$ ). С учетом этого зависимость (6) можно представить в виде критериального уравнения:

$$Eu = \varphi \left[ Re^{-c}, \left( \frac{D}{d} \right)^e, \left( \frac{\delta}{d} \right)^f, \left( \frac{\ell}{d} \right)^k \right]. \quad (7)$$

Полученное уравнение соответствует "π-теореме", так как число безразмерных комплексов ( $Eu, Re, \frac{D}{d}, \frac{\delta}{d}, \frac{\ell}{d}$ ) равно числу переменных ( $p_n, W, \rho, \mu, d, D, \delta, \ell$ ), существенных для процесса, за вычетом первичных величин ( $M, L, T$ ), т.е.  $5 = 8 - 3$ .

Для рассматриваемой задачи наибольший практический интерес представляет зависимость коэффициента сопротивления от числа  $Re$  и геометрических размеров трубы Вентури. Учитывая, что  $\zeta = 2Eu$ , уравнение (7) может быть переписано в виде

$$\zeta = \varphi_1 \left[ Re^{-c}, \left( \frac{D}{d} \right)^e, \left( \frac{\delta}{d} \right)^f, \left( \frac{\ell}{d} \right)^k \right] \quad (8)$$

Критериальное уравнение (8) может служить первоосновой для получения эмпирических зависимостей для расчета  $\zeta$ .

Для определения коэффициентов сопротивления труб Вентури были изготовлены опытные образцы и экспериментальный стенд для их испытания.

На рис.1. представлены опытные образцы труб Вентури. Изготавливались они в двух вариантах: с криволинейным конфуззором, очерченным по радиусу  $R_k = 1,5 \div 4 d$  (рис.1, б), и с прямолинейным конфуззором с углом сходимости  $\alpha_k = 30^\circ$  (рис.1, в). Диффузорная часть перехода в обоих случаях была одинакова и имела угол конусности  $\alpha_\delta = 7^\circ$ . Остальные геометрические характеристики, испытанных труб Вентури, приведены в таб. 2.

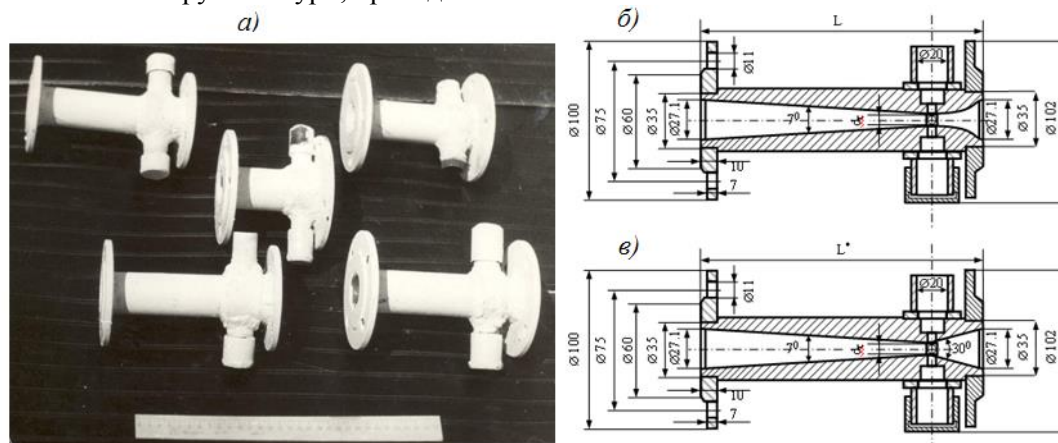


Рис. 1. Опытные образцы труб Вентури.

а – общий вид; б – с криволинейным конфуззором (по радиусу); в – с прямолинейным конфуззором.

Таб. 2: Характеристики опытных образцов труб Вентури

Соотношение диаметров $D/d$	Диаметр горловины $d$ , мм	Диаметр отверстий в стенке горловины $\delta$ , мм	Длина вставки $l$ , мм	Общая длина с криволинейным и прямолинейным конфуззором, $L/L'$ , мм
2	13,5	2,7 5,4 8,1	13,5	132,2/152,6*
3	9,0	1,8 3,6 5,4	0,9	168 / 196*

4	6,8	1,4 2,7 4,1	6,8	188,4/214,8*
4,5	6,8	1,0	6,0	193 / 223*
5	5,4	1,0	5,4	201,6/228,4*

Для испытаний опытных образцов труб Вентури был оборудован экспериментальный стенд, рис.2.

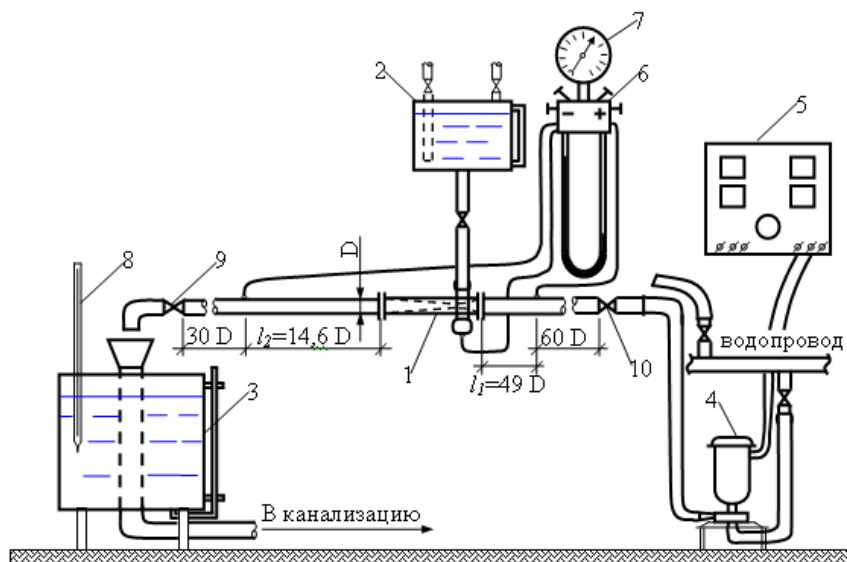


Рис.2. Схема экспериментального гидравлического стенда для испытания труб Вентури.

Соединение стенда с водопроводом выполнялось отрезками шлангов. Прошедшая установку вода через центральную трубу мерного бака 3 сбрасывалась в канализацию. Регулирование расхода осуществлялось вентилями 9 и 10, установленными до и после трубы Вентури. Для контроля гидростатического давления до сужающего устройства служил образцовый манометр 7. При необходимости повышения давления, а также осуществления плавного изменения расхода, использовался насос 4, питаемый регулируемым напряжением от источника переменного тока 5.

Измерение расхода производилось объемным способом. Для этого служил мерный бак 3 полезным объемом 100 л., оборудованный водомерным стеклом и тщательно протарированный. Время наполнения бака фиксировали секундомером. Перепады давления измеряли двухтрубным дифманометром ДТ-50 с удлиненной шкалой, заряженным ртутью. Температура воды замерялась в мерном баке ртутным термометром 8.

При испытаниях решали следующие задачи: устанавливали влияние вязкости жидкости (числа  $Re$ ) на  $\zeta$ ; определяли зависимость  $\zeta$  от соотношения диаметров  $D/d$  и  $\delta/d$ ;

устанавливали критериальные зависимости для расчета коэффициентов сопротивления и давали объяснения полученным закономерностям.

Обработка экспериментальных данных состояла из двух этапов: первичной обработки опытных материалов и окончательной критериальной обработки.

В процессе первичной обработки определяли  $W, \rho, P_n, \zeta, \Delta p$ .

Результаты испытаний труб Вентури при различных числах Рейнольдса подтвердили предположение о существенном влиянии вязкости на коэффициент сопротивления  $\zeta$ . Эта зависимость проявляется тем сильнее, чем меньше  $Re$ . С возрастанием числа Рейнольдса зависимость коэффициента сопротивления от вязкости сказывается в меньшей степени.

На рис.3. в логарифмических координатах приведены результаты испытаний труб Вентури с криволинейным и прямолинейным конфузорами для трех соотношений диаметров  $D/d=2; 3; 5$ ; при числах Рейнольдса  $Re = (0,25-1,5) \cdot 10^5$ . Там же приведены опытные данные работы (Яньшин, 1965), для переходов саналогичной формой при  $D/d=2$ , полученные им на аэродинамическом стенде при больших числах Рейнольдса.

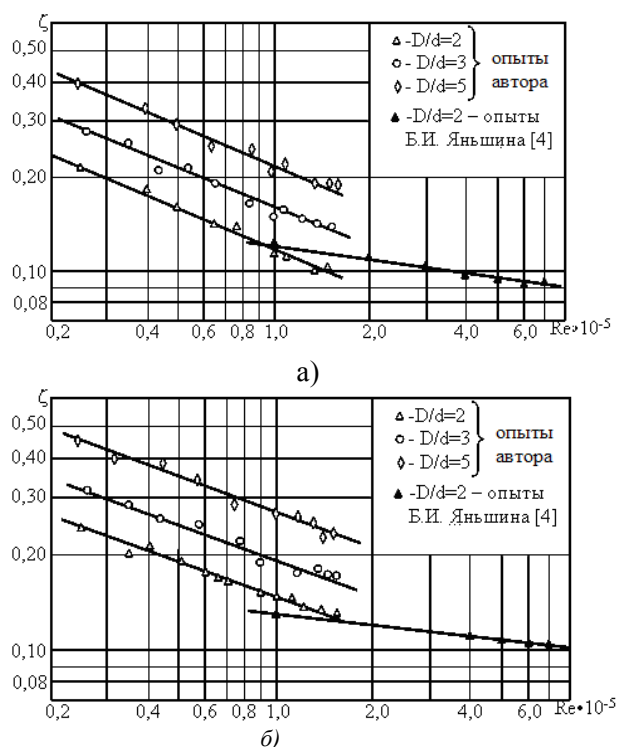


Рис.3. Зависимость коэффициентов сопротивления  $\zeta$  труб Вентури с криволинейным (а) и прямолинейным (б) конфузорами от числа Рейнольдса при различных соотношениях диаметров  $D/d$  по опытным данным.

Видно, что в области со значительным проявлением вязкостного сопротивления показатель степени при  $Re$  для труб Вентури с криволинейным конфузуром равен  $-0,464$ . Соответствующий показатель степени для прямолинейного перехода равен  $-0,379$ .

В области незначительного проявления вязкостного сопротивления, когда потери давления определяются главным образом геометрией потока, показатель степени при  $Re$  для труб Вентури с криволинейным конфузуром равен  $-0,13$ . Соответствующий показатель степени для прямолинейного перехода равен  $-0,123$ .

Между упомянутыми областями не существует четкой границы, а имеется некоторая переходная область, в которой зависимость коэффициента местного сопротивления от числа Рейнольдса имеет сложный характер. Можно, однако, предложить использовать в качестве граничного значения,  $Re_{гр} = 1,5 \cdot 10^5$ , при котором опытные данные в переходной зоне имеют удовлетворительное отклонение от существующих аппроксимирующих прямых линий.

В работе (Идельчик, 1975) при расчетах коэффициента сопротивления конфузурно-диффузорных переходов рекомендует принимать значение  $Re_{гр} = 2,0 \cdot 10^5$ , т.е. несколько большую величину. Последнее можно объяснить тем, что для переходов с меньшей степенью сужения ( $D/d < 2$ ), чем у испытанных, область невязкостного сопротивления начинается при больших значениях чисел Рейнольдса.

В результате окончательной обработки экспериментальных данных установлены следующие критериальные зависимости для определения коэффициентов сопротивления труб Вентури:

- для переходов с криволинейным конфузуром

$$\zeta_{кр} = 17,639 Re^{-0,464} \left(\frac{D}{d}\right)^{0,66} \left(\frac{\delta}{d}\right)^{0,09} \quad (9)$$

- для переходов с прямолинейным конфузуром

$$\zeta_{пр} = 8,046 Re^{-0,379} \left(\frac{D}{d}\right)^{0,70} \left(\frac{\delta}{d}\right)^{0,09} \quad (10)$$

Уравнения (9) и (10) получены для труб Вентури, имеющих прямолинейный диффузор с углом конусности  $\alpha_\phi = 7^\circ$ , конфузор которых или очерчен по радиусу  $R_k = 1,5 \div 4d$ , или прямолинейный с углом сходимости  $\alpha_k = 30^\circ$ , и справедливы при  $Re = (0,25 \div 1,5) \cdot 10^5$ ;  $D/d = 2 \div 5$ ;  $\delta/d = 0,2 \div 0,6$ ;  $l/d = 1$ .



Среднее отклонение опытных данных от расчетных, вычисленных по уравнению (9), не превышает 4,5% при максимальном отклонении -8,2%. В уравнении (10) соответствующие отклонения составляют 4,7% и - 8,1%.

Для расчета коэффициентов сопротивления труб Вентури при больших числах Рейнольдса, когда влияние вязкости проявляет себя незначительно, обобщение опытных данных Б.И. Яньшина в критериальной форме с учетом полученных зависимостей позволяет установить следующие уравнения:

- для переходов с криволинейным конфузуром

$$\zeta_{кр} = 0,392 \left( 0,655 + 0,345 \frac{\ell}{d} \right) R_e^{-0,13} (D/d)^{0,66} (\delta/d)^{0,09}; \quad (11)$$

- для переходов с прямолинейным конфузуром

$$\zeta_{пр} = 0,375 \left( 0,655 + 0,345 \frac{\ell}{d} \right) R_e^{-0,123} (D/d)^{0,70} (\delta/d)^{0,09}; \quad (12)$$

Зависимости (11) и (12) справедливы при  $Re = (1,5 \div 7,0) \cdot 10^5$  и при  $0,25 \leq l/d \leq 2$ .

#### **Выводы.**

Проведены экспериментальные исследования гидродинамических характеристик активного элемента самодренлируемого гелиоконтра отопительной системы, выполненного в виде сужающего устройства - трубы Вентури со степенью сужения потока от 2 до 5 в области значительного проявления вязкостного сопротивления. Результаты экспериментов обработаны в критериальной форме, общий вид которой получен на основе метода анализа размерностей, и сопоставлены с данными других авторов. Полученные критериальные зависимости могут быть использованы для расчёта гидродинамических характеристик активного элемента самодренлируемого гелиоконтра отопительной системы.

#### **Условные обозначения, принятые в статье:**

$D, d$  - диаметр широкого и узкого сечения трубы Вентури, м;  $p$  - давление, Па;  $\rho$  - плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\zeta$  - коэффициент местного сопротивления.

Работа выполнена в рамках гранта БВ-М-Ф3-003 фундаментальных исследований при финансовой поддержке Комитета по координации развития науки и технологий при Кабинете Министров Республики Узбекистан.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

[1] Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям.- М.: Машиностроение, 1975- 559 с. [2] Рашидов Ю.К. Саморегулирующиеся активные элементы для водяных систем солнечного теплоснабжения // Архитектура. Строительство. Дизайн.- Ташкент, 2013, № 4, с.50-55. [3] Рашидов Ю.К. Расчёт самодренлирующегося гелиоконтра водяной отопительной системы с активным элементом// Архитектура. Строительство. Дизайн.- Ташкент, 2014, № 3, с.51-55. [4] Рашидов Ю.К. Султанова Ш.Ю., Суръатов Х.Т. Повышение надёжности и эффективности самодренлируемых водяных систем солнечного теплоснабжения //Гелиотехника.- Ташкент, 2017. - №1. С.30-37. [5] Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. М.: Мир.1972.-381 с. [6] Яньшин Б.И. Гидродинамические характеристики затворов и элементов трубопроводов.- М.: Машиностроение, 1965.- 260 с.

### **ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОБМЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СИСТЕМАХ ОТОПЛЕНИЯ**

**Ю. Рашидов, Н. Авезова**

Международный институт солнечной энергии

г. Ташкент, 100084, ул. Бодомзор йули 2Б, корпус 2. [avezov@uzsci.net](mailto:avezov@uzsci.net)

#### **Аннотация**

Выявлены основные тенденции развития энергосберегающих технологий на основе интеллектуального управления теплообменными процессами в низкотемпературных системах отопления. Выполнено сравнение распределения температуры в помещении при его обогреве высоко- и низкотемпературным радиатором, и тёплым полом. Отмечено, что снижение температуры теплоносителя в

системах водяного отопления обеспечивает существенную экономию энергоресурсов за счёт уменьшения потерь при выработке, транспортировке и распределении тепла, а также большую безопасность для пользователей. Сделан вывод о необходимости разработки предложений для обновления действующих строительных норм с учётом последних достижений науки и техники в области низкотемпературных систем отопления.

**Ключевые слова:** низкотемпературная система отопления, высоко- и низкотемпературный радиатор, тёплый пол, теплоноситель, водяное отопление, саморегулирование, интеллектуальное управление

Разработка новых энергосберегающих технологий, обеспечивающих рациональное использование энергии и сокращение затрат тепла на отопление, приводит к использованию отбросного тепла, тепла окружающей среды, солнечной радиации, теплоты грунта и других альтернативных источников энергии. Так как температурный уровень этих источников тепла обычно невысок, для их использования необходимы специальные системы отопления, отличающиеся по своим конструктивным особенностям от традиционных. Поэтому они получили название как «системы низкотемпературного отопления» (Богословский и Сканава, 1991).

Низкотемпературные системы отопления до сих пор широкого распространения не получили, несмотря на их преимущества. Препятствием для распространения является увеличенный расход металла вследствие развития площади нагревательных поверхностей (Сканава и Махов, 2002).

**Радиаторы** традиционно считаются атрибутами водяных систем отопления с высокими стандартными температурными параметрами в подающем и обратном трубопроводах - 95/70°C и даже 105/70°C в однетрубных системах отопления (Богословский, Крупнов, Сканава и др. 1990). Но постулаты, на которых базировалась такая точка зрения, устарели. Экономия металла и строительной теплоизоляции не ставится сегодня выше экономии энергоресурсов. А технические характеристики современных **радиаторов** позволяют говорить не только о возможности их применения в низкотемпературных системах, но и о преимуществах такого решения.

Возрастающий в последнее время интерес к низкотемпературным системам отопления связан с их несомненными достоинствами, а также актуальностью использования альтернативных источников энергии (солнечной, теплоты грунта, геотермальной и т.д.). Снижение температуры теплоносителя – основная тенденция развития отопительной техники последних десятилетий в европейских странах (Плохих, 2011). Это становилось возможным по мере улучшения теплоизоляции зданий, совершенствовании отопительных приборов. В 1980-х стандартные параметры были снижены до 75/65 °C. Основной выгодой от этого стало уменьшение потерь при выработке, транспортировке и распределении тепла, а также большая безопасность для пользователей.

С ростом популярности напольного и других видов панельного отопления в системах, где они применяются, температура подачи уменьшена до уровня 55 °C, что учтено конструкторами теплогенераторов, регулирующей арматуры и т.д.

Сегодня температура подачи в высокотехнологичных системах отопления может составлять 45 и даже 35 °C. Стимул к достижению указанных параметров – возможность наиболее эффективно использовать такие источники тепла, как тепловые насосы и конденсационные котлы. При температуре теплоносителя вторичного контура 55/45 °C коэффициент эффективности преобразования для теплового насоса типа «грунт–вода» составляет 3,6, а при 35/28 °C уже – 4,6 (при работе только на обогрев). А эксплуатация котлов в конденсационном режиме, требующая охлаждения дымовых газов водой обратной линии ниже «точки росы» (при сжигании жидкого топлива – 47 °C), дает выигрыш в КПД порядка 15 % и более. Таким образом, снижение температуры теплоносителя обеспечивает существенную экономию энергоресурсов, и, соответственно, сокращение выбросов углекислого газа в атмосферу.

Следует, однако, заметить, что применение современного высокоэффективного отопительного оборудования в низкотемпературных системах требует соответственно высококачественного управления теплообменными процессами, происходящих в них. Последнее может быть достигнуто на основе интеллектуального управления теплообменными процессами с использованием информации как меры отражения соотношения производства и потребления тепловой энергии (Чайковская, 2008, 2012).

Цель настоящей работы – выявить основные мировые тенденции развития энергосберегающих технологий на основе интеллектуального управления теплообменными процессами в низкотемпературных системах отопления.

Среди низкотемпературных систем отопления особое место занимает напольное отопление. За последние двадцать лет применение напольного лучистого отопления значительно расширилось. В Германии, Дании и Австрии от 30 до 50 % новых жилых зданий оборудованы напольным отоплением (Olesen, 2003).

Особенно широко распространено напольное отопление в Корее, где около 90% жилых домов обогреваются через полы (Olesen, 2003). Еще за 100 лет до нашей эры корейцы использовали дым очага как средство обогрева каменного пола. Дым от кухонного огня отводился под массивным каменным полом к противоположной стене, а затем поднимался вверх по внутренней полости стены, игравшей роль дымовой трубы. Таким образом, массив пола служил аккумулятором теплоты. Примерно в это же время римляне пользовались аналогичным типом отопления.

В течение 1950–60 годов установки напольного отопления со стальными или медными трубами появились в Западной Европе. К сожалению, в то время теплоизоляция зданий была несовершенной, поэтому для обогрева требовалась чересчур высокая температура пола, что привело к дискредитации этих систем. К концу 1970-х годов по мере усовершенствования теплозащиты зданий напольное отопление получает все более широкое распространение, в частности, в Германии, Швейцарии, Австрии и скандинавских странах. В настоящее время используются в основном полиэтиленовые трубы (Olesen, 2003).

Современные здания все больше становятся термически чувствительными – благодаря улучшению их теплоизоляции. При этом наиболее серьезная проблема, связанная с тепловым комфортом в зданиях с хорошей теплоизоляцией, – большие колебания температуры помещения при изменении внутренних тепловыделений от людей, освещения, оборудования, прямой солнечной радиации. Следствием незначительных теплопотерь в термозащищенных зданиях является тот факт, что изменение внутренних тепловыделений оказывает значительно большее влияние на температуру помещения, чем в зданиях со стандартной теплоизоляцией. Степень этого влияния зависит от тепловой инерции и управляемости систем отопления. Поскольку напольное отопление отличается от других систем большей инерционностью, часто утверждают, что при использовании напольного отопления возрастает риск перегрева помещения и увеличения теплопотерь. Однако некоторые исследования доказали, что это не так (Olesen, 2003).

Внешнее и внутреннее тепловые возмущения (от солнечного света, бытовой техники, присутствия людей) способны сильно воздействовать на микроклимат в помещении. И **радиаторы** реагируют на эти тепловые изменения точнее, чем панельные системы отопления.

Как известно, «теплый пол», особенно устроенный в бетонной стяжке, – система с большой теплоемкостью, медленно реагирующая на регулирующие воздействия.

Даже если «теплый пол» управляется термостатами, быстрая реакция на подвод стороннего тепла невозможна. При укладке греющих труб в бетонную стяжку время реагирования напольного отопления на изменение количества поступающего тепла составляет около двух часов.

Быстро среагировавший на поступление стороннего тепла комнатный термостат отключает напольное отопление, которое продолжает отдавать тепло еще примерно в течение двух часов. При прекращении поступления стороннего тепла и открытии термостатического клапана полное прогревание пола достигается только спустя такое же время. В этих условиях действенным оказывается только эффект саморегулирования, который в последнее время широко используется в системах солнечного теплоснабжения (Рашидов, 2006а, 2006б, 2006с, 2006д, 2013).

Саморегулирование – сложный динамический процесс (Плохих, 2011). На практике он означает, что подача тепла от нагревателя регулируется естественным путем благодаря двум следующим закономерностям: 1) тепло всегда распространяется от более нагретой зоны к более холодной; 2) величина теплового потока определяется разностью температур. Понять суть этого позволяет известное (оно широко используется при выборе отопительных приборов) уравнение:

$$Q = Q_{\text{ном}} \cdot (\Delta T / \Delta T_{\text{ном}}) \cdot n,$$

где  $Q$  – теплоотдача нагревателя;  $\Delta T$  – разница температуры нагревателя и воздуха в помещении;  $Q_{\text{ном}}$  – теплоотдача при номинальных условиях;  $\Delta T_{\text{ном}}$  – разница температуры нагревателя и воздуха в помещении при номинальных условиях;  $n$  – экспонента нагревателя.

Саморегулирование характерно как для напольного отопления, так и для радиаторов. При этом для «теплого пола» значение  $n$  составляет 1,1, а для радиатора – порядка 1,3 (точные значения приводятся в каталогах). То есть реагирование на изменение  $\Delta T$  во втором случае будет более «выраженным», и восстановление заданного температурного режима произойдет быстрее.

Важен с точки зрения регулирования и тот факт, что температура поверхности радиатора примерно равна температуре теплоносителя, а в случае с напольным отоплением это совсем не так.

При кратковременных интенсивных поступлениях стороннего тепла система регулирования «теплого пола» не справляется с работой, вследствие чего имеют место колебания температуры помещения и пола. Некоторые технические решения позволяют их снизить, но не устранить.

На рис. 1 показаны графики изменения оперативной температуры для индивидуального дома при его обогреве регулируемыми высоко-, низкотемпературными радиаторами и «теплым полом» (Плохих, 2011). Дом рассчитан на проживание четырех человек и оснащен естественной вентиляцией. Источниками сторонних поступлений тепла являются люди и бытовая техника. В качестве комфортной задана оперативная температура 21 °С. На графиках рассматривается два варианта ее поддержания: без перехода на энергосберегающий (ночной) режим и с ним.

Отметим: оперативная температура – показатель, характеризующий комбинированное воздействие на человека температуры воздуха, радиационной температуры и скорости движения окружающего воздуха. Опыты показывают, что **радиаторы** явно быстрее, чем «теплый пол», реагируют на колебания температуры, обеспечивая меньшие ее отклонения и более комфортный и эффективный с точки зрения использования энергии температурный профиль внутри помещения.

Сравнение вертикального распределения температуры в одинаковых по площади и планировке помещениях (без мебели и людей), обогреваемых низкотемпературным радиатором и «теплым полом» приведено на рис. 2. Температура наружного воздуха составляла –5 °С. Кратность воздухообмена – 0,8.

Как следует из рис.2., установленный под окном **низкотемпературный радиатор** обеспечивает наиболее равномерное распределение температуры, перекрывая поступление в комнату холодного воздуха. Но при выборе конкретного решения следует принимать во внимание качество остекления, расположение мебели, другие особенности объекта.

Тепловые потери для «теплого пола», в зависимости от толщины теплоизоляции (100–300 мм), составляют 5–15 % (в нижнем направлении, при температуре воздуха – 21, бетонного основания – 10°C). Для **высокотемпературного радиатора** потери через заднюю стену составляют примерно 4 %, для низкотемпературного – только 1 % (при условии, что тепловая защита здания соответствует действующим европейским нормативам).

Основное преимущество низкотемпературных системах отопления заключается в использовании в качестве теплоносителя воды, циркулирующей по греющему контуру из труб.

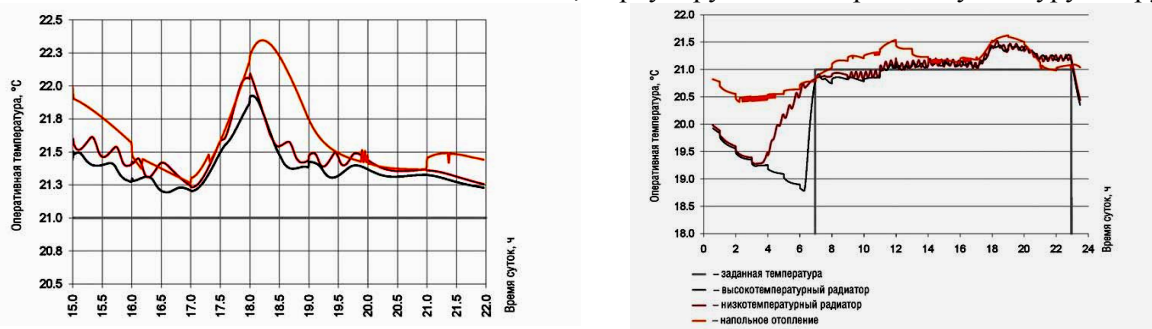


Рис.1. Графики изменения оперативной температуры в смоделированных условиях индивидуального дома при его обогреве регулируемыми высоко-, низкотемпературными радиаторами и «теплым полом»

Вода имеет высокое теплосодержание на единицу объема и может нагреваться различными источниками энергии (электричество, нефть, газ, уголь и др.). Она чиста, не токсична и всегда доступна, в том числе и по цене. Низкая температура воды (наиболее экономичные температурные параметры на входе и выходе системы 55/45°C), при которой работают системы напольного отопления, способствует экономии энергии. От напольных систем, использующих в качестве теплоносителя электроэнергию, водяные системы выгодно отличаются отсутствием дополнительной нагрузки электромагнитных полей.

В сравнении с другими обогревательными системами (например, радиаторное отопление), в которых используется тот же теплоноситель, а именно вода, напольное отопление характеризуется иным способом распределения тепла. Многолетний практический опыт различных компаний

показывает, что напольное отопление благодаря участию всей поверхности пола в эмиссии тепла обеспечивает исключительно равномерное горизонтальное распределение температур и близкое к идеальному вертикальное распределение. Таким образом, в помещениях создается наиболее оптимальный климат: температура пола в помещениях колеблется в пределах 22–25°C, а температура воздуха на уровне головы составляет 19–22°C. Это наиболее благоприятные жизненные условия, что подтверждают проведенные независимые психологические тесты, свидетельствующие о том, что люди чувствуют себя наиболее комфортно, если голове немного холоднее, чем ногам.

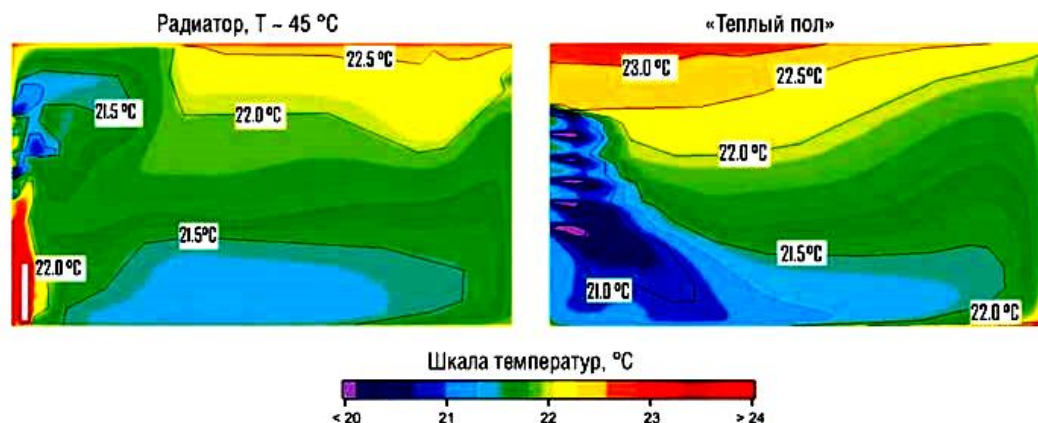


Рис.2.Вертикальное распределение температуры в одинаковых по площади и планировке помещениях (без мебели и людей), обогреваемых низкотемпературным радиатором и «теплым полом»

В отличие от радиаторного отопления напольная система не способствует возникновению неблагоприятной для человека положительной ионизации воздуха, и при ее использовании, что очень важно, поддерживается оптимальная влажность воздуха. Напольная система гигиенична, поскольку при минимальных тепловых потоках пыль в помещении практически не циркулирует. Она невидима, подходит для современного дизайна, и при отсутствии отопительных приборов появляется возможность более рационального использования площадей жилого или офисного помещения.

И наконец, необходимо отметить экономический фактор: при напольном отоплении, в сравнении с радиаторным, экономится тепловая энергия на 20–30% в жилых зданиях, а в помещениях с высокими потолками (спортзалы, выставочные павильоны, церковные комплексы) этот показатель может достигать 50%.

Между тем достоинства водяного напольного отопления складываются из суммарного влияния теплоносителя и отдельных элементов системы, в состав которой входят трубы и комплектующее оборудование. В системах напольного отопления Wirsbo (Корчагин, 2002) используются специально разработанные трубы Wirsbo-pePEX и Wirsbo-evalPEX, изготовленные из полиэтилена PEX-A с антидиффузионным барьером, блокирующим проникновение кислорода в систему и предохраняющим ее стальные элементы от коррозии. Антидиффузионные барьеры накладываются на основную трубу Wirsbo-PEX, а сверху покрываются защитным слоем для предотвращения возможных повреждений при монтаже труб Wirsbo-pePEX.

Система работает по принципу подающего и обратного коллекторов, каждая петля контролируется с обоих концов. Вентиль на подающем коллекторе может быть снабжен исполнительным механизмом, который управляется от комнатного термостата или вручную. В обратный коллектор встроены регулирующие вентили, которые контролируют поток воды по всем петлям, выравнивая таким образом перепады давления. Регулирующее оборудование (термостаты и исполнительные механизмы) надежно обеспечивает регулировку комнатной температуры, основанную на открытии и закрытии потока воды (двухпозиционное регулирование).

Система водяного отопления представляет собой многослойную конструкцию, которая устанавливается на бетонные или деревянные перекрытия. Она должна отвечать всем нормам по теплоизоляции, звукоизоляции и прочности. Для новых зданий с наливными бетонными полами система напольного отопления проектируется как система «мокрой укладки». В ней

предусматриваются слои: бетонная плита, гидроизоляция (особенно необходима для плит соприкасающихся с землей и во влажных помещениях), звуко- и теплоизоляция, пленка, трубы, бетонная стяжка, цементный слой для выравнивания пола и покрытие. Отопительные петли в этом варианте находятся в бетонной смеси. Бетон хорошо проводит тепло, и этот наливной слой служит экраном для распределения тепла по поверхности пола.

В старых зданиях, когда наливные полы не могут быть установлены, используют метод «сухой прокладки». Отопительные трубы устанавливаются в изоляции несущего слоя в специальных алюминиевых пластинах, которые обеспечивают равномерное распределение тепла. Это уменьшает количество тяжелых слоев и высоту конструкции. Специально для этих целей разработана система Wirsbo-Alu. Толщина изоляционных слоев и используемые материалы варьируются в зависимости от производственного назначения строительных объектов.

В 2011-2012 году в Узбекистане была введена в действие обновлённая нормативно-методологическая база [15-18] для проектирования и строительства энергоэффективных зданий (Ходжаев, Кадыров и Ходжаев, 2016), направленная на обеспечение снижения на 25-50 % расхода энергии на отопление, вентиляцию и кондиционирование зданий, без снижения нормируемых параметров микроклимата помещений. В них предусмотрено существенное повышение теплозащитных показателей ограждающих конструкций [15], применение прогрессивных энергосберегающих архитектурно-типологических и объёмно-планировочных решений зданий [15, 18], современных эффективных теплоизоляционных материалов [15, 16], инженерных систем и оборудования [17].

В заключение следует отметить, что с момента ввода вышеупомянутых норм прошло более пяти лет, и они естественно не охватывают в полной мере вышерассмотренные достижения в области низкотемпературных систем отопления. Поэтому в настоящее время назрела необходимость разработки и обоснования предложений для обновления действующих строительных норм с учётом последних достижений отопительной науки и техники.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Богословский В.Н. Внутренние санитарно-технические устройства. Ч.1. Отопление/ В.Н. Богословский, Б.А. Крупнов, А.Н. Сканави и др.; Под ред. И.Г. Староверова и Ю.И. Шиллера. – М.: Стройиздат, 1990.- 344 с. (Справочник проектировщика). [2] Богословский В.Н., Сканави А.Н. Отопление: Учеб. Для вузов. – М.: Стройиздат, 1991. – 735 с. [3] Корчагин Ю.М. Водяное напольное отопление// Сантехника.- Москва, 2002. - №5, С.31-36. [4] Olesen B.W. Теория и практика напольного лучистого отопления// АВОК.- Москва, 2003. - №1. [5] Плохих И. Радиаторы в низкотемпературных системах отопления// Аква-Терм.- Москва, 2011. - №2. [6] Сканави А.Н., Махов Л.М. Отопление: Учеб. Для вузов. – М.: АСВ, 2002. – 576 с. [7] Рашидов Ю.К. Альтернативный метод расчёта систем солнечного теплоснабжения// Гелиотехника.– Ташкент, 2006.–№ 3, С. 83-86 (05.00.00; №1). [8] Рашидов Ю.К. Термодинамические основы альтернативного метода совершенствования систем солнечного теплоснабжения на базе синергетических эффектов самоорганизации и саморегулирования //Архитектура. Курилиш. Дизайн. – Ташкент: ТАҚИ, 2006. – №1, С 101-105. [9] Рашидов Ю.К. Альтернативный метод совершенствования систем солнечного теплоснабжения на основе синергетических процессов самоорганизации и саморегулирования// Альтернативная энергетика и экология – Саров. - 2006, № 5 (37) С.88-89. [10] Rashidov Yu.K. Alternative method of perfection of systems solar warmly of supply on a basis synergetic of processes of self-organizing and self-regulation// International Journal for Alternative Energy and Ecology ISJAEE.- Sarov.- 2006, № 5 (37) PP.89-90. [11] Рашидов Ю.К. Саморегулирующиеся активные элементы для водяных систем солнечного теплоснабжения// Архитектура. Курилиш. Дизайн. - Ташкент : ТАҚИ, 2013, №4, с.51-55 [12] Ходжаев С.А., Кадыров Р.Р., Ходжаев С.А. Техничко-экономические аспекты повышения теплозащиты зданий и сооружений// Архитектура и строительство Узбекистана.- Ташкент, 2016. - №6, С.33-36. [13] Чайковская Е.Е. Поддержание функционирования энергетических систем на основе интеллектуального управления теплообменными процессами // ММФ-2008: VI Минский 6 международный форум по тепло- и массообмену: Тез. докл. и сообщ. / Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси. 19-23 мая 2008 г. Минск, 2008. Т.2.С.304- 306. [14] Чайковская Е.Е. Энергосберегающие технологии на основе интеллектуального управления теплообменными процессами// ММФ-2012: XIV Минский 14 международный форум по тепло- и массообмену: Тез. докл. и сообщ. / Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси. 10-13 сентября 2012 г. Т.2.С. 378- 382.[15] КМК 2.01.04-97\* Строительная теплотехника./Госархитектстрой.- Ташкент.- АQATM.-2011.-48 с.[16] КМК 2.03.10-95\* Крыши и кровли./Госархитектстрой.- Ташкент.- АQATM.-2011.-98 с.[17] КМК 2.04.05-97\* Отопление, вентиляция и кондиционирование./Госархитектстрой.- Ташкент.- АQATM.-2011.-208 с.[18] ШНК 2.08.02-09\* Общественные здания и сооружения./Госархитектстрой.- Ташкент.- АQATM.-2011.-139 с.



## A TIME-DEPENDENT GAUSSIAN MODEL FOR PREDICTION OF GLOBAL SOLAR PARAMETERS CASE STUDY: SOUTHEASTERN OF TURKEY

H. Kılıç<sup>1</sup>, B. Gümüş<sup>2</sup>, M. Yılmaz<sup>3</sup>, K. Akkılıç<sup>4</sup>, M. E. Asker<sup>5</sup>

<sup>1,4,5</sup>Diyarbakır Technical Sciences Vocational Schools Electrical-Energy Department, Dicle University, [heybet.kilic@dicle.edu.tr](mailto:heybet.kilic@dicle.edu.tr), [kakkilic@dicle.edu.tr](mailto:kakkilic@dicle.edu.tr), [measker@dicle.edu.tr](mailto:measker@dicle.edu.tr)

<sup>2</sup>The Department of Electrical and Electronic Engineering, Dicle University, [bilgumus@dicle.edu.tr](mailto:bilgumus@dicle.edu.tr)

<sup>3</sup>The Department of Electronics and Communication Engineering, Batman University, [musa.yilmaz@batman.edu.tr](mailto:musa.yilmaz@batman.edu.tr)

### Abstract

In that century every kind of energy sources are very important for countries. Therefore, renewable energy resources are crucial key to achieve the goal of meeting energy demand that is grown with advancement in technology. Moreover, to avoid the non-dependent in energy for some countries such as Turkey, the renewable energy resources are provided duality solutions in energy problem. Turkey has an important solar energy potential. That paper proposes a new approach in prediction of global solar radiation and sunshine duration based on earlier year global radiation and sunshine duration. The prior scientific searches are based on sunshine, cloud, temperature, and some other meteorological parameters. The proposal predicts the basic parameters using time series based analysis method exponentially weighted moving average (EWMA) for Gaussian distribution using Caurana approach to model next year global solar radiation and sunshine duration and using some statistical parameters which are called Mean Absolute Percentage Error (MAPE) and coefficient of determination(R2) to exam the success of the proposal technic.

**Key words:**Global solar radiation, sunshine duration, exponentially weighted moving average, Gaussian distribution

### 1. Introduction

Global solar radiation (GSR) and sunshine duration (SSD) are crucial frameworks in solar energy applications such as Photovoltaic(PV), energy conversion systems wood drying, stoves, atmospheric studies, thermal load analyses on buildings and meteorological forecasting (Pierro et al. 2015; Sozen, 2015). The measurement or prediction of global solar radiation and sunshine duration have significant role in scientific and industrial areas due to indicated reasons (Kılıç H. et al. 2017; (KentliF and Yılmaz M., 2015). Although the countries meteorological services have a monopoly on measurement of global solar radiation and sunshine duration, in some research centre or university there are measurement stations. However due to geographical conditions and economic reasons these station cannot be employed in everywhere. In that case where there is no possible to obtain measurement data, prediction or modelling system may be used for global solar radiation and sunshine duration data.

The modelling of global solar radiation based sunshine duration had been started by Angström- Prescott which is also called sunshine based linear and nonlinear regression. In the next step several method have been deployed in modelling of global solar radiation that are based on temperature and cloud linear and non-linear regression. The temperature and temperature-cloudiness combined method used in the case of missing sunshine duration in such area temperature or cloudiness based model have effective results. To accomplish better solution in global solar modelling fuzzy logic is also used in sunshine, temperature and cloudiness based model(Ozgoren et al., 2012; (Duzen H. and Aydin H., 2012).

Furthermore the last two decades artificial neural network(ANN) approach have been used widely in solar radiation prediction or has been combined with Angström- Prescott and other meteorological data that are used in estimation of models. It has proven to be very high quality tools for search, as they are able to use in non-linear system behaviours, data categorization, in clustering or model ordinary systems simulation. Hence it is a beneficial tool in prediction of systems that have complicated behaviour such as global solar radiation and meteorological events. In addition Artificial Neural Networks offers a nonlinear statistical method that have become very popular to try to deal with a problem in a different way in a sort of problems homologous to atmospheric science(Shamim M.A. et al., 2015).

Other approach in prediction of global solar radiation is time series analysis method. In whole meteorological science events such as global solar radiation, sunshine duration and temperature which behaviour of them expressed in time scale. Therefore, time series analysis method have used in global solar radiation estimation that is provide most knowledge of the underlying physical nature of global solar radiation and sunshine duration. Time series analysis gives some facilities that are used with conventional methods and also combined with some modern methods that are artificial neural network and its derivation (Güçlü Y.S. et al., 2015).



Finally in that paper a different approach of time series based analysis method is called exponentially weighted moving average (EWMA) for Gaussian distribution using Caurana approach advanced in prediction of both global solar radiation and sunshine duration, because in some region especially in south-eastern Anatolia region in Turkey that is consist of nine cities(Diyarbakır, Gaziantep, Şanlıurfa, Batman, Mardin) do not have enough available global solar radiation and sunshine duration due to measurement station have removed since August of 2015. In this paper five biggest cites of the region which are Batman, Diyarbakır, Gaziantep, Şanlıurfa and Mardin data supported by Turkish State Meteorological Service are between 1998 and 2015 which is shown in Table 1. Currently there are no further measurement data of global solar radiation and sunshine duration that will be provided for next years by meteorological service. Thus sunshine based model will not be applicable in prediction of global solar radiation. The aim of the exponential weighted moving average (EWMA) for Gaussian distribution using Caurana approach which is a new approach in literature and time series based for prediction of GSR and SSD is to accomplish acceptable prediction of global solar radiation and sunshine duration by using prior years measured value of them and eliminate the drawbacks of missing some datasets or unavailable situation for measurement station.

Tab. 1. Data of cities provided by Turkish state meteorological service

Location	Long(E)	Lath(N)	MeasuredData	
			Period	TotalYears
Gaziantep	37.22	37.04	1998-2010	12
Şanlıurfa	38.46	37.07	1998-2010	12
Diyarbakır	40.13	37.55	1998-2008	10
Batman	41.07	37.52	1998-2006	8
Mardin	40.45	37.07	2012-2015	4

## 2. Metarial and methods

The method is used in this paper can be explain as exponentially weighted moving average for Gaussian distribution with Caruana approach. In that method firstly two year data which is called as test years data are used to construct Gaussian distribution for each two years, then Caruana approach is deployed to compute parameter of Gaussian function which are  $A$ ,  $\mu$ ,  $\sigma$  are known as the height of the curve's peak, the position of the centre of the peak and standard deviation respectively. Finally step of method predict the next years Gaussian parameter  $A$ ,  $\mu$ ,  $\sigma$  and construct the Gaussian distribution of the year. Gaussian distribution or function can be deployed in many application of mathematics, science, engineering and natural World events (Smith J., 2012; Lewis C., 1982). Moreover, the Gaussian function can be used to explain some meteorological phenomenon behaviour such as temperature, global solar radiation and sunshine duration of an area in a year as specified by the central limit theorem of the probability theory. Gaussian distribution function can be expressed as below:

$$y_t = Ae^{-(t-\mu)^2/2\sigma^2} \quad (1)$$

The graph of function constructed with a symmetrical bell shaped curve with  $t = \mu$ . Where  $A$  is the height of the curve's peak, and  $\sigma$  controls the width of the bell. Although it is not very to determine the parameters of Gaussian distribution since nature of such non-linear distribution cause in more than one way or with more conditions than are necessary a simple approach can be employed which is called as Caruana approach Then the parameters of Gaussian distribution function can be obtained as follow (Bo-land J, 1995; Brockwell P., Davis R. A., 1996; Bowerman B. L., O'Connell R. T., 1979).

$$\mu = \frac{-b}{2c} \quad (2)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{-1}{2c}} \quad (3)$$

$$A = e^{(a-b^2)/4c} \quad (4)$$

Finally, the two step remains. The first one is usage of the exponentially weighted moving average to predicted the next year parameters of Gaussian distribution function  $A$ ,  $\mu$ ,  $\sigma$  separately and then the second one is the construction of Gaussian distribution function for next year with predicted values of  $A$ ,  $\mu$  and  $\sigma$ .

If datasets are a time series, the series mean is a simple measure and reflect the nature of datasets. To analysis of some behaviours of data the mean value is usually the basic and useful statistic tool. Since mean values that are calculated vary, or move, the current interval move form  $t = 1, t = 2, \dots$  etc. that knows as moving average, they are calculated in short interval and they are more useful. The basic moving average is the unweighted average of earlier values, the exponentially weighted moving average (EWMA) is based on the same as basic moving average, however the EWMA contributes to the mean weighted by their neighbours to the current time therefore there is not unique interval, but a whole interval of moving averages of datasets can be analysed and used for forecasting next neighbours' data.

A time series can be considered as  $(A, \mu, \sigma)_t, t = 1, 2, 3, \dots, i$  then the average of it can be calculated. If  $i$  is selected large, and integer  $n$  which is selected smaller than  $i$ ,  $(A, \mu, \sigma)_t$  can calculated a set of averages, or simple moving averages (of order  $n$ ):

$$(A, \mu, \sigma)_t = \frac{1}{n} \sum_{t=2}^{n+1} (A, \mu, \sigma)_t \quad (5)$$

After some mathematical operations and reduction, the moving average that weighted with (16), (17) becomes,

$$\overline{(A, \mu, \sigma)}_t = \sum_{k=1}^n \beta (1 - \beta)^{k-1} (A, \mu, \sigma)_{t-k+1} \quad (6)$$

Then (18) can be written as a repeated smoothed relation

$$S_t = \beta (A, \mu, \sigma)_t + (1 - \beta) (A, \mu, \sigma)_{t-1} \quad (7)$$

Exponentially weighted moving average for Gaussian distribution with Caruana algorithm is expressed as block diagram in below figures. In fig. 1,  $t$  is the first years of datasets and  $t+N$  is the last year of datasets in Table 2.

Tab. 2 data used in EWMA process

Location	Test Class Years		Prediction Class Years	
	Period	Total years	Period	Total years
<b>Gaziantep</b>	1998-1999	2	2000-2010	10
<b>Şanlıurfa</b>	1998-1999	2	2000-2010	10
<b>Diyarbakır</b>	1998-1999	2	2000-2008	8
<b>Batman</b>	1998-1999	2	2000-2006	6
<b>Mardin</b>	2012-2013	2	2014-2015	2

Accuracy of prediction method test by determination coefficient ( $R^2$ ) and mean absolute percentage errors (MAPE) [35] i.e.,  $0 \leq \text{MAPE} \leq 10$  indicates excellent prediction accuracy,  $10 \leq \text{MAPE} \leq 20$  indicates good prediction,  $20 \leq \text{MAPE} \leq 50$ , indicates decent prediction,  $\text{MEPA} \geq 50$ , indicates inaccurate prediction. On the other hand,  $R^2$  means predicted data are fitted with measurement data. An  $R^2$  of 1 indicates that the regression line highly fits the data, while an  $R^2$  of 0 indicates that the predicted data does not fit the data at all measurement data [36], [37]. Definitions of  $R^2$  and MAPE are as following:

$$R^2 = \frac{\sum_{j=1}^N (S_j - S_{j,avg}) \cdot (y_j - y_{j,avg})}{\sqrt{[\sum_{j=1}^N (S_j - S_{j,avg})^2] \cdot [\sum_{j=1}^N (y_j - y_{j,avg})^2]}} \quad (8)$$

$$\text{MAPE} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{(S_j - y_j)}{y_j} * 100 \quad (9)$$

Where  $S_j$  is predicted value of  $y_j$  and  $y_j$  is measured value.  $S_{j,avg}$  and  $y_{j,avg}$  are their average values respectively.

### 3. Results and discussions

This paper proposes a prediction method which is called as exponentially weighted moving average for Gaussian distribution using Caurana approach. In that method test class years are used to prediction for future years. The comparison of predicted global solar radiation (GSRp) and measured global solar

radiation (GSRm) are shown in fig. 1. In addition, the predicted sunshine duration (SSDp) and the measured sunshine duration (SSDm) are compared in fig. 2.

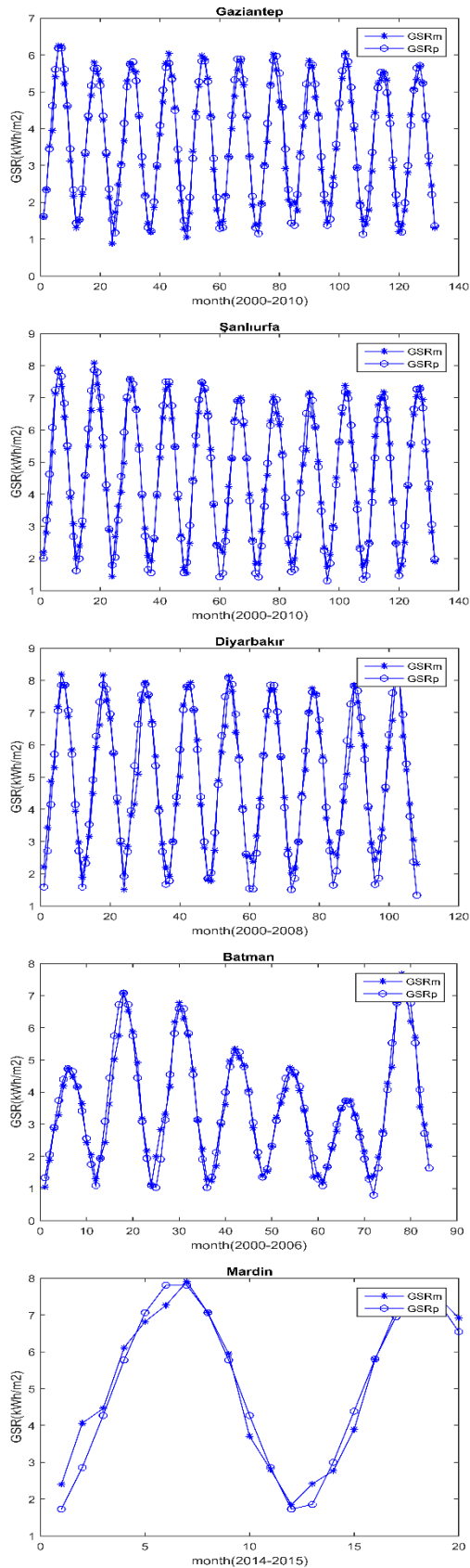


Fig. 1. The comparison of predicted and measured year global solar radiation.

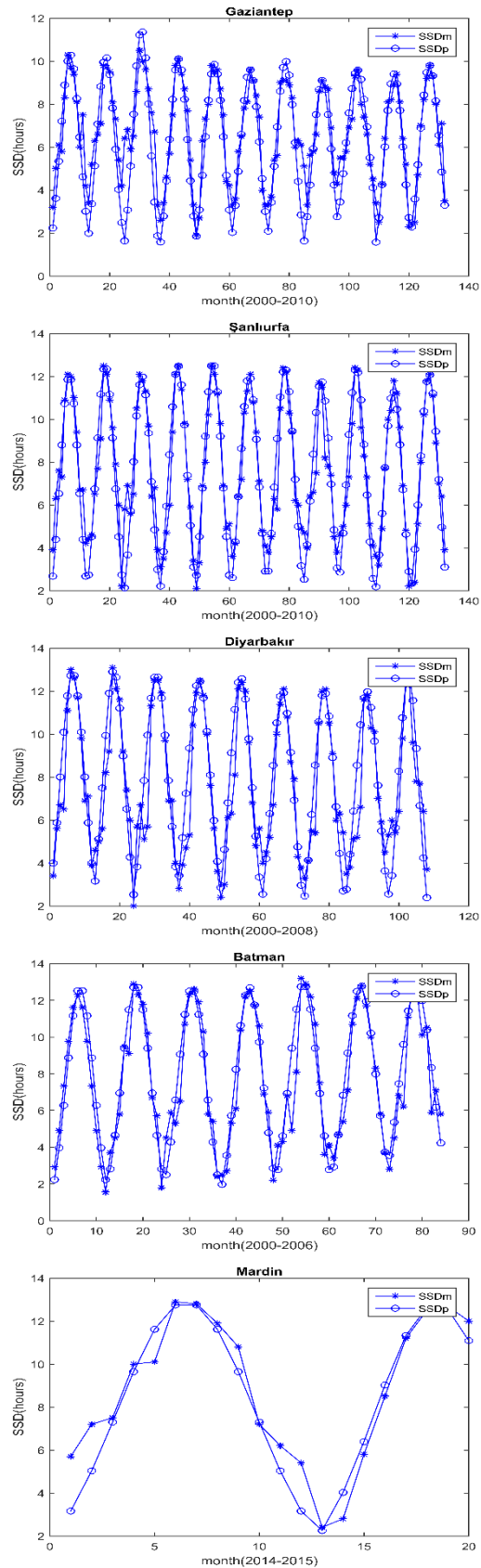


Fig. 2. The comparison of predicted and measured year sunshine duration.

Finally, the statistical test tools are used to check the accuracy of the method that are determination coefficient  $R^2$  and mean absolute percentage average (MAPE). The result of  $R^2$  and MAPE are indicated in Table 3. Due to the results  $R^2$  a high closer 1 than 0 for both GSR and SSD means  $y(t)$ 's are good fitted with  $S(t)$ 's.

Tab 3. Measured maape and  $R^2$  of predicted values

Location	Predicted years	MAPE/GSR(kWh/m <sup>2</sup> -day)	$R^2$ /GSR	MAPE/SSD(hour-day)	$R^2$ SSD
Gaziantep	2000-2010	7,834	0,952	9,661	0,937
Şanlıurfa	2010-2010	8,808	0,956	5,177	0,910
Diyarbakır	2000-2008	5,207	0,950	13,932	0,917
Batman	2000-2006	8,528	0,957	10,662	0,904
Mardin	2014-2015	6,912	0,939	7,811	0,929

The results in view of MAPE are also acceptable since for both GSR and SSD in Gaziantep, Şanlıurfa and Mardin the value of MAPE are between 0 and 10(kWh/m<sup>2</sup>-day) which indicates excellent prediction accuracy as well as it is slightly worse for Diyarbakır and Batman which is between 10 and 20(kWh/m<sup>2</sup>-day) means still a good prediction for GSR and SSD.

#### 4. Conclusion

The time depended EWMA series approach is used in south-eastern region of Turkey for five biggest cities which are Batman, Diyarbakır, Gaziantep, Şanlıurfa data of first two years from each city are chosen for long-term prediction and for Mardin data of first two years are chosen for short-term prediction. The results show that time series based EWMA for Gaussian distribution using Caurana approach is acceptable in long and short term prediction, particularly it is valid where in missing of global solar radiation and sunshine duration.

In addition, the south-eastern region of turkey which cannot be supported by Turkish State Meteorological Service for data of global solar radiation and sunshine duration furthermore. The method gives an idea for next year data because this region has high potential of solar energy. Therefore, the predicted information of GSR and SSD which is provided a track is very noteworthy for investor in field of solar energy generation, distribution and transmission.

#### REFERENCES

- [1] Kiliç B., Gümüş, B., Yılmaz M., 2017. Time Dependent Prediction of Monthly Global Solar Radiation and Sunshine Duration Using Exponentially Weighted Moving Average in Southeastern of Turkey. Thermal Science. doi: 10.2298/TSCI160107228K [2] Bakirci, K., 2015. Models for the estimation of diffuse solar radiation for typical cities in Turkey. Energy, 82, pp.827–838. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544215001176>. [3] Duzen, H. & Aydin, H., 2012. Sunshine-based estimation of global solar radiation on horizontal surface at Lake Van region (Turkey). Energy Conversion and Management, 58, pp.35–46. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2011.11.028>. [4] Güçlü, Y.S., 2015. HARmonic–LINear (HarLin) model for solar irradiation estimation. Renewable Energy, 81, pp.209–218. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148115002177>. [5] Mulaudzi, S.T., 2013. Solar radiation analysis and regression coefficients for the Vhembe Region, Limpopo Province, South Africa. , 24(3), pp.3–8. [6] Ozgoren, M., Bilgili, M. & Sahin, B., 2012. Estimation of global solar radiation using ANN over Turkey. Expert Systems with Applications, 39(5), pp.5043–5051. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2011.11.036>. [7] Pierro, M., 2015. Model output statistics cascade to improve day ahead solar irradiance forecast. Solar Energy, 117, pp.99–113. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X15002212>. [8] Shamim, M.A., 2015. An improved technique for global solar radiation estimation using numerical weather prediction. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 129, pp.13–22. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364682615000590> [9] Sozen, A. Mirzapour, A., Tarık Ç.M., 2015. Selection of the best location for solar plants in Turkey. Journal of Energy in Southern Africa, 26(4), pp.52–63 [10] Yadav, A.K., Chandel, S.S., 2014. Solar radiation prediction using Artificial Neural Network techniques: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 33, pp.772–781 [11] Kentli, F., Yilmaz, M., 2015. Mathematical Modelling of Two-axis Photovoltaic System with Improved Efficiency, Elektronika Ir Elektrotehnika. vol.21, no.4, pp. 40-43 [12] Boland J., 1995, Time-Series Analysis of Climatic Variables, Solar Energy, 55, pp. 377–388. [13] Brockwell, P., Davis, R. A., 1996. Introduction to Time Series and Forecasting, Springer-Verlag, New York, pp. 203-214. [14] Bowerman, B. L., O'Connell, R. T., 1979. Time Series Forecasting, Duxbury Press, Boston, pp. 36-88 [15] Lewis, C., 1982. International and business forecasting methods, Butterworths, London, pp. 254-268. [16] Smith, J., 2012. Statistical Analysis handbook, Chapman and Hall, the Winchelsea press, Winchelsea, pp. 454-468.

## INVESTIGATION AND COMPARISON OF SOLAR POWER PLANTSIMULATION PROGRAMS

C. Haydaroğlu<sup>1</sup>, B. Gümüş<sup>2</sup> H. Kiliç<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Dicle University Engineering Faculty Dep. Of Electrical and Electronics Engineering Diyarbakır / Turkey  
e-mail: [cem.haydaroglu@dicle.edu.tr](mailto:cem.haydaroglu@dicle.edu.tr)

<sup>2</sup>Dicle University Engineering Faculty Dep. Of Electrical and Electronics Engineering Diyarbakır / Turkey  
e-mail: [bilgumus@dicle.edu.tr](mailto:bilgumus@dicle.edu.tr)

<sup>3</sup>Dicle University Diyarbakır Technical Sciences Vocational School, Diyarbakır / Turkey  
e-mail: [heybetkilic@hotmail.com](mailto:heybetkilic@hotmail.com)

### Abstract:

Due to the polluting effect of fossil fuels on environment and their exhaustible nature, investments in renewable energy resources increasingly continue. In order to benefit from one of these energy resources, solar energy, 50 GW of new power plants were installed only in 2015. The use of simulation software is very important in the design and analysis of photovoltaic solar power plants. Simulation programs produce different results from one another. Each program also gives different analysis results. This raises the question of which program will be more effective in feasibility and decision processes. In this study, five different solar power simulation programs were compared on a functioning solar power plant. 250 kWp solar power plant located in Dicle University was simulated by using PVSOL, PVGIS, Sunny Design Web, Bluesol and PVsystems simulation programs and generation results were compared with the simulation results.

**Keywords:** Solar Energy, Solar Power Plant, Simulation Program, PVSOL, PVGIS, PVsystems

### 1.Introduction

Fossil fuels cause environmental pollution and global warming as a result of greenhouse gas emissions. Global warming in turn leads to temperature increases and glacier melting. In order to prevent climate changes from reaching dangerous levels due to increasing temperatures in the last 50 years, 195 countries attended the climate summit held in Paris in 2015 and jointly agreed to keep the annual temperature between 1.5-2°C (UNFCCC. Conference of the Parties (COP) 2015). This means making investments to transition from fossil fuels to renewable clean energy resources (IEA Energy Outlook 2016). Countries around the world have initiated great investments to make maximum use of solar energy which is one of the renewable energy resources. 50 GW of new solar power plants were launched only in 2015 (REN21 Global Status Report 2015).

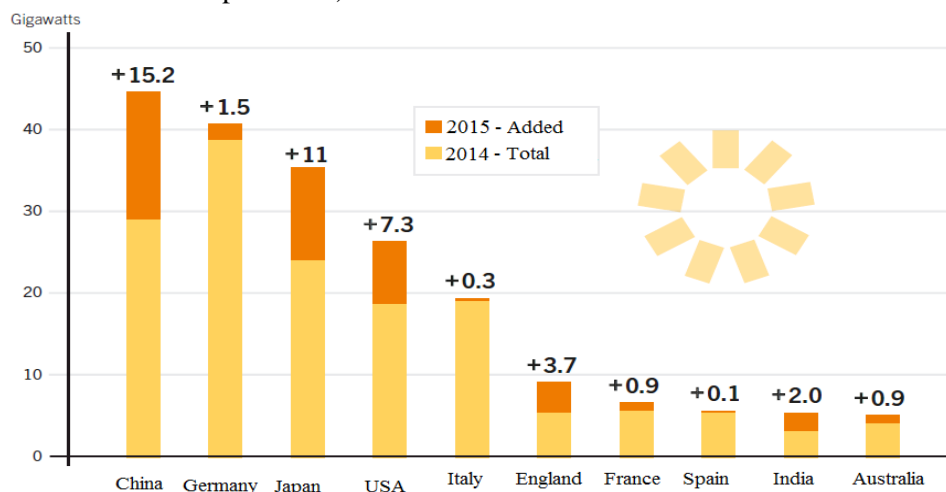


Figure 1: Top Ten Countries with Initial and Added Solar Power Capacity by 2015

Solar power plants which were used only in wealthy countries until recently now make significant contributions to meet the demand for energy all around the world. New government programs and incentives, increasing demand for electricity, discovery of the potential of solar power plants by countries, increasing competition and decreasing prices led to an increase of investments in this energy sector. 60% of the solar power plants launched in the world in 2015 were in Asia. As seen in Figure 1 above, China, Germany, Japan and USA are the top countries with solar power plant installations, followed by Italy.

Chinese government made a breakthrough in 2015 to reduce environmental pollution, increase local solar panel production and make maximum use of the renewable energy potential. As seen in Figure 1, China added 15.2 GW of new plants to its current potential and raised its total installed power to 44 GW (REN21 Global Status Report 2015).

As a result of increasing studies on the installation of solar power plants in the world, many simulation programs performing feasibility studies such as cost analysis, compatibility and efficiency of these plants have been released. The aim of this study is to compare the solar power plant design simulators which are actively used in the market. For comparison, the 250 kWp power plant established in Dicle University was used. Simulations were conducted based on the current parameters of the power plant and results were compared with the actual generation values.

## **2. Material and Method**

Five simulation programs were addressed in this study, which are PVGIS, Sunny Design Web, BlueSol, PVSOL and PVsyst simulation programs. This section briefly presents the characteristics of these programs and gives information on the power plant used as a model.

PVGIS is a free online tool used to estimate the solar power of a photovoltaic (PV) system. It calculates the estimated annual output energy of the panels. PVGIS is a project conducted by JRC (Joint Research Center) from the European Commission's science services center. A free web-based simulation program was developed as part of this project. This application shows the average daily and monthly electrical energy generation as well as the average monthly and yearly global irradiation on the plant location per square meter in the form of graphs and tables. The system also provides the tables of estimated losses due to temperature and low irradiation by using local ambient temperature, estimated losses due to optical reflection effects, cable losses, inverter losses and combined PV system losses. It is possible to import horizontal-axis, tilted-axis and dual-axis results with the tracking options (Haydaroglu, C. and Gumus, B., 2016).

Sunny Design Web is a web-based program with multiple language option, developed by SMA Solar Technology for the online design of renewable solar power plants. Irradiation settings for the configuration of PV system can be both automatically retrieved from the database and customized by the user. The system also provides the opportunity to prepare self-consumption or non-self-consumption, non-connected and Hybrid PV projects. This program contains inverter and panel data of various firms, thereby allowing the design of solar power plants with the desired power and characteristics (Haydaroglu and Gumus, 2016).

BlueSol is an easy-to-use software developed for the design and analysis of photovoltaic systems in all countries around the world with a standard Microsoft interface. With this software, different types of solar power systems with different powers can be designed. This simulation program is also used for the sizing of photovoltaic systems and gives information regarding cabling and electrical system. Furthermore, it can assess the radiation by preparing three-dimensional models and realizing a shading simulation on the near obstacles and surfaces. Electrical diagram is automatically created. Also, inverters with various powers, voltages and brands produce one-year average generation results of the system which will be installed with an interface containing all panel information. It can also calculate the depreciation time and installation cost of the system (Haydaroglu, et al , 2016).

PVSOL is a product package used for the design, simulation and financial analysis of photovoltaic systems with powers and scales ranging from on-grid large commercial scale systems to small off-grid housing systems. As seen in Figure 2, PVSOL performs a 3D visualization of PV systems by a shading calculation based on 3D objects. The program calculates the shading frequency distribution of input objects on the installation area. Results are shown on a graph. 3D visualization provides to the user with important information on shadows cast during a day or a year. Shading simulation can be conducted with 10-minute intervals. Yield simulation takes into consideration the final shading rate for each module.

The design and analysis of photovoltaic solar power systems can be performed by the PVsyst program. It can design various types of solar power systems (Sun 2011). On-grid and off-grid solar power systems and solar-powered irrigation systems can also be designed by this program (Yadav 2015; Guo, B. et al., (2015); Haydaroglu and Gumus,(2016);). With PVsyst solar power simulation program, 3-dimensional models can be prepared and their shading statuses can be analyzed. In the solar power system designed, the shadows cast on solar panels during sunrise and sunset can be viewed real-time. Furthermore, inverters with various powers, voltages and brands produce one-year average results of the



system which will be installed with an interface containing all panel information (Bouzguenda et al. 2014; Freeman et al. 2014; Fisher et al. 2014).

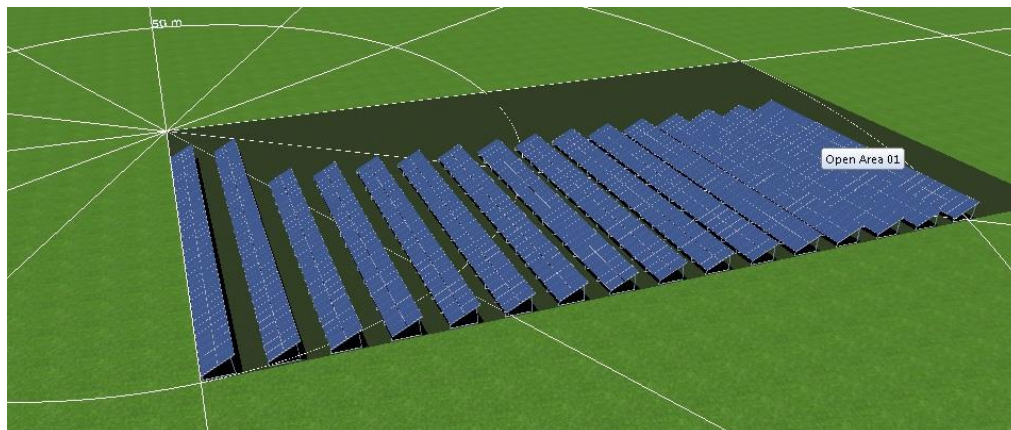


Figure 2. Simulation of Dicle University Solar Power Plant in PVSOL simulation program

Dicle University Solar Power Plant is placed in the geographical coordinates of 40016'E longitude and 37054'N latitude. Its plant power is 250 kWp. Polycrystal photovoltaic modules were used in the plant. In this system, 1000 panels with 250 Wp power were placed with a 30° tilt angle and 0° azimuth angle facing the south. Characteristics of the panel used are given in Table 1 below.

Table 1 Module Characteristics

	Measured Values	Rated Values
<b>Nominal Power</b>	253.1438 W	250 W
<b>Maximum power voltage</b>	30.3639 V	30.38 V
<b>Maximum current</b>	8.337 A	8.29 A
<b>Open current voltage</b>	37.1664 V	37.12 V
<b>Short circuit current</b>	8.796 A	8.76 A
<b>Maximum system voltage</b>		1000 V

One 10 kW and eight 30 kW outdoor type inverters were used in the plant. Dicle University Solar Power Plant is connected to the network via a 34.5 kV line. Network connection is provided by the conversion of low voltage at the inverter outputs to high voltage by a three-phase 0.4/34.5 kV 50 Hz, 630 KVA dry-type transformer. General wiring configuration of the Dicle University Solar Power Plant is shown in Figure 3.

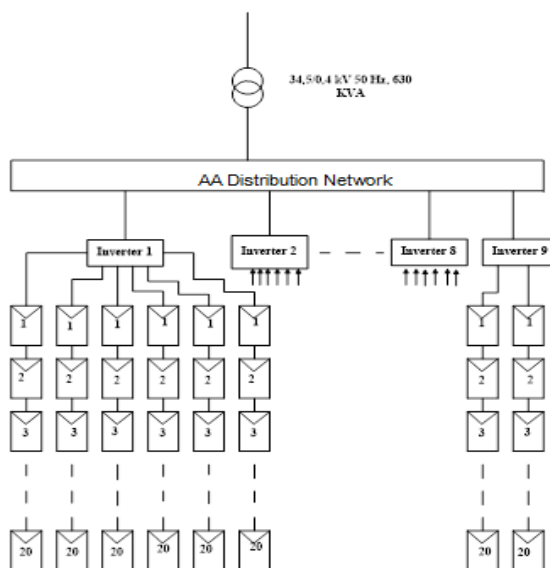


Figure 3. General Wiring Configuration of Dicle University Solar Power Plant System



10 different parameters including PV power, PV energy, power produced, energy produced, DC power, DC voltage, current, voltage, frequency, inverter temperature of the 250 kWp power plant can be measured and recorded in this power plant system by using a data-logger. Immediate data were recorded in the data-logger with 5-minute intervals. Recorded data can be remotely accessed and monitored by using a web-based program.

### 3. Findings

Dicle University Solar Power Plant was modeled and simulated on PVGIS, Sunny Design Web, Bluesol, PVsyst and PVSOL programs with a dedication to all the components used in its installation. An investigation of the data in Figure 4 obtained as a result of simulations shows that Bluesol program provides us with direct and diffuse radiation values, data of shading areas (if any), financial analysis and monthly estimated energy generation results. Sunny Design Web program gives the energy produced by the system and the monthly performance ratios. PVGIS program gives the average daily and monthly radiation and energy generation values and the optimal slope data of the system to be installed by months. PVSOL simulation program offers monthly radiation values as well as the energy generated as 10-minute long data in Excel format. PVsystem simulation program, on the other hand, presents the energy generated, radiation values, performance ratio, final yield, reference yield, array yields and losses. Table 2 shows a comparison of results obtained from simulation programs.

Table 2: Comparison of Simulation Program Outputs

Characteristics	Bluesol	PVGIS	Sunny Design Web	PVSOL	PVSyst
Daily Radiation	+	+	-	+	+
Shading Analysis	+	-	-	+	+
Financial Analysis	+	-	-	-	-
Generation Values	+	+	+	+	+
Performance Analysis	-	-	+	-	+
Report Format	Word	word	pdf	Excel	Pdf

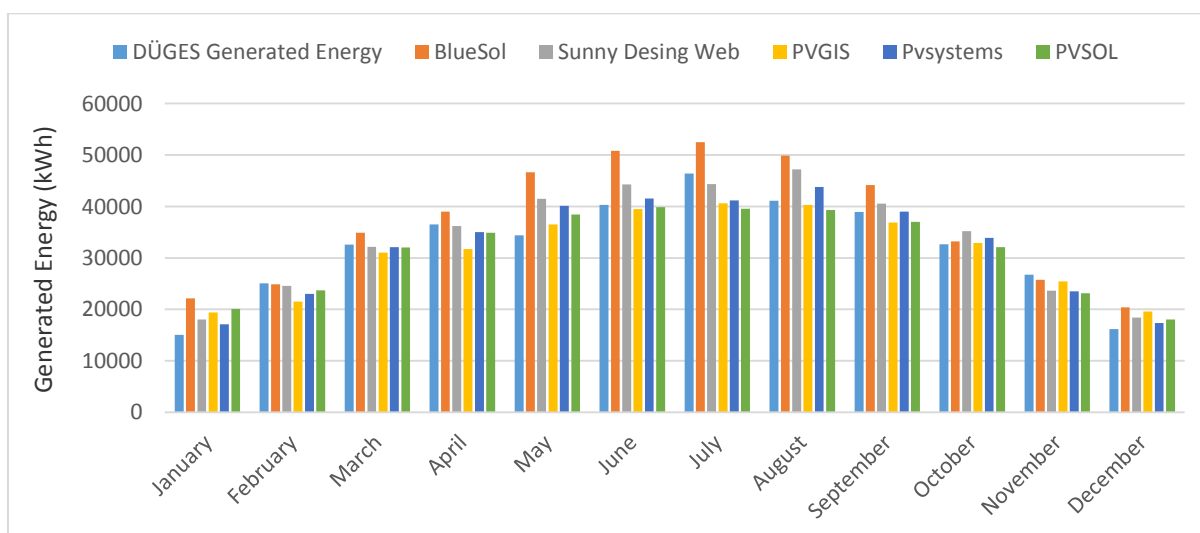


Figure 4. Comparison of Generation Values and Simulation Results of Dicle University Power Plant

### 4. Results and Discussion

A comparison of one-year actual generation values and simulation results of the energy generated in Dicle University Solar Power Plant is given in Figure 4. According to the actual generation values, 385.86 MWh of energy was generated in the plant throughout 2016. With respect to the simulation programs, PVSOL estimated 378 MWh of annual energy generation while Bluesol estimated 443.99 MWh and Sunny Design Web estimated 406.1 MWh of annual energy generation. An energy generation of 375.3 MWh was estimated by PVGIS simulation program. Considering the results of simulation pro-

grams used, energy generation estimated by PVsyst simulation program was observed to be closest to the actual energy generation values. PVsyst simulation program estimated an energy generation of 380.6 MWh. A comparison of estimations by simulation programs and long-term average data from the power plant will produce more accurate results, because generation values may vary by years depending on the seasonal weather conditions. The use of PVGIS simulation program will be advantageous for a short and quick preliminary study, while Bluesol, PVSOL and PVsyst simulation programs are recommended for detailed analyses. As compared to other simulation programs, PVsyst gives detailed information on generated energy, radiation values, performance ratio, final yield, reference yield, array yields and losses, and conducts a performance analysis in accordance with the standard IEC 61724.

## REFERENCES

- [1] Bouzguenda, M. et al., 2014. Design of an off-grid 2 kW solar PV system. 2014 9th International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies, EVER 2014, pp.1–6. [2] Fisher, B. et al., 2014. Field performance modeling of Semprius CPV systems. 2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2014, pp.759–765. [3] Freeman, J. et al., 2014. Validation of multiple tools for flat plate photovoltaic modeling against measured data. 2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2014, pp.1932–1937. [4] Guo, B. et al., (2015). Effect of dust and weather conditions on photovoltaic performance in Doha, Qatar. 2015 1st Workshop on Smart Grid and Renewable Energy, SGRE 2015. [5] Gostein, M., Caron, J.R. & Littmann, B., 2014. Measuring soiling losses at utility-scale PV power plants. 2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2014, pp.885–890. [6] Haydaroglu, C. & Gumus, B., (2016). Performance Analysis of grid connected 250 kWp Dicle University Solar Power Plant in Diyarbakır/ Turkey and comparison with simulation results at winter conditions. VI. International 100% Renewable Energy Conference, pp.60-65. [7] Haydaroglu, C., Gumus, B., Kaçmaz, C. & Yıldız, E., (2016). The Simulation Of Photovoltaic Solar Power Plants Thru The Bluesol Software And An Investigation On The Accuracy Of Simulation Results . International Science and Education Conference, pp.186-192. [8] Haydaroglu, C. & Gumus, B., (2016). Examination of pvgis and Sunny desing web photovoltaic system web-based simulation programs and evaluation of the reliability of results. International Science and Education Conference, pp.193-199. [9] Haydaroglu, C. & Gumus, B., (2016). Dicle Üniversitesi Güneş Enerjisi Santralinin PVsyst ile Simülasyonu ve Performans Parametrelerinin Değerlendirilmesi. DUMF Mühendislik Dergisi 7,3, 491-500. [10] IEA, 2015. Energy and climate change. World Energy Outlook Special Report 2015, pp.1–200. [11] Available at: <https://www.iea.org> [12] Kandasamy, C.P., Prabu, P. & Niruba, K., 2013. Solar potential assessment using PVSYST software. Proceedings of the 2013 International Conference on Green Computing, Communication and Conservation of Energy, ICGCE 2013, pp.667–672. [13] Sharma, V. & Chandel, S.S., 2013. Performance analysis of a 190kWp grid interactive solar photovoltaic power plant in India. Energy, 55, pp.476–485. Available at: <http://dx.doi.org> [14] Padmavathi, K. & Daniel, S.A., (2013). Performance analysis of a 3MWp grid connected solar photovoltaic power plant in India. Energy for Sustainable Development, 17(6), pp.615–625. Available at: <http://dx.doi.org> [15] Sun, J., (2011). An optimum layout scheme for photovoltaic cell arrays using PVSYST. Proceedings 2011 International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer, MEC 2011, pp.243–245. [16] UNFCCC. Conference of the Parties (COP), 2015. Adoption of the Paris Agreement. Proposal by the President. Paris Climate Change Conference - November 2015, COP 21, 21932 (December), p.32. Available at: <http://unfccc.int> [17] Wetstone, G. & Thornton, K. (Eds.). (2016). Renewables 2015 Global Status Report United Arab Emirates, Available at: <http://www.ren21.net> [18] Yadav, P., 2015. Simulation and Performance Analysis of a 1kWp Photovoltaic System Using PVsyst. , pp.358–363.

## АНАЛИЗ СОЛНЕЧНОГО ПОТЕНЦИАЛА РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

Э.Ю. Рахимов, Ш.Э. Саъдуллаева, М.Б. Шерматова

Международный институт солнечной энергии

корпус 2, д. 26, ул. Бодомзор йули, Ташкент, 100084, Республика Узбекистан

тел.: (+998) 71 235-40-90; факс: (+998) 71 235-03-77; e-mail: [avezov@uzsci.net](mailto:avezov@uzsci.net)

### Аннотация

В тезисе приводится краткая информация о проведённой работе по сбору и созданию базы данных актинометрических параметров, необходимых для оценки солнечного потенциала Республики Узбекистан. Результаты обработки 4-х летних данных по 6-ти метеорологическим станциям Республики представлены в виде графиков.

**Ключевые слова:** интенсивность солнечной радиации, метеорологические станции, актинометрические данные.

### 1. Введение

Согласно Стратегии развития Республики Узбекистан на 2017-2021 гг., утверждённой УП РУз от 7 февраля 2017 года №УП-4947, диверсификация топливно-энергетического баланса страны, а также декарбонизация производства электрической и тепловой энергии рассматриваются в качестве приоритетных направлений при дальнейшей оптимизации процесса функционирования энергетической системы республики и отраслей экономики в целом [1].

В связи с этим, остро стоит вопрос о проведении практической оценки потенциала внедрения и использования возобновляемой энергии на территории всей Республики. Основными компонентами возобновляемых источников энергии в республике являются солнечная энергия, гидравлическая, ветровая энергия, а также энергия биомассы.

Предварительная оценка технического потенциала энергии солнечного излучения в Узбекистане произведена на основе прогнозной оценки валового потенциала и с учетом достигнутого в мире и Узбекистане развития технологий преобразования, созданных технических средств массового изготовления, возможностей их применения в промышленно значимых масштабах.

Оценки показали, что технический потенциал, рассчитанный при условии использования 1% территории, составляет для размещения:

- солнечных установок с КПД солнечного коллектора 60% – 133,0 млн. т н.э. в год, или 0,26% от валового потенциала;
- солнечных фотоэлектрических модулей серийного изготовления с КПД преобразования 16% – оценивается в 42,46 млн. т.н.э. в год, или 0,08% валового потенциала;
- солнечно-тепловых электростанций с общей установленной мощностью 8000 МВт – 1,29 млн. т н.э. в год, или 0,002% валового потенциала.

Таким образом, общий технический потенциал использования солнечной энергии на настоящем этапе составляет 176,8 млн. т.н.э., или лишь 0,34% его валового потенциала [2]. Однако даже этот показатель в 3 раза больше годового производства углеводов в стране.

По оценкам экспертов, расширение мощностей солнечных станций до 8 ГВт позволит снизить топливную зависимость национальной энергосистемы.

### 1. Обработка и анализ актинометрических данных

Интенсивность солнечной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность, является базовой информацией, используемой при проектировании солнечных электрических станций и прогнозировании их выходных параметров. Оценка потенциала солнечной энергии в конкретном географическом районе является крайне важной задачей. Только в случае ее решения разработчики и потребители солнечных и ветровых установок будут иметь обоснованную информацию об эффективности работы оборудования, продолжительности его функционирования в течение года, сроках окупаемости, необходимости установки аккумуляторов, дублирующих мощностей. В рамках проекта Азиатского банка развития ТА 8008 «Развитие солнечной энергетики в Узбекистане» в шести регионах Республики были установлены 6 метеостанций. Данный тезис обобщает результаты обработок 4-х летних (январь 2013-декабрь 2016) актинометрических данных от 6-ти метеостанций, основывающихся на измерениях *GHI* (Суммарная солнечная радиация), *DNI* (Прямая солнечная радиация на нормальную поверхность), *DHI* (Диффузная солнечная радиация на горизонтальную поверхность), параметры измерялись периодичностью в 10 минут [3].

В таб. 1. приведены координаты 6-ти метеостанций, установленных по проекту ТА 8008.

**Таб. 1:** Координаты 6-ти наземных метеостанций в РУз, установленных при содействии АБР

№	Название области	Название метеостанции	Координата N (Широта)	Координата E (Долгота)
6	Ташкент	Паркент	N 41° 18' 57"	E 69° 44' 28"
8	Навои	Кармана	N 40° 08' 43"	E 65° 18' 32"
14	Самарканд	Дагбит	N 39° 45' 28"	E 66° 54' 54"
22	Наманган	Пап	N 40° 52' 41"	E 71° 06' 43"
30	Сурхандарья	Шерабад	N 37° 39' 57"	E 67° 00' 31"
31	Кашкадарья	Гузар	N 38° 37' 05"	E 66° 15' 17"

На рис. 1. показаны расположения 6-ти метеостанций, установленных по проекту ТА 8008 по регионам Респубике.



Рис.1. Распределение метеорологических станций по республике

Анализ включает оценку 4-х летних усредненных показателей солнечной радиации юго-восточной части РУз с целью дальнейшего определения производительности плоских солнечных энергетических установок при их установке в пределах указанной территории.

На рис.2. приведена суммарная солнечная радиация по характерным регионам Республики; в таб.2. приведено число ясных и неясных дней в году (за основу оценки солнечных дней взят показатель суточной энергетической освещенности, при которой работа солнечных коллекторов и панелей отвечает требованиям производительности:  $\Sigma q_{\perp} \geq 1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^2 \cdot \text{день}$ ) по данным, полученным от 6-ти метеостанций в регионах РУз; нарис. 3. показаны месячные значения интенсивности прямого солнечного излучения для города Ташкент (метеостанция Паркент).

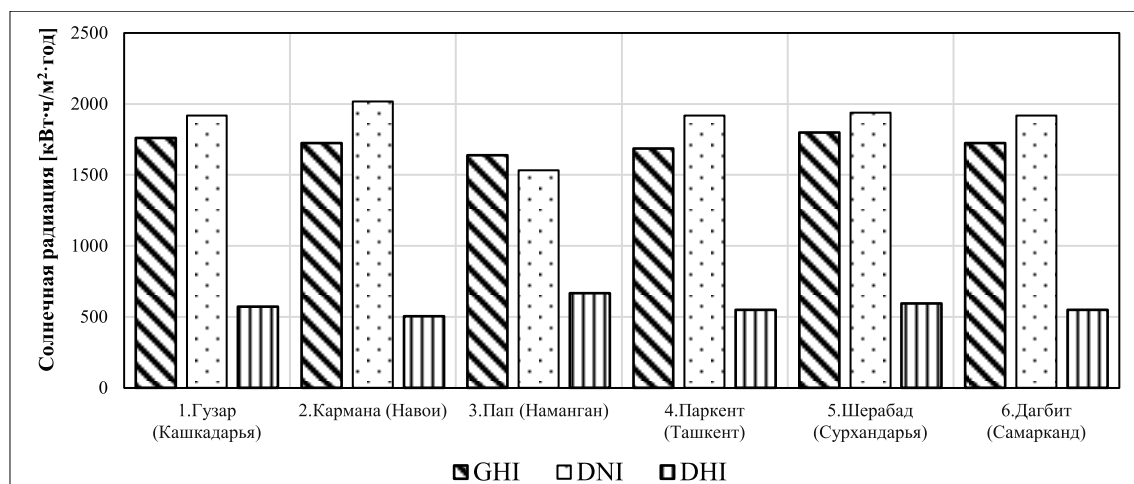


Рис.2. Суммарная солнечная радиация по характерным регионам Республики

Таб. 2: Число ясных и неясных дней в году по данным 6-ти метеостанций в регионах РУз.

Название метеостанций	Число ясных солнечных дней ( $\Sigma q_{\perp} \geq 1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^2 \cdot \text{день}$ )	Число неясных дней ( $\Sigma q_{\perp} < 1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^2 \cdot \text{день}$ )
1. Гузар (Кашкадарья)	323	43
2. Кармана (Навои)	329	37
3. Пап (Наманган)	316	50
4. Паркент (Ташкент)	319	47
5. Шерабад (Сурхандарья)	343	23
6. Дагбит (Самарканд)	331	35

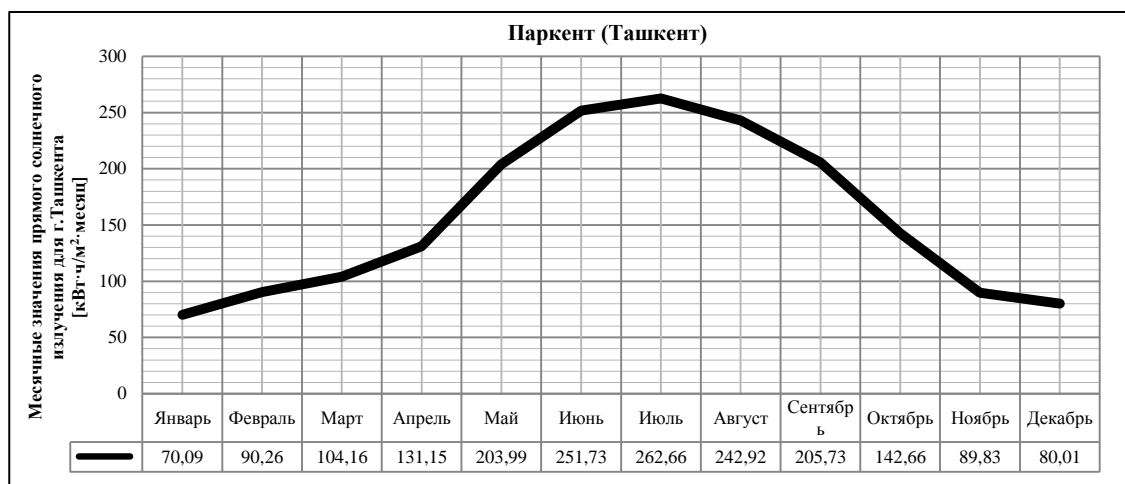


Рис. 3. Месячные значения интенсивности прямого солнечного излучения на нормальную поверхность для г. Ташкента

## 2. Выводы

Как видно из рисунков 2,3 и таб. 2. интенсивность солнечной радиации на территории республики изменяется в пределах от 1500 кВт ч/м<sup>2</sup>·год для Ферганской долины до 2100 кВт ч/м<sup>2</sup>·год для Севера Республики. Минимальное и максимальное значения месячной солнечной интенсивности прямого солнечного излучения на нормальную поверхность для города Ташкента наблюдаются соответственно в январе (70.09 кВт·ч/м<sup>2</sup>·месяц) и июле (262 кВт·ч/м<sup>2</sup>·месяц). Для сравнения, энергетическая освещённость территории стран Центральной Европы составляет 1000 кВт·ч/м<sup>2</sup>·год; Средиземноморье - приблизительно 1700 кВт·ч/м<sup>2</sup>·год[4].

Результаты исследований доказывают, что мероприятия по внедрению и эксплуатации в регионе солнечных установок для производства тепловой и электрической энергий являются технически целесообразными и перспективными в современных условиях дефицита первичных ресурсов сопряжённого с экспоненциальным ростом потребления.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Постановление президента Республики Узбекистан от 7 февраля 2017 года № УП-4947. О дальнейшем развитии возобновляемой энергетики, повышении энергоэффективности в отраслях экономики и социальной сфере на период 2017-2021 годов. [2] Аvezов Р.Р., Лутпуллаева С.Л. Состояние, перспективы и проблемы использования возобновляемых источников энергии в Узбекистане. «Физика в Узбекистане». Материалы конференции, посвященной «Году физики-2005». Ташкент; АН РУз, 27-28 сентября, 2005г.-с.119-123. [3] UZBTA 8008 АБР «Развитие использования солнечной энергии в Узбекистане», 2013-2017 гг.-с.109-121.[4] Солнечная энергия. Стратегии и перспективы развития. [www.rea.org.uadieretSolarsolar.html](http://www.rea.org.uadieretSolarsolar.html)

## ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В ЭКОНОМИКЕ УЗБЕКИСТАНА

А. Анарбаев<sup>1</sup>, Л. Алимова<sup>2</sup>, К. Мажидов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО «Научно-технический центр АО Узбекэнерго»  
Ташкент, 100125, Узбекистан, [anizan6004@mail.ru](mailto:anizan6004@mail.ru)

<sup>2</sup>Ташкентский государственный технический университет  
Ташкент, 100002, Узбекистан, [umferuza2003@mail.ru](mailto:umferuza2003@mail.ru)

### Аннотация.

Представлены основные предложения по технологиям в области возобновляемых источников энергии запланированным в рамках отраслевых аналитических докладов и правительственных программ Узбекистана, исследований авторов. Сделаны экономические оценки перспектив внедрения энергосберегающих мероприятий на основе ВИЭ в топливно-энергетическом секторе республики, на основе которых определены приоритеты мероприятий.

**Ключевые слова:** возобновляемые источники энергии, технологии, экономическая оценка.

### 1. Введение

Для существенного снижения энергоёмкости и широкого внедрения возобновляемых источников энергии целесообразна реализация ряда технологических мероприятий в указанных отрас-

лях экономики. Понимая важность перехода на эффективный путь развития, Правительство Узбекистана предпринимает ряд мер по переходу к широкому использованию возобновляемых источников энергии в энергетическом секторе, что нашло отражение в отраслевых аналитических документах [1]. Целесообразно проанализировать основные предложения на основе экономических оценок по энергосберегающим мероприятиям, как запланированным в рамках правительственных программ, так и получивших в мировой практике технологий по возобновляемым источникам энергии применительно к экономическим условиям республики.

## 2. Основная часть

Рассмотрим наиболее перспективные на наш взгляд в экономическом плане технологии возобновляемых источников энергии ВИЭ для внедрения в отрасли энергоснабжения республики.

### I. Внедрение солнечных приставок к котельным систем теплоснабжения.

При реконструкции и модернизации систем теплоснабжения республики в существующие централизованные теплоисточники могут быть интегрированы солнечные установки по предварительному подогреву воды. Этот вариант наиболее экономичен и надежен, поскольку обученный персонал обеспечит правильную эксплуатацию оборудования. При этом могут существенно быть сокращены выбросы вредных веществ от ТЭС и локальных котельных.

Быстрый возврат инвестиций в эту технологию возможно получить за счет высвобождения значительных объемов газа от внутреннего потребления на экспортные нужды. В Узбекистане добывается 65 млрд.м<sup>3</sup> природного газа, из них 60% потребляется внутри страны. Экспортируется около 12 млрд. м<sup>3</sup> по цене примерно \$200 за 1000м<sup>3</sup>. в то время как на внутреннем рынке он продается по \$50 при субсидировании государством 40% затрат в теплоснабжении. Солнечный теплоисточник позволяет сэкономить при удельных показателях 0,12÷0,15 тонн условного топлива (т.у.т.) на 1 м<sup>2</sup> солнечного коллектора до 200 м<sup>3</sup> природного газа. Требуемые удельные капитальные вложения с учетом необходимого оборудования и стоимости строительно-монтажных работ составят от \$450 на 1 м<sup>2</sup> площади солнечных коллекторов. Согласно данным Госкомстата республики в теплоснабжении по итогам 2014 года отпущено 36396,4 тыс.Гкал. На её производство израсходовано 4116,2 тыс. т.у.т. В среднем для котельных нагрузка горячего водоснабжения (ГВС) составляет порядка 30% от общей, которая включает нагрузку на отопление. Если обеспечивать ввод солнечных приставок в существующие котельные при темпах для замещения ими нагрузки ГВС в теплоснабжении республики в 4%, то потребуются капитальные вложения в солнечные коллектора площадью 50000м<sup>2</sup> в размере порядка \$22,5 млн. Объемы экономии газа составят 10000 тыс. м<sup>3</sup> при потенциальной экспортной выручке

$$$(200-50) \times 10\ 000 = \$1,5 \text{ млн.}$$

Выбросы CO<sub>2</sub> (1 000 м<sup>3</sup> = 1,8977 т CO<sub>2</sub>) снизятся на 19 тыс. тонн. При этом дополнительный доход по экологическим проектам в рамках Парижской конвенции по климату, аналогичным механизму чистого развития ранее действовавшего Киотского протокола, при цене за тонну выбросов 15\$, составит \$313,5 тыс. в год.

Окупаемость капитальных вложений достигнет

$$\$22,5 \text{ млн.} / (\$1,5 \text{ млн.} + \$0,31 \text{ млн.}) = 12,4 \text{ лет}$$

Этот показатель обеспечит за отведенный срок эксплуатации энергосберегающего оборудования возврат вложенных финансовых средств.

II. Внедрение при новом строительстве в системах отопления тепловых насосов. В областях и районах, где существует относительный избыток электроэнергии и относительный недостаток теплоты крайне выгодна установка тепловых насосов. Теплонасосные установки, используя возобновляемую низкопотенциальную энергию окружающей среды и повышая ее потенциал до уровня, необходимого для теплоснабжения, затрачивают в 3 ÷ 7 раз меньше первичной энергии, чем при сжигании топлива. В целом за счет экономии на инженерных коммуникациях стоимость квадратного метра в здании, оснащенный системами ВИЭ, примерно на 30–40 % ниже, чем в обычном доме.

Средняя площадь крыши типичного многоквартирного дома составляет 1200м<sup>2</sup>. Если половину этой площади покрыть солнечными батареями, то можно получить 60 тыс. кВтч энергии в год в каждом доме даже при том, если они имеют КПД только 10%. Избыточная энергия может накапливаться за лето в специальном аккумуляторе, расположенном под домом, и использоваться зимой.



Стоимость ФЭП в составе автономных энергоустановок равна на мировом рынке  $\$6$  /Вт<sub>пик</sub> с радиусом фотоэлемента 2,5 см на 1 Вт<sub>пик</sub>. Стоимость теплового насоса  $\$279$  тыс. за 1 Гкал/час установленной мощности. Отопительный период в республике длится в среднем 3000 часов.

Для среднестатистического дома потребляется тепловая энергия при отопляемых площадях  $1500\text{ м}^2 \times 0,43\text{ Гкал/м}^2 \approx 640$  Гкал. Таким образом, дополнительные капвложения для одного дома составляют

$$\$6 \times (1200/2)/(3,14 \times (2,5 \times 10^{-1})^2) + \$279\,000 \times 640/3000 = (\$18\,345 + \$59\,520) = \$77\,865$$

В этом случае срок окупаемости с учетом стоимости экономии электро- и теплоэнергии, что ненамного больше показателей развитых стран

$$\$77\,865/(\$0,03 \times 60000 + \$15,5 \times 640) = 6,65 \text{ лет}$$

Темпы строительства в городах республики при увеличении потребностей в жилой площади могут составлять до 900 типовых домов в год, что потребует инвестиций для их оборудования ФЭП и тепловыми насосами

$$\$51,2 \times 900 = \$46,1 \text{ млн.}$$

В перспективе это позволит создать индустрию экологического строительства, даст толчок развитию использования ВИЭ для систем теплоснабжения.

### III. Создание крупных фотоэлектрических станций в энергетике.

В условиях южных широт ФЭС, подключенные к сети, могут производить не менее 1500 кВтч/кВт<sub>пик</sub> в год. Достигнутая стоимость таких установок в развитых странах мира составила в 2009 году около 4  $\$/\text{Вт}_{\text{пик}}$ . Для станций их стоимость меньше чем для небольших установок.

Производство электроэнергии ФЭС мощностью 1 МВт при капвложениях в  $\$400$  тыс. составит 1500 тыс. кВтч в год. При стоимости 1 кВтч электроэнергии в республике  $\$0,03$  расчетный срок окупаемости

$$\$400 \text{ тыс.} / (1500 \text{ тыс.} \times \$0,03) = 8,9 \text{ лет}$$

Это не намного больше норматива при внедрении нового оборудования в энергетике. Т.к. под ФЭС в 1 МВт требуются площади в  $4 \text{ км}^2$ , то выбор места их установки не должен приводить к отчуждению пахотных земель в республике.

### IV. Создание электростанций, работающих на биомассе.

Ещё одной новой для республики является использование биомассы в энергетике как возобновляемого ресурса. В мировой практике [2] накоплен положительный опыт в данном направлении возобновляемой энергетики. Министерство Энергетики США (US Department of Energy — DoE) и компания Ameresco в штате Южная Каролина торжественно открыли новую генерирующую станцию на основе биомассы стоимостью 795 млн. долларов США. Энергосервисный контракт, подписанный в 2009 году сроком на 20 лет, стал самым дорогим в истории США с участием государства и ее эксплуатация за этот период позволит сэкономить до 1 млрд. долларов США. Станция SRS (Savannah River Site) Biomass Cogeneration Facility, расположенная на площади в 34 акра (137 593 кв. м.), заменила собой угольно-мазутную ТЭС, построенную еще в 1950-х годах. В качестве сырья используются отходы местных деревообрабатывающих предприятий (древесная стружка/щепа), 385.000 тонн которых SRS сможет ежегодно генерировать в 20 МВт. За 30 месяцев сертификации, разработки и строительства, SRS Biomass Cogeneration Facility позволила создать до 800 рабочих мест, а при выходе на полную мощность на обслуживании станции будет задействовано около 25 сотрудников. В после США принят закон «H.R.2419, the Food, Conservation, and Energy Act of 2008», который предусматривает ежегодное финансирование энергетического лесоводства в США в размере  $\$15$  млн.

Крупнейшая в Европе электростанция, работающая на древесной биомассе, находится в Зиммеринге (Австрия). Мощность электростанции 66 МВт. Электростанция ежегодно потребляет 190 тысяч тонн биомассы, собираемой в радиусе 100 км от станции. Работа станции позволяет сократить ежегодные выбросы  $\text{CO}_2$  на 144 тысячи тонн [2]. Согласно расчетам срок окупаемости таких станций, работающих на биомассе составит при ставке дисконтирования в  $r=10\%$ , капвложениях  $K=795$  млн. $\$$ , экономии  $\mathcal{E}=1$  млрд. $\$$ , сроке эксплуатации  $T=20$  лет

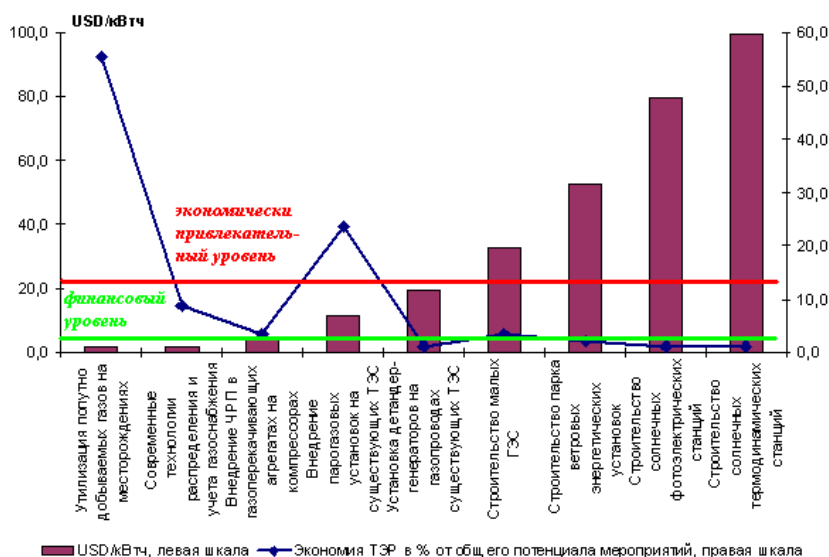
$$C_{ок} = \frac{\ln(1 - r \cdot K / (\mathcal{E} / T))}{\ln(1 + r)} \approx 18 \text{ лет}$$



Результаты исследование энергосберегающих технологий в крупной электроэнергетике на основе возобновляемых источников энергии, обобщены в таблице 1.

**Таб. 1:** Экономические показатели по энергосберегающим мероприятиям на основе ВИЭ в секторе топливно-энергетического комплекса (ТЭК)

Технологии в возобновляющих источниках энергии	Капитальные вложения, млн.\$	Экономия ТЭР, тыс. т.н.э. в год	Срок окупаемости, лет
Строительство малых ГЭС мощностью	260	92,4	7
Строительство парка ветровых энергетических установок до 100 МВт мощности	250	55,2	8 (при «зеленых» тарифах)
Строительство солнечных термодинамических станций до 50 МВт мощности	250	29,2	8 (при «зеленых» тарифах)
Строительство фотоэлектрических станций до 50 МВт мощности	200	29,2	8,9
Строительство и реконструкция ТЭС на электростанциях, работающие на биомассе	795	11,9	18



**Рис.1.** Кривые экономической целесообразности использования технологий возобновляемых источников энергии в топливно-энергетическом комплексе республики. (долл./кВтч)

Кривая экономической целесообразности (рис. 1) показывает удельную стоимость производства энергии (левая шкала) и экономию топливно-энергетических ресурсов (правая шкала) для каждой из альтернатив «озеленения», которые запланированы в рамках правительственных программ или предлагаются в рамках исследования. Отражены экспортные и внутренние цены на энергию, определяющие экономически и финансово привлекательные уровни. Представление такой комбинации данных на одном графике дает возможность определения приоритетов мер по повышению энергоэффективности в зависимости от объемов инвестиций и ожидаемой экономии. Поэтому разделение мероприятий на этапы было осуществлено на основе построенных кривых.

Таким образом, на начальном этапе (первые 3-5 лет) необходимо реализовать технологические меры, которые имеют сроки окупаемости до 7 лет (срок службы энергосберегающего оборудования в соответствии с утвержденными нормами амортизации) и предусматривают удельные затраты ниже стоимости сэкономленного топлива и энергии.

На начальном этапе (3-5 лет):

- строительство микро и малых ГЭС мощностью до 30 МВт. В республике была разработана Программа развития малой гидроэнергетики на ближайшие годы, предусматривающая реализацию проектов по модернизации действующих и строительству новых гидроэлектростанций. Реализация программы позволит нарастить генерирующие мощности гидроэнергетики с 394 МВт в до 613 МВт;

На последующих этапах (до 7 лет):

- строительство парка ветровых энергетических установок до 100 МВт мощности. В частности, планировалось строительство в посёлке Чарвак опытной ветровой энергетической установки мощностью 750 кВт, а также ветропарка на плато Устюрт;

- строительство солнечных термодинамических электростанций до 50 КВт мощности. До 2018 года планировалось строительство солнечной станции мощностью 50 МВт с экономией 36 млн.м<sup>3</sup> природного газа при выработке 110 млн.кВтч электроэнергии

- строительство крупных солнечных фотоэлектрических станций до 100 МВт мощности и более, в том числе на базе собственного производства панелей в республике из добываемого кремния и перерабатываемого в технический.

- авторами предлагается рассмотреть переход крупных тепловых угольно-мазутных электростанций на альтернативное топливо – биомассу. Как было показано выше, в мировой практике используется технология смешивания угля с биомассой для сжигания на электростанциях. Энергетические плантации биомассы предупреждают эрозию почвы, способствуют улучшению состояния окружающей среды. При сжигании биомассы на электростанции в атмосферу выбрасывается столько же CO<sub>2</sub>, сколько было поглощено растением во время роста. Широко практикуется создание специальных плантаций быстрорастущих пород древесины тополя и ивы с дальнейшим измельчением древесины и переработкой в пеллеты. На территориях, примыкающих к высыхающему Аральскому морю целесообразно создание таких энергетических плантаций вокруг при строительстве электростанции, работающей на биомассе. Другим перспективным районом зона вокруг Ново-Ангренской ТЭС, работающая на низкокачественном буром угле, с тяжелой экологической обстановкой является предпочтительным районом высаживания таких плантаций.

Мероприятия по установке энергетического оборудования на основе возобновляемых источников энергии являются высоко затратными. Поэтому необходимо просчитывать как технические, так и экономические аспекты при их внедрении в республике, предусматривая поэтапность с тем, чтобы создать необходимую базу для устойчивого развития ВИЭ в Узбекистане.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1]. Концептуальные положения и направления развития использования возобновляемых источников энергии для производства электрической и тепловой энергии в Узбекистане на долгосрочную перспективу. Документ-разработан ГАК «Узбекэнерго» 2011. [2]. Перспективы энергетических технологий. 2008. МЭА

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В ЭКОНОМИКЕ РТ

М.М.Султонова, А.И.Шарипов

*Политехнический институт Технического университета Таджикистана имени академика М. Осими  
город Худжанд, Таджикистан*

тел.: 927773113,

e-mail: [ngo\\_saodat@mail.ru](mailto:ngo_saodat@mail.ru)

Предметом исследования является определение уровня использования потенциала альтернативных источников энергии в республике.

Цель исследования. Выявить и оценить эффективность использования альтернативных источников энергии в экономике Республики Таджикистан.

Задачи исследования:

- исследовать все виды возобновляемых источников энергии;
- оценить современное состояние энергетики Республики Таджикистан;
- выявить и оценить особенности использования альтернативных источников энергии в экономике РТ.
- выбрать из различных видов возобновляемых источников энергии наиболее эффективный для экономики республики;

Энергетика занимает в Таджикистане особое место, являясь главной составляющей и стержнем промышленного и сельскохозяйственного производства, неотъемлемой частью систем жизне-

обеспечения граждан, а также образования, транспорта и телекоммуникаций. Энергетика Таджикистана – это платформа цивилизованного образа жизни его граждан.

При нынешнем дефиците электроэнергии и при увеличении потребления в пять раз сегодня как население, так и производственно-промышленный сектор республики испытывает нехватку в электроэнергии. Дефицит энергии и ограниченность топливных ресурсов с всё нарастающей остротой показывают неизбежность перехода к альтернативным источникам энергии (АИЭ).

В Стратегии Развития Энергетики Таджикистана наравне со строительством новых источников энергии придается большое значение энергоэффективности. Приняты Закон РТ «Об использовании возобновляемых источниках энергии», подписан Указ Президента РТ «О дополнительных мерах по экономному использованию энергии».

Альтернативные источники энергии - это источники на основе постоянно существующих или периодически возникающих в окружающей среде потоков энергии. Возобновляемая энергия не является следствием целенаправленной деятельности человека, и это является ее отличительным признаком. В соответствии с резолюцией № 33/148 Генеральной Ассамблеи ООН (1978 г.) к АИЭ относятся: солнечная, ветровая, геотермальная, энергия морских волн, приливов и океана, энергия биомассы, древесины, древесного угля, торфа, тяглового скота, сланцев, битуминозных песчаников и гидроэнергия больших и малых водотоков.

Таджикистан обладает значительными запасами возобновляемых энергоресурсов. Базовым возобновляемым энергетическим ресурсом Таджикистана являются гидроресурсы, которые являются самыми высокоэффективными среди всех видов возобновляемых источников энергии, находящихся на территории страны, а вырабатываемая на гидроэлектростанциях (ГЭС) электроэнергия - самая дешевая из всех существующих способов получения энергии в Таджикистане. Кстати, запасы возобновляемых гидроэнергетических ресурсов, возможных к освоению, превышают нынешнее потребление электроэнергии Центральной Азии в 3,5 раза. Другие возобновляемые источники энергии, такие как солнечная и ветровая энергия, энергия биомассы, термальных источников могут практически обеспечить около 10% энергетических потребностей республики. При производстве электроэнергии по основным источникам, становится очевидным то, что ВИЭ совершенно не используются (кроме энергии воды, в основном больших ГЭС). Несмотря на отсутствие ВИЭ, можно предварительно подсчитать, что потенциал ВИЭ составляет:

Гидроэнергия 527 ТВт-ч/а (45314 КТНЭ/а)

Солнечная энергия 25 ТВт-ч/а (2150 КТНЭ/а)

Биомасса 2 ТВт-ч/а (172 КТНЭ/а)

Ветряная энергия 25-150 ТВт-ч/а (2150-12898 КТНЭ/а)

Геотермальная энергия 45 ТВт-ч/а (3869 КТНЭ/а)

Эти цифры дают основания предполагать, что общий потенциал ВИЭ приблизительно составляет 60000 кТНЭ/а. Это огромный потенциал, учитывая то, что общее предложение первичной энергии в год приблизительно составляет 3600 кТНЭ/а.

Таджикистан богат гидроэнергетическими ресурсами; гидропотенциал главных рек страны приблизительно составляет 40,000 мВ, из которых в данное время используется только 10%.

В настоящее время используется менее 4% имеющегося потенциала от технических возможных и экономически эффективных запасов гидроресурсов Таджикистана и менее 1% от других видов ВИЭ. Около 10% населения Таджикистана проживает в горных труднодоступных районах по долинам мелких рек и водотоков вдали от централизованных систем электроснабжения. И наиболее перспективным здесь является применение нетрадиционных источников возобновляемой энергии: энергия малых рек, солнечная энергия, геотермальные воды, энергия ветра и биоэнергия. Особенно важно то, что малые водотоки практически равномерно распределены на большей территории Таджикистана и ресурсы их огромны. К малым ГЭС условно относят гидроэнергетические агрегаты мощностью от 100 кВт до 10 МВт. Меньшие агрегаты относятся к категории микро-ГЭС.

В последние годы малая гидроэнергетика занимает одно из ведущих мест в электроэнергетике многих стран мира. В некоторых странах суммарная мощность микро-ГЭС превышает 1 млн. кВт (Италия, Франция, Испания, Швеция, Канада, США). Их используют как локальные экологически чистые источники энергии, за счет которых экономятся традиционные виды топлива, уменьшая выброс углекислого газа в атмосферу. Лидирующие позиции в развитии малой гидроэнергетики занимает Китай, если в 2000 году в этой стране совокупная мощность

малых ГЭС составляла около 25 ГВт, то к началу 2010 года работало 45 тыс. малых ГЭС общей мощностью более 55 ГВт, обеспечивающих значительную часть потребностей в электроэнергии сельского населения страны.

Согласно Барки Тоджик, в Таджикистане построено приблизительно 340 мГЭС, однако только одна из этих станций подключена к электросети. Принимая во внимания огромный потенциал развития мГЭС, Правительство приняло долгосрочную «**Программу строительства малых электростанций на 2009-2020гг**» (одобрена Правительством Республики Таджикистан 02 февраля 2009 года, № 73). Согласно данной программе, ожидается строительство новых мГЭС, общей мощностью около 100 МВт, что позволит повысить производство до 642 тВт·ч в год.

В наши дни интерес к малым ГЭС возрос. Независимо от того, что крупные ГЭС являются экономически более выгодными, у малых гидроэлектростанций есть свои плюсы. Во-первых, строительство малых ГЭС менее затратно и может быть организовано за счет частных предприятий и фермерских хозяйств. Немаловажным фактом является то, что малые ГЭС зачастую не требуют сложных технических элементов, таких как большие водохранилища, являющиеся причиной затопления больших площадей на равнинных реках. Современные малые гидроэлектростанции полностью автоматизированы. А их высокая надежность и полный ресурс не менее 40 лет только доказывают необходимость их использования.

Из всех ВИЭ малые ГЭС наиболее конкурентоспособны (за исключением обычных ГЭС).

В настоящее время, в республике приоритетными проектами являются строительство малых ГЭС, размещенные в непосредственной близости к потребителям во избежание строительства дорогостоящих линий электропередач.

Предварительные оценки показывают, что на притоках рек, в горных регионах республики технически возможно и экономически целесообразно строительство более 900 мГЭС мощностью от 100 до 3000 кВт. По оценкам экспертов использование энергии малых рек может удовлетворить потребность в электроэнергии около 500-600 тысяч человек, проживающих в отдаленных регионах страны, на 50-70%, а в отдельных случаях – на 100%. И сегодня само население горных регионов активно начинает строить микро и мини ГЭС, используя, как собственные средства, так и средства доноров.

Учитывая традиционное ведение хозяйств жителей села, где практически в каждом дворе имеется домашний скот и птица, целесообразно использование органических отходов растительного и животного характера для получения из них биогаза, а также высококачественного органического удобрения.

Использование биоэнергетических установок перспективно в условиях крупных животноводческих комплексов и птицефабрик, где помимо производства электрической энергии существует острая потребность в утилизации отходов. Таджикистан обладает потенциалом использования сельскохозяйственных отходов в качестве источника энергии, в частности биогаза из навоза крупного рогатого скота и помета птиц. Несколько экспериментальных генераторов биогаза в настоящее время работают в Таджикистане.

В ходе биохимических процессов биомасса может быть превращена в такие виды топлива как газ метан, жидкий метанол, твердый древесный уголь.

Предполагается, что Таджикистан располагает потенциалом для производства примерно 2 млрд. кВт·ч/год электроэнергии из биомассовых ресурсов.

Для построения биогазовых установок в условиях Таджикистана, был использован опыт Индии, где с 1939г. используются биогазовые установки для дехканских хозяйств, их количество превышает более 100000 установок, и по их мнению устройства такого вида являются очень выгодными.

Полученный биогаз, может идти на отопление животноводческих помещений, жилых домов, теплиц, на получение энергии для приготовления пищи, сушку сельскохозяйственных продуктов горячим воздухом, подогрев воды, выработку электроэнергии с помощью газовых генераторов.

После утилизации содержание питательных веществ в полученном удобрении увеличивается на 15% по сравнению с обычным навозом. При этом в новом удобрении уничтожены гельминты и болезнетворные бактерии, семена сорных трав. Такой навоз применяется без традиционных выдержек и хранения. При утилизации получается также жидкий экстракт, который предназначается для полива кормовых трав, овощей и т.п. Сухое удобрение используется по прямому назначению, при этом урожайность люцерны повышается на 50%, кукурузы на 12, овощей на 20-30%.

Из навоза одной коровы можно получить в сутки до 4,2 м<sup>3</sup> биогаза. Энергия, заключенная в одном м<sup>3</sup> биогаза, эквивалентна энергии 0,6 м<sup>3</sup> природного горючего газа, 0,74 л нефти, 0,65 л дизельного топлива, 0,48 л бензина и т.п. При применении биогаза экономятся также мазут, уголь, электроэнергия и другие энергоносители. Внедрение биогазовых установок улучшает экологическую обстановку на животноводческих фермах, птицефабриках и на прилегающих территориях, предотвращаются вредные воздействия на окружающую среду.

Климат Таджикистана благоприятен для использования солнечной энергии. Есть 280-330 солнечных дней в году, и интенсивность суммарной солнечной радиации колеблется в течение года от 280 до 925 МДж/м<sup>2</sup> в предгорных районах, а также от 360 до 1120 МДж/м<sup>2</sup> в горной местности. Использование имеющейся солнечной энергии в Таджикистане может удовлетворить 10-20% спроса на энергоносители. По оценкам потенциал солнечной энергии Таджикистана составляет около 25 млрд. кВтч / год. Этот потенциал практически не используется, если не учесть некоторое его использование для нагрева воды.

Геотермальные ресурсы в Таджикистане мало изучены. Данные об использовании термальных вод, как правило, отсутствуют, хотя он используется в некоторых районах Таджикистана, например в районе Ходжа-Оби-Гарм. Наравне с другими ВИЭ для горных районов Таджикистана может быть перспективным термоэлектрические преобразователи для получения электрической энергии, а также использование низкотемпературного потенциала земли и водотоков с использованием тепловых насосов.

Существует небольшой потенциал энергии ветра в Таджикистане, но использование как дополняющий основной гидроэнергетики оправдано в некоторых регионах. Наиболее сильные ветры в горных районах, таких, как Федченко и Анзоб, где ландшафт страны выступает за сближение воздушных потоков, например, в Худжанде и Файзабад. Среднегодовая скорость ветра в среднем в этих регионах составляет около 5-6 м / с. Среднюю скорость ветра 3-4 м / с можно найти в открытых равнинах и долинах.

Изложенное дает возможность сделать следующие выводы:

- Таджикистан обладает огромными ресурсами для разработки дополнительных источников энергии.
- При нынешнем дефиците электроэнергии и при увеличении потребления в пять раз становится актуальным поиск дополнительных источников энергии.
- При условиях того, что добыча и транспортировка традиционных основных источников энергии ископаемых органических топливных ресурсов становится дороже, а запасы их на нашей планете не безграничны и быстро иссякают, вопрос о производстве биогаза становится важным.
- Предполагается, что Таджикистан располагает потенциалом для производства примерно 2 млрд. кВт.ч/год электроэнергии из биомассовых ресурсов.
- Доступность использования разных видов бесплатного сырья
- Возможность и доступность построения биогазовой установки в условиях дехканских хозяйств
- Биогаз заменяет традиционное топливо и можно использовать в следующих направлениях: для производства электричества, для производства тепловой энергии, для производства газа, а также в качестве удобрения для сельского хозяйства
- Использование биогаза экологически безопасно, и может способствовать увеличению потенциала энергосбережения свыше 30%.

На стадии исследования видов альтернативных источников энергии было установлено, что альтернативными источниками энергии являются: солнечная, ветровая, геотермальная, энергия морских волн, приливов и океана, энергия биомассы, древесины, древесного угля, торфа, тяглового скота, сланцев, битуминозных песчаников и гидроэнергия больших и малых водотоков.

Сделан анализ современного состояния энергетики Республики Таджикистан. Анализ показал, что из 5190 МВт имеющегося мощности энергосистемы Таджикистан на долю гидроэлектростанций приходится 93,9%, на долю тепловых станций – 318 МВт, то есть всего около 6,1%.

Более 98% электроэнергии, вырабатываемой в Таджикистане, получают на гидроэлектростанциях, в том числе, 97% на крупных и средних.

Доля энергетических затрат в общем объеме ВВП достаточно высока и составляет порядка 60%, что связано с низкой экономической эффективностью в стране. Кроме того, цены на жидкое

топливо подвержены колебаниям на мировом рынке и оказывают значительное влияние на общие энергетические затраты. Экономический рост является основной причиной увеличения потребления энергии. При общем объеме доходов Госбюджета Республики Таджикистан в 2012 году 10,160,600 тыс. сомони на развитие топливно-энергетический комплекса запланировано 1 549,4 млн. сомони или 15,2% всего госбюджета страны. Следует отметить, что после введения энергетической блокады, доля экспорта и импорта электроэнергии в платёжном балансе страны резко снизилась, а доля импорта энергоносителей (нефтепродукты, газ) в платёжном балансе, постоянно растёт в связи с ростом цен.

При оценки особенностей использования альтернативных источников энергии в экономике Республики Таджикистан были сделаны следующие выводы:

- Таджикистан обладает огромными ресурсами для разработки дополнительных источников энергии;

- при нынешнем дефиците электроэнергии и при увеличении потребления в пять раз становится актуальным поиск дополнительных источников энергии;

- при условиях того, что добыча и транспортировка традиционных основных источников энергии ископаемых органических топливных ресурсов становится дороже, а запасы их на нашей планете не безграничны и быстро иссякают, вопрос о производстве биогаза становится важным.

Для выбора наиболее эффективного вида альтернативных источников энергии были сделаны расчеты с использованием метода сравнительной эффективности. По этому методу сопоставляются затраты, связанные с сооружением и последующей эксплуатацией рассматриваемого энергетического объекта, с аналогичными затратами по альтернативному проектному решению, обеспечивающему одинаковый энергетический эффект при соблюдении надежности и качества энергообеспечения в соответствии с требуемыми нормативами. Экономически оправданным является вариант, имеющий наименьшие затраты.

Для сравнения были выбраны три вида возобновляемой энергии: ветровая, солнечная и гидроэнергия, имеющие одинаковую мощность. Предварительные расчеты показали, что строительство мГЭС требует капиталовложений в размере 412,62 тыс. сомони, ветровой электростанции 600 тыс.сомони, солнечной электростанции 539,3 тыс. сомони. В тоже время в процессе эксплуатации ежегодные издержки составляют: мГЭС=29,1 тыс. сомони, ВЭС=42 тыс. сомони, СЭС=35,7 тыс. сомони. Из этого следует, что при одинаковом энергетическом эффекте в отличие от других экологически безопасных возобновляемых источников электроэнергии, таких, как солнце, ветер, малая гидроэнергетика является экономически эффективным.

Проведенный анализ использования ВИЭ в экономике РТ и сделанные расчеты дали возможность разработать следующие мероприятия для эффективного использования альтернативных источников энергии: Сделанные расчеты и проведенный анализ использования ВИЭ в экономике РТ дали возможность разработать следующие мероприятия для эффективного использования альтернативных источников энергии:

1. Привлечение инвестиций. Сооружение в республике новых крупных объектов энергетики - тепловых или гидравлических электростанций - требует колоссальных финансовых, технических, технологических, кадровых ресурсов и в большинстве своем не под силу нашей стране, а институты частных инвестиций хотят иметь долгосрочные правительственные (государственные) гарантии. Предварительные расчеты показали, что строительство мГЭС требует капиталовложений в размере 412,62 тыс. сомони, ветровой электростанции 600 тыс.сомони, солнечной электростанции 539,3 тыс. сомони. В тоже время в процессе эксплуатации ежегодные издержки составляют: мГЭС=29,1 тыс. сомони, ВЭС=42 тыс. сомони, СЭС=35,7 тыс. сомони. Поскольку сооружение и эксплуатация малых ГЭС по сравнению с ветровой и солнечной электростанций требует наименьших издержек, использование малых ГЭС в республике имеет большее развитие, чем другие виды альтернативной энергии.

Места сооружения таких объектов большой единичной мощности, требующих серьезных финансовых ресурсов, должны быть тщательно обоснованы и располагаться в регионах с наилучшими значениями интегральных показателей альтернативной энергии. Конструкция и компоновка такого объекта должна иметь наилучшие технико-экономические показатели и обеспечивать длительную надежную и эффективную работу при минимальных требованиях к обслуживанию, ремонту и воздействию природно-климатических условий.

Заключение контрактов на создание новых объектов альтернативной энергетики большой единичной мощности должно осуществляться на конкурсной основе с наилучшими условиями, имея в виду не только стоимость на момент подписания контракта, сколько гарантируемые фирмой-изготовителем долговременные показатели: эффективность преобразования энергии; рабочий ресурс; способность противостоять запределным внешним воздействиям; эксплуатационные и ремонтные свойства.

При возведении объектов альтернативной энергетики большой мощности, следует иметь в виду перспективность рынка сбыта вырабатываемой энергии в части гарантированных долгосрочных потребностей в энергии, тарифной политики и мерах государственной поддержки за производство экологически чистого продукта. Привлечение частных инвестиций, в частности в ВИЭ, и развитие рыночных отношений в энергетическом секторе: Несмотря на ряд важных шагов, принятых в последние годы в этом направлении, частный сектор до сих пор не играет большой роли в развитии энергетики Таджикистана. Помимо тарифов, наиболее значительной проблемой и сдерживающим фактором в сфере ведения частного бизнеса является несовершенство и сложность налогового законодательства, административные барьеры, а также ограниченный доступ к кредитным ресурсам для малого и среднего бизнеса;

2. Развитие местной производственной и ремонтно-эксплуатационной базы, материалов и оборудования для энергетического сектора, передача технологий и ноу-хау: В стране отсутствует современная ремонтно-эксплуатационная система обслуживания энергетических объектов (техническое обслуживание, производство запасных частей и нестандартного оборудования). Поэтому в случае, выхода из строя даже самой незначительной детали, необходимо обращаться в страну изготовителя. При этом, следует иметь в виду, что всё большее количество стран принимает участие в развитии энергетического сектора, увеличивается разнообразие производителей, материалов и оборудования, при их многих отличиях. В Таджикистане имеется ряд предприятий («Востоккредмет»; «Таджиктекстильмаш»; «Таджикэнергоремонт» «Спецавтоматика»), которые, при соответствующей модернизации (оснащении соответствующими станками, приборами и оборудованием) могли бы организовать производство оборудования, а также профилактическое и ремонтное обслуживание энергетических объектов, работающих на возобновляемых источниках энергии.

Для решения этих вопросов требуется также пересмотреть нормативно правовую базу, по комплексу вопросов, связанных с ремонтом и восстановлением энергооборудования. Передача технологий и ноу-хау регулируется законодательством Республики Таджикистан в области интеллектуальной собственности, гармонизированным с требованиями ВТО.

3. Подготовка квалифицированных кадров. Для правильного функционирования ВИЭ в республике необходимы квалифицированные кадры и специалисты по их обслуживанию. Необходимо создать краткосрочные образовательные программы по ВИЭ, курсы, семинары, тренинги и пр., рассчитанные на разный временной интервал, проводимые тренерами, преподавателями НПО. В технических ВУЗах республики внедрять дисциплины по качественной подготовке по современным проблемам развития возобновляемых источников энергии и создать современное лабораторное учебно-исследовательское оборудование и специализированные программные продукты по возобновляемым источникам энергии.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Твайделл Дж., Уэйр А. Возобновляемые источники энергии: Пер. с англ. - М. Энергоатомиздат. 1990. - 392 с. [2] Абул Магомедов. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии. Махачкала: Издательско-полиграфическое объединение "Юпитер", 1996. - 245с. [3] Мальцева А.В. Концентраторы солнечного излучения в энергетике/ А. В. Мальцева // Энергия: экономика, техника, экология : Ежемес. научно-попул. и общ.-полит. ил. журнал. - М.: Наука, 2005. - N7. [4] Бернштейн Л.Б. Приливные электростанции в современной энергетике/ Л.Б. Бернштейн и др.; Под ред.Л.Б. Бернштейна. - М.:, 1961. - 256 с. [5] Эаспресс-оценка и анализ пробелов. Таджикистан, - 35 с. [6] Кабутов К. «Таджикистан: приоритетные направления и состояние исследований в области ВИЭ».- Ташкент. Ж. Гелиотехника, 2007, №4 [7] АхмедовХ.М., КаримовХ.С. Возобновляемые источники энергии в Таджикистане и возможности их использования. Душанбе-2003г.- 35с. [8] Михайлов Л.П. Малая гидро-энергетика.- М.: Энергоатомиздат, 1989. – 180 с. [9] Зоран Морвай, Весна Букарица, Никола Чупин, Душан Гвозденак, Огнен Маркович, Славица Робич, Фаррух Шохимардонов. «Промежуточная Стратегия по Возобновляемым Источникам Энергии для Интегрированного Сельского Развития», Таджикистан-2001г.-58с. [10] Электронный сайт: <http://www.minenergoprom.tj/energetika.php> [11] Электронный сайт: <http://news.tj/ru/news/barki-tochik-uveryaet>



<http://www.rcrc.tj/> [12] Электронный сайт: <http://www.rcrc.tj/> [13] Электронный сайт: [http://www.iea.org/stats/electricitydata.asp?COUNTRY\\_CODE=TJ](http://www.iea.org/stats/electricitydata.asp?COUNTRY_CODE=TJ)

## GRAPHENE MEMBRANES AND NANOFUIDICS

Slaven Garaj<sup>1,2,3,4</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics, National University of Singapore,  
Singapore, 117551, Singapore,

e-mail: [slaven@nus.edu.sg](mailto:slaven@nus.edu.sg).

<sup>2</sup>Department of Biomedical Engineering, National University of Singapore,  
Singapore, 117575, Singapore,

<sup>3</sup>Centre for Advanced 2D Materials, National University of Singapore,  
Singapore, 117546, Singapore.

<sup>4</sup>NUSNNI-NanoCore, National University of Singapore,  
Singapore, 117576, Singapore.

### ABSTRACT

Graphene-oxide (GO) membranes, exhibiting ultra-high water flux, attracted significant attention recently as molecular and ionic sieves. Scalable, inexpensive, thermally and chemically robust, and integrable with the current technologies – they are particularly enticing candidates for the next-generation, high-performance separation membranes. We demonstrated that the two dominant mechanisms for the salt rejection in GO membranes are ionic size exclusion due to compression of the hydration shell in narrow channels, and electrostatic repulsion due to membrane surface charge. The observed charge-selectivity and size-exclusion offers a new venue for rational design of membranes with increased performance, and enables the new applications in the field of ion exchange and electrodialysis membranes.

**Key words:** nanomaterials, graphene, nanofluidics, membranes, desalination.

### 1. INTRODUCTION

Severe strain on the fresh water supply – due to population growth and shifting weather patterns – recently precipitated a strong research interest in new methods for water purification and desalination. New membrane materials and new desalination approaches are needed<sup>1</sup>. The traditional polymer membranes, currently used in most of commercial systems, have low water permeability<sup>2</sup> and require high operational pressures. The water permeability for graphene membrane is expected to be larger by order of magnitude<sup>3-6</sup> compared to traditional membranes, which would lead to 15-50% decrease in operational costs, as well as significant decrease in capital costs and the footprint of the desalination plant<sup>7</sup>. The latter might be particularly important for emergency deployment of the water treatment facility, in the aftermath of an industrial disaster (for example, Fukushima Daiichi nuclear incident).

Two-dimensional materials (2Dmat), consisting of atomically-thin freestanding crystalline sheets, revolutionized many fields of science and technology. Graphene, the first member of the 2Dmat family, is currently being developed for applications in touch-screens, solar cells, and high-frequency electronics. Other 2Dmats (such as graphene-oxide, boron-nitride, dichalcogenides, etc.) share some of the properties of graphene, but in others aspects are sufficiently different, increasing the spectrum of potential applications.

2D materials have unique nanofluidic properties: we have previously shown that pristine, atomically thin graphene membrane is completely impermeable to water and ions in the direction perpendicular to the sheet<sup>3</sup>. In contrast, graphene membrane with sub-nanometre pores and atomic defects exhibits size-specific permeability of ions through the sheet<sup>3,4,6</sup>. Along the sheet, in the direction parallel to graphene's basal plane, water flows with very little frictions. It has been shown<sup>8,9</sup> that water flows almost unimpeded between graphene/graphene-oxide sheets separated by only 0.7–1 nm, while other liquids and gases are rejected. This combination of tuneable ion-specific permeability and frictionless water flow makes graphene-based membranes potentially disruptive technology for water desalination, filtering and molecular sieving.

### 2. RESULTS AND DISCUSSIONS

First, I will describe the behavior of water and ions in nanoscale constrictions whose dimensions are comparable to the size of the hydration shells of the ions, and could accommodate only few water molecules along their cross-sections. We will discuss how the role of the dimensionality (D) could affect the nanofluidic behavior in the case of nanopores<sup>3,10</sup> (0-dimensions, 0D), nanotubes<sup>11</sup>

(1D) and graphene nanochannels<sup>8,12</sup> (2D). I will present some of our recent work in the field of nanopores and nanochannels. Figure 1 depicts some of the nanofluidic regimes encountered with nanopores and nanochannels. The insight thus gathered could guide us to the rational design of the graphene-based membranes for desalination, with superb properties.

In the second part of the talk, I will discuss new type of graphene-oxide (GO) membrane we are developing in Singapore. Exhibiting ultra-high water flux<sup>8</sup>, they have attracted significant attention recently as molecular and ionic sieves<sup>9,13</sup>. They consist of stacked layers of graphene sheets, spaced by the chemical functional groups. The interlocked sheets define a percolated network of channels, delimited by the chemical functionalities (Figure 1A). By controlling the nature of chemical functional group, we could control the interlayer spacing between the sheets, as well as membrane's ionic selectivity, charge selectivity and the water flux.

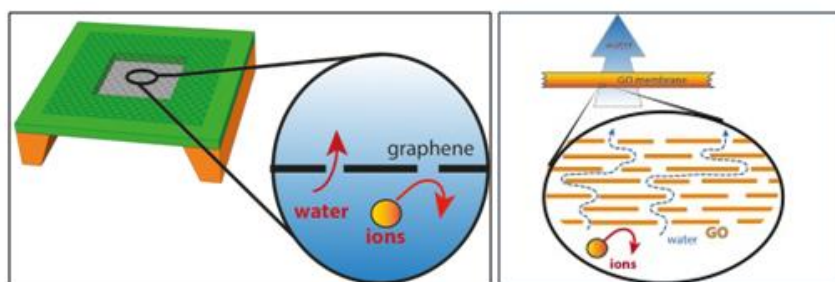


Fig.1 (A) Crystalline, single-layer graphene membrane with small sub-nanometre pores – the water molecule pass through the membrane with very little resistance due to inherent thinness of the membrane, while ions are rejected as their hydration radii is larger than the pore size. (B) Laminate graphene oxide membrane – water flows without friction through the percolated nanochannels in the membrane, while the ions are rejected due to sub-nanometer height of the nanochannels.

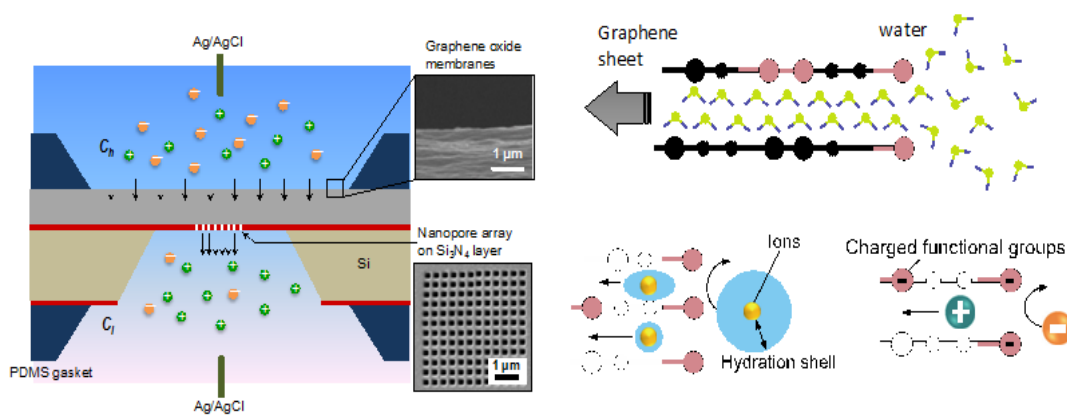


Fig.2 (A) Schematics of out liquid cell for measuring ion permeability of thick graphene membranes at the nano-scales, using drift-diffusion technique. (B) Water between graphene laminates flows like an ordered ice-like structure, leading to the frictionless flow. (C) Dominating ion rejection mechanism in GO membranes are size exclusion due to the hydration sizes and electrostatic charge rejection.

Using our drift-diffusion technique<sup>13</sup> (Figure 2A), we could individually measure the permeability of each ions in the aqueous salt solution, all at the membrane scales of  $100 \times 100 \text{ nm}^2$ . We investigated mobility of a wide selection of aqueous salts ions. Two general trends were revealed: (a) cation permeability decreases exponentially with increased hydration radius; and (b) permeability of negatively charged ions is suppressed by order of magnitude compared to positive ions of similar radius. We conclude that the dominant mechanisms for the ion rejection in GO membranes are size exclusion due to compression of the ionic hydration shell in narrow channels, and electrostatic repulsion due to membrane surface charge.

### 3. CONCLUSIONS

We investigated flow of water in narrow graphitic channels in GO membranes, and demonstrated charge-rejection and size rejection are the dominating mechanism for ionic filtration. Armed with the insight into the physical mechanism governing the ionic flow, we were able to engineer new membranes with decreased the ionic cut-off size and increased charge selectivity; all leading to promising applications in desalination and electrodialysis.

### 4. REFERENCES

- [1] Koros, W. J. & Zhang, C. Materials for next-generation molecularly selective synthetic membranes. *Nat Mater***16**, 289–297 (2017). [2] Elimelech, M. & Phillip, W. A. The Future of Seawater Desalination: Energy, Technology, and the Environment. *Science***333**, 712–717 (2011). [3] Garaj, S. *et al.* Graphene as a subnanometre trans-electrode membrane. *Nature***467**, 190–193 (2010). [4] O’Hern, S. C. *et al.* Selective Ionic Transport through Tunable Subnanometer Pores in Single-Layer Graphene Membranes. *Nano Lett***14**, 1234–1241 (2014). [5] Cohen-Tanugi, D. & Grossman, J. C. Water Desalination across Nanoporous Graphene. *Nano Lett***12**, 3602–3608 (2012). [6] Surwade, S. P. *et al.* Water desalination using nanoporous single-layer graphene. *Nat Nanotechnol***10**, 459–464 (2015). [7] Cohen-Tanugi, D., McGovern, R. K., Dave, S. H., Lienhard, J. H. & Grossman, J. C. Quantifying the potential of ultra-permeable membranes for water desalination. *Energy Environ. Sci.***7**, 1134–1141 (2014). [8] Nair, R. R., Wu, H. A., Jayaram, P. N., Grigorieva, I. V. & Geim, A. K. Unimpeded Permeation of Water Through Helium-Leak-Tight Graphene-Based Membranes. *Science***335**, 442–444 (2012). [9] Joshi, R. K. *et al.* Precise and Ultrafast Molecular Sieving Through Graphene Oxide Membranes. *Science***343**, 752–754 (2014). [10] Garaj, S., Liu, S., Golovchenko, J. A. & Branton, D. Molecule-hugging graphene nanopores. *Proc Natl Acad Sci USA***110**, 12192–12196 (2013). [11] Secchi, E. *et al.* Massive radius-dependent flow slippage in carbon nanotubes. *Nature***537**, 210–213 (2016). [12] Radha, B. *et al.* Molecular transport through capillaries made with atomic-scale precision. *Nature***538**, 222–225 (2016). [13] Hong, S. *et al.* Scalable Graphene-Based Membranes for Ionic Sieving with Ultra-high Charge Selectivity. *Nano Lett.***17**, 728–732 (2017).

## NANOSCALE CONSTRUCTION SITE: EXPLORING FORMATION OF NANOMATERIALS IN LIQUIDS

U. Mirsaidov<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Centre for BioImaging Sciences, Department of Biological Sciences, Department of Physics, National University of Singapore,

Singapore, 117557, Singapore, mirsaidov@nus.edu.sg

<sup>2</sup>Centre for Advanced 2D Materials and Graphene Research Centre, Department of Physics, National University of Singapore,

Singapore, 117546, Singapore.

<sup>3</sup>NUSNNI-NanoCore, National University of Singapore,

Singapore, 117576, Singapore.

### Abstract

*Understanding how materials form at nanoscale is fundamental for many technological applications in nanoelectronics, optoelectronics, photovoltaics, and biochemical sensing. In order to understand the detailed nanoscale mechanisms of materials synthesis, it is important to track their evolution in time. Here, using in situ liquid cell transmission electron microscopy (TEM), I will reveal the mechanisms associated with two common approaches for forming nanostructure: (1) the self-assembly of nanoparticles and (2) the etching of materials to obtain smaller and defined nanostructures. Namely, I will show how Au and Pt nanoparticles assemble into organized structures such as nanochains, nanorings and micro-filaments. Next, I will show the wet-etch dynamics of Si nanowires and highlight how intermediate etch-byproducts are formed and removed from the etching surfaces. Our studies highlight the importance of the direct visualization of nanoscale processes for rational design of materials.*

**Key words:** nanomaterials, nanofabrication, self-assembly, nanoparticles, nanowires.

### 1. Introduction

Nanostructures can be defined and formed through “bottom-up” processes such as assembly of nanoscale objects or “top-down” processes such as nanoscale etching. These processes, which include the

assembly of nanoparticles into organized structures and chemical etching reactions to form nanoscale architectures, are fundamental for materials engineering and fabrication of functional nanodevices. Moreover, most of these processes take place in liquid environment. Despite the technological importance of these processes, many their details remain unknown. This is mainly due to a lack of proper experimental techniques that enable to visualize these solution-based processes with nanometer and sub-nanometer resolution in real-time.

*In-situ* liquid cell transmission electron microscopy (TEM) developed by our group and others [1-4] enabled to closely study the nanoscale physical and chemical processes in liquids in real time. Here, using *in situ* liquid cell transmission electron microscopy (TEM), we directly observed the nanoscale processes such as interaction and self-assembly of nanoparticles and chemical etching of nanomaterials. Our experimental liquid cell platform consists of two ultrathin (~20 nm) electron transparent SiN<sub>x</sub> membranes (Fig. 1A) sandwiching an aqueous specimen, which effectively isolates this volatile liquid specimen from the vacuum of TEM enabling us to monitor the nanoparticle self-assembly and wet-etching of nanowires in solution.

## 2. Results and Discussions

First, using direct *in situ* TEM imaging, I will describe the role of intermolecular forces, such as van der Waals, hydration and electrostatic forces, in interactions between nanoparticles in solution, and highlight how these interactions lead to the attachment of these nanoparticles. Specifically, I will show how the balance between the repulsive hydration force and attractive van der Waals (vdW) force for interacting nanoparticle pairs regulates their attachment. We found that an intricate balance between these two forces results in a metastable nanoparticle-pair, which promotes their subsequent attachment to each other [5]. Next, I will describe the role of these interactions and nanoparticle shapes on the dynamics of their self-assembly into organized nanostructures [6-8]. Our observations not only reveal the role of these interactions (vdW, electrostatic, steric) in the formation of nanostructure from individual nanoparticle building blocks but also enables us to capture the intermediate stages of the nanoparticle assembly (Fig. 1B).

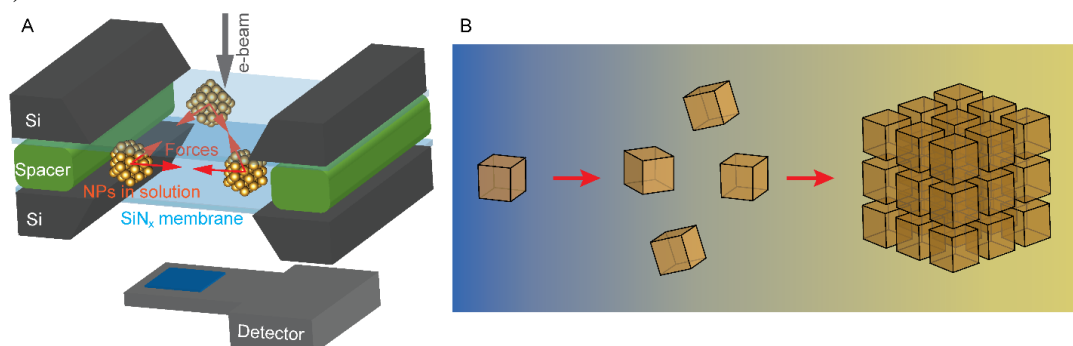


Fig.1 (A) Liquid cell sandwiches a thin layer (10-100 nm) of solution (light blue) containing either precursor solution and/or nanoparticles between two ultrathin (~10-20 nm) SiN<sub>x</sub> membrane windows that are separated by a spacer. This liquid cell protects the encapsulated thin solution layer from the vacuum of TEM. The camera underneath captures the dynamics of the nanoscale process occurring in the solution. (B) Interaction of nanoparticles in a solution, and assembly of these nanoparticles into nanostructures can be directly visualized using *in situ* liquid cell TEM.

During my talk, I will also describe our recent work on direct observation of wet-etching of Si nanowires. We found that Si wet-etch occurs in two distinct stages (Fig. 2): (i) formation and growth of etch-reaction intermediates in the form of nanoclusters on the surface of the nanopillars, followed by (ii) detachment and dissolution of these intermediates in the etchant solution. Our simulations revealed that etch-intermediates grow on the Si surface because they are weakly adherent to the surface and they coalesce into nanoclusters via surface diffusion. These nanoclusters of etch by-products detach from the Si surface once they reach a critical size of ~10 nm.

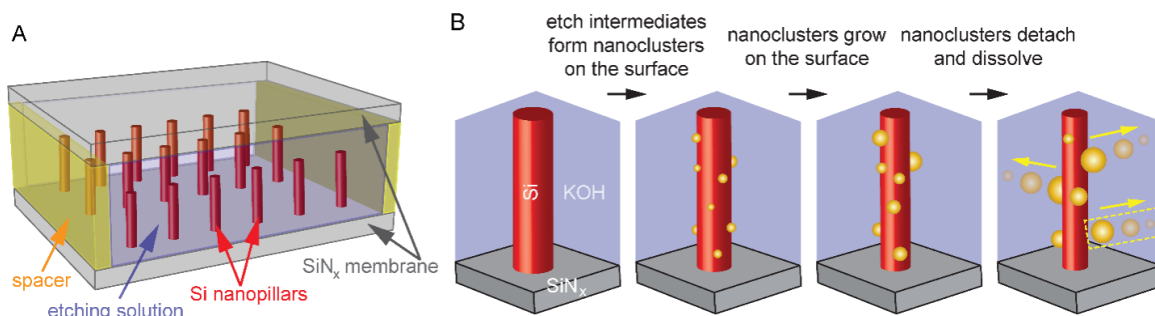


Fig.1 (A) Schematic of our liquid cell platform with Si nanopillars used for in situ TEM imaging of wet etching process. An array of 200 nm tall and 45 nm diameter Si nanopillars are patterned on a bottom SiN<sub>x</sub> membrane at a pitch of 90 nm; the two membranes are separated by a 240-nm spacer. The nanopillars are then immersed in an etchant (KOH) solution that fills the liquid cell, and the resulting etching process is observed inside a TEM. (B) Schematic illustration of a two-step etching mechanism: (i) formation and growth of reaction intermediates on the surface of the nanopillars, followed by (ii) detachment and dissolution of these intermediates in the etchant solution.

### 3. Conclusions

These findings highlight the role of solvent mediated physical and chemical processes in materials synthesis. Our observations also emphasize the importance of direct nanoscale observation in uncovering previously unknown intermediate stages that are pivotal for synthesis and self-assembly.

### REFERENCES

- [1] M. J. Williamson, R. M. Tromp, P. M. Vereecken, R. Hull, F. M. Ross, *Nature Materials* **2** (2003), p. 532. [2] H. Zheng, R. Smith, Y. Jun, C. Kisielowski, U. Dahmen, A. P. Alavisatos, *Science* **324** (2009), p. 1309. [3] U. Mirsaidov, H. Zheng, D. Bhattacharya, Y. Casana, P. Matsudaira, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **109** (2012), p. 7187. [4] F. M. Ross, *Science* **350** (2015), p. 9886. [5] U. Anand, J. Lu, N. D Loh, Z. Aabdin, U. Mirsaidov, *Nano Lett.* **16** (2016), p. 786. [6] G. Lin, X Zhu, U. Anand, Q. Liu, J. Lu, Z. Aabdin, H. Su, U. Mirsaidov, *Nano Lett.* **16** (2016), p. 1092. [7] G. Lin, S. W. Chee, S. Raj, P. Kral, and U. Mirsaidov, *ACS Nano* **10**, p. 7443-7450 (2016). [8] S. F. Tan, U. Anand, and U. Mirsaidov, *ACS Nano* **11**, p. 1633–1640(2017).

## УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ТЕПЛООБМЕНА ВЫБОРОМ ОПТИМАЛЬНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ И МАТЕРИАЛА НАНОЧАСТИЦ

Ж.С.Ахатов<sup>1</sup>, С.К.Теляев<sup>2</sup>, В.Н.Авдиевич<sup>2</sup>, А.А.Искандаров<sup>2</sup>, С.З.Мирзаев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Physical-Technical Institute, SPA "Physics-Sun", Academy of Sciences of Uzbekistan.  
Bodomzor yuli Str. 2-B, 100084 Tashkent, Uzbekistan.

<sup>2</sup>Ion-plasma technologies and Thermophysics of multiphase systems laboratory, department of Engineering Physics, Tashkent State Technical University named after Islam Karimov,  
Dormon Yuli 33, 100125 Tashkent, Uzbekistan

### Аннотация

В работе представлены результаты исследования вынужденной конвекции однопроцентной наножидкости на основе 7 нм частиц диоксида кремния в прямоточном теплообменнике труба в трубе в ламинарном и турбулентном режимах. Эксперименты показали, что применение в качестве теплоносителя наножидкости с SiO<sub>2</sub> существенно сказывается на величине коэффициента теплоотдачи. При этом может наблюдаться как интенсификация теплообмена, так и его ухудшение в зависимости от режима течения жидкости.

За последние годы прогресс в области разработки промышленных устройств нового поколения выявили проблему эффективного отвода тепловых потоков значительной плотности и настоятельно требует адекватного прогресса в системах охлаждения. Во всех тепловых установках и оборудовании, в том числе технологий с использованием возобновляемых источников энергии, особенно солнечной энергии, особое значение имеет процесс интенсивного отвода тепла, для которых

используются различные виды теплообменного оборудования и теплоносителей. Актуальность этой проблемы определяется стремлением к повышению интенсивности работы теплообменных устройств в сочетании с желанием сократить затраты энергии и добиться максимальной компактности при минимальной материалоемкости, а также соответствовать требованиям экологии. Наряду с этим традиционные охлаждающие системы, основанные на вынужденной конвекции и обреблении поверхности, больше не соответствуют выдвигаемым требованиям по теплоотводу. Одновременно с миниатюризацией теплообменных и других энергетических устройств и элементов чрезвычайно быстро развиваются и исследования, связанные с одновременным использованием в таких устройствах теплоносителей с примесью ультрадисперсных частиц оксидов различных металлов.

К перспективным путям повышения теплоотдающих характеристик охлаждающих устройств можно отнести: применение новых теплоносителей и использование более эффективных схем охлаждения. В настоящее время в области новых теплоносителей многообещающим направлением является применение наножидкостей, представляющих собой смесь стандартных теплоносителей, таких, как вода, масло, этиленгликоль с наночастицами [1-3]. Добавление порядка нескольких процентов частиц  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и ряда других оксидов металлов, приводит к изменению теплофизических свойств смеси. Коэффициент теплопроводности возрастает на 20 %, что превышает значения, рассчитанные по традиционным соотношениям для смеси. Высокая практическая мотивация получения высокотеплопроводящих жидкостей привела к тому, что большинство исследователей активно заняты изучением и анализом особенностей теплопроводящих свойств наножидкостей. Хотя увеличение теплопроводности большинства наножидкостей может быть успешно предсказано классической теорией Максвелла для систем с высоко диспергированными сферическими наночастицами [4], экспериментальные исследования показали увеличение параметров теплопроводности, не согласующееся с расчетными данными [5-10]. В работах [6-9] предлагаются возможные механизмы теплопроводности в наножидкости. На сегодняшний день существуют несколько моделей механизмов, объясняющих явления переноса в наножидкостях: так называемый баллистический транспорт фона в наночастицах; броуновское движение наночастиц; образование граничного жидкого слоя вокруг наночастиц с аномальной теплопроводностью [11-16].

Используемые для вычисления методы молекулярной динамики показали [14-16], что граничный слой не имеет никакого влияния на теплоперенос. Между тем, Еарен и др. показали [17], что взаимодействие “твердое тело-жидкость” может индуцировать перколирующую сеть путей теплопроводности атомами жидкости, находящимися на поверхности раздела фаз. Здесь необходимо отметить, что результаты компьютерного моделирования таких систем относятся к идеализированному объекту, т.е. для системы одинаковых по размеру частиц небольших размеров (несколько десятков атомов). Так, методом ЯМР – спектроскопии было проведено исследование ряда параметров слоя молекул воды на поверхности наночастиц алюминия [18]. Оценка толщины слоя вокруг наночастиц показала, что она составляет приблизительно 1.4 нм. Учитывая, что расстояние между наночастицами в обычных наножидкостях намного превышает 2 нм, можно предположить, что этот слой не может вносить существенный вклад в теплопроводность системы. Поэтому подавляющее большинство исследований исходит из предположения, что образование наночастицами надмолекулярных кластероподобных структур является основным фактором увеличения теплопроводности в наножидкостях [19–23]. Несмотря на вышесказанное, можно предположить локальное увеличение концентрации частиц, вызванное образованием кластеров наночастиц, которое может существенно увеличить вероятность формирования перколяционной сети межфазных слоев. Хотя образование жидкого поверхностного слоя, по-видимому, незначительно влияет на теплопроводность самого кластера, в определенных условиях, он может приносить вклад в теплопроводность наножидкости в целом и его значение необходимо уметь оценивать, как расчетным путем, так и экспериментально. Вместе с тем, полученные экспериментальные результаты весьма противоречивы [9,24]. Что связано с несколькими обстоятельствами. Прежде всего, в экспериментах изучалась, главным образом, зависимость эффективного коэффициента теплопроводности наножидкости от объемной концентрации наночастиц и соотношения коэффициентов теплопроводности наночастиц и связующей жидкости. Вместе с тем существуют экспериментальные данные, которые прямо или косвенно указывают на зависимость коэффициента теплопроводности [25,26-28] и вязкости (Рис.1) от размера наночастиц и pH несущей среды. На это ука-



зывают и данные по эффективной вязкости, полученные с помощью кинетической теории для наногазовых взвесей [29] и молекулярно-динамического моделирования для наносuspензий [23].

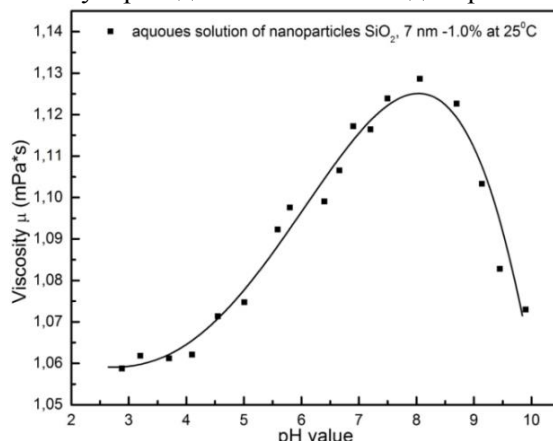


Рисунок 1. Зависимость вязкости от pH несущей среды

Экспериментально создать монодисперсную наножидкость невозможно, что существенно усложняет интерпретацию полученных данных. В работах по молекулярно-динамическому моделированию с наножидкостью, где контролировались размер частиц и их масса, наночастицы и молекулы несущей среды представлялись системой упругих твердых сфер различного радиуса и массы. Изучалась зависимость эффективного коэффициента теплопроводности от отношения масс и радиусов наночастиц и молекул несущей среды, а также объемной доли частиц и приведенной плотности несущей среды. В ряде экспериментальных работ было установлено, что наножидкости даже с малым объемным содержанием частиц имеют экстремально высокое превышение теплопроводности по сравнению с несущей жидкостью [26,2]. Молекулярно-динамическое моделирование коэффициента теплопроводности более ресурсоемкое, чем моделирование диффузии наночастиц и эффективного коэффициента вязкости наножидкостей. Поэтому в большинстве работ по компьютерному моделированию приводятся систематические данные лишь для малых частиц, а отношение масс изменялось в диапазоне до 250. Такое соотношение радиусов соответствует моделированию наночастиц с характерными размерами 1–2 нм. Установлено, что в зависимости от параметров системы значение теплопроводности увеличивалось до сотен процентов. Противоречивость результатов и отсутствие единого общепринятого мнения сдерживает применение этих модельных подходов в прикладных областях.

При рассмотрении задач теплообмена необходимо рассматривать все теплофизические свойства в комплексе, включая вязкость и теплоемкость, так как на коэффициент теплоотдачи оказывает влияние кроме, непосредственно, теплопроводности также и структуратечения, толщина пограничного слоя и другие характеристики потока. Поэтому в ряде работ, несмотря на увеличение коэффициента теплопроводности, отмечается ухудшение теплопередающих свойств [30]. Несмотря на огромное количество работ, в области теплообмена наножидкостей по-прежнему остается множество вопросов [31-33]. Экспериментальные данные часто противоречивы и даже взаимоисключают друг друга. Неясен механизм теплопроводности в наножидкости, является ли он единственным или одновременно действуют несколько. Кроме того, существуют различные подходы для описания наножидкостей. В большинстве работ отмечается увеличение теплоотдачи при использовании наночастиц [32]. Результаты ряда экспериментов свидетельствуют о том, что корреляционные формулы для числа Нуссельта, справедливые для чистых жидкостей, не применимы, когда величина объемной концентрации наночастиц становится больше чем 0,5 % [33]. Кроме того, имеются публикации, где отмечается уменьшение теплоотдачи при добавлении наночастиц [34]. Из вышеперечисленных исследований не ясны процессы, происходящие при ламинарно-турбулентном течении. В связи с этим изучение теплообменных процессов в наножидкостях имеет не только важное практическое значение, но и представляет большой интерес с фундаментальной точки зрения. Целью настоящей работы является экспериментальное изучение вынужденной конвекции наножидкости с частицами диоксида кремния в прямоточном теплообменнике. Блок-схема собранной установки (Рис. 2.) для изучения вынужденной конвекции наножидкости с частицами диоксида кремния в прямоточном теплообменнике включает: 1. Рабочий участок (труба в трубе); 2.



Водоподогреватель;3. Насос водоподогревателя;4. Расширительный бачок водоподогревателя; 5. Вентиль расширительного бачка;6. Вентиль регулирования расхода горячей воды во внутренней трубе;7. Радиатор для охлаждения воды, текущей в наружной трубе рабочего участка; 8. Насос холодильника;9. Расширительный бачок радиатора;10. Измеритель расхода воды, текущей во внутренней трубе рабочего участка;11. Измеритель расхода воды, текущей во внешней трубе рабочего участка;12. Вентилятор радиатора с источником питания; 13. К1, К2, К3, К4 – вентили, регулирующие режимы течения (прямоток или противоток) и расход воды во внешней трубе рабочего участка;14. Вентили Маевского, предназначенные для удаления воздуха из системы.

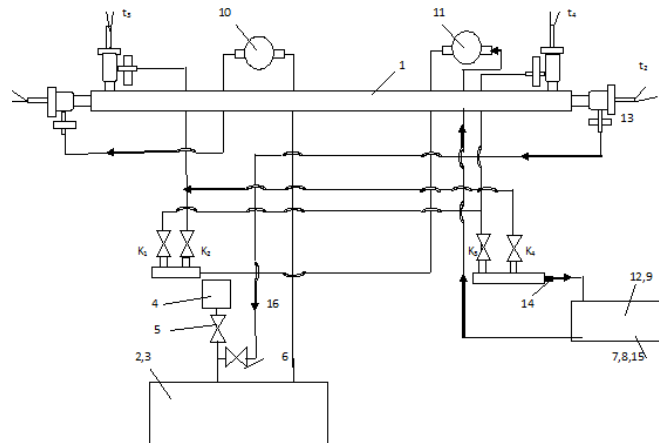


Рисунок 2. Блок схема для изучения вынужденной конвекции

Нами проведено экспериментальное исследование вынужденной конвекции однопроцентной наножидкости на основе наночастиц диоксида кремния в прямоточном теплообменнике труба в трубе в ламинарном и турбулентном режимах. Эксперименты показали, что применение в качестве теплоносителя наножидкости  $\text{SiO}_2$  существенно сказывается на величине коэффициента теплоотдачи. При этом может наблюдаться как интенсификация теплообмена, так и его ухудшение. При фиксированном значении числа Рейнольдса в случае ламинарного режима течения применение наножидкости позволило на 22 % интенсифицировать теплообмен. В случае же турбулентного режима установлено примерно 9%-ное ухудшение коэффициента теплоотдачи. Это связано с существенным влиянием наночастиц не только на теплопроводность, но и на вязкость наножидкости.

В ламинарном режиме течения коэффициент теплоотдачи пропорционален теплопроводности среды и не зависит от вязкости; как следствие наблюдается интенсификация теплообмена так как теплопроводность теплоносителя из-за наличия в нём частиц оксида кремния возрастает. В турбулентном режиме течения коэффициент теплоотдачи нелинейно зависит не только от теплопроводности теплоносителя, но и от его вязкости. В этом случае, если рост теплопроводности теплоносителя за счет наночастиц существенно меньше роста его вязкости, может иметь место ухудшение теплообмена, которое наблюдалось в наших исследованиях. Таким образом, положительный для теплообмена эффект от добавки в теплоноситель наночастиц нелинейно зависит от соотношения между вязкостью и теплопроводностью получившейся наножидкости, а значит, от материала частиц и их концентрации. Это дает возможности управления процессом теплообмена путем выбора оптимальных концентраций и материала наночастиц. Проведённые исследования показывают возможности использования наножидкостей в качестве теплоносителя и разработки более эффективных низко-потенциальных энергетических установок.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] E. Michaelides, *Nanofluidics. Thermodynamic and transport properties*. Springer, (2014). [2] Yu W., France D.M., Routbort J.L., Choi S.U.S. Review and Comparison of Nanofluid Thermal Conductivity and Heat Transfer Enhancements // *Heat Transfer Engineering*. V. 29. –P. 432.(2008).[3] Godson L., Raja B., Mohan Lal D., Wongwises S. // *Renewable and sustainable energy reviews*. V. 14. P. 629–641(2010).[4] P. Keblinski, J. A. Eastman, D. G. Cahill, *Mater. Today* 8, 36 (2005).[5] J. A. Eastman, S. U. S. Choi, S. Li, W. Yu, L. J. Thompson, *Appl. Phys. Lett.* 78, 718 (2001).[6] S. U. S. Choi, Z. G. Zhang, W. Yu, F. E. Lockwood, E. A. Grulke, *Appl. Phys. Lett.* 79, 2252 (2001).[7] J. Eapen, R. Rusconi, R. Piazza, S. Yip, *J. Heat Transfer* 132, 102402 (2010).[8] H. Zhu, C. Zhang, Y. Tang, J. Wang, *J. Phys. Chem. C* 111, 1646 (2007).[9] J. W. Gao, R. T. Zheng, H. Ohtani, D. S. Zhu, G.

Chen, Nano Lett. 9, 4128 (2009).[10] P. Keblinski, R. Prasher, J. Eapen, J. Nanopart. Res. 10, 1089 (2008).[11] S. Ozerinc, S. Karac, A. Y. Guvenc, Microfluid. Nanofluid.8, 145 (2010).[12] W. Yu and S. U. S. Choi, J. Nanopart. Res. 5, 167 (2003).[13] B. Wang, L. Zhou, X. Peng, Int. J. Heat Mass Transfer 46, 2665 (2003).[14] Q. Xue W. Xu, Mater. Chem. Phys. 90, 298 (2005).[15] E. Doroodchi, T. M. Evans, B. Moghtaderi, J. Nanopart.Res. 11, 1501 (2009).[16] L. Xue, P. Keblinski, S. R. Phillpot, S. U. S. Choi, J. A. Eastman, Int. J. Heat Mass Transfer 47, 4277 (2004).[17] J. Eapen, J. Li, S. Yip, Phys. Rev. E. 76, 062501 (2007).[18] J. Eapen, J. Li, S. Yip, Phys. Rev. Lett. 98, 028302 (2007).[19] C. Gerardi, D. Cory, J. Buongiorno, L. Hu, T. Mckrell, Appl.Phys. Lett. 95, 253104 (2009).[20] R. Prasher, W. Evans, P. Meakin, J. Fish, P. Phelan, P. Keblinski, Appl. Phys. Lett. 89, 143119 (2006).[21] R. Prasher, P. E. Phelan, P. Bhattacharya, Nano Lett. 6, 1529 (2006).[22] D. Lee, J. W. Kim, B. G. Kim, J. Phys. Chem. B 110, 4323 (2006).[23] K. S. Hong, T. K. Hong, H. S. Yang, Appl. Phys. Lett. 88, 031901 (2006).[24] Y. Xuan W. Hu, AIChE J. 49, 1038 (2003).[25] Keblinski P., Eastman J.A., Cahill D.G. Materials Today. P. 36–44(2005).[26] Putnam S.A., Cahill D.G., Braun P.V. J. Appl. Phys. V. 99. P. 084308(2006).[27] Kumar D.H., Patel H.E., Rajeev Kumar V.R., Sundararajan T., Pradeep T., Das S.K. Phys. Rev. Lett. V. 93. N 14. P. 144301(2004).[28] Рудяк В.Я., Краснолуцкий С.Л. ДАН. Т. 392. № 4. С. 624–627(2003).[29] Рудяк В.Я., Белкин А.А., Егоров В.В. ЖТФ. Т. 79. В. 8. С. 18–25(2009).[30] Yu W., France M.D., Roubort J.L., Choi S.U.S. Review and Comparison of Nanofluid Thermal Conductivity and Heat Transfer Enhancements. Heat Transfer Engineering. – 2008, V.29(5). – P. 432–460(2008). [31] Рудяк В.Я., Белкин А.А. Наносистемы: физика, химия, математика. Т. 1 (1). С. 156–177(2010).[32] Терехов В.И., Калинина С.В., Леманов В.В. Теплофизика и аэромеханика. № 2. С. 173–188.(2010).[33] Godson L., Raja B., Mohan Lal D., Wongwises S. Renewable and sustainable energy reviews. V.14. P. 629–641(2010).[34] Pak B., Cho Y.I. Experimental heat transfer, V. 11. P. 151–170(1998).

## SOME PROPERTIES OF DOWTHERM THERMAL OIL NANOFLUID

H. Yong<sup>1</sup>, H. Xia<sup>1</sup>, Sh. Nurmatov<sup>2</sup>, Jin Jian<sup>1</sup>, Kai Wei<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Engineering Thermophysics Chinese Academy of Sciences

Beijing, 11 Beisihuanxi Road, 100190, China, [haoyong@iet.cn](mailto:haoyong@iet.cn)

<sup>2</sup>Institute of Material Science SPA “Physics-Sun” Academy of Sciences of Uzbekistan

Tashkent, 100084, Uzbekistan, [nur1973@list.ru](mailto:nur1973@list.ru)

### Abstract

*Analysed methods of nanofluids preparation on the basics of thermal oils, which will be useful for thermal storage or as heat transfer fluid in a solar thermal power. Discussed agglomeration of 30 nm carbon nanoparticles in obtained nanofluid. Presented results of thermo mass photo, TG, DTA and DSC measurements.*

**Key words:** Solar power, thermal oil, nanofluids.

### 1. Introduction

Nanofluids are solid–liquid composite materials consisting of solid nanoparticles or nanofibers with sizes typically of 1–100nm suspended in liquid. It has been shown that nanoparticles with higher thermal conductivity than their surrounding liquid can increase the effective thermal conductivity of suspension. For example, reported that a small amount (<1% volume fraction) of Cu nanoparticles or carbon nanotubes dispersed in water or oil can increase the inherently poor thermal conductivity of the liquid by 74% and 150% [1, 2]. Heat transfer and thermal storage fluids such as water, oil and ethylene glycol are used in many fields of applications, but one of them has poor specific heat in compared with most solids. Modernisation of solar technologies which used liquids need to improve their thermo-physical properties. Since mixture theory was suggested by Maxwell [3], which means that suspending solid particles in liquid would substantially increase the performance, numerous investigations have been carried out. Steve Choi in 1995 [4] firstly used sentence nanofluid. Nanotechnology provides new area of research to process and produce materials with average crystallite sizes below 100 nm called nanomaterials. The term “nanomaterials” encompasses a wide range of materials including nanocrystalline materials, nanocomposites, carbon nanotubes and quantum dots[5,6]. Nanofluids clearly exhibit improved thermo-physical properties such as specific heat, thermal conductivity, thermal diffusivity, viscosity and convective heat transfer coefficient. The property change of nanofluids depends on the volumetric fraction of nanoparticles [7], shape and size of the nanomaterials [8].

### 2. Nanofluid preparation

As basic fluid selected Dowtherm A heat transfer fluid. Dowtherm A is a eutectic mixture of two very stable compounds, biphenyl (C<sub>12</sub>H<sub>10</sub>) and diphenyl oxide (C<sub>12</sub>H<sub>10</sub>O). These compounds have practically the same vapor pressures, so the mixture can be handled as if it were a single compound. DOWTHERM A fluid may be used in systems employing either liquid phase or vapor phase heating. This

thermal oil used as heat transfer fluid in many facilities and also can be used as thermal storage material. Recommended use temperature range is in liquid phase: 15°C to 400°C, vapour phase: 257°C to 400°C. Diapason of pressure from atmospheric till 10,6 bar. Specific heat is 1,5 -2,7 kJ/kg K in the range of temperature 15-405 . Table 1 also present some physical properties of this thermal oil.

Table 1. Physical properties of Dowtherm A

Characteristics	Value
Boiling temperature	257,1 °C
Freezing temperature	12,0 °C
Flash point, SETA	113 °C
Fire point, C.O.C.	118 °C
Density at 25°C	1056 kg/m <sup>3</sup>

Thermal oil-based nanofluid was prepared by intermixing the measured mass of 30 nm carbon nanoparticles and added in the volume of 1% and 0.063% (Figure 1). Carbon nanoparticles presented by Aladdin industrial corporation, Shanghai, China. Thermal oil based nanofluid prepared in 100 min by using ultrasonicater.

As can be seen in 24 hours after preparing with the use of ultrasound for 100 minutes, the nanofluid with the content of carbon nanoparticles in the volume of 0.063 did not undergo any changes.

However, nano-medium with a content of 1% carbon nanoparticles has precipitated. As can be seen from the figure 1, the 1% nanofluid is divided into two parts and the upper part contains only pure Dowtherm oil and the lower part is only a carbon precipitate. Before measures, this fluid was shaken to have well distribution.



Figure 1. Prepared Dowtherm basic oil (A) and nanofluids: B –with 0.063 % 30 nm carbon, C- with 1% 30 nm carbon nanoparticles pictures.

It can be convincingly said that the use of 1% nanoparticles content is not acceptable for this kind of thermal oils.

Prepared contents investigated by differential thermal (DTA), thermal gravimetric (TG), differential scanning calorimetric (DSC) analyzes. For DTA and TG measurements used the PerkinElmer Diamond Thermogravimetric /Differential Thermal Analysis (TG/DTA/DTG) system, for DSC measurements used STA 449 F3Jupiter of Netzsch, evolved gases analyzed by using thermo mass photo instrument of Rigaku.

### 3.Experimental results, discussions and conclusions

The Dowtherm A heat carrier, operated in industrial heat exchange systems for over 60 years, is the preferred product for indirect heating installations in a wide range of applications. It is a stable heat carrier that does not undergo rapid decomposition at high temperatures, which can be effectively used in both liquid-phase and vapor-phase systems.

Low viscosity throughout the operating range ensures efficient heat exchange and minimization of problems when starting up the system. The heat carrier is not distinguished by its corrosive activity with respect to conventional metals and alloys. Criteria for choosing the heat transfer fluid - this working capacity of the fluid under partial conditions determines four important characteristics: stability, vapor pressure, freezing point and viscosity.

During exploitation of thermal oils also important know evolved gases. Figure 2 shows results of measurements for evolved gases by temperature. We can find that basic oil content has only two intensive lines in 154 and 170 points which correspond to biphenyl (C<sub>12</sub>H<sub>10</sub>) and diphenyl oxide (C<sub>12</sub>H<sub>10</sub>O).

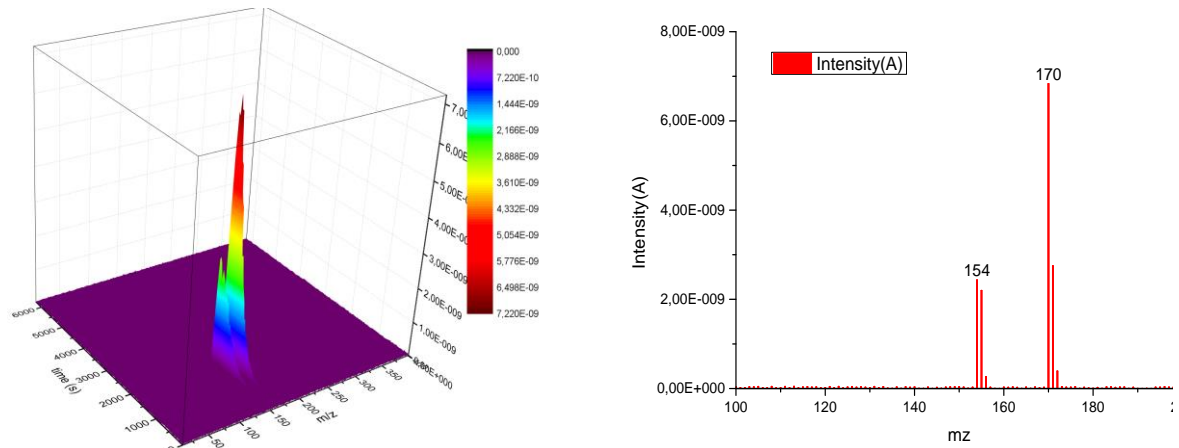


Figure 2. Thermo mass measurement results of Dowtherm A

DTA and TG measurements performed by using alumina crucible with lid. Figure 3 shows that for basic fluid intensive mass loss started in 130 and changed to 145 °C for nanofluid with 1% added nanocarbon, changed to 160 °C for nanofluid with 0,063 % added nanocarbon.

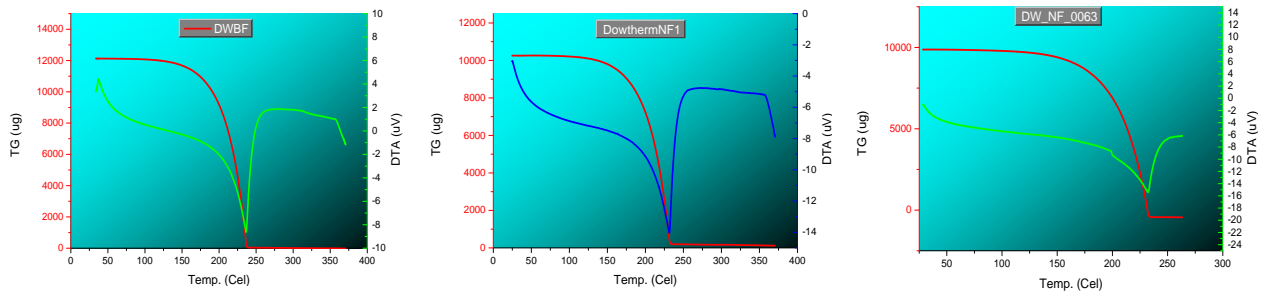


Figure 3. DTA and TG measurements results of Dowtherm basic oil and nanofluids.

Followed figure 4 shows results of DSC investigations of basic (1) thermal oil and nanofluids (2,3)

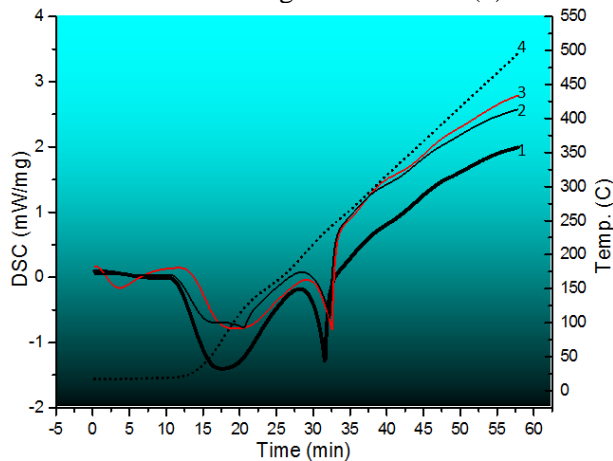


Figure 4. DTA and TG measurements results of Dowtherm basic oil and nanofluids: 1- basic oil, 2- 0,063 % added carbon nanofluid, 3- 1% added carbon nanofluid, 4- temperature regime.

We can find that thermal flow before temperature 150-170 higher than basic fluid. The highest heat flow can be detected at temperatures of 20-100 °C and from 170 to 450 °C. By the results in fig. 3, it can be said that at temperatures of 20-100 °C, the high heat flux relative to mass is the actual values of the heat capacity of the base medium and the nanoscale, because, although aluminum vessels with a lid were used, the oil was ignited at temperatures of 150-170 °C. After these temperatures, the values of residual carbon nanopowders are apparently given out.

## REFERENCES

- [1] S. Jana, A.S. Khojin, W.H. Zhong, *Thermochim. Acta* 462 (2007) 45–55. [2] S.U.S. Choi, Z.G. Zhang, W. Yu, et al., *Appl. Phys. Lett.* 79 (2001) 2252–2254. [3] J.C. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, Clarendon Press, 1881. [4] S.U.S. Choi, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, *ASME Publ. Fed* 231 (1995) 99–106. [5] T.P. Otanicar, P. E. Phelan, R.S. Prasher, G. Rosengarten, & R. A. Taylor, (2010), Nanofluid – based direct absorption solar collector, *Journal of renewable and sustainable energy*, 2. [6] Gupta H.K, Agrawal G.D, Mathur J. (2012), An overview of Nanofluids: A new media towards green environment, *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENVIRONMENTAL SCIENCES* Volume 3, No 1, 2012. [7] Optimal concentration of alumina nanoparticles in molten Hitec salt to maximize its specific heat capacity. Ming Xi Ho, Chin Pan. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 70 (2014), pp174–184. [8] Yang Y, Zhang Z G, Grulke E A, Anderson W B & Wu G., (2005), Heat transfer properties of nanoparticle-in-fluid dispersions (nanofluids) in laminar flow, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48(6), pp1107–1116.

## MULTI COMPONENT NANOFLUID PREPARATION AND THEIR SOME CHARACTERISTICS

H. Yong<sup>1</sup>, H. Xia<sup>1</sup>, Sh. Nurmatov<sup>2</sup>, Jin Jian<sup>1</sup>, Kai Wei<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of engineering thermophysics Chinese Academy of Sciences*  
Beijing, 11 Beisihuanxi Road, 100190, China, [haoyong@iet.cn](mailto:haoyong@iet.cn)

<sup>2</sup>*Institute of Material Science SPA “Physics-Sun” Academy of Science of Uzbekistan*  
Tashkent, 100084, Uzbekistan, [nur1973@list.ru](mailto:nur1973@list.ru)

### Abstract

*Analysed methods of nanofluids preparation on the basics of solar salts, which will be useful for thermal storage or as heat transfer fluid in solar thermal power. Described a new method of nanofluid preparation and results of TG, DTA, DSC and SEM analysis.*

**Key words:** Solar power, thermal storage, nanofluids.

### 1. Introduction

Environmental pollution and the depletion of reserves of hydrocarbon fuels causes mankind to look for an alternative to the existing types of energy sources such as nuclear and conventional thermal power plants that burn hydrocarbons. At the present the free and ubiquitous alternative is solar energy. It is well known that the use of solar energy also has its own nuances, such as the seasonality of availability, or dependence on weather conditions, as well as night time. It turned out to easily eliminated, if we apply the thermal storage system, which has shown excellent results in practical application of the series of solar power plants [0].

The efficiency of thermal storage systems and solar power plants in general are closely linked to heat transfer material and the thermal storage materials [0] and their thermal and thermodynamic properties. Last year's several researchers have achieved excellent results in this area, which is encouraging the competitiveness of solar energy systems [0-0]. One of the priorities in the design of thermal storage materials is to improve their performance characteristics as heat capacity and thermal conductivity.

Analysis of the literature showed that by the developing of nano-technology, integration occurred in the area of solar energy through the use of nanotechnology in thermal storage systems. Namely, the addition of nanoscale particles (NP) in existing heat storage materials. Adding a certain size of nanoparticles increases the heat capacity of an abnormally high proportion [0], but this technology has not yet found wide industrial application and it need for more investigations and research results. Below will discussed some important results in this area.

Investigated [14] traditional solar salt (60% NaNO<sub>3</sub> + 40% KNO<sub>3</sub>) and was doped with silica nanoparticles at different solid mass concentrations (from 0.5% to 2%), noted that the mechanism involved in the specific heat increment is based on a surface phenomenon. Differential scanning calorimeter (DSC), scanning electron microscope (SEM), differential thermal (DTA), thermal gravimetric (TG) methods used. But using silica nanoparticles for thermal energy storage will be expensive pleasure. Also SEM analyses results and particles distribution was explained successfully.

The investigation [15] experimentally studies the optimal concentration of alumina nanoparticles in doped molten Hitec (ternary eutectic salt that is a mixture of sodium nitrate (NaNO<sub>3</sub>), potassium nitrate (KNO<sub>3</sub>) and sodium nitrite (NaNO<sub>2</sub>) in proportions of 7, 53, 40 mol%, respectively) that maximizes its specific heat capacity. The specific heat capacities of pure Hitec and nano-Hitec fluid are measured using



a DSC, and the microstructures following solidification are observed using SEM. Found that optimal concentration of nanoparticles is 0.063 wt. % for Hitec salt and greatest enhancement of specific heat capacity was 19.9%. By the SEM images following the solidification of samples and the developed model reveal the uniform dispersion of nanoparticles with negligible agglomeration at concentrations of under 0.016 wt.%. The agglomeration becomes significant and the particle clusters seem to be inter-connected at high concentrations.

Majority of scientists used a method of nanofluids preparation [14] by following general protocol for preparing the nanofluid: limited amount of components of basic salt for nanofluid and respectively amount of nanoparticles were measured in advance on a balance. The pure eutectic was prepared in the same manner without adding the nanoparticles. All chemicals were then dissolved in distilled water by portion 10mg:1ml. This water solution, which contains starting 0,063 till 2% of nanoparticles and salts eutectic nanofluid, was sonicated by an ultra sonicator for 100 min. to obtain homogeneous dispersion of the nanofluid. The water solution was then rapidly evaporated on a hot plate, which was maintained at 200. A portion of the dry sample was transferred to a Tzero hermetic pan (for subsequent DSC measurements). The pan was then mounted on a hotplate to remove any absorbed moisture. The standard Tzero hermetic pan was fixed with a lid and hermetically sealed. Before transferring the samples to the pan, the empty pan/lid and the pan/lid with a sapphire reference were mounted in a differential scanning calorimeter to obtain a baseline and a reference data.

The temperature was initially held at 150 C for at least 4 min. to evaporate any adsorbed moisture. The temperature was then ramped up to 560 C at 20 C/min. and held for another 4 min. The DSC was then cooled down to room temperature. The same temperature program was then cycled 4–6 times with the same sample to test repeatability of the sample. The size and distribution of the nanoparticles in the nanofluid samples were also measured before and after performing the TG, DTA, DSC experiments using a scanning electron microscope.

## 2. Experimental procedure

In this paper, as basic fluid (BF) selected the low temperature nitrates content offered by Justin W.Raade [5] which contain  $\text{LiNO}_3$ ,  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{CsNO}_3$  and  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ . This offered mixture of salts on eutectic point has following properties: melting point is 65, thermal stability limit in air is 561, and thermal stability in nitrogen is 564. As Nanoparticle selected 30 nm  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticles.

Table 1. Composition of basic fluid

	Component	Weight percent, %	Mole percent, %
1	$\text{LiNO}_3$	8	15
2	$\text{NaNO}_3$	6	10
3	$\text{KNO}_3$	23	30
4	$\text{CsNO}_3$	44	30
5	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	19	15

Prior to the experiments, it was decided that for the preparation of nano-medium will be used a method which has been proposed D.Shin. However, later, to avoid loss of eutectic proportions in fused material, at first decided to check the melting and the formation of a eutectic mass, which made by five components (Table 1).

As the table 2 shows that the melting point of  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  equal to 42.7 °C, and it was feared that at the time of evaporation of water which was used to dilute the salts with nanoparticles,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  will melt and thus violated the eutectic proportion of chemicals. Especially before experiments checked  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  solubility and dry process.

A standard procedure was developed to prepare and characterize salt mixtures. The first step was to prepare free flowing anhydrous salt components. Components were purchased in reagent grade purity, typically 99% pure. The general protocol for preparing the nanofluid is as follows: Prepared dry powders mixture  $\text{LiNO}_3 + (\text{CaNO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} + \text{NaNO}_3 + \text{KNO}_3 + \text{CsNO}_3$ , 80+190+60+230+440 mgs respectively, after mixing by mortar and pestle melted for well mixing in temperature which was melting point, after than cooled till room temperature.

The obtained semi-liquid mass divided into the three parts. First party intended as a base fluid. The second part for nanofluid with aluminum oxide nanoparticles with the percentage of 0.063% by weight. Third part used for nanofluid with aluminum oxide nanoparticles with the percentage of 1%. In this paper discussed results of investigation some properties of nanofluid with 1% added nanoparticles. Scale of additional selected by using results of majority scientists and they noted that [15] concentration of alumina

nanoparticles 0.063% shows highest enhancing of specific heat capacity and concentration of nanoparticles 1% it is limit of concentration to add nanoparticles after which will not obtained specific heat capacity enhancing in desired scale up to 20 – 25 %.

Table 2. Some properties chemicals and manufacturer information

Chemicals	T <sub>melt</sub> ,	Manufacturer
LiNO <sub>3</sub>	255	Sinopharm chemical reagent Co., Ltd, China
NaNO <sub>3</sub>	308	Sinopharm chemical reagent Co., Ltd, China
KNO <sub>3</sub>	400	Sinopharm chemical reagent Co., Ltd, China
CsNO <sub>3</sub>	414	Sinopharm chemical reagent Co., Ltd, China
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	42,7	Sinopharm chemical reagent Co., Ltd, China
30 nm Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> nanoparticles	<2000	Aladdin industrial corporation, Shanghai, China

Prepared contents investigated by differential thermal, thermal gravimetric, differential scanning calorimetric analyzing and scanning electronic microscope. For DTA and TG measurements used the PerkinElmer Diamond Thermogravimetric /Differential Thermal Analysis (TG/DTA/DTG) system, for DSC measurements used STA 449 F3Jupiter, Netzsch. Basic salt microstructure and nanoparticles distributions are observed using a scanning electron microscope Carl- ZEISS Gemini SEM.

### 3. Results, discussions and conclusions

Figure 1 shows results DTA measurements of BF. Melting point of BF converges and identically with results of authors (J.W.Raade) and соответствует 65-70 .

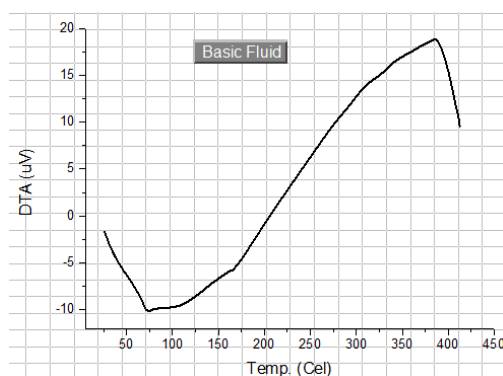


Figure 1. DTA measurement result of five component BF

Figure 2 and 3 shows results of SEM investigation. BF microstructure captured for compare with nanofluid microstructure and NP distribution

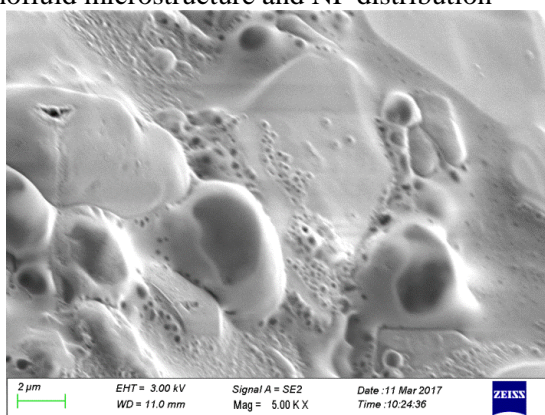


Figure 2. SEM images of BNF at ×5,000 magnification.

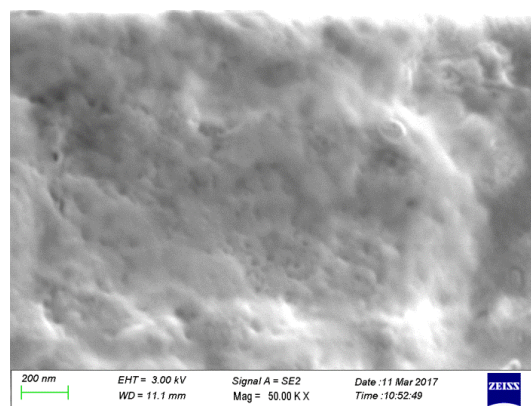


Figure 3. SEM images of BNF at ×50,000 magnification.

SEM shows that although most of the surface is smooth and looks homogeneous, we can see the traces of bubbles that formed when melting. This trend persists in all samples before and after heat treatment. Below we will discuss these results.



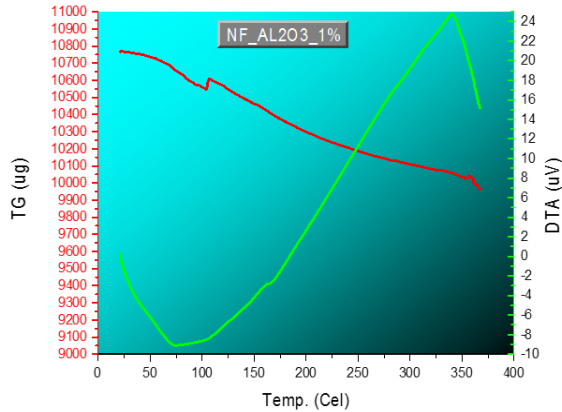


Figure 4. DTA and TG measurements results of nanofluid with 1%  $Al_2O_3$

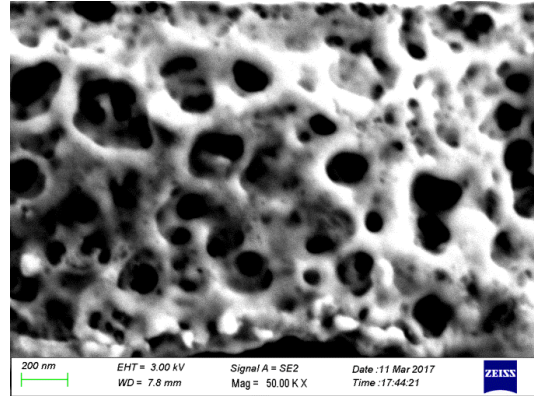


Figure 5. SEM results of BNF 1%  $Al_2O_3$

Figure 4 shows that after adding of 1%  $Al_2O_3$  nanoparticles in obtained nanofluid no changes in DTA and mass behavior. In the BNF during experiments mass losses was around 10 -12 % for 3 cycles. Figure 5 shows distribution of 1 % added  $Al_2O_3$  nanoparticles. There are no any agglomerations and we can assume that nanofluid prepared by well mixing method. But we can see that the structure has many pores. This makes it difficult for SEM experiments to have a better pictures and distinguish nanoparticles, in the second, this means that the basic material retains the fused structure upon solidification. A basic five-component material with a low melting point showed instability at the influence of temperature and this was also reflected in measurements of the heat capacity. The results of these measurements are presented below.

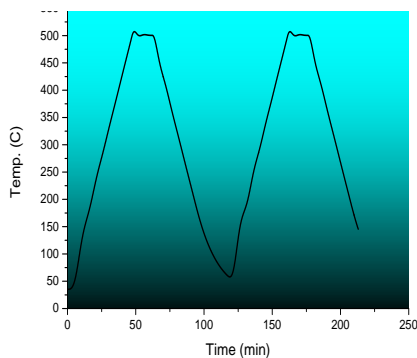


Figure 5. Temperature regime for DSC measurements

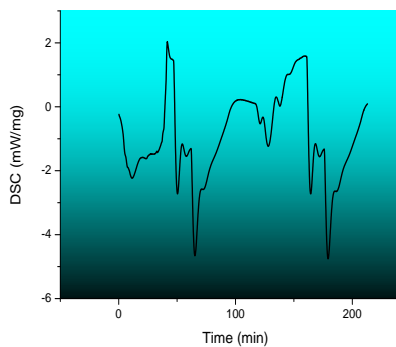


Figure 6. DSC measurement result of basic fluid

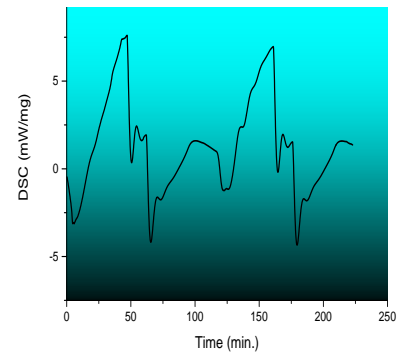


Figure 7. DSC measurement result of nanofluid with 1%  $Al_2O_3$

Figure 5 shows the selected temperature mode for DSC measurements. The rate of 20 °C/min was chosen and in the point of 500 °C keep for 20 min., than samples cooled to 50 °C and cycle repeat.

The results of DSC measurements were not stable (Figures 6.7). As the figures show, some reactions occurring inside the material contribute to the formation of additional noise. And in reality, we could not determine the actual values of the heat flux relative to the mass of the sample. Although we can say that there is an increase in the heat flux in the sample on which  $Al_2O_3$  is added in the amount of 1%. But this increase is so great (in 2 and 3 time in some areas) that we will have to look for other solutions to explain these results. This is the development of a method for separating reaction noise from actual heat capacity readings and it is possible that during the reactions the eutectic of the base material is lost and it plays the role of an additional material as a nanoparticle. This increases the heat capacity in the above scales. But on the other hand, this means that the incremental materials are in fact more than 1% and an increase in the heat capacity at such levels contradicts the literary data and the existing theories about the heat capacity.

In general, it can be said that the use of nanoparticles and, in general, nanotechnology in solar energy requires more research and new explanations.

## REFERENCES

- [1] Review on concentrating solar power plants and new developments in high temperature thermal energy storage technologies, Ming Liu, N.H.Steven Tay, Stuart Bell, Martin Belusko, Rhys Jacob, Geoffrey Will, Wasim Saman and Frank Bruno. Renewable and Sustainable Energy Reviews 53(2016) 1411-1432. [2] Thermal energy storage materials and systems. Bauer T., Steinmann W.D., Laing D., & Tamme R. In G. Chen (Ed.), Annual Review of Heat Transfer, Vol. 15, pp. 131-177, 2012. : Begell House, Inc.[3] Molten salts database for energy applications, R. Serrano-López, J. Fradera, S. Cuesta-López, Chemical Engineering & Processing: Process Intensification, Volume 73, Pages 87-102, November 2013. [4] Review on storage materials and thermal performance enhancement techniques for high temperature phase change thermal storage systems. Liu M, Saman W, Bruno F. Renew. Sustain. Energy Rev. 2012;16: 2118-32. [5] Development of molten salt heat transfer fluid with low melting point and high thermal stability . Justin W. Raade, David Padowitz . Journal of Solar Energy Engineering 133(3), 031013 (Jul 28, 2011) [6] Advanced Thermal Storage System with Novel Molten Salt. Matthieu Jonemann, Halotechnics, Inc. Emeryville, California. National Renewable Energy Laboratory (NREL) report, 2012. [7] Thermal and transport Properties of NaCl-KCl-ZnCl<sub>2</sub> Eutectic Salts for New Generation High Temperature Heat Transfer Fluid. ” Peiwen Li, Edgar Molina, Kai Wang, Xiankun Xu, Ghazal Dehghani, Amit Kohli, Qing Hao, Mohamad H. Kassaei, Sheldon M. Jeter, Aryn S. Teja, Journal of Solar Energy Engineering, October 2016, Vol.138/054501-1. [8] Molten salts as engineering fluids – A review. Part I. Molten alkali nitrates. V.M.B. Nunes, C.S. Queirós, M.J.V. Lourenço, F.J.V. Santos C.A. Nieto de Castro. Applied Energy 183 (2016) 603-611. [9] A Review on Thermal Energy Storage Unit for Solar Thermal Power Plant Application. Arun Kumar and S.K.Shukla, Energy Procedia. 2015. 74: 462 - 469. [10] Experiments and Analysis on the Molten-Salt Direct Contact Absorption Receiver Concept. Mark S. Bohn K. Y. Wang. Second ASME/JSME Thermal Engineering Conference Honolulu, Hawaii 22-27 March, 1987.[11] Preparation of Multi nitrate molten salt and its properties tests. Wei Zhai, Bo Yang, Maodong Li, Shiping Li, Mingliang Xin, Jinmei Lin, Lian Wang. International Symposium on Material, Energy and Environment Engineering (ISM3E 2015).[12] A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. Y. Tian, C.Y. Zhao. Applied Energy 104 (2013): 538–553. [13] Increment of specific heat capacity of solar salt with SiO<sub>2</sub> nanoparticles. Andreu-Cabedo et al. Nanoscale Research Letters 2014, 9:582.[14] Enhancement of specific heat capacity of high-temperature silica-nanofluids synthesized in alkali chloride salt eutectics for solar thermal-energy storage applications. Donghyun Shin, Debjyoti Banerjee. International Journal of Heat and Mass Transfer.54 (2011). 1064-1070. [15] Optimal concentration of alumina nanoparticles in molten Hitec salt to maximize its specific heat capacity. Ming Xi Ho, Chin Pan. International Journal of Heat and Mass Transfer, 70 (2014), 174–184.

## УПРАВЛЕНИЕ КРИСТАЛЛИЧНОСТЬЮ И РАЗМЕРОМ НАНОЧАСТИЦ КРЕМНИЯ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ

Р.Х. Ашуров<sup>1</sup>, Т.К. Турдалиев<sup>1</sup>, И.Х.Ашуров<sup>2</sup>, В.М.Ротштейн<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт Ионно-плазменных и лазерных технологий им. У Орифова АН РУ

<sup>2</sup>Национальный Университет Узбекистана им. М.Улугбека

### Аннотация

Были осуществлены процессы реакции разложения моносилана в плазме тлеющего разряда как постоянного, так и переменного тока. Показана возможность синтеза нанокремния с использованием режима тлеющего разряда. Для исследования фазового состава и размера частиц, полученных образцов нанокремния был применен метод спектроскопии комбинационного рассеяния. Показан возможность контроля над изменением структуры плёнки аморфного кремния, с включениями кристаллической фазы и над размерами частиц при варьировании давления и состава газовой смеси

**Ключевые слова:**Аморфный гидрогенизированный кремний, нанокремний, плазма тлеющего разряда, Рамановская спектроскопия

### 1.Введение

Аморфный гидрогенизированный кремний, с включениями нанокристаллической фазы (а-

Si:H + nc-Si), является перспективным материалом для солнечных фотовольтаических преобразователей, о чем, в частности свидетельствует огромное число работ посвященных исследованию способов получения и анализа пленок (a-Si:H + nc-Si). Одним из наглядным примером является использование р-типных нанокристаллов кремния (p-nc-Si:H) в матрице аморфного кремния (a-Si:H) для улучшения проводимости, ширины запрещенной зоны и антиотражающие качества оптического р-типного слоя фотовольтаических преобразователей [1-3].

Одним из перспективных направлений получения гидрогенизированного аморфного кремния, с включениями нанокристаллической фазы, является использование реакции разложения моносилана в плазме тлеющего разряда как постоянного, так и переменного тока [4]. В основе данного способа формирования пленок аморфного кремния, с включениями нанокристаллической фазы, лежит разложение силана в электрическом разряде. На процессы в плазме серьезное влияние оказывают виды и параметры разряда. Для решения этой задачи нами были экспериментально исследованы возможности разложения моносилана в постоянном и высокочастотном (ВЧ) электрических разрядах.

С использованием данных, полученных из литературных источников и результатов собственных экспериментальных исследований, был выработан алгоритм процесса реализации реакции разложения как чистого моносилана, так и смесей сложного состава, в высокочастотном тлеющем разряде, с целью получения аморфного гидрогенизированного кремния с включениями нанокристаллической фазы.

## 2. Эксперимент

В первой серии экспериментов в качестве исходного продукта реакции использовался чистый моносилан. Экспериментально получено, что при давлении силана, равном  $1,9 \times 10^{-1}$  торр, наблюдается максимум образования SiH при различных мощностях разряда. В результате проведенных экспериментов сделан вывод о том, что более эффективное осаждение пленок аморфного кремния с включениями нанокристаллической фазы следует проводить при давлении, равном  $(1,9-2,2) \times 10^{-1}$  торр. Реакционная камера откачивалась до давления  $3 \times 10^{-4}$  торр, подложка прогревалась при  $220^\circ\text{C}$  в течение 60 мин. После прогрева в камеру подавался моносилан с расходом  $200 \text{ см}^3/\text{мин}$  и устанавливалось рабочее давление 30 Па, мощность низкочастотного генератора 200 Вт, плазма возбуждалась на частоте 50 кГц и производилось осаждение пленки аморфного гидрогенизированного кремния с включениями нанокристаллической фазы.

Во второй серии экспериментов в качестве исходного продукта реакции использовалась в различном соотношении газообразная смесь водорода  $\text{H}_2$  и 5%-ого разбавленного аргоном моносилана  $\text{SiH}_4$ . Смесь подавалась в вакуумную камеру посредством дозирующей натекательной системы. Температура подложки поддерживалась в диапазоне  $220-500^\circ\text{C}$ . Подложками служили пластины кремния. В каждой из серий экспериментов, проводилась вариация одного из следующих параметров: концентрации компонентов газовой смеси и давления смеси в камере осаждения от 0,01 до нескольких торр.

## 3. Результаты и обсуждения

Для определения физических характеристик и фазового состава тонких плёнок кремния проводилось с использованием спектроскопии комбинационного рассеяния. Рамановская спектроскопия применима для определения характеристик нанокристаллов кремния как экспрессный неразрушающий метод анализа, позволяющий по форме и положению пиков рамановского рассеяния оценить размер нанокристаллов, оценивать соотношение аморфной и кристаллической фаз, анализировать состав нанокристаллов и оценивать деформации в нанокристаллах. Спектры комбинационного рассеяния полученных образцов регистрировались на InViaRaman спектрометре производства компании «Renishaw», Великобритания, при возбуждении линиями Cobolt CW 532nm DPSS лазера 532нм и Helium-Cadmium лазера 325нм.

### 3.1. Анализ соотношения аморфной и кристаллической составляющих в нанокристаллах кремния

Аморфный кремний в нанокомпозитах кремния может проявиться в спектре комбинационного рассеяния в виде широкой рамановской структуры в области  $480 \text{ см}^{-1}$ . В свою очередь, следует отметить, что для частиц размером 60 нм максимум спектра комбинационного рассеяния приходится на  $522 \text{ см}^{-1}$ , значение очень близкое к значению для объемного кремния. Таким образом, анализируя рамановские спектры можно сказать о соотношении аморфной и кристаллической со-

ставляющих в нанокристаллах кремния [5]. Для этого необходимо определить интегральные интенсивности, соответствующие кристаллическому и аморфному пикам.

На рисунке 1 показан полученный нами рамановский спектр осажденной пленки нанокристаллического кремния. Анализ экспериментальной спектральной кривой показывает, что в полученном спектре наблюдаются как моды аморфного кремния  $\sim 480 \text{ см}^{-1}$ , так и моды, отвечающие за наличие кристаллической фазы в плёнке  $\sim 520 \text{ см}^{-1}$ . Таким образом, из анализа спектра комбинационного рассеяния следует, что плёнка имеет аморфно-нанокристаллическую структуру.

Последующий отжиг исследуемого образца при температуре порядка  $1100^\circ\text{C}$  приводит к видоизменению соответствующего спектра комбинационного рассеяния, что показано на рисунке 2. В качестве источника возбуждения использовался Cobolt CW 532nm DPSS лазер с длиной волны излучения 532 нм. В процессе измерений использовалась дифракционная решётка с периодом 1800 линий/мм, а в качестве регистрирующего устройства – штатный детектор Renishaw CCD Camera. Видно, что по мере превращения аморфных кластеров кремния в нанокристаллы кремния широкая спектральная полоса с максимумом около  $480 \text{ см}^{-1}$  трансформируется в полосу с максимумом, близким к  $521 \text{ см}^{-1}$ , характерному для объемного кристалла кремния при комнатной температуре. Определение степени кристалличности проводилось с использованием результатов серии измерений спектров комбинационного рассеяния целого ряда образцов, полученных в различных экспериментальных условиях и осуществлялось по интегральным интенсивностям соответствующих кристаллических и аморфных пиков. Зависимость степени кристалличности от давления смеси газов в камере представлена на рисунке 3.

Максимальные значения степени кристалличности (55%) при используемых параметрах достигаются в диапазоне давлений смеси, близких к 1 Торр, где наблюдается и максимальный размер нанокристаллитов (13 нм). С увеличением давления смеси свыше 1,5 Торр в осажденных плёнках значительно преобладает аморфная структура. Кристаллиты исчезают при давлении смеси свыше 2,5 Торр.

Измерения показали, что с увеличением концентрации моносилана в смеси по отношению к водороду в диапазоне от 5 до 25% степень кристалличности увеличивается с 21% до 43 %.

### 3.2. Гранулометрический контроль образцов нанокремния методом комбинационного рассеяния, с использованием InViaRaman спектрометра

Как известно, в рамановских спектрах нанокристаллов кремния наблюдается красный сдвиг, зависящий от размера наночастиц [5-7].

Как уже отмечалось, для частиц размером 60 нм максимум приходится на  $522 \text{ см}^{-1}$ , значение очень близкое к значению для объемного кремния.

С уменьшением размера частиц сдвиг смещается в сторону уменьшения энергий. Теоретические и экспериментальные результаты, представленные в этих работах, полученные при исследовании данного эффекта, позволяют нам с достаточно высокой степенью точности определять размеры наночастиц, по соответствующим красным сдвигам в их спектрах комбинационного рассеяния. На рисунках 4 представлены семейство спектров комбинационного рассеяния, полученные нами для образцов нанокристаллического кремния, размер частиц которых соответствует 16 нм, 27 нм и 50 нм. В качестве источника возбуждения использовался Cobolt CW 532nm DPSS лазер с длиной волны излучения 532 нм. В процессе измерений использовалась дифракционная решётка с периодом 1800 линий/мм, а в качестве регистрирующего устройства – штатный детектор Renishaw CCD Camera.

Как видно из рисунка 4, для частиц размером 50 нм максимум приходится на  $519 \text{ см}^{-1}$ , что довольно близко к значению для объемного кремния, а с уменьшением размера частиц сдвиг смещается в сторону уменьшения энергий. Полученные результаты иллюстрируют возможности изменения структуры плёнки аморфного кремния, с включениями кристаллической фазы, при варьировании давления газовой смеси и содержания в ней водорода.

## 4. Заключение

Используя представленных результатов измерений, можно определить вероятность процесса образования определенных размерных групп нанокристаллов кремния в зависимости от давления рабочей смеси в реакционной камере.

На основании полученных результатов исследований, продемонстрирована возможность выработки регламента экспериментального процесса создания нанокристаллического кремния, с

использованием режима тлеющего разряда, обеспечивающего получение наноразмерных структур кремния с заданными характеристиками.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] JunMa, HeBai, JianjunZhang, YujieYuan, JianNi, KailiangZhang. Size-controlled nc-Si:H/a-SiC:H quantum dots superlattice and its application to hydrogenated amorphous silicon solarcells //Solar Energy Materials & Solar Cells 157 (2016)923–929. [2] X. Liao, W. Du, X. Yang, H. Povolny, X. Xiang, X. Deng. Nanostructure in thep-layer and itsimpacts on a morphous silicon solarcells, // J. Non-Cryst.Sol.352(2006)1841–1846. [3] R. J. Koval, C. Chen, G. M. Ferreira, A. S. Ferlauto. Maximization of the open circuit voltage for hydrogenated amorphous silicon n–i–p solar cells by in- corporation of protocrystalline silicon p-type layers. // Appl.Phys.Lett.81(2002),1258–1260. 4. В.И.Струнин, А.А.Ляхов, Г.Ж.Худайбергенов, В.В.Шкуркин. Моделирование процесса разложения силана в высокочастотной плазме. //ЖТФ, 2002, том 72, вып. 6, стр. 109-114. [5] Faraci G. at. al. Modified Raman confinement model for Si nanocrystals // Phys. Rev. B. 2006. V. 73. P. 033307 (4 p.). [6] Meier C. at. al. Raman properties of silicon nanoparticles // Phisica E. 2006. V. 32. P. 155-158. [7] Mishra P., Jain K.P. Raman. Photoluminescence and optical absorption studies on nanocrystalline silicon // Mater. Sci. Eng. Eng. B. 2002. V. 95. P. 202-213.

## ТЕХНИЧЕСКИЙ КРЕМНИЙ, КАК ОСНОВА СОЗДАНИЯ В РЕСПУБЛИКЕ УЗБЕКИСТАН НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ПРОИЗВОДСТВ ЧЕРНОЙ И ЦВЕТНОЙ МЕТТАЛЛУРГИИ, ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ И СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Б.М. Абдурахманов, М.Х. Ашуров, Х.Б. Ашуров, М.Ш.Курбанов

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз, ул Дурмон йули 33,  
Академгородок, 700125 Ташкент, Узбекистан; [bogarab@mail.ru](mailto:bogarab@mail.ru)

Освоение в Республике Узбекистан промышленного производства технического кремния (ТК) [1] и, близкого к нему по применяемой карботермической технологии, ферросилиция (ФС) [2], ориентированного на собственную сырьевую базу в виде жильного кварца (ЖК) и высококачественных кварцевых песков (КП)[3], сопровождается появлением новых, интересных технических и технологических задач, а также весьма широких перспектив для создания в РУз новых видов производств.

Так наличие собственного ТК, причем с возможностью выплавки всех его марок, включая Кр00 с чистотой 98,8 %[1], позволяет ставить вопрос об организации в РУз предприятий по его химико-металлургическому переделу в поликристаллический кремний -сырец , а затем в поли – мульти или монокристаллический кремний для изделий электронной техники и солнечных элементов (СЭ) [4]. Важно отметить, наличие в РУз научно-технического задела [5,6], позволяющего сделать обоснованный выбор в пользу моносилановой версии упомянутого передела, обладающей неоспоримыми преимуществами в части меньшей энергоемкости и экологическим последствиям по сравнению с хлорсилановой [1,4]. Более того, становление в РУз именно моносиланового производства кремния позволит освоить наиболее передовые, малоэнергоемкие и экологически чистые технологии изготовления СЭ, основанные на создании структур ( $\alpha$ -SiH – Si –  $\alpha$ -SiH) , содержащих на обеих поверхностях Si-подложки тонкие слои из аморфного гидрогенизированного кремния, технология изготовления которых базируется исключительно на разложении моносилана в плазме высокочастотного тлеющего разряда.

СЭ этого типа обладают КПД 24% и выше и в то же время в 1,5 раза меньшим коэффициентом деградации мощности при нагреве, что важно при эксплуатации солнечных фотоэлектрических станций (СФЭС) в климатических условиях Центральной Азии[1,4]. Отметим, что SiСЭ, выполненные по стандартным технологиям в промышленном производстве обладают КПД не превышающим 16-17%, а повышение этого показателя до «рекордных» для SiСЭ величин, ~ 20%, сопровождается неприемлемым ростом стоимости изделий.

Одной из новых технических задач сопряженных с организацией в РУз производства ТК и ФС является утилизация отходов. Это, во первых, мелкие фракции исходного кремнийсодержа-



щего сырья (КСС) в виде ЖК, объем которых может достигать значительных величин, иллюстрацией чего служит таблица 1.

Таблица 1. Химический состав ЖК из различных узбекистанских месторождений и выход в % после операции дробления перед шихтовкой

Месторождение ЖК	Химический состав, %					% выхода после дробления
	SiO <sub>2</sub>	FeO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Прочие	
Битаб (Навои)	98,01	0,68	0,34	0,47	0,5	57,5
Сарыкуль (Самарканд)	98,06	0,35	0,76	0,33	0,5	61,5
Акбулак (Самарканд)	97,68	0,62	0,76	0,44	0,5	85,6
Кукпатас (Навои)	97,73	0,55	0,93	0,29	0,5	49,3
Пармитан (Джизак)	97,71	0,46	0,31	0,52	1	54,5

Наиболее остро стоит проблема утилизации кремниевой пыли, и микрокремнезема (МКЗ)[3] -экологически опасных отходов, обусловленных спецификой применяемой электродуговой карботермической технологии восстановления КСС, реализуемой при температурах 1800-2500 К, что сопровождается появлением наноразмерных, от 50-100нм до 2 мкм, пылевых частиц [8,9], доля которых в общем объеме отходов составляет 90%, улавливается системами очистки отходящих газов с эффективностью до 99, 96% и объем которых может доходить до 30% от массы самой товарной продукции. Несмотря на различия в химическом составе, цвете и содержании углерода, мельчайшие частицы МКЗ обладают некоторыми общими свойствами, а именно:

- их возникновение в производстве ТК, а также родственных карботермических процессах обусловлено достаточно сложным и до конца не изученным физическим механизмом, связанным с испарением, переносом и конденсацией паров кремния и монооксида кремния в различных зонах электродуговой пещи последующим доокислением монооксида кремния до SiO<sub>2</sub> на колошнике;

- частицы преимущественно состоят из «глобул», диаметр которых изменяется в широких пределах от 50 нм до 2 мкм, что, например, в 50 - 200 раз меньше среднего размера частиц цемента;

- частицы по данным разных источников являются аморфными, среди которых наблюдаются и кристаллические образования и характеризуются высоким содержанием SiO<sub>2</sub> от 84 до 98%;

Характерно, что частицы МКЗ часто представляют собой не отдельные микроглобулы в упомянутом выше широком диапазоне размеров, а образуют конгломераты из мелких частичек что отмечается в [1,8,9].

Из сопоставления микрофотографий, сделанных на электронном и оптических микроскопах, частиц МКЗ [1,8-11], и КП[3,12], то есть природного мелкодисперсного кремнезема, а также данных, иллюстрирующих современные представления о поверхности частиц микрозернистого кремния [1,13] следует, что частицы МКЗ представляют собой сферические образования - «глобулы», тогда как песчинки имеют более сложную конфигурацию и, несмотря на некоторую окатанность, своей формой и изрезанностью краев указывают на превалирование чисто механических воздействий при своем образовании, а также на кристаллическую структуру. Форма частиц МКЗ, по нашему мнению, наоборот, свидетельствует об их преимущественном образовании из распыляемого потоком печных газов расплава маточного вещества, каковым является монооксид кремния. Этот вывод не противоречит представлениям, развитым в [2,10,20]. Поверхность обоих типов кремнезема принципиально отличается от таковой у частиц порошка Si, не зависимо от их размеров. Поверхность частиц Si, не гладкая, а изобилует выступами и впадинами, размеры которых могут составлять до 10 % от величины самой частицы, что обусловлено его кристаллической структурой, ярко проявляющейся при механическом измельчении [13]. Кроме того частицы Si всегда имеют область нарушенной кристаллической структуры, где сосредоточены дефекты и нарушения, возникшие при размоле, а также покрывающий каждую частицу слой SiO<sub>2</sub> наноразмерной толщины, неизбежно возникающий при контакте поверхности кремния с любой кислородосодержащей средой, например, с кислородом воздуха.

Исключительно высокая дисперсность МКЗ обуславливают малую насыпную или, так называемую, «кажущуюся» плотность – от 150 до 250 кг/м<sup>3</sup> [8] по сравнению с истинной плотностью, близкой к плотности монолитного кремнезема в виде кварцита или ЖК, составляющей 2200-2300 кг/ м<sup>3</sup>.

Наиболее разработанным является использование МКЗ при производстве бетонов и строительных растворов [8,14,15], причем, в ряде стран сформулированы требования к параметрам МКЗ, например, в России они регламентируются ТУ 5743–048–02495332–96. Высокая активность

МКЗ, обусловленная большой удельной поверхностью, составляющей  $\geq 20000 \text{ м}^2/\text{кг}$  [10] позволяет эффективно использовать его в качестве добавки к цементам, которая характеризуется отличными пуццолановыми свойствами, а также выполняет роль мелкого заполнителя и образует дополнительное количество гидратных фаз являющихся гелевым связующим. При оптимальных дозировках МКЗ экономия цемента может достигать до 28 -50% , при гарантированном улучшении свойств бетонов, в том числе, повышении прочности, водонепроницаемости, хлоридо – и сульфатостойкости, а также увеличении в 2-3 раза их морозостойкости [8,16, 17].

Целесообразно применение МКЗ и как раскислителя в сталелитейном производстве, что представляет интерес для металлургических предприятий РУз. Не меньший интерес для них представляет применение МКЗ в качестве компонента при создании более стойких чем традиционные, огнеупоров, а также связующих материалов применяемых при футеровке металлургических печей.

Оцененные нами [1,11] некоторые свойства МКЗ Ангренского завода ферросилиция и его химический состав (табл.2), объем которого в сутки доходит до 8 -10 тонн, в зависимости от качества исходного сырья и марки выплавляемого продукта, близки к характеристикам аналогичных отходов возникающих на производствах ТК и ФС России и других стран [8,9, 16].

Таблица 2. Сопоставление состава МКЗ, представляющего собой отходы производства ферросилиция марки ФС65 на Ангренском заводе (а), с анализом отходов производства ТК марки Кр1 на ОАО «РУСАЛ» Иркутск (б), и таковыми, возникающими при производстве ферросилиция марки ФС75 на ОАО «Кузнецкие ферросплавы» (в).

Наименование вещества	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	MgO	K <sub>2</sub> O	CaO	Mn O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Содержание %.	а	92,7	1,18	1,26	0,59	0,68	0,95	1,49	0,12 не опр.
	б	93,4- 95,3	0,36	0,4	не опр.	следы	не опр.	0,3	0,05 0,18
	в	91,7- 93,6	0,6-1,4	0,68	не опр.	0,08	не опр.	0,52	0,3 0,2

Это позволяет считать данный вид МКЗ привлекательным и высоколиквидным сырьем, в первую очередь, для строительной отрасли, что, безусловно, может повысить рентабельность основного производства. Устойчивость бетонов, изготовленных с добавками МКЗ к воздействиям окружающей среды, представляет особый интерес при создании опорных устройств или фундаментов при сооружении СФЭС. Дело в том, что строительство СФЭС связано не только с затратами Si, идущего на изготовление СЭ из примерного расчета 10 г. на 1 Вт мощности создаваемой энергоустановки. В общей сложности на единицу мощности СФЭС необходимо затратить до 217 г. различных материалов, а именно: стекло, дюралюминий, стальные изделия, медь и т.д. [1]. Они необходимы, как для изготовления модулей и панелей СФЭС, размещаемых с ориентацией на Юг под углом местности, так и для деталей опорных устройств, позволяющих зафиксировать упомянутые изделия в этом положении и обеспечить ветроустойчивость конструкциям, обладающим, как известно, большой парусностью. По нашим оценкам создание, уже строящейся в РУз СФЭС мощностью 100 МВт и стоимостью 310 млн. долларов США, потребует расхода бетона в объемах, по крайней мере, 10 тыс. т. Требования к этим бетонным изделиям предъявляются не менее, а более жесткие, чем к таковым общегражданского назначения, поскольку, априори, их эксплуатация постоянно проходит на открытом воздухе в условиях воздействия осадков, а также суточных и сезонных перепадов температуры. Тем не менее срок эксплуатации бетонных комплектующих СФЭС должен превышать срок службы СЭ, составляющий в настоящее время, минимум, 30 лет [1,4]. Поэтому повышение прочностных характеристик бетона для опор СФЭС применением отходов металлургического передела ЖК в ТК является полезным решением, и еще раз подчеркивает целесообразность, предложенного нами в [1,4], комплексного подхода к решению задач солнечной энергетики.

Не менее важен и возврат МКЗ в основное производство. Технически этот вопрос решается, теми же приемами, что и возврат в производство мелочи КСС и применение КП [1,2,18,20], то есть путем изготовления брикетов. Однако в состав таких брикетов, в которых помимо МКЗ входит отсев ЖК, и УВ с операции шихтовки, а также КП, МКЗ вводится в небольших, максимум, ~ 20% по массе [18], количествах. Причины ограничений – не достаточные пористость и механическая прочность таких брикетов, а главное, не воспроизводимость этих параметров [2,20], сильно



зависящая, как показали наши исследования [1,11], от гранулометрического состава компонентов, в первую очередь КСС, идущих на брикетирование.

Важность решения задачи по преодолению этих ограничений несомненна.

Во первых, ряд узбекистанских КП выгодно отличаются от ЖК более высокой чистотой по примесям [3,12] и простотой добычи. Что касается УВ в виде древесного угля или кокса, то эти материалы в РУз не производятся и импортируются за валюту. Поэтому потери ЖК в виде мелочи на отсевах реально составляющие, например, согласно данным табл.1, от 15 до 50% в зависимости от поставщика КСС, и потери УВ, доходящие обычно до 15-20% [2,20], существенно ухудшают экономику производств ТК и ФС. Не менее актуальной является утилизация пылевых отходов в виде МКЗ, составляющих до 1/3 от объема выплавляемого целевого продукта [1,2,8,10,20].

На основе опыта плавки ТК и ФС нами разработана новая технология, суть которой состоит в том, что добавки МКЗ в кремнеземную часть шихты для изготовления брикетов надо проводить с учетом насыпной плотности конкретного используемого КСС, что позволяет оптимизировать операцию шихтовки и значительно, в 2 раза, увеличить долю МКЗ в составе брикетов и при этом снизить на 10-15 % удельный расход электроэнергии, что не маловажно для этих процессов с удельной энергоемкостью от 18 МВт·ч до 13 МВт·ч на тонну продукта.

В табл. 3 и 4 приведены данные иллюстрирующие высокое качество ТК и ФС, выплавленных по нашей технологии из шихт содержащих мелочь КСС, КП Джеройского месторождения [3] и МКЗ.

Таблица 3. Химический состав ТК, полученного с использованием пылевых отходов промышленного производства в виде МКЗ и КП.

Элемент	Si	Al	Fe	Ca	Ti	Na
Содержание в %	98,11	0,58	0,56	0,32	0,25	0,09

Таблица 4. Химический состав ФС65, полученного с использованием пылевых отходов промышленного производства в виде МКЗ, а также мелочи КСС и УВ.

Элемент	Si	Al	Mn	Cr	C	P	S
Содержание в %	66,23	1,14	0,32	0,28	0,09	0,04	0,02

Необходимо отметить также огромные перспективы для применения МКЗ в технологии SiC [10] и, в особенности, наноразмерных порошков этого материала. Производство SiC на основе МКЗ базируется на плазмометаллургическую технологию (ПМТ) [10,21] и печной синтез (ПС) [22], имеющих, в свою очередь, различные вариации при своем аппаратурном воплощении.

Вероятный механизм ПС SiC из смесей МКЗ и УВ предложен в [10] по которому синтез протекает с активным участием газообразного монооксида кремния и также является многоканальным. Особо интересно, то, что выделена и оценена роль размерного эффекта, то есть размеров частиц МКЗ и УВ, вступающих в химическое взаимодействие, который проявляется в зависимости давления насыщенного пара над поверхностью кристаллических частиц от их размеров, в результате чего, скорость взаимодействия растет с увеличением поверхности испарения SiO<sub>2</sub> и адсорбционной способности поверхности примененного УВ. То есть при использовании мелких и хорошо перемешанных материалов, каковыми и являются смеси МКЗ и, например, сажи, первичным взаимодействием является твердофазное контактное взаимодействие SiO<sub>2</sub>(т)+C(т), в результате которого при температурах 1500 К образуются газообразные монооксиды кремния и углерода, а при температурах выше 1800 К – карбид кремния и дефицитный по кислороду кремнекислородный расплав. Образование в зоне контакта кремнезёма с углеродом пленок кремнекислородного расплава увеличивает поверхность контакта и интенсифицирует процесс восстановления.

В [10], а также в ряде других работ были сопоставлены типичные режимы получения и параметры продукта изготавливаемого ПС и по ПМТ. Показано, что в отличие от ПС процесс образования карбида кремния по ПМТ, где в качестве реагентов используются МКЗ, метан с содержанием CH<sub>4</sub> 94,5% и азотный плазменный поток с начальной температурой 5100К, является «одноканальным», протекающим с участием паров Si и циановодорода по схеме "пар – кристалл".

ПМТ в отличие от ПС, реализуемого с использованием печи сопротивления, позволяет по-

лучать продукт в виде нанопорошков с чистотой 91-94% , с размером ограненных частиц 60-70 нм, обладающих минимальным количеством поверхностных дефектов, с удельной поверхностью 36000-38000 м<sup>2</sup>/кг, а также позволяет управлять процессом синтеза, например, путем регулирования состава газовой фазы, введением определенных добавок, что обеспечивает получение SiC заданными электрофизическими свойствами.

В тоже время с помощью ПС SiC на основе МКЗ может быть получен в виде микропорошка, с размером частиц от 200 до 900 нм и выше, с удельной поверхностью 3000-4000 м<sup>2</sup>/кг и что важно, температура синтеза может быть заметно снижена по сравнению с традиционным получением этого материала, равно как и продолжительность процесса, что позволяет снизить удельные затраты электроэнергии почти в 2 раза. Важно отметить наличие положительного опыта ПС SiC с размером частиц 0,2 -1 мкм на основе брикетированной шихты, состоящей из МКЗ и буроугольного полукокса[23], а также использования для этих целей коксовой пыли и сажи, то есть отходов различных металлургических и энергетических производств. Эти наработки представляют первоочередной интерес для использования в РУз, как альтернативы импортируемому древесному углю и коксу.

Оценим экономическую целесообразность использования отходов производства ТК и ФС в виде МКЗ для изготовления порошков SiC. Мировое валовое потребление этого материала составляет 600 – 700 тыс. т в год и оценивается в 670 млн. долл. США [10,23,24]. Важнейшими областями использования SiC являются металлургия (около 45 %), производство абразивов (до 30 %) и огнеупоров (до 25 %). Маломасштабными по фактическому объему (менее 1 %), но интенсивно развивающимися и имеющими наиболее высокие экономические показатели, являются производства карбидкремниевых порошковых материалов. Это порошки с размером частиц менее 1 мкм, так называемый "микронизированный карбид кремния", потребляемый производством керамики и «нанопорошки или нанокарбид кремния», то есть порошки SiC с размером частиц менее 100 нм, для высококачественной конструкционной керамики и гальваники и ряда новейших, актуальных и перспективных направлений науки и техники [21, 22,24, ].

Цены на различные виды товарного карбида кремния в последние несколько лет остаются стабильными и составляют в долларах США за 1 тонну:

- 1) Чёрный, чистотой 99 % : Сорт 1 1400 – 1500 ; Сорт 2 1150 – 1300
- 2) Зелёный, чистотой св. 99,5 % 1650 – 1850
- 3) Огнеупорный. Сорт 1, чистотой 98 % 1300 – 1400; Сорт 2, чистотой 95% 1050 – 1250
- 4) Микронизированный чистотой около 98 % 13000 – 15000
- 5) Нанокарбид чистотой около 98 % 200000 – 250000

Цены на ТК и ФС в этот же период, наоборот, характеризуются нестабильностью, имеют тенденцию к понижению и составляют, например, для марок Кр0 и ФС 75 за 1 тонну, соответственно : 2300 и 1350 долларов США. Заметим, что стоимость единицы мощности сравнительно большой СФЭС, строящейся в настоящее время в Республике Узбекистан, составляет 3,1 доллара США, а удельные затраты на изготовление ее фотоэлектрической части, то есть, собственно СЭ, составляют 10 г. монокристаллического кремния, изготавливаемого из 15 г. п кремния-сырца, который в свою очередь, изготавливается из 45 г. ТК [1 ], если, конечно, имеется ввиду не перспективный и экологически чистый моносилановый [5,6], а стандартный хлорсилановый передел ТК в Si-сырец электронной чистоты и получение из него вытягиванием по Чохральскому монокристаллического или крупноблочного поликристаллического кремния с удельным сопротивлением 1 ом .см [1,4]. То есть на оснащение, строящейся в РУз солнечной электростанции мощностью 100 МВт кремниевыми СЭ, необходимо будет затратить 4500 тонн ТК стоимостью 10млн. 350тыс. долларов США. Из сопоставления цен на ТК, ФС и рядовые марки SiC, потребляемые в сфере изготовления абразивов и огнеупорных материалов (позиции 1-3), следует, что производство карбида кремния, ориентированного на переработку отходов производства ТК и ФС в виде МКЗ, стоимостью ~ 33 долларов США за 1 тонну и с учетом гораздо меньшей энергоёмкости технологического процесса по сравнению с изготовлением ТК и даже ФС, априори, отличается более высокой рентабельностью. В особенности, если производство карбида кремния этих марок может быть территориально размещено вблизи производства ТК или ФС с обеспечением минимизации перевозок и перегрузок МКЗ, образующегося в виде пылевых отходов в производстве ТК и ФС. Что же касается выпуска микронизированного SiC, а тем более «нанокарбида кремния», то изготовление наноразмерных порошков SiC в количествах сопоставимых с объемом ТК, за-

трачиваемым на создание СЭ для упомянутой солнечной станции, оказывается в три и более раз более прибыльным чем даже изготовление этой станции в целом.

При всей приблизительности наших оценок, это обстоятельство нельзя упускать из виду при разворачивании промышленного производства материалов для солнечной энергетики в РУз и активно утилизировать отходы производства ТК и ФС, не только путем их рекуперации и (или) использования в производстве строительных материалов и бетонов, но и в сфере наиболее рентабельного и наукоемкого производства карбида кремния всех описанных выше модификаций.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Абдурахманов Б.М., Ашууров М.Х., Ашууров Х.Б., Кадыров А.Л., Курбанов М.Ш., Оксенгендлер Б.Л. Проблемы и перспективы кремниевого производства в Центральной Азии, Нури марифат, Худжанд, 2016, 430 с. [2] Рысс М.А. Производство ферросплавов. Москва, Металлургия, 1985, Изд. 2-е, 344 с. [3] Турмурастов И.Б., Ашууров Х.Б., Панченкова Л.А., Курбанов М.Ш., Абдурахманов Б.М. // «Геология и минеральные ресурсы», 2014 г, №4, с. 3-12. [4] Ашууров М.Х., Абдурахманов Б.М., Абдурахманов К.П., Ашууров Х.Б. «Гелиотехника» №2, 2010, с. 3-9. [5] Ашууров Х.Б. и др. Патент РУз №05023 Способ получения алкоксисиланов.(Способ защищен также патентами США, Японии, КНР и ряда др. стран) [6] Ашууров Х.Б. и др. Патент РУз № 1AP 05179 Способ синтеза моносилана с применением триалкоксисиланов. (Способ защищен также патентами США, Японии, КНР и ряда др.стран) [7] A. Louwen et al. / Solar Energy Materials Solar Cells 147 (2016) p.295-314 [8] Лохова Н.А., Макарова И.А., Патраманская С.В. Обжиговые материалы на основе микрокремнезема. – Братск: БрГТУ, 2002. – 163 с. [9] Леонова М.С. // Экология, № 7(87), апрель, 2015, с. 1068-1070. [10] Галевский Г.В., Протопопов Е.В., Темлянцев М.В. // Вестник Кузбасского ГТУ, Металлургия, выпуск. № 4 (104) с.103-110, 2014 [11] Абдурахманов Б.М., Ашууров Б.Б., Курбанов М.Ш., Нуралиев У.М., Адиллов М.М. Доклады III Международной научно-практической конференции «Современные материалы, техника и технологии в машиностроении». 19-21 апреля 2016 г. Андижан. [12] Закиров М.З., Гафуржанов С.Г. Кварцевые и кварц-полевошпатовые пески Узбекистана, Ташкент, ФАН, 1983, 93 с. [13] Олимов Л.О. Межзеренные границы в поликристаллическом кремнии: микроструктура, зарядовые состояния и р-п переходы, Автореферат докторской диссертации. «Академия ношарлик маркази», Ташкент, 2017 [14] А.с. № 1323545 Шикирянский А.М., Фомин Г.С., Погорелов М.А., Рысс М.А., Косачев Е.А. Строительный раствор. [15] А.с. № 637358 Милованова Р.Г., Семенова В.Н., Чупина А.И. Строительный раствор. [16] Алевин Ю.А. // Промышленность строительных материалов. Серия 11. Экспресс-информация. Отечественный опыт. – М.: ВНИИЭСМ, 1987. – Вып. 9. – С. 3...4. [17] Трофимов Б.Я., Жуков И.В., Башев, В.А. и др. // Бетон и железобетон. 1987, №4. С. 39 [18] Черняховский Л.В. Тезисы докладов X конференции по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния нанометровых структур и приборов на его основе. «Кремний – 2014», Иркутск 7– 12 июля. [19] Катков О.М. Выплавка технического кремния. Иркутск, ИрГТУ, 1997, 243 с. [20] Руднева В.В., Галевский Г.В. // Перспективные материалы. 2008. Специальный выпуск (6), часть 2. С. 80–85. [21] Полях О.А., Руднева В.В. Наноматериалы и нанотехнологии в производстве карбида кремния: монография: в 3 т. – т 1: Микрокремнезем в производстве карбида кремния (монография) / научный редактор Г.В. Галевский – М.: Флинта: Наука, 2007. – 248 с. [22] Аникин А.Е., Галевский Г.В., Руднева В.В. Восстановительная переработка техногенного кремнезема с использованием бурого угольного полукокса. Горно-металлургический вестник, 2015, № 6. С 393-396 [23] Руднева В.В. // Изв. вузов. Черная металлургия. 2006. № 12. С. 13–15.

## DYNAMIC LIGHT SCATTERING MEASUREMENTS OF 2,6-LUTIDINE – WATER SYSTEM WITH SALT ADDED NEAR THE DEMIXING POINT

K.B.Egamberdiev, O.Trunilina, A.Iskandarov, S.K.Telyaev, S.Z.Mirzaev

Department of Engineering Physics, Tashkent State Technical University,  
Dor'mon Yuli 33, 100125 Tashkent, Uzbekistan,  
e-mail: [kegamberdiev@yandex.ru](mailto:kegamberdiev@yandex.ru)

### Abstract

The diffusion coefficients of 2,6-dimethylpyridine – water mixtures of critical composition have been measured without and with alkali halides added by using dynamic light scattering. The data have been analyzed in terms of power law behavior.

**Key words:** 2,6-lutidine, alkali halides, critical composition

## 1. Introduction

Thermodynamic and transport properties of pure liquid and liquid mixtures are very useful in chemical and pharmaceutical industry, and are also very helpful for chemical analysis where knowledge of the thermodynamic and physical properties of the multi-component systems is essential for the design calculations, involving separations, heat transfer, mass transfer and fluid flow. Experimental studies yield properties of pure liquids and their mixtures with organic solvents which provide significant contributions towards the detailed understanding of ionic interactions in pure liquids and their mixtures with organic solvents. It is hoped that the efforts lead to experimentally validated empirical and theoretically founded expressions, enabling models for the structural optimization of liquid mixtures in view of desired properties.

Aqueous solutions of 2,6-dimethylpyridine (2,6-DMP) have received considerable attention in different contexts of soft matter research. The nature of criticality in aqueous solution of 2,6-DMP containing alkali halides has remained a challenging problem. Sufficiently close to the critical point, the correlation length of critical fluctuations becomes so large that microscopic details of short-range intermolecular interactions become trivial [1-4]. Phase separation in aqueous solutions containing ions is usually driven by non-Coulombic forces.

## 2. Experiment

In this work we have investigated the diffusion coefficients of 2,6-DMP – water mixtures of critical composition without and with alkali halides. The diffusion coefficients  $D$  of the mixtures of critical composition have been determined with a self-beating photon correlation spectrometer [2,5]. The samples were illuminated by a frequency-doubled Nd:YAG laser ( $\lambda_0=532$  nm, Coherent, Santa Clara, CA, USA;  $\lambda_0$ -wavelength in free space). The scattered light was received by a photomultiplier and analysed real-time using a digital correlation board (ALV-5000/E, Laser, Langen, Germany). The board was capable of providing the (normalized) intensity photon autocorrelation function  $S(q_r, t)$  over the period from  $2 \times 10^{-7}$  to  $3,4 \times 10^3$  s. Here

$$q_r = \frac{4\pi n}{\lambda_0} \sin(\theta/2) \quad (1)$$

is the absolute value of the wave vector at the selected scattering angle  $\theta = \theta_r = \pi/2$ . In eq 1, the parameter  $n$  is the optical refractive index which has been measured with a conventional refractometer (Zeiss, Obercochem, Germany).

The diffusion coefficients

$$D(T) = [q_r^2 \tau_c(q_r, T)]^{-1} \quad (2)$$

has been derived from the correlation times  $\tau_c$  of the photon autocorrelation function  $g^{(1)}$  of the electrical field of the scattered light. In self-beating experiments, it is related to the normalized autocorrelation function  $g^{(1)}(\tau_c)$  of the intensity according to the relation

$$|g^{(1)}(\tau_c)|^2 = g^{(2)}(\tau_c) - 1 \quad (3)$$

Rayleigh scattering of liquids yields a Lorentzian line shape in the frequency domain which corresponds with an exponential decay

$$S(q_r, t) (= g^{(2)}(\tau_c) - 1) = \exp[-t/\tau_c(q_r, T)] \quad (4)$$

of the time-correlation function. Eq 4 represents indeed a monomodal strictly exponentially decaying correlation function. In the quasi-elastic light scattering experiments, the specimen cell was provided with a jacket for circulating thermostat fluid. The spectrometer was placed on a vibration-damped optical table and was completely shielded by a thermostatic box. Two sets of copper pipes for circulating thermostat fluid provided high temperature stability during the measurements. Temperature fluctuations and gradients within the cell were smaller than 0.01 K. With the aid of a Pt-100 thermometer, which close to the scattering volume was immersed in the liquid samples,  $T$  was measured with an accuracy of 0.01 K. Small changes in the temperature and scatter in the correlation times  $\tau_c$  resulted in an experimental uncertainty  $\Delta D/D \leq 0.05$  in the mutual diffusion coefficient data.

## 3. Results and Discussion

Diffusion coefficients  $D$  of some mixtures of critical composition are shown as a function of reduced temperature  $\varepsilon$  in Figure. The  $D$ -values have been calculated according to eq 2 from the correlation times  $\tau_c$  as followed from the quasi-elastic light scattering experiments. In the log-log representation of Figure each series of data displays a linear part reflecting power law behavior. The  $D$ -values of the 2,6-

DMP + H<sub>2</sub>O mixture without salt deviate also at  $\varepsilon > 0.03$  (Figure, inset). Such deviations had been found more distinctive at higher salt content [6].

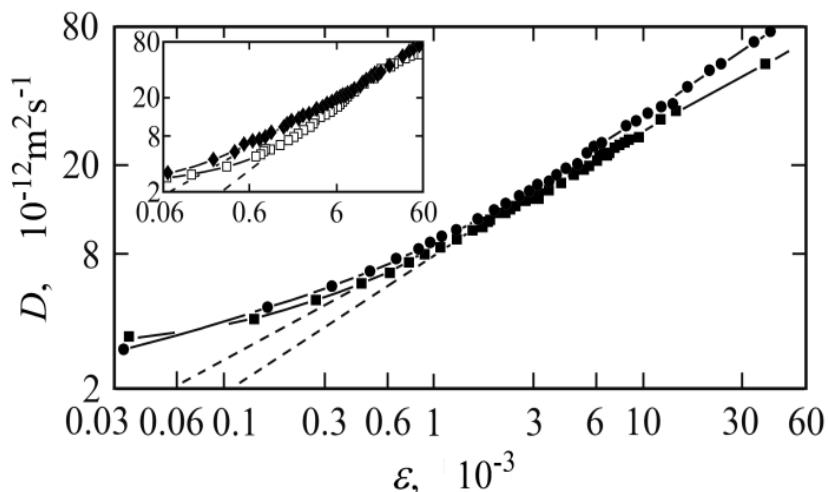


Figure. Log-log plot of the mutual diffusion coefficient  $D$  (eq 5) versus reduced temperature  $\varepsilon$  for two 2,6-DMP + H<sub>2</sub>O mixtures of critical composition with 1 per cent (w/w) of salt added: ●, KBr; ■, NaBr. The inset shows data for the critical mixtures without salt (□) and with 0.5 per cent NaCl (◆). Dashed lines indicate the continuations of the linear parts in the curves.

Neglecting crossover corrections at  $\varepsilon > 10^{-3}$ , the linear part in the  $\log(D)$  -vs-  $\log(\varepsilon)$  relations may be represented by the suggestive expression for the critical contribution [7,8]

$$D_c = \frac{k_B T}{6\pi\eta_s \xi} = \frac{k_B T}{6\pi\eta_b Q_0^{Z_\eta} \xi_0^{1+Z_\eta} \varepsilon^{-\nu(1+Z_\eta)}} = D_0 \varepsilon^{\nu^*} \quad (5)$$

to the diffusion coefficient. In this equation  $k_B$ -Boltzmann's constant,  $\varepsilon = |T - T_c|/T_c$  is reduced temperature,  $\xi$ -fluctuation correlation length,  $\xi_0$ -amplitude,  $\eta_b$ -denotes the non-critical background viscosity,  $\eta_s$ -shear viscosity,  $Z_\eta$ -the universal exponent of viscosity,  $\nu$ -critical exponent of the fluctuation correlation length, and  $\nu^*$ - a critical exponent. Often the explicit dependence of  $D_c$  upon  $T$  and also the temperature dependence in the background viscosity are disregarded because the interest is only the small temperature range near  $T_c$  where the power law behavior dominates.

In this case

$$\nu^* = (1 + Z_\eta)\nu \quad (6)$$

follows as a combination of the universal shear viscosity exponent  $Z_\eta$  and the critical exponent  $\nu$  of the fluctuation correlation length. The  $\nu^*$  values derived from the diffusion coefficient data are given in Table.

Table. Critical exponent  $\nu^*$  and optical refractive indices  $n$  for the 2,6-DMP + H<sub>2</sub>O + salt mixtures of critical composition.

Salt	$Y_{\text{salt}}$	$n$	$\nu^*$ $\pm 0.03$	Salt	$Y_{\text{salt}}$	$n$	$\nu^*$ $\pm 0.03$
-	0	1.407	0.66				
NaF	0.005	1.393	0.57	NaBr <sup>[6]</sup>	0.03	1.409	0.48
NaCl	0.003	1.391	0.60	NaI	0.005	1.390	0.60
NaCl	0.004	1.387	0.58	NaI	0.01	1.389	0.58
NaCl	0.005	1.381	0.53	LiBr	0.01	1.388	0.58
NaBr	0.005	1.419	0.53	NaBr	0.01	1.389	0.52
NaBr	0.01	1.389	0.52	KBr	0.01	1.389	0.61
NaBr <sup>[6]</sup>	0.015	1.404	0.49				

Despite of our expectation of Ising-like critical demixing behavior with the mixtures of this study, only the 2,6-DMP + H<sub>2</sub>O system without added salt (Table) reveals exponents close to  $\nu^* = (1 + Z_\eta)\nu = 0.673$  as following from the generally accepted theoretical  $\nu$  and  $Z_\eta$  values. The  $\nu^*$  values for mixtures with added salt are generally smaller than  $\nu^*(Y_{\text{salt}} = 0) = 0.66$ .

## REFERENCES

- [1] Mirzaev S.Z., Iwanowski I., Kaatze U. Dynamic scaling and background relaxation in the ultrasonic spectra of the ethanol - dodecane critical mixture. Chem. Phys. Lett., 2007, 435, 263. [2] P.K. Khabibullaev, S.Z. Mirzaev, U. Kaatze. Critical fluctuations and noncritical relaxations of the nitrobenzene–isooctane system near its consolute point. Chemical Physics Letters, 2008, Volume 458, Pages 76-80. [3] Mirzaev, S.Z.; Bhattacharjee, J.K.; Kaatze, U. Sound Attenuation Near the Demixing Point of Binary Liquids: Interplay of Critical Dynamics and Noncritical Kinetics. Rep. Prog. Phys. 2010, 73, 066601. [4] Kostko, A. F.; Anisimov, M. A.; Sengers, J. V. Criticality in Aqueous Solutions of 3-Methylpyridine and Sodium Bromide. Phys. Rev. E 2004, 70, 026118. [5] Trachimow, C.; De Maeyer, L.; Kaatze, U. Extremely Slow Reaggregation Processes in Micelle Solutions. A Dynamic Light Scattering Study. J. Phys. Chem. B 1998, 102, 4483-4487. [6] Truszkowska, D.; Dzida, M.; Kaatze, U. Effect of Ionic Additives on Critical Exponents of 2,6-Dimethylpyridine – Water. Chem. Phys. Lett. 2014, 604, 53-59. [7] Kawasaki, K. Kinetic Equations and Time Correlation Functions of Critical Fluctuations. Ann. Phys. (N.Y.) 1970, 61, 1-56. [8] Ferrell, R. A. Decoupled-Mode Dynamical Scaling Theory of the Binary-Liquid Phase Transition. Phys. Rev. Lett. 1970, 24, 1169-1172.

## ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ СИНТЕЗА НА СОЛНЕЧНОЙ ПЕЧИ НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ СИСТЕМ TiO<sub>2</sub> – CuO И TiO<sub>2</sub> – NiO И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ НА ИХ ОСНОВЕ

С.Х. Сулейманов, В.Г. Дыскин, М.У. Джанклич, Н.А. Кулагина,  
О.А. Дудко, А. Лулагин

*Институт материаловедения НПО «Физика-Солнце»*

ул., Бодомзор йули, 2 Б, Ташкент, 100084, Узбекистан, sultan.suleimanov@gmail.com

### Аннотация

*Изучено влияние технологических режимов синтеза на солнечной печи на свойства материалов систем TiO<sub>2</sub> – CuO и TiO<sub>2</sub> – NiO. Исследовалось влияние температуры и времени выдержки расплава, скорость его охлаждения, газовой среды на фазовый состав композиционных материалов и оптические свойства покрытий TiO<sub>2</sub> – CuO и TiO<sub>2</sub> – NiO. Установлено, что наиболее существенное воздействие на образование керметов оказывают такие факторы, как температура, время выдержки расплава и скорость его охлаждения. Эксперименты показали, что на солнечной печи были синтезированы керметные композиции TiO<sub>2</sub> – CuO и TiO<sub>2</sub> – NiO, покрытия из которых имели значения интегрального коэффициента поглощения 97,0 % и 90,4 % соответственно. При этом степень черноты составляет 4,22 % и 4,96 %. Нагрев покрытий до 400 – 500 °C показал, что покрытия обладают достаточно высокой стабильностью и могут быть рекомендованы как селективно поглощающие покрытия для солнечных теплоприемников.*

**Ключевые слова:** кермет, плавление на солнечной печи, селективно поглощающие покрытия, высокие температуры, интегральный коэффициент поглощения, степень черноты

В солнечной тепловой энергетике задача увеличения коэффициента полезного действия тепловых электростанций решается применением параболоцилиндрических концентраторов. Для этого на поверхность теплоприемника наносят селективно поглощающее покрытие (СПП), с помощью которого нагревают пар до температуры ~400<sup>0</sup>C. Чтобы турбина тепловой электростанции работала в оптимальном режиме с КПД ~35%, необходимо довести температуру пара до 600–700<sup>0</sup>C. Для этого необходимы новые материалы для нанесения СПП, которые при высоких температурах были бы стабильны, химически и механически прочными не только в вакууме, но и на воздухе, и при этом не теряли бы своих селективных свойств: интегральный коэффициент поглощения  $\alpha_s$  и степень черноты  $\epsilon$ .

Перспективными материалами для высокотемпературных СПП считаются композитные материалы (керметы) на основе оксидных матриц и металлических наполнителей [1–7]. Благодаря металлической фазе, пластичной при высоких температурах и препятствующей распространению

микротрещин, керметы более термостойкие, чем другие материалы. Оптические свойства (показатели преломления и поглощения) покрытий на основе керметов можно варьировать целенаправленным (компьютерное моделирование) выбором пары металл – оксид и изменением концентрации компонентов смеси [8].

В технологии получения любых композиционных материалов принципиально важным является перевод порошковой смеси исходных компонентов в состояние с равномерным распределением реагентов на микроструктурном уровне, которое достигается плавлением смеси. Из расплава уходят абсорбированные газы, перемешивание в жидкой фазе идет на молекулярном уровне, что способствует устранению концентрационных неоднородностей, выравниванию состава и достижению химической гомогенности. Этот метод позволяет добиться воспроизводимости оптических характеристик покрытий, несмотря на сложность получения равномерного распределения частиц компонентов в покрытии.

Высокая концентрация ( $\sim 10^4$ ) солнечной энергии обеспечивает быстрый (менее 1 мин) нагрев порошковой смеси до температур плавления компонентов. Это позволяет синтезировать сложные оксидные композиции из смеси низкотемпературных и высокотемпературных компонентов. Низкотемпературные компоненты не успевают преждевременно испариться и в едином расплаве вступают в реакции с высокотемпературными компонентами. Покрытия, полученные из синтезированного на солнечной печи материала, обладают лучшими оптическими и механическими свойствами. Это связано с тем, что предварительный синтез композиционного материала позволяет получить заданную структуру, фазовый состав, избавиться от адсорбированных газов в исходной шихте. СПП из синтезированного материала обладает высокой плотностью и имеет хорошие адгезионные свойства.

Обычно в качестве термоустойчивого материала матрицы кермета используется оксид алюминия  $Al_2O_3$ , который обладает высокой прочностью и стойкостью к тепловому удару и эрозии, а также химической стойкостью. Оксид титана  $TiO_2$  несколько уступает по этим характеристикам  $Al_2O_3$ , но обладает высокими защитными и механическими свойствами. Двухокиси титана посвящено большое количество работ, его оптические, механические, тепловые свойства достаточно полно изучены [9].

Из литературы известно, что оксид титана позволяет получить селективно поглощающее покрытие, а оксиды меди и никеля представляют собой чернь. Поэтому для создания композиционных металлокерамических материалов (керметов) мы выбрали композиции на основе систем  $TiO_2 - CuO$  и  $TiO_2 - NiO$ , предполагая, что одновременно с синтезом оксидных соединений будет проходить восстановление металла одного из оксидов, в результате чего будет проходить формирование структуры керметов, где образуется оксидная матрица, в которой распределяются металлические наночастицы. Так как оксид титана имеет более высокое значение величины теплоты образования, чем оксиды меди и никеля, то мы предположили, что при синтезе композиционных материалов можно будет частично восстановить медь в системе  $TiO_2 - CuO$  и никель в системе  $TiO_2 - NiO$ .

Синтез керметов мы проводили на солнечной печи методом плавления смеси оксидов в присутствии твердого углерода, который выполняет роль восстановителя металлических частиц меди и никеля.

Шихту для синтеза готовили сухим смешиванием тонкомолотых ( $< 10$  мкм) исходных оксидов, после чего в массу добавляли твердый углерод и снова все перемешивали. Готовую шихту компактировали в виде цилиндров диаметром 10 мм и высотой 5 – 10 мм методом полусухого прессования, увлажняя ее водой.

Синтез композиционных материалов проводился плавлением исходной шихты на воздухе и в среде азота на солнечной печи с вертикальной оптической осью, состоящей из гелиостата и параболоидного зеркала с диаметром миделя 3 м, или радиационной оптической печи УРАН с двумя эллиптическими зеркалами.

Во время проведения экспериментов исследовалось влияние среды плавления, времени плавления, температуры и скорости охлаждения расплава, концентрации исходных оксидов и углерода. Образцы плавил на интенсивно водоохлаждаемых полых алюминиевых подложках конической формы. Плавление каждого образца проводилось в два этапа. Время плавления образца определялось полным проплавлением навески и удалением абсорбированных газов. После охлаждения образец переворачивали основанием вверх и повторяли процесс плавки. Образцы охлаждали путем естественного охлаждения на водоохлаждаемой поверхности, что соответствует ско-



рости отвода тепла  $\sim 200 - 400$  °C/c, а также сверхбыстрой закалкой, что соответствует скорости  $\sim 10^5 - 10^6$  °C/c.

Эксперименты по плавке и закалке показали, что необходимо создавать перегрев расплава, чтобы получить гомогенное состояние. В области температур, близких к температуре кристаллизации, в расплаве наблюдаются процессы ликвации, что приводит к неоднородной кристаллизации. В расплаве отделяется металлическая составляющая, которая при остывании на водоохлаждаемой подложке ( $\sim 200 - 400$  °C/c) кристаллизуется отдельным агломератом внутри всего материала. Эксперименты по закалке показали, что в расплавах без перегрева (в области температур  $\sim 1900$  °C) фиксируется разделение оксидной матрицы и металлической фазы. В расплавах с перегревом (более  $2200$  °C) наблюдается гомогенное состояние, а закалка со скоростью  $\sim 10^5 - 10^6$  °C/c позволяет нам фиксировать керметную композицию с равномерным вкраплением металлических наночастиц.

Для изучения влияния кислорода воздуха на химические процессы в расплаве был проведен синтез керметных композиционных материалов в среде азота. Синтез материалов в азотной среде был осуществлен на водоохлаждаемой подложке с обдувом азотом. Охлаждение расплава осуществляли со скоростью  $\sim 200 - 400$  °C/c.

Для изучения фазового состава синтезированных материалов выполнен рентгенофазовый анализ (РФА) на установке ДРОН-УМ1. По данным РФА установлено, что в образцах системы  $TiO_2 - CuO$ , синтезированных на воздухе или в среде азота, охлажденных при скорости  $\sim 200 - 400$  °C/c, керамическая матрица состоит из  $TiO_2$ ,  $Cu_2Ti_2O_5$  и  $Cu_2O$ , а металлические частицы меди выделяются в отдельный агломерат внутри керамического материала. В образцах системы  $TiO_2 - NiO$ , синтезированных на воздухе или в среде азота, охлажденных при скорости  $\sim 200 - 400$  °C/c, керамическая матрица состоит из  $TiO_2$ ,  $NiTiO_3$  и небольшого количества восстановленного Ni, а основная масса металлических частиц никеля выделяется в отдельный агломерат внутри керамического материала. Структура керметов получена в образцах, синтезированных на воздухе с перегревом расплава и охлажденных при сверхбыстрой закалке. На рисунке 1 приведены дифрактограммы синтезированных керметов систем  $TiO_2 - CuO$  и  $TiO_2 - NiO$ .

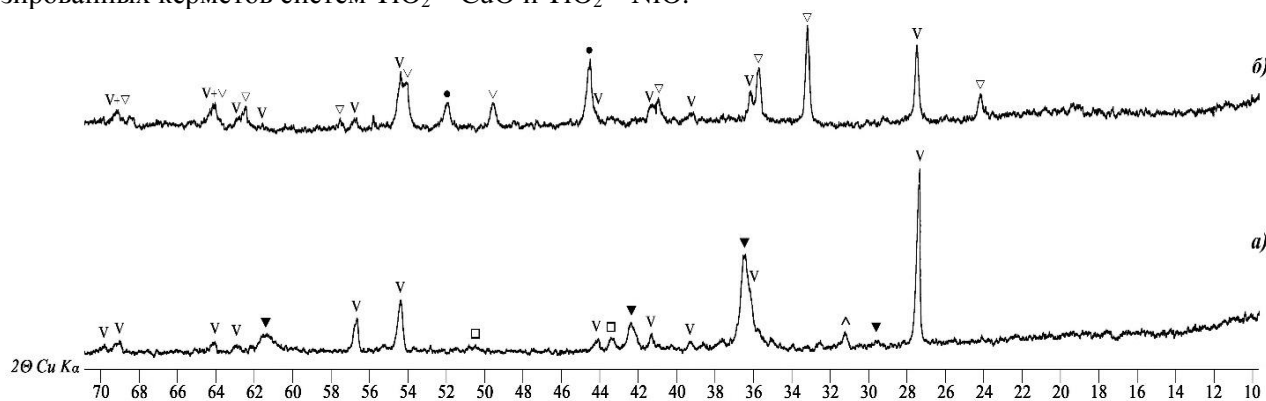


Рис. 1 Рентгеновские дифрактограммы керметных композиционных материалов, полученных плавлением на солнечной печи на воздухе при скорости охлаждения расплава  $\sim 10^5 - 10^6$  °C/c: а) керметный композиционный материал системы  $TiO_2 - CuO$ ; б) керметный композиционный материал системы  $TiO_2 - NiO$  —  $TiO_2$  (рутил),  $\nabla$  —  $Cu_2Ti_2O_5$ ,  $\blacktriangledown$  —  $Cu_2O$ ,  $\square$  —  $Cu$ ,  $\nabla$  —  $NiTiO_3$ ,  $\bullet$  —  $Ni$

Из синтезированных керметов были изготовлены СПП на подложках из нержавеющей стали методом термического испарения в вакуумной камере на установке РР601, остаточное давление в камере  $\sim 6,6 \times 10^{-4}$  Па. После нанесения покрытий были проведены измерения спектров отражения СПП в видимой области спектра от 350 до 950 нм. Результаты измерений представлены на рисунке 2.

По данным измерений спектров отражения образцов был рассчитан интегральный коэффициент поглощения  $\alpha_s$ . Измерение степени черноты  $\varepsilon$  было выполнено на терморациометре ТРМ. По данным интегрального коэффициента поглощения и степени черноты были рассчитаны значения коэффициентов селективности для различных типов СПП. Экспериментальные результаты представлены в таблице 1.

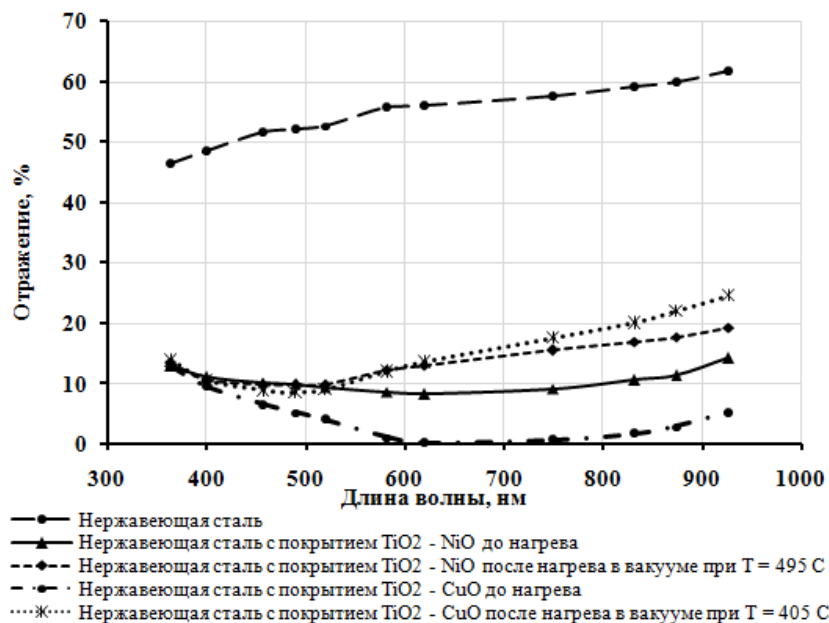


Рис. 2 Спектры отражения керметных композиционных покрытий на подложке из нержавеющей стали до и после нагрева в вакуумной камере

Образцы с керметными композиционными СПП были испытаны на нагрев в вакууме, после чего на них повторно измерены спектрально-оптические характеристики (спектры отражения и степень черноты). По результатам измерений спектров отражения (рис. 2) рассчитаны интегральные значения коэффициентов поглощения и коэффициент селективности (таб. 1).

Таб. 1 Сравнительные характеристики оптических свойств композиционных покрытий до и после нагрева в вакуумной камере

Состав	До нагрева в вакууме			Температура нагрева образца	После нагрева в вакууме		
	$\alpha_s$ , %	$\epsilon$ , %	$\alpha_s/\epsilon$		$\alpha_s$ , %	$\epsilon$ , %	$\alpha_s/\epsilon$
TiO <sub>2</sub> : CuO	97,0	4,22	22,99	405 <sup>o</sup> C	84,13	6,3	13,36
TiO <sub>2</sub> : NiO	90,4	4,96	18,22	495 <sup>o</sup> C	79,54	3,7	21,5

Как видно из таблицы 1, покрытия из керметных композиционных материалов систем TiO<sub>2</sub>-CuO и TiO<sub>2</sub> - NiO, синтезированных плавлением на воздухе при скорости охлаждения расплава  $\sim 10^5 - 10^6$  C/c, имеют высокие значения интегрального коэффициента поглощения  $\alpha_s = 97,0$  % и  $\alpha_s = 90,4$  % соответственно. Измерения оптических свойств покрытий при высоких температурах 400 - 500 <sup>o</sup>C показали, что наблюдается незначительное уменьшение интегрального коэффициента поглощения, а значения степени черноты сохраняют свой порядок. После нагрева в вакууме покрытия сохранили адгезию, не потрескались и не разрушились. По изучению спектрально-оптических характеристик разработанных нами композиционных покрытий можно сделать вывод, что керметные композиционные материалы систем TiO<sub>2</sub> - CuO и TiO<sub>2</sub> - NiO являются перспективными для создания селективно-поглощающих покрытий для солнечных теплоприемников.

#### ЛИТЕРАТУРА

[1] Колтун М.М. Селективные оптические поверхности преобразователей солнечной энергии. М.: Наука, 1979. 519 с. [2] Агнихотри О., Гупта Б. Селективные поверхности солнечных установок. М.: Мир, 1984. 280с. [3] Серафин О.Б. Селективные оптические поверхности и их роль в фототермическом преобразовании солнечной энергии //Преобразование солнечной энергии. Вопросы физики твердого тела. М: Энергоатомиздат, 1982. С. 8 - 56. [4] Сиверс А.Д. Спектральная селективность сложных материалов //Преобразование солнечной энергии. Вопросы физики твердого тела. М: Энергоатомиздат, 1982. С. 56 - 106.

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЗДАНИЯ СЕТЕВЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ В НЕКОТОРЫХ РАЙОНАХ СРЕДНЕЙ АЗИИ И ЗАКАВКАЗЬЯ

С.В.Киселева<sup>1,2</sup>, О.С.Попель<sup>1</sup>, А.Б.Тарасенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Объединенный институт высоких температур РАН,

г. Москва, 125412, Россия, [O.Popel@mail.ru](mailto:O.Popel@mail.ru)

<sup>2</sup> Научно-исследовательская лаборатория ВИЭ Географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова,

г. Москва, 119991, Россия, [k\\_sophia\\_v@mail.ru](mailto:k_sophia_v@mail.ru)

### Аннотация

*Выполнена оценка экономической привлекательности создания сетевых фотоэлектрических станций в некоторых районах Узбекистана, Киргизстана, Таджикистана, Туркменистана, Казахстана и Азербайджана с учетом принятых в указанных государствах стимулирующих развитие возобновляемой энергетики тарифов на электроэнергию и климатических условий. Для анализа выбраны варианты создания модельных солнечных электростанций мощностью 5 МВт с применением фотоэлектрических модулей, изготовленных по различным технологиям с соответствующими современными и перспективными стоимостными показателями. Проведено сравнение технико-экономических показателей СЭС при использовании мультикристаллических фотоэлектрических модулей и высокоэффективных модулей, выпускаемых заводом компании «Хевел» в России по НТТ-технологии.*

**Ключевые слова:** фотоэлектрические станции, технико-экономические показатели, страны Средней Азии и Закавказья, мультикристаллические фотоэлектрические модули, НТТ модули.

### 1. Введение

Страны Средней Азии и Закавказья обладают значительными ресурсами солнечной энергии и декларируют планы активного развития солнечной энергетики.

В Узбекистане в 2013 году принята программа по развитию возобновляемой энергетики, в том числе предусматривающая строительство солнечных электростанций суммарной мощностью более 2 ГВт и создание предприятия по выпуску фотоэлектрических панелей мощностью 100 МВт. Первая тестовая солнечная энергоустановка мощностью 130 кВт с использованием корейских технологий была введена в Папском районе Наманганской области в 2015 году. В 2016 году в Бухарской области при помощи компании ENESOL (ОАЭ) пущена в эксплуатацию мобильная автономная солнечная электростанция (СЭС) мощностью 1,2 МВт. Разработано технико-экономическое обоснование строительства солнечной электростанции мощностью 100 МВт в Самаркандской области с использованием кредита Азиатского банка развития.

В Кордайском районе Казахстана в 2013 году частным инвестором ТОО «КазЭкоВатт» введена в эксплуатацию солнечная электростанция «Отар» мощностью 504 кВт. В Капчагае действует СЭС мощностью 2 МВт, а в Жульинском районе – электростанция «Бурное Соляр-1» мощностью 50 МВт. Планируется строительство Коксарайской СЭС (35 МВт), СЭС Aquila Solar (24 МВт) и Муналинской СЭС (5 МВт). В Целиноградском районе Акмолинской области компанией «КВ Enterprises» с участием компании Siemens ведется строительство солнечной электростанции мощностью 100 МВт. В Астане компанией ТОО «Astana Solar» создано промышленное производство поликристаллических фотоэлектрических модулей.

В Кыргызстане (Бишкек) в 2016 году с участием инвесторов из Германии введен в эксплуатацию завод по сборке фотоэлектрических модулей мощностью 30 МВт в год (120 тыс. панелей в год), поставка которых планируется в страны Евразийского экономического союза.

В Туркменистане в поселке Бикрова вблизи Ашхабада воссоздан Институт солнечной энергии (Научно-производственное объединение "Гюн" ("Солнце")), одной из приоритетных задач которого ставится развитие возобновляемой энергетики. Национальной программой развития электроэнергетической отрасли Туркменистана до 2020 года предусматривается создание 84 МВт генерирующих мощностей на основе энергии Солнца и ветра.

В Таджикистане в 2016 году создан Государственный энергетический институт, на территории которого немецкой компанией DPU Investment GmbH и NETRACON введена первая в стране солнечная энергоустановка мощностью 30 кВт. В рамках сотрудничества с Немецким Энергетиче-

ским Агентством Deutsche Energie-Agentur GmbH (DENA) и компанией BAE Batterien GmbH в Республике планируется строительство солнечной электростанции мощностью 100 МВт.

Активное освоение возобновляемых источников энергии ведется в Азербайджане. В 2014 году компанией «Азалтернативэнерджи» Государственного агентства по альтернативным и возобновляемым источникам энергии введена в эксплуатацию пилотная Сураханская солнечная электростанция мощностью 2,8 МВт, а в 2015 году с участием бельгийской компании Soltech – СЭС мощностью 20 МВт в Нахичеванской области. В Сумгаите действует завод по сборке фотоэлектрических модулей мощностью до 30 МВт в год.

Во всех указанных странах введены стимулирующие тарифы для энергии от солнечных генераторов (Таб. 1). Это связано с тем, что конкурентоспособное развитие солнечной энергетики в большинстве стран пока сдерживается относительно низкой стоимостью электроэнергии, получаемой традиционными способами. Так в Таджикистане и Кыргызстане серьезная конкуренция для солнечной энергетики имеет место со стороны гидроэлектростанций, а в Туркмении и Узбекистане – со стороны газовой генерации.

Таб. 1: Стимулирующие тарифы, принятые в странах Средней Азии и Закавказья [1].

Страна	Тариф, €/кВтч	Страна	Тариф, €/кВтч
Узбекистан	0,150	Туркменистан	0,165
Казахстан	0,145	Таджикистан	0,140
Кыргызстан	0,110	Азербайджан	0,200

Целью настоящей работы является оценка экономической привлекательности создания сетевых фотоэлектрических станций с учетом принятых в указанных государствах стимулирующих тарифов и климатических условий. Гипотетические места расположения солнечных станций указаны на карте распределения средних за год дневных сумм суммарной солнечной радиации (рис. 1), полученных, также как и в работе [2], на основе климатических данных из базы NASASSE.

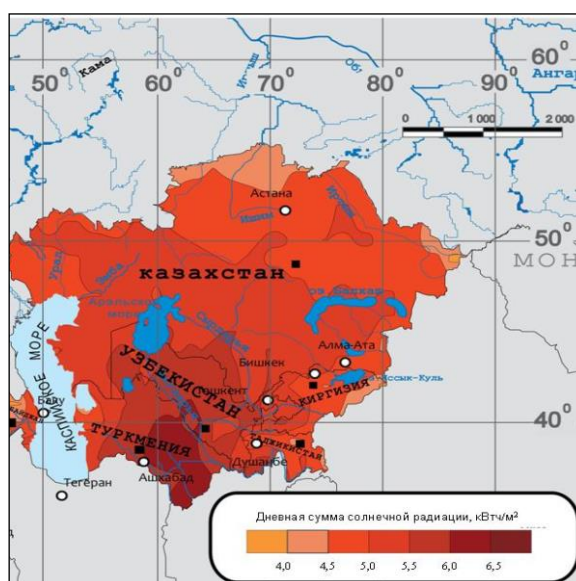


Рис. 1. Карта распределения средних за год дневных сумм суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность с указанием мест расположения модельных солнечных электростанций (черные квадраты) мощностью 5 МВт

## 2. Исходные данные для оценок

Для анализа выбраны варианты создания солнечных электростанций с применением фотоэлектрических модулей, изготовленных по различным технологиям с соответствующими современными и перспективными стоимостными показателями.

В качестве основного варианта для большинства СЭС рассматриваются мультикристаллические модули типа YingliSolar мощностью 250 Вт, широко представленные на мировом рынке. Цены на них определялись на основе данных поставщиков в конкретных республиках. Исключение составляет Казахстан, где действуют государственные требования по локализации производства компонентов и создано собственное производство фотоэлектрических преобразователей и моду-

лей на их основе. В этой связи для Казахстана рассматривалось использование мультикристаллических фотоэлектрических модулей Astana Solar KZPV 270 M 72 мощностью 270 Вт.

В качестве альтернативного варианта рассматривались осваиваемые в производстве на заводе компании «Хевел» в Новочебоксарске (Россия) модули пиковой мощностью 310 Вт на основе технологии HIT (Heterojunction with in trinsic thin-layer) [3, 4]. В рамках данной технологии на пластину монокристаллического кремния дополнительно наносятся тонкие слои аморфного кремния, легированные бором, фосфором и водородом [5], что позволяет расширить спектр эффективно преобразуемого солнечного излучения, повышая тем самым рабочие характеристики и КПД элемента без существенного роста затрат.

Мультикристаллическая технология, по мнению многих экспертов [4], представляет собой оптимальное решение с точки зрения сочетания показателей стоимости и эффективности производимых фотоэлектрических модулей. Вместе с тем, достоинством фотоэлектрических модулей завода «Хевел» является то, что при умеренной стоимости они имеют более высокий КПД, что позволяет сократить площадь станции и соответственно снизить затраты на ее создание. Дополнительным преимуществом HIT-модулей по сравнению с мультикристаллическими следует считать более слабую зависимость КПД от температуры модуля, что особенно важно для районов эксплуатации с жарким климатом.

Оценка технико-экономических показателей модулей по HIT-технологии приведена в работе [6]. Перспективная себестоимость таких фотоэлектрических модулей оценивается на уровне 0,48-0,56 \$/Вт(пик) с перспективой дальнейшего снижения в результате совершенствования технологии и расширения масштабов производства до 0,29-0,36 \$/Вт(пик). Проектная мощность завода ООО «Хевел» по выпуску фотоэлектрических модулей сегодня составляет 160 МВт/год. Учитывая ряд особенностей этого производства (первая технологическая линия ориентирована на использование исходных кремниевых пластин размером 156×156 мм), можно ожидать, что стоимость HIT-модулей на текущем этапе развития завода будет составлять около \$/Вт 0,61 (пик). Следует отметить, что этот уровень стоимости предсказывался швейцарской фирмой MeyerBurger – поставщиком оборудования для производства высокоэффективных модулей. КПД выпускаемых сегодня 310 ваттных HIT-модулей в стандартных условиях тестирования составляет 18,6% с прогнозом роста до 20%.

На мировом рынке сегодня доминируют мультикристаллические модули с КПД на уровне 15% и стоимостью в диапазоне \$/Вт 0,3-0,5 (пик) [7]. Политика Кыргызстана и Азербайджана не направлена на полную локализацию производства фотоэлектрических модулей и позволяет на льготных условиях ввозить их компоненты прежде всего из Китая, где они выпускаются в больших объемах и с относительно низкой себестоимостью. В обеих Республиках налажено лишь сборочное производство.

В Казахстане создан завод по производству как фотоэлектрических преобразователей, так и модулей на их основе, причем сырьем является добываемый в Республике кремний. Важно отметить, что переделы по получению поликремния, росту слитков и производству пластин на текущем этапе локализовать не планируется. При такой организации производства рыночные цены на фотоэлектрические модули в Казахстане составляют \$/Вт 0,78 - 0,9 (пик), что обусловлено в том числе относительно малой производительностью завода (50 МВт/год). Мощности сборочных линий фотоэлектрических модулей в Киргизии и Азербайджане составляют 30 МВт/год, причем для Киргизии ожидается производство продукции на уровне 1-1,5 млрд. сомов в год [9].

С учетом изложенного в наших оценках стоимость мультикристаллического модуля для Казахстана принята \$/Вт 0,85 (середина диапазона), а для остальных рассматриваемых государств – \$/Вт 0,6 (на основе данных по Киргизии). Затраты на сетевые фотоэлектрические инверторы оценивались на основе средних цен на инвертор SunnyTriPower 60-10 (SMASolartechologyAG) мощностью 60 кВт – \$/Вт 120(пик). Оценки стоимости опорных конструкций, строительномонтажных работ и других сопутствующих расходов выполнялись аналогично [2]. Среднегодовая выработка модельной фотоэлектрической станции мощностью 5 МВт и капитальные затраты на ее создание рассчитывались в соответствии с методикой, описанной в [9]. Некоторое отличие заключалось в том, что в данном расчете учитывалось снижение КПД сетевых инверторов при работе станции на малой мощности (ниже 10% от номинальной). Срок простой окупаемости станции вычислялся исходя из условия продажи всей произведенной энергии в сеть по принятому в рассматриваемом государстве льготному тарифу (см. Таб. 1) как отношение капитальных затрат к годово-

му доходу от продажи энергии. Коэффициент использования установленной мощности станции (КИУМ) характеризует эффективность ее работы (как по отдельным месяцам, так и по году в среднем) и вычисляется как отношение расчетной выработки станции к производству ее пиковой мощности на число часов в году (8760 ч).

Технические параметры рассматриваемых фотоэлектрических модулей сведены в таб. 2.

Таб. 2: Технические параметры фотоэлектрических модулей

Параметр	Модули		
	AstanaSolar KZPV 270 M72	Hevel HIT 310	YingliSolar YL 250 P
Площадь модуля, м <sup>2</sup>	1,97	1,67	1,63
Пиковая мощность модуля, Вт	270	310	250
Температурный коэффициент мощности, %/°C	-0,45	-0,29	-0,45
Нормальная рабочая температура ФЭП NOCT, °C	46	44	46
КПД модуля при стандартных условиях STC, %	13,7	18,6	15,3

Следует обратить внимание на то, что модули Hevel имеют по сравнению с мультикристаллическими модулями AstanaSolar и YingliSolar более высокий КПД при нормальных условиях испытаний STC (1000 Вт/м<sup>2</sup>, температура ФЭП 25°C, AM=1,5) и более низкую нормальную температуру фотопреобразователя NOCT, характеризующую степень разогрева модуля при его облучении потоком солнечного излучения 800 Вт/м<sup>2</sup> при температуре воздуха 20°C и скорости ветра 1 м/с.

### 3. Результаты оценок и их обсуждение

Результаты расчетов представлены в Таб. 3. Видно, что для всех рассмотренных вариантов срок простой окупаемости вложений строительство солнечных электростанций составляет от 4 до 6 лет. В большинстве случаев при принятом уровне цен и тарифов использование модулей, выполненных по технологии HIT, обеспечивает небольшое преимущество по срокам окупаемости над мультикристаллическими модулями. При этом существенным преимуществом использования HIT-модулей является уменьшение площади станции примерно на 15%, что может стать важным фактором при строительстве СЭС в горных районах с малым количеством ровных площадок, а также в районах с развитым сельским хозяйством. При этом оценка для модулей HIT для Казахстана, Кыргызстана и Азербайджана носит в определенной степени условный характер, поскольку, в этих странах для получения стимулирующего тарифа требуется обеспечить локализацию производства по компонентам станции. Однако эта проблема может быть решена путем выноса в данные республики (за исключением Казахстана) этапа сборки фотоэлектрических модулей.

Таб. 3: Расчетные технико-экономические показатели сетевых СЭС мощностью 5 МВт

Регион	Узбекистан (Бухарская обл.)		Таджикистан (Душанбе)		Казахстан (Ка- рагандинская обл.)		Кыргызстан (Чуйская обл.)		Туркменистан (Ашхабад)		Азербайджан (Центральный район)	
	HIT	Multi-Si	HIT	Multi-Si	HIT	Multi-Si	HIT	Multi-Si	HIT	Multi-Si	HIT	Multi-Si
Среднегодовая выработка СЭС, МВтч/год	8729	8606	9455	9488	8616	8565	9110	9197	8471	8367	7883	7871
Среднегодовой КИУМ, %	19,9	19,6	22,0	22,0	19,7	19,6	21,0	21,0	19,3	19,1	18,0	18,0
Максимальное значение среднемесячного КИУМ, % (месяц)	23,5 (VIII)	22,8 (VIII)	28,2 (IX)	27,9 (IX)	23,2 (IX)	23,0 (IX)	25,6 (VIII)	25,3 (VIII-IX)	22,6 (VI)	22 (VI)	22,1 (VI)	21,7 (VI)
Площадь СЭС, Га	5,8	6,9	5,8	6,9	6,1	7,3	5,9	7,1	5,8	6,9	5,9	7,0
Стоимость СЭС (без аренды земли), млн. евро	5,7	5,8	5,7	5,8	5,7	7,5	5,7	5,8	5,7	5,8	5,7	5,8
Срок простой окупаемости, лет	4,3	4,5	4,3	4,4	4,5	6,1	5,7	5,7	4,0	4,2	3,6	3,7



В целом экономические показатели станций прежде всего определяются стоимостью фотоэлектрических модулей (60-65% от стоимости станции в рамках данного расчета) и величиной стимулирующего тарифа в регионе (Таб. 3). Так, наилучшие показатели по срокам окупаемости, несмотря на меньшую среднегодовую выработку энергии модельной СЭС среди рассматриваемых государств, демонстрирует Азербайджан в связи с максимальным значением стимулирующего тарифа. Наихудшие – Кыргызстан, где стимулирующий тариф самый низкий.

Выбранные для анализа некоторые районы строительства СЭС существенно различаются по температурным условиям и в то же время характеризуются приблизительно одинаковым среднегодовым поступлением солнечной энергии на наклонные поверхности фотоэлектрических модулей. Такая ситуация характерна для выбранных площадок в Узбекистане и Кыргызстане, а также в Туркменистане и Казахстане (см. Таб. 4). В этой связи представляется возможным оценить влияние температуры окружающей среды на выработку энергии и соответственно на КИУМ модельных СЭС с различными типами фотоэлектрических модулей.

Минимальные температуры окружающей среды характерны для выбранной высокогорной площадки в Киргизии: менее + 2<sup>0</sup>С в среднем за год и + 14,5<sup>0</sup>С в самый жаркий месяц года. Сравнение данных таблицы 3 для площадок в Узбекистане и Киргизии показывает, что при примерно одинаковом поступлении солнечной энергии годовая выработка энергии СЭС в Киргизии на мультикремниевых модулях почти на 600 МВтч превышает выработку СЭС в Узбекистане. Замена мультикремниевых модулей на НІТ-модули в Киргизии приводит к некоторому снижению выработки энергии. В то же время в рассмотренном районе Узбекистана с жарким климатом при такой замене выработка энергии и КИУМ несколько возрастают, что связано с меньшим температурным коэффициентом мощности и в некоторой степени с более низкими значениями рабочей температуры НОСТНІТ-модулей. Аналогичные выводы могут быть сделаны и при сравнении площадок в Туркменистане и Казахстане.

Таб. 4: Температурные условия работы и поступление солнечной энергии для некоторых выбранных мест создания модельных СЭС

Регион	Узбекистан (Бухарская обл.)	Кыргызстан (Чуйская обл.)	Туркменистан (Ашхабад)	Казахстан (Карагандинская обл.)
Среднегодовая температура, °С	16,8	1,7	15,6	11,3
Максимальная среднемесячная температура, °С (месяц)	31,0 (VII)	14,5 (VII)	29,4 (VII)	28,2 (VII)
Широта местности и угол наклона модулей к горизонту, град	38	41	38	44
Среднегодовое поступление солнечной энергии на наклонную поверхность модулей, кВтч/м <sup>2</sup> /день	5,0	5,0	4,8	4,8
Максимальное среднемесячное поступление солнечной энергии на наклонную поверхность модулей, кВтч/м <sup>2</sup> /день (месяц)	6,1 (VIII)	6,3 (VIII)	5,8 (VI)	5,8 (VIII)

#### 4. Заключение

Технико-экономические оценки модельных сетевых фотоэлектрических станций мощностью 5 МВт в условиях ряда государств Средней Азии и Закавказья при действующих в них стимулирующих развитие солнечной энергетики тарифов на электроэнергию показали, что сроки простой окупаемости таких электростанций составляют от 4 до 6 лет, что свидетельствует о привлекательности проектов строительства солнечных электростанций в этих странах. Наиболее благоприятные условия для строительства СЭС имеют место в Азербайджане, где установлены наибольшие стимулирующие тарифы (0,200 €/кВтч) и фактически не установлено жестких требований по локализации производства. Наиболее жесткие требования по локализации производства мультикристаллических фотоэлектрических модулей характерны для Казахстана, где организована собственная добыча кремния и действует завод по производству фотоэлектрических преобразователей и модулей. Однако пока еще относительно высокая себестоимость производимых модулей, более низкие стимулирующие тарифы и несколько худшие, чем у других среднеазиатских стран, климатические условия по поступлению солнечной энергии обуславливают более высокие значения простого срока окупаемости СЭС (около 6 лет).

Освоение в России компанией «Хевел» производства более эффективных фотоэлектрических модулей по НТТ-технологии (кпд до 20% вместо 15% у мультикристаллических) обусловило целесообразность проведения сравнительных технико-экономических оценок рассмотренных СЭС при условии их создания с использованием НТТ и мультикристаллических модулей. Уже сегодня СЭС на НТТ-модулях оказываются конкурентоспособными для всех рассмотренных площадок в Средней Азии и Закавказье. Имеющиеся перспективы снижения стоимости НТТ-модулей и повышения КПД могут обеспечить их еще более высокую конкурентоспособность использования в странах, не имеющих строгих ограничений по локализации производства. Помимо экономических преимуществ несомненным достоинством применения НТТ-модулей является снижение требуемой площади земельного участка под строительство СЭС заданной мощности, что важно для горных районов и районов с развитым сельскохозяйственным производством. В районах с жарким климатом важным преимуществом НТТ-модулей может оказаться более низкое значение температурного коэффициента мощности, обуславливающее повышение выработки энергии и коэффициента установленной мощности СЭС.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 11-50-00124) в части модификации расчетных методик и выполнения технико-экономических оценок. Анализ состояния практического использования солнечной энергии в некоторых государствах Средней Азии и Закавказья, а также подбор климатических данных выполнены С.В. Киселевой.

## ССЫЛКИ

[1] Шуткин О.И., Перспективы развития солнечной энергетики в России и странах СНГ, Международная конференция "Развитие возобновляемой энергетики в СНГ", Москва, 3 февраля 2015. [2] Киселева С.В., Коломиец Ю.Г., Попель О.С., Тарасенко А.Б., Оценка эффективности фотоэлектрических станций в климатических условиях Кыргызстана // Альтернативная энергетика и экология, 2015, 01, сс. 14-25. [3] Савченко А.В., Крюченко Ю.В., Костылев В.П., Соколовский И.О. и др., Метод оптимизации параметров гетеропереходных фотоэлектрических преобразователей на основе кристаллического кремния // Физика и техника полупроводников, 2016. Т.50, №2, сс. 259-263. [4] Тарасенко А.Б., Попель О.С., Промышленные технологии фотоэнергетики и возможные пути их развития в России (обзор). Ч. 1. Общие подходы к созданию ФЭП и базовые кремниевые технологии // Теплоэнергетика, 2015, 11, сс. 61-69. [5] Тарасенко А.Б., Попель О.С., Промышленные технологии фотоэнергетики и возможные пути их развития в России (обзор). Ч. 2. Модификации технологий производства фотоэлектрических преобразователей, совершенствование контактных структур и выбор перспективных технологий для расширения производства ФЭП в РФ // Теплоэнергетика, 2015, 12, сс. 29-39. [6] AtseLouwen, Wilfried van Sark, Ruud Schropp, André Faaij, A cost road map for silicon heterojunction solar cells // Solar Energy Materials & Solar Cells 147 (2016) pp. 295–314; [7] PV Insights, PV insights: Solar Photovoltaic (Polysilicon wafer cell and panel) Prices and Research Reports, 2014. URL <http://www.pvinsights.com/>. [8] T.S. Gabderakhmanova, S.V. Kiseleva, S.E. Fridand A.B. Tarasenko, Energy production estimation for Kosh-Agach grid-tie photovoltaic power plant for different photovoltaic module types // Journal of Physics: Conference Series 774 (2016) 012140, pp.1-10. [9] Сообщение телеканала МИР24 от 04 декабря 2016г, URL: [mir24.tv/news/society/15397453](http://mir24.tv/news/society/15397453). [10] Web-сайт компании Panasonic. URL <https://eu-solar.panasonic.net>

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПАРАМЕТРЫ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ БАТАРЕЙ

М.Н.Турсунов, В.Г.Дыскин, Х.Сабилов, Э.Т.Абдуллаев, И.М.Комолов

Физико-технический институт НПО «Физика-Солнце»

*Работа посвящена исследованию степени загрязнения поверхности и влияния её на параметры фотоэлектрических батарей с разной степени обработкой поверхности защитного стекла в летний и осенний периоды времени года. Показано повторяемость в ходе зависимости токов от количества осадков во времени. Значение разницы тока короткого замыкания «чистого» и «загрязненного» ФЭБ пропорционально количеству дней без осадков с учетом скорости ветра.*

Одним из негативных последствий ветровой эрозии в условиях аридного климата является повышенный уровень запыленности атмосферного воздуха. Основными очагами выноса пыли и солей на территории республики является высохшая часть дна Аральского моря, поверхности соленых сбросовых озер и солончаков. Установлено, что одним из причин снижения выходной мощности является загрязнение поверхности ФЭБ, степень которого зависит от внешней среды. Размеры осаждаемых частиц пыли составляют от долей микрона до сотни микрометра. Влияние дождевой воды на пыль разное. Так, как дождевая вода в регионах является насыщенной разными веществами и очищает поверхность фотоэлектрических батарей (ФЭБ) плохо и остаются пятна. Вследствие загрязнения фронтальной поверхности ФЭБ производительность фотоэлектрической станции (ФЭС) снижается до 30 и более /1-3/ процентов в течение месяца в летнее время года. Проблема, от решения которой существенно зависит эффективность использования фотоэлектрических систем в условиях Узбекистана, является очистка поверхности фотоэлектрических батарей от осаждаемой пыли. В настоящей работе посвящена исследованию степени загрязнения поверхности и влияния её на параметры фотоэлектрических батарей с разной степенью обработкой поверхности защитного стекла в летний и осенний периоды времени года в условиях г.Ташкента.

Предварительные исследования с января по апрель месяцы показали, загрязнения, осаждаемые на поверхность ФЭБ из атмосферного воздуха в виде пыли разного размера не держаться много времени из-за периодических осадков в виде снега и дождя, включая иногда и декады мая месяца. В этот период времени накапливаемое между осадками количество загрязнения уменьшают ток короткого замыкания ФЭБ на 6-8 %, что является приемлемой. Однако, начиная со второй половины мая месяца до конца октября (ноября) количество осаждаемых загрязнений существенно возрастает. Для начало мониторинга загрязнений мы выбрали вторую половину мая месяца, когда дневная температура достигает 30<sup>0</sup>С и более. Методика, разработанная нами ранее, согласно /3-4/ включает измерения плотности потока солнечного излучения до защитного стекла и после прохождения её и электрических параметров ФЭБ тока короткого замыкания и напряжения холостого хода. Изменение эффективности преобразования ФЭБ при наличии загрязнения определяется:

$$\Delta\eta = 1 - \frac{I_1}{I_0} \quad (1)$$

$I_0$  – ток короткого замыкания ФЭБ перед началом эксплуатации (чистое стекло),  $I_1$  – ток короткого замыкания ФЭБ в некоторый момент времени эксплуатации (запыленное стекло). Выражение (1) можно записать в виде:

$$\Delta\eta \sim 1 - \frac{\overline{T}_1}{\overline{T}_0} \quad (2)$$

$\overline{T}_0, \overline{T}_1$  – средние значения коэффициентов пропускания чистого и загрязненного стекла. Выражение (2) дает возможность получить искомую зависимость между метеорологическим параметром (количеством осадков на единицу поверхности) и  $\Delta\eta$ . Коэффициент пропускания стекла  $T$  можно определить непосредственно оптическими измерениями или косвенно по измерению величины плотности потока солнечного излучения:

$$T \approx \frac{\Phi_1}{\Phi_0} \quad (3)$$

$\Phi_1$  - плотность потока солнечной радиации через «грязное» стекло;  $\Phi_0$  - плотность потока солнечной радиации через «чистое» стекло. Для исследования в качестве объектов выбраны стекло с рифленой поверхностью толщиной 3,2 мм и две ФЭБ с полированной и рифленой поверхностью для сравнения влияния загрязненности от качества обработки поверхности стекла. Плотность прямой части солнечного излучения определяли при помощи эталонного СЭ над защитным стеклом при прямом попадании солнечного излучения. Плотность прошедшей части излучения измерением с тыльной стороны стекла при механическом контакте измерителя с объектом. На ФЭБ с стеклом полированной и рифленой поверхностью измеряли ток короткого замыкания и напряжения холостого хода. Размеры объектов исследования идентичные. Толщины всех трех стекол равные. Объекты исследования установлены на металлической конструкции, на высоте 6 м над уровнем Земли (на уровне второго этажа здания), позволяющие изменение положения перпендикулярно к солнечному излучению. Измерение проводили во время прохождения Солнцем зенита. Измерение проводились с 16 мая по 30 декабря 2016 года.

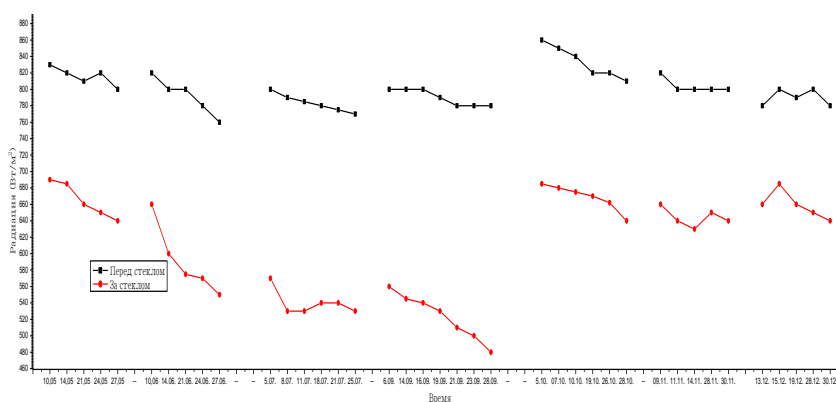


Рис.1 Зависимость плотности солнечного излучения от времени, 1- плотность прямого солнечного излучения, 2- плотность солнечного излучения, проходящего через толщу стекла, измеренная с тыльной стороны.

На рис.1 (кривые 1,2,) приведены результаты измерения параметров исследуемых объектов. Разрывы зависимостей – дни с осадками в виде дождя или снега. Количество осадков увеличиваются с мая по декабрь месяц многократно. Причем ноябрь и декабрь месяцы непрерывность осадков составляют по несколько дней. Кривые 1 и 2 зависимость плотности прямого солнечного излучения и излучения прошедшего через стекло с рифленой поверхностью от времени. Для наглядности полученных зависимостей влияния загрязнений на коэффициент пропускания стекла, приведенные значения плотности прямого потока солнечного излучения выбраны из большого количества измеренных значений близких к величине  $820 \pm 3 \text{ Вт/м}^2$ . Данные для пасмурных дней исключены из графиков.

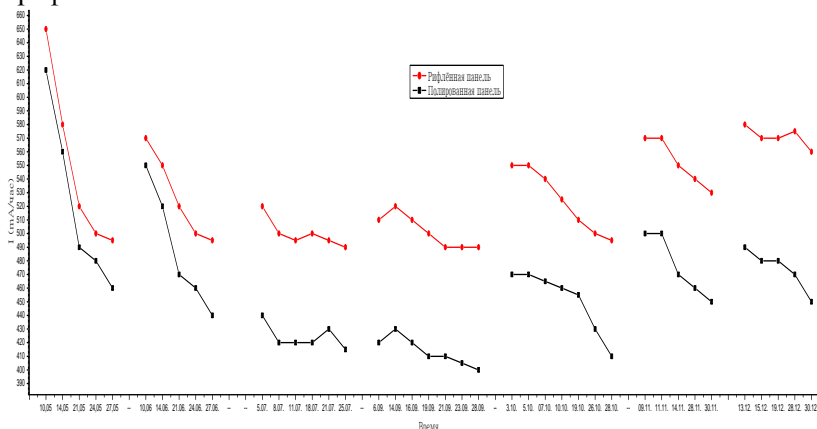


Рис. 2. Зависимость тока короткого замыкания фотоэлектрических батарей от времени с стеклами разной степенью обработки поверхности, 1- стекло с рифленой поверхностью, 2 – стекло с полированной поверхностью.

Рис.2 (кривые 1 и 2) показывают изменения тока короткого замыкания ФЭБ с полированным и рифленным защитным стеклом от плотности солнечного излучения во времени. Токи короткого замыкания ФЭБ уменьшаются во времени непрерывно до начала осадков в виде дождя или снега и затем резко возрастают. Особенно это наглядно видно после продолжительности осадков в течение нескольких дней. Наблюдается повторяемость в ходе зависимости токов от количества осадков во времени. Значение разницы тока короткого замыкания «чистого» и «загрязненного» ФЭБ пропорционально количеству дней без осадков с учетом скорости ветра. Ближе к концу осени дневное количество осаждаемой пыли возрастает и это объясняется с увеличением скорости ветров и большим количеством пыли, из оголенной части Аральского моря и солончаковых озер после знойного лета по пути ветра. Для других регионов республики количество осаждаемой пыли на поверхности ФЭБ может быть существенно другим. На территории Узбекистана три области сильно подвержены ветровой эрозии по природным причинам: Кашкадарьинская область, юго-восточная оконечность Сурхандарьинской области, и западная часть Ферганской области. Это связано преимущественным направлением распространения ветров с юга республики, с Аральского моря, со степных регионов Казахстана и с русла Сырдарьи в сторону Наманганской области. Для Кашкадарьинской области, Каракалпакстана и Навоийской области, даже в зимние месяцы запыленность атмосферы достаточно высокая. Например, исследования ФЭБ в условиях близко к г.Карши показали, что в зимние месяцы (январь-март) снижение мощности составляет 10-13%, а апрель-май до 17 % /5/. Для регионов Узбекистана только уровень плотности солнечного излучения и количество солнечных дней не может быть основным критерием размещения фотоэлектрических систем. При расчете эффективности фотоэлектрических систем следует учитывать степень запыленности атмосферы и высокую температуру окружающей среды по временам года. В случае выбора места размещения с учетом приведенных аргументов следует изыскать вариантов решения проблемы очистки поверхности от загрязнений и уменьшения влияния высоких температур на эффективность фотоэлектрических систем.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] M. Mani, R. Pillai//Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2010., v. 14, P 3124 -3131. [2] M. Mazumder, M. N. Horenstein, J. W. Stark at all //IEEE transactions on industry applications. 2013. v. 49. № 4, P 1793 -1800. [3]M. N. Tur sunov., V.G. Dyskin., I.A Yuldashev., Kh. Sobirov., Park Jeong Hwoan. A Criterion of Contamination of the Glass Surface of Photovoltaic Batteries // Applied Solar Energy. 2015. V.51. pp. 163-164 [4] Дыскин В.Г., Турсунов М.Н. Абдуллаев Э.Т., «Проблемы энерго- и ресурсосбережения», 2016, № 1-2, стр. 4-6. [5] Юлдошев И.А., Комбинированные энергоустановки на основе фотоэлектрических батарей из кристаллического кремния, автореферат докторской диссертации, 2016 г., с.50-51.

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФОТО ТЕПЛОВЫХ БАТАРЕЙ С ВОЗДУШНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

М.Н.Турсунов<sup>1</sup>, Х.Сабилов<sup>1</sup>, Б.М.Турдиев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Физико-технический институт НПО «Физика-Солнце»

<sup>2</sup>Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности,  
e-mail: [bmt1975611@gmail.com](mailto:bmt1975611@gmail.com)

*В работе приводятся результаты исследования повышения эффективности использования фото тепловых батарей (ФТБ) с воздушным охлаждением при разных температурах окружающей среды и увеличения эффективности теплоотдачи тыльной поверхности ФЭБ при воздействии на охлаждающий воздушный поток паров воды. Показано, что фото тепловые батареи с воздушным охлаждением являются эффективными в случае отсутствия воды в регионах с жарким климатом при температурах до 40<sup>0</sup>С и могут существенно увеличить мощность батарей при применении.*

**Ключевые слова:** фотоэлектрическая батарея, фотоэлектрическая станция, фототепловая батарея, солнечный элемент, тепловой коллектор.

Эффективное использование фотоэлектрических станций (ФЭС) в Узбекистане зависит от учета конкретных факторов, которые различаются от условий использования других стран. Эти факторы определяются климатическими условиями эксплуатации. Параметры солнечных элементов в экстремальных условиях жаркого климата Центральной Азии, сильно ухудшаются, в том числе КПД фотоэлектрических батарей (ФЭБ) на основе кристаллического кремния уменьшается

более чем на 40 %. [1-4]. Основными причинами снижения эффективности ФЭБ в условиях жаркого климата являются два фактора:

1. Экстремальные температурные условия, приводящие к снижению эффективности ФЭС в летние месяцы года.
2. Относительно высокая запыленность воздуха, также больше действует в летние месяцы года.

Основным потребителем электроэнергии, вырабатываемой ФЭС в Узбекистане, являются сельские регионы. Потребность обусловлена тем, что сельскохозяйственные угодья – это большие площади с малой плотностью энергопотребления, что является невыгодным для централизованного снабжения электроэнергией с использованием линий электропередачи. Оба эти фактора действуют во всех регионах республики. Однако их влияние усиливается, в зависимости от географического положения местности. К югу от Самаркандской области усиливается влияние температуры, а к северу в сторону Аральского моря влияние запыленности. В зоне орошаемого земледелия Ташкентской области и Ферганской долины влияние двух факторов меньше. Но даже в этих регионах без их учета эффективное использование невозможно, так как падение эффективности ФЭБ составляет больше 25-30 % по каждому из факторов.

Во всем мире ФЭС большой мощности строят в местах не пригодных для земледелия, с высокой годовой инсоляцией, высокой дневной температурой и повышенной запыленностью воздуха. В таких местах количество воды ограничена или её добыча требует существенных финансовых затрат и соответствующие амортизационные отчисления для дальнейшего содержания. Поэтому повышения эффективности фотоэлектрических батарей в условиях отсутствия воды является актуальной задачей.

В работе приводятся результаты исследования повышения эффективности использования фото тепловых батарей (ФТБ) с воздушным охлаждением при разных температурах окружающей среды и пути повышения теплоотдачи тыльной поверхности ФЭБ при воздействии на охлаждающий воздушный поток паров воды. Фотоэлектрическая установка с принудительным воздушным охлаждением создана по аналогии с [5], с модернизацией конструкции боковой отражательной плоскости для создания однородности освещенности солнечным излучением поверхности ФЭБ. Использована отражающая пленка с коэффициентом отражения  $R=0,5$ , что дала возможность увеличения плотности потока солнечного излучения на поверхности ФЭБ до 1,4 раза.

Для обеспечения планарности боковых плоскостей использован в отличие от алюминия [5] текстолит с обработанной поверхностью. На тыльной поверхности ФЭБ установлены 8 термоэлектрических датчиков, 4 по периметру и 4 в центральной части для проведения мониторинга температуры. Измерения распределения температуры показали, что разброс температуры по тыльной поверхности ФЭБ составляет  $\pm 3\%$ , в два раза меньше, чем в случае [5]. Перпендикулярно к поверхности ФЭБ установлены 8 вентиляторов [6], которые работают в автоматическом режиме и включаются при нагреве тыльной поверхности выше заданной температуры. Время работы вентиляторов зависит от температуры окружающей среды и плотности потока солнечного излучения. Была тестирована зависимость мощности ФЭБ от скорости потока охлаждающего воздуха. Скорость потока воздуха измерялась цифровым анемометром AR836<sup>+</sup> (Германия), а величина его варьировалась изменением мощности вентиляторов. Скорость потока воздуха при достижении вентиляторами номинальной мощности 16 Вт, равно 5 м/сек.

Эффективность коллекторной части ФТБ, определяется теплообменом между тыльной поверхностью ФЭБ и контактирующего с нею материала коллектора. В данном случае контактирующим с тыльной поверхностью ФЭБ материалом является воздушный поток, создаваемый вентиляторами. На рис.1 приведена зависимость температуры тыльной поверхности ФЭБ от температуры окружающей среды, измеренные термоэлектрическими датчиками. Каждая величина температуры является среднеарифметической от данных 8 термоэлектрических датчиков.



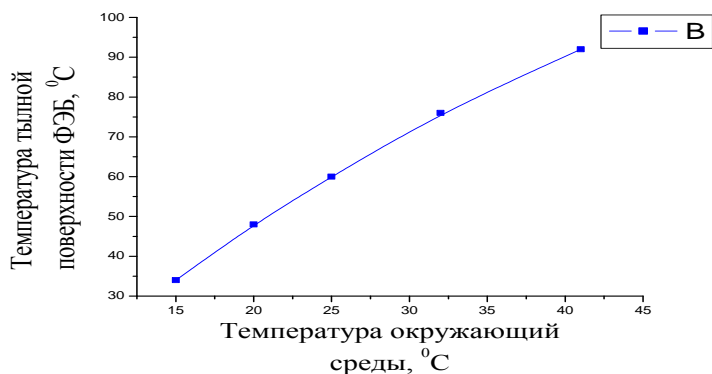


Рис.1. Зависимость температуры тыльной поверхности ФЭБ от температуры окружающей среды.  
(Примечание: все измерения проведены при ясной погоде.)

Температура тыльной поверхности ФЭБ с увеличением температуры окружающей среды растет медленно, чем в начале времени измерения. При температуре окружающей среды более 40°C температура тыльной поверхности ФЭБ достигает более 90°C. С увеличением температуры тыльной поверхности ФЭБ (ФЭБ состоит из 40 СЭ (солнечный элемент), коммутированных последовательно) уменьшается эффективность преобразования [1, 3-4], в большей степени напряжения холостого хода.

На рис.2 приведена зависимость напряжения холостого хода ФТБ от времени при разных температурах окружающей среды. Как видно в течении получаса после начала работы ФТБ идет уменьшение напряжения холостого хода. Затем с момента включения коллектора с вентиляторами происходит рост напряжения холостого хода. Дальнейший рост напряжения холостого хода ограничивается влиянием температуры окружающей среды, которая определяет температуру потока воздуха, уносящего тепловую энергию с тыльной стороны батареи. Изменение напряжения холостого хода зависит от температуры окружающей среды. Чем меньше температура окружающей среды, тем больше обеспечивается рост напряжения. Холодный воздух уносит больше тепловую энергию с тыльной стороны батареи. При высоких температурах окружающей среды, когда разность температуры тыльной поверхности ФЭБ и температуры окружающей среды мала, то поток уносимого тепла ограничен и поэтому величина восстановления напряжения холостого хода меньше. Таким образом в условиях южных регионов республики, когда температура достигает 40°C и выше эффективность коллектора с воздушным охлаждением снижается. Для повышения эффективности ФТБ в таких условиях предложена и реализована методика впрыскивания водяных паров в тыльную поверхность ФЭБ в процессе работы вентиляторов (рис.2 кривая с штрихом 5). Водяные

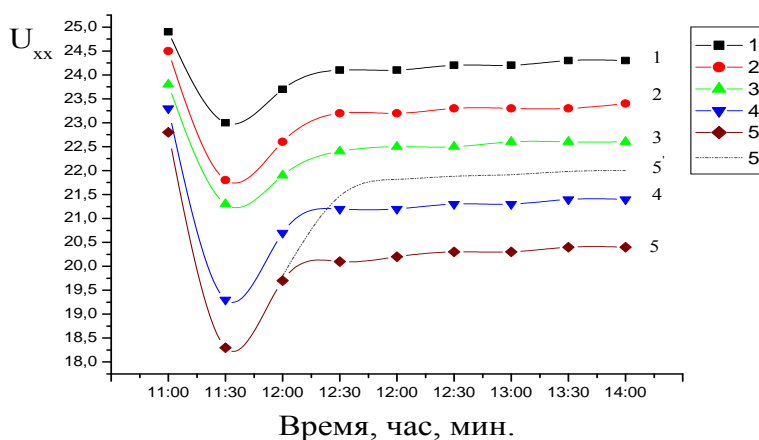


Рис.2. Зависимость напряжения холостого хода ФТБ от времени при разных температурах окружающей среды, 1- 15 °C, 2- 20 °C, 3- 25°C, 4-32°C, 5-41°C, 5 штрих линия - при впрыскивании в коллектор паров воды.

пары, уносимые потоком воздуха от вентиляторов, приводят к двум эффектам, охлаждают поток воздуха и покрывают тыльную поверхность ФЭБ тонкой пленкой, которая усиливает теплопередачу к потоку воздуха и увеличивает эффективность работы воздушного коллектора. Вместо воды можно использовать и другие быстро испаряемые жидкости, например, ацетон, этиловый спирт, фреон или толуол.

На рис.3 приведена зависимость напряжения восстановления ( $U_B$ ) фото тепловой батареи после подключения коллектора от разности температур тыльной поверхности ( $T_{т.п.}$ ) ФЭБ и окружающей среды ( $T_{о.с.}$ ). Зависимость  $U_B$  ФТБ от разности температур тыльной поверхности является нелинейной и с увеличением разницы температур нелинейность проявляется более отчетливо. Мощность ФТБ определяется напряжением  $U_B$  (изменение тока короткого замыкания с температурой можно пренебречь) поэтому, эффективность ФТБ с воздушным охлаждением (напряжения восстановления  $\Delta U_B = U_{xx} - U_T$ ) зависит от разности  $\Delta U_B$  нелинейно. Чем больше температура окружающей среды, тем меньше возможность воздушного потока, создаваемого коллектором уносить тепло за пределы коллектора. Однако, даже при таких температурах дополнительная мощность, генерируемая за счет использования воздушного охлаждения применением вентиляторов больше, чем электрическая мощность потребляемые вентиляторами.

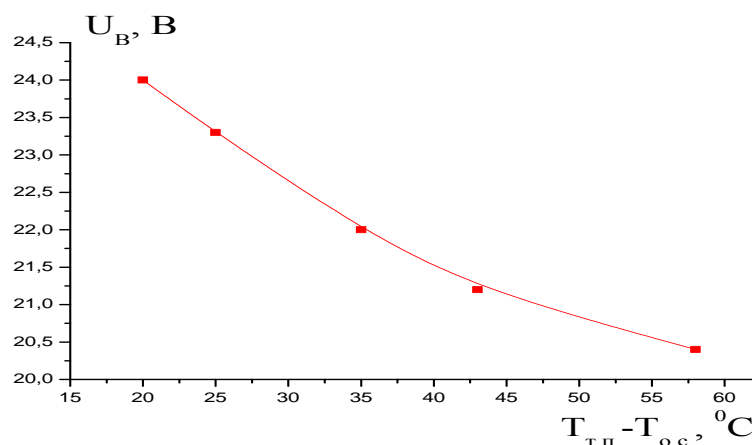


Рис.3. Зависимость напряжения  $U_B$  ФТБ от разности температур тыльной поверхности ФЭБ и окружающей среды ( $T_{т.п.} - T_{о.с.}$ ).

При отработке технологии впрыскивания паров легко испаряемых жидкостей в объем коллектора электрическая мощность фото тепловой батареи может существенно возрасти при температурах окружающей среды 40 °C и выше. Поэтому ФТБ с воздушным охлаждением являются эффективными источниками электрической энергии в случае отсутствия воды в регионах с жарким климатом, и имеет большую перспективу применения.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] М.Н. Турсунов, И.А.Юлдошев. Разработка фотоэлектрических батарей, установок эффективно работающих в условиях Центральной Азии. Проблемы энерго-ресурсосбережения. Ташкент, 2011. Специальный выпуск. С. 160-165. [2] M.N.Tursunov, R.A.Muminov, V.G.Dyskin, I. A. Yuldoshev. A mobile photothermal converter and its operating characteristics. *Applied Solar Energy* January 2013, Volume 49, Issue 1, P. 16-18. [3] IEC International Standard 60904-1. Photovoltaic devices – Part 1: Measurement of photovoltaic current-voltage characteristics. Second edition; intr.2006-09. International Electrotechnical Commission. 2006. P.1-23. [4] Skoplaki E, Palyvos J. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance. A review of efficiency/power correlations. *Solar Energy*. 2009. № 83. P. 614-624. [5] Патентнапромышленный образец № SAP 01413 от 22.04.2015. Фотоэлектрическая установка с принудительным охлаждением. Турсунов М.Н, Собиров Х, Юлдошев И.А, Комолов И.М. Расмий ахборотнома.29.02.2016.№ 2[6] И.А.Юлдошев. Повышение эффективности фотоэлектрической батареи принудительным охлаждением. Проблемы энерго-ресурсосбережения. Ташкент, 2015.№3. С. 122-127.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДЫ НА ПАРАМЕТРЫ ФОТО ТЕПЛОВОЙ БАТАРЕИ

М.Н.Турсунов<sup>1</sup>, Б.М.Турдиев<sup>2</sup>, И.М.Комолов

1 - Физико-технический институт НПО «Физика-Солнце»,

2 – Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности.

В работе приводятся результаты исследования влияния температуры воды, коллектора при заданной температуре тыльной поверхности ФЭБ, на электрические параметры фото тепловой батареи. Установлено, что в ФТБ с тепловыми коллекторами следует использовать для охлаждения воды с температурой до 32<sup>0</sup>С, что дает возможность получения электрической мощности не менее 190 Вт при напряжениях 21,5 В достаточной для полной зарядки аккумуляторов гелевого и щелочного типов в автономных системах энергии. В случае использования кислотных аккумуляторов, температура используемой воды можно увеличивать до 45<sup>0</sup>С.

**Ключевые слова:** фотоэлектрическая батарея(ФЭБ), ток короткого замыкания (ТКЗ), напряжение холостого хода, фото тепловая батарея, коллектор.

В фото тепловых батареях (ФТБ) для повышения эффективности преобразования солнечного излучения тыльная поверхность фотоэлектрической батареи (ФЭБ) охлаждается разными методами, потоком воды или воздуха [1-3]. Температура тыльной поверхности ФЭБ является одним из факторов, определяющих электрические параметры ФТБ и ее эффективность. Реализация возможностей ФТБ при заданной температуре тыльной поверхности ФЭБ зависит от температуры воды на входе в тепловой коллектор. Для эффективного использования необходимо заранее планировать режим работы ФТБ, как источника генерирующего электроэнергию или в другом случае и электроэнергию и теплой воды.

При проектировании фото тепловых батарей необходимо учитывать влияние конвективного теплообмена /4/. Как было показано, если температура окружающей среды более 30 <sup>0</sup>С, то изменение температуры ФЭБ с увеличением скорости ветра незначительно и для эффективной работы ее необходимо охлаждать.

$$Q_c = 2\alpha(T - T_0) \quad (1)$$

$T$  - температура ФЭБ при термодинамическом равновесии,  $T_0$  - температура окружающей среды (воздуха),  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи.

В случае фото тепловых батарей тыльная поверхность ФЭБ имеет тепловую защиту, поэтому влияние ветра исключается, и съем тепла с тыльной стороны батареи приводит к увеличению эффективности преобразования. Эффективность передачи тепла конвективным теплообменом зависит от материалов, обеспечивающих передачу энергии от ФЭБ к коллектору. В данной работе проводится исследование влияния температуры воды на входе в коллектор при заданной температуре тыльной поверхности ФЭБ на электрические параметры фото тепловой батареи. Целью исследования является определение эффективности предлагаемых конструкций ФТБ, для возможности использования в стационарных фотоэлектрических станциях большой мощности, и повышения эффективности в экстремальных условиях использования. В Физико-техническом институте НПО «Физика-Солнце» разработаны фото тепловые батареи с тепловым коллектором на основе полимерных трубок /3,5/. Установлено, что эффективность коллекторной части ФТБ батарей, определяется эффективностью теплообмена между тыльной поверхностью ФЭБ и контактирующего с нею коллектора с теплоносителем. Тыльная поверхность ФЭБ покрыта защитной полимерной пленкой и к ней в механическом контакте находятся полимерные трубки коллектора с водой. В такой сложной системе солнечный элемент- ламинирующее покрытие - защитная пленка – воздух – полимерная трубка – вода в процессе конвективного теплообмена /4/ потери неизбежны. Экспериментально установлено /3-5/, что температура тыльной поверхности ФЭБ и воды на выходе из коллектора различаются на 10 – 14 <sup>0</sup>С в зависимости от типа материала коллектора. В случае коллекторов из металла приблизительно на 10 <sup>0</sup>С, для коллекторов из полимерных трубок до 14<sup>0</sup>С в зависимости от диаметра.

В состав фото тепловой установки входит ФТБ с боковой отражающей плоскостью, аккумулирующая система на основе аккумуляторов и контроллера заряда, инвертора напряжения, емкости для холодной и горячей воды. Емкость для холодной воды выполняет функцию напорного бака. Высота подъема напорного бака обеспечивает давление воды в объеме кол-

лектора. Для проведения исследований и обеспечения водой разной температуры на входе коллектора использовали предварительно подготовленную воду с заданной температурой. Измерения параметров ФТБ проводили при постоянном значении плотности солнечного излучения и температуры окружающей среды. Методика измерения параметров ФТБ приведена в работах /3-4/. В таблице приведены исходные значения измеренных величин для проведения экспериментов.

таблица

Высота напорного бака над ФТБ, см	Плотность потока солнечного излучения, Вт/м <sup>2</sup>	Средняя температура тыльной поверхности ФЭБ, Т <sup>0</sup> С	Температура окружающей среды, Т <sup>0</sup> С	Ток короткого замыкания ФЭБ, А (условия АМ 1,5)	Напряжение холостого хода ФЭБ, В (АМ 1,5)
150	800-820	91-94	31-33	8,4	23,6

На рис.1 приведена зависимость напряжения холостого хода ФТБ от времени при разных температурах воды, подаваемой в коллектор.

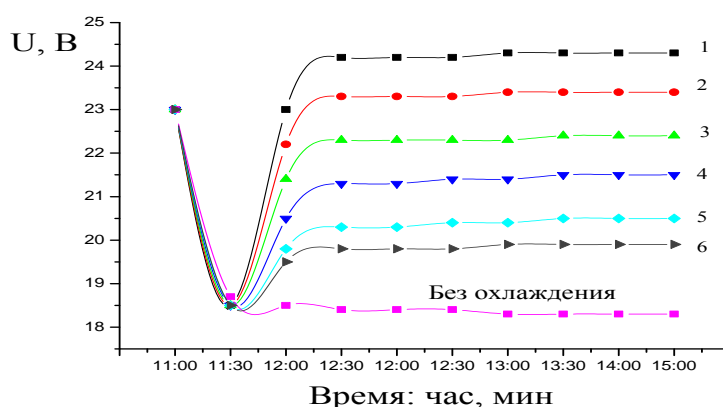


Рис.1 Зависимость напряжения холостого хода ФТБ от времени при разных температурах воды, 1-15 °С, 2-20 °С, 3-25 °С, 4-32 °С, 5-41 °С, 6-46 °С.

Как видно в течении 40 минут после начала работы ФТБ происходит уменьшение напряжения холостого хода до 18,4 В из-за нагрева тыльной поверхности ФЭБ, падающим на фронтальную поверхность потоком солнечного излучения и поглощением её солнечными элементами. Эффективность преобразования солнечных элементов составляет 15,6 %, поэтому остальная часть, не преобразованная в СЭ, превращается в тепло и накапливается на тыльной поверхности СЭ и тыльной защитной полимерной пленке ФЭБ. Электрическая мощность до включения коллектора составляет 117 Вт. С момента включения коллектора следует процесс восстановления напряжения ФТБ. Увеличение напряжения холостого хода ФТБ ограничивается влиянием температуры воды входящей в коллектор, которая определяет и температуру горячей воды, уносящей тепловую энергию с тыльной стороны батареи конвективным теплообменом при заданных значениях показателей таблицы. Дальнейшее изменение напряжения холостого хода зависит от плотности падающего солнечного излучения и температуры окружающей среды. В ходе эксперимента каждый раз более холодная вода менялась более нагретой водой, вытеснением предыдущей из коллектора и контролировали измерением напряжения до получения постоянного значения, характеризующая данную температуру. Как видно из рис.1, при температурах подаваемой воды в коллектор 15- 20 °С напряжение восстановления почти соответствует значению напряжению холостого хода ФЭБ, измеренной при температуре 25°С в условиях АМ 1,5 и даже больше (при 15°С) данного значения. При увеличении температуры воды в коллекторе происходит снижение напряжения восстановления коллектора из-за уменьшения разности температур тыльной поверхности и воды, и соответственно уменьшается поток тепла уносимое водой. При температурах воды 40°С и более напряжения восстановления снижается до 19,5 В. В случае использования ФТБ в режиме автономных источников энергии температуру входящий в коллектор воды необходимо выбрать таким образом, чтобы напряжения была достаточной для эффективного аккумулирования электрической энергии в гелевых или щелочных аккумуляторах. Так как при использовании гелевых и щелочных аккумуляторов для достижения полной зарядки необходимо в режиме зарядки иметь нагрузку не менее

17 В. На рис.2 приведена зависимость мощности ФТБ от времени при разных температурах воды в коллекторе и показателях, приведенных в таблице.

Подача воды в коллектор с температурой 15 - 25 °С приводит к увеличению выработке электрической мощности до 200 Вт - 215 Вт. При увеличении температуры воды в коллекторе до 41 °С мощность уменьшается до 181 Вт. При температурах воды более 32-35°С и плотности потока солнечного излучения более 800 Вт\м<sup>2</sup> для увеличения электрической мощности ФТБ использования коллектора менее эффективно. При температуре, подаваемой воды в коллекторе, например, 45 °С, вырабатываемая мощность снижается до 167 Вт. Однако, даже в этих двух случаях (41 и 45°С) использование ФТБ в режиме автономного источника электропитания с аккумуляторной системой на основе химических источников тока является оправданной, так как из-за достаточно высокого напряжения (19 В и более) гарантирует зарядку кислотных аккумуляторов при напряжениях, приведенных на рис.1. Кроме того, отметим, что использование артезианской воды с содержанием соли до 7-10 г/л для коллектора на основе полимерной трубки практически не влияет на его работоспособность.

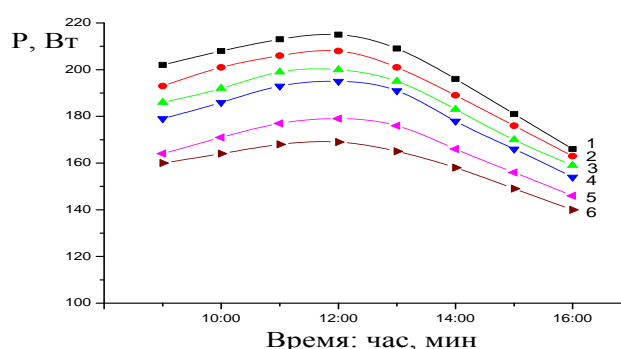


Рис.2. Зависимость мощности ФТБ от времени при разных температурах воды в коллекторе, 1-15 °С, 2- 20 °С, 3 - 25 °С, 4 - 32 °С, 5 - 41 °С, 6 - 46 °С.

Ограничением для данных коллекторов является необходимость использования чистой воды без содержания твердых частиц или отложений, что связано с низким давлением воды в коллекторе. В заключении отметим, что в ФТБ с тепловыми коллекторами следует использовать для охлаждения воды с температурой до 33°С, что дает возможность получения электрической мощности не менее 180 Вт при напряжениях 21,5 В достаточной для полной зарядки аккумуляторов гелевого и щелочного типов в автономных системах энергии. В случае использования кислотных аккумуляторов, температура используемой воды можно довести до температуры 45°С. Необходимо использования чистую воду без содержания твердых частиц или отложений, что связано с низким давлением воды в коллекторе. В случае использования воды с линии водопровода такая необходимость отпадает.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Sandnes B., Rekstad J. A photovoltaic/thermal (PV/T) collector with a polymer absorber plate: experimental study and analytic model // Solar Energy. 2002. № 72 (1). P. 63-73. [2] М.Н Турсунов, Сабилов Х, И. А. Юлдошев, А., Комолов И.М Повышение эффективности фототепловых батарей применением полимерных материалов для отвода тепла// Республика илмий амалий анжумани, Карши 2016. 15 апрель. 259-261бет. [3] И.А. Юлдошев. Повышение эффективности фотоэлектрической батареи принудительным охлаждением// Проблемы энерго-ресурсосбережения. – Ташкент, 2015. –№3. – С. 122-127. [4] -М.Н. Турсунов., В.Г. Дыскин., Б.М. Турдиев, И.А. Юлдошев. Влияние конвективного теплообмена на температуру солнечной фотоэлектрической батареи // Гелиотехника. – Ташкент, 2014. – №4. – С. 34-37. [5] И.А. Юлдошев, Автореферат докторской диссертации, Ташкент 2016 г., с. 50-51.

## ОСОБЕННОСТИ НАГРУЗОЧНЫХ ВОЛЬТАМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЕВОГО СОЛНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УРОВНЯХ ОСВЕЩЕННОСТИ СОЛНЕЧНЫМ СВЕТОМ.

Р.Р. Кабулов, Н.А.Матчанов, Б.Р.Умаров, М.А.Маликов

Международный Институт Солнечной Энергии  
Ташкент, 100084, Узбекистан, sirnornur@uzsci.net

### Аннотация

Проведены исследования токовых вольтамперных характеристик (ВАХ) поликристаллического кремниевого солнечного элемента (СЭ) при различных мощностях солнечного излучения от  $0,05 \text{ kW/m}^2$  до  $1,1 \text{ kW/m}^2$ . Установлено, что с увеличением мощности освещения КПД СЭ увеличивается от 11,5% до 17%. Так же, улучшаются параметры нагрузочной ВАХ СЭ, что тесно связано с уменьшением последовательного сопротивления ( $R_{ser}$ ). Шунтирующее сопротивление ( $R_{sh}$ ) СЭ, так же, уменьшается. Эти изменения  $R_{ser}$  и  $R_{sh}$  связаны с модуляцией фотоактивных слоев СЭ под действием солнечного излучения.

**Ключевые слова:** Солнечный элемент, поликристаллический кремний, нагрузочная вольтамперная характеристика.

### 1. Введение

Исследование фотоэлектрических характеристик СЭ при различных уровнях освещенности и температурах окружающей среды даст возможность установить энергетические потери имеющие место в СЭ и определить интервал освещенности и температурный диапазон, где эффективно будут функционировать фотомодули состоящие из СЭ с заданными параметрами. В данной работе были проведены экспериментальные исследования СЭ площадью  $2,25 \text{ cm}^2$  на основе поликристаллического кремния (поли-Si), который при «стандартных тестовых условиях» - Standard Test Conditions (STC),  $P = 1 \text{ кВт/м}^2$ ,  $T = 25^\circ\text{C}$ , имел коэффициент полезного действия (КПД) = 17%. Экспериментальные исследования нагрузочных вольтамперных характеристик были проведены на комплексе измерения вольтамперных характеристик OrielSol 3A класса ААА с использованием симулятора солнечного излучения Модель - 94043A, поступившего по проекту Азиатского Банка развития ТА-8008 УЗБ «Развитие солнечной энергетики в Узбекистане». Спектральные исследования фоточувствительности проведены с использованием кварцевого зеркального монохроматора ZMR-3.

### 2. Экспериментальные результаты.

На рис.1 представлены спектральные зависимости тока короткого замыкания ( $I_{кз}$ ) поли-Si СЭ. СЭ имеет область спектральной чувствительности от 400 нм до 1100 нм. На рис.2 представлены (в логарифмическом масштабе) результаты темновой ВАХ поли-Si СЭ, кривая А - прямая и кривая В - обратная ветвь ВАХ. Анализ прямой ветви ВАХ [1] позволила оценить величину встроенного потенциала поли-Si СЭ, который имеет величину  $V_b = 0.9 \pm 0.03 \text{ эВ}$ . Так же, из

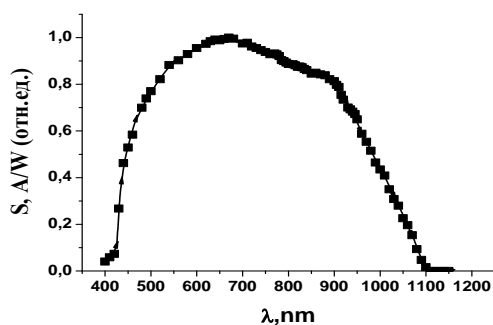


Рис.1 Спектральная зависимость тока короткого замыкания ( $J_{кз}$ ) поликристаллического кремниевого СЭ.

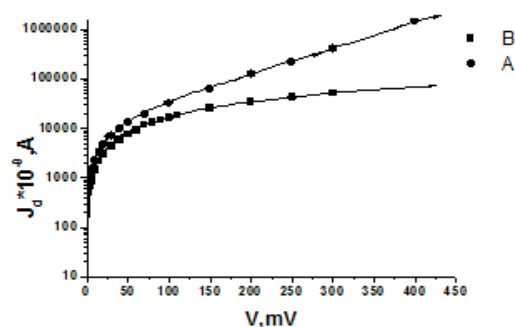


Рис.2 Темновая ВАХ поликристаллического кремниевого СЭ. А-прямая ветвь, В-обратная ветвь ВАХ.

анализа прямой и обратной ветви ВАХ [2] были оценены параметры носителей заряда в области объемного заряда:  $p_0 = 2,8 * 10^{10} \text{ см}^{-3}$ ;  $\mu_n * \tau_n = 3 * 10^8 \text{ см}^2/\text{В}$ , где  $p_0$  концентрация дырок в р-слое СЭ;  $\mu_n$  - подвижности электронов;  $\tau_n$  - время жизни электронов.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что в указанном интервале мощности освещения солнечным светом, ток короткого замыкания ( $I_{sc}$ ), значение фототока на макси-



муме мощности выходной ( $I_{\max}$ ) (рис.3), максимальное значение выходной мощности ( $P_{\max}$ ) СЭ согласно [3], растут линейно от мощности падающего излучения ( $P$ ) (рис.4).

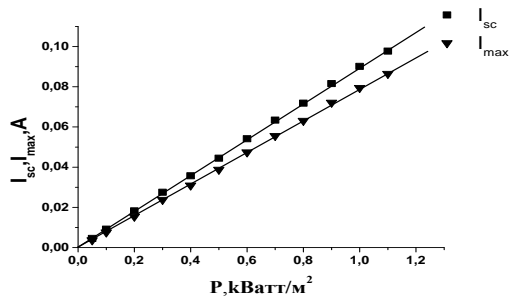


Рис.3 Зависимость тока короткого замыкания ( $I_{\text{кз}}$ ) и значение фототока на максимуме выходной мощности ( $I_{\text{max}}$ ) от мощности падающего излучения ( $P$ ) поли Si СЭ.

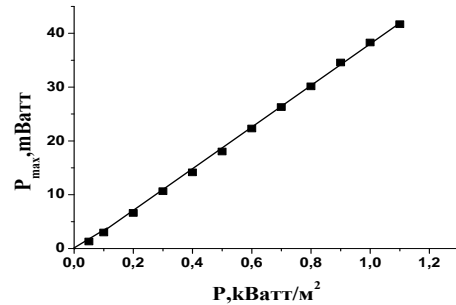


Рис.4 Зависимость максимального значения выходной мощности ( $P_{\text{max}}$ ) от мощности падающего излучения ( $P$ ) поли Si СЭ.

Напряжения холостого хода ( $V_{\text{oc}}$ ) и максимальное значение напряжения ( $V_{\text{max}}$ ) на максимуме выходной мощности (рис.5), коэффициент заполнения ВАХ (FF) и коэффициент полезного действия (КПД) (рис.6) сублинейно растут от  $P$ . КПД СЭ с ростом  $P$  увеличился от 11,5% до  $\approx 17\%$ , а FF растет от 60% до 70%.

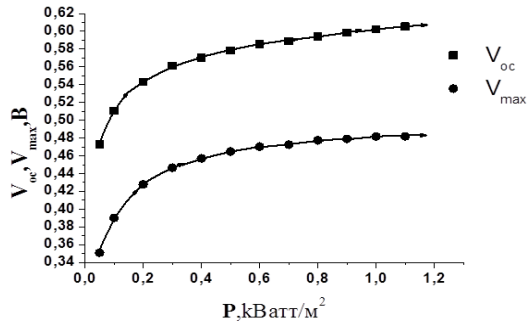


Рис.5 Зависимость напряжения холостого хода ( $V_{\text{oc}}$ ) и максимального значения напряжения ( $V_{\text{max}}$ ) на максимуме выходной мощности поли-Si СЭ от мощности падающего излучения ( $P$ ).

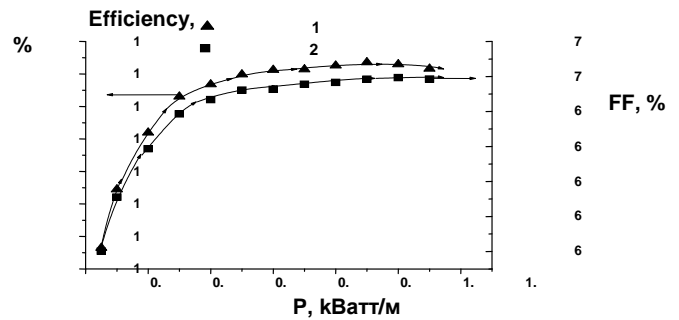


Рис.6 Зависимость КПД (Efficiency) -1 и коэффициента заполнения ВАХ (FF) - 2 поли-Si СЭ от мощности падающего излучения ( $P$ ).

На рис.7 дана экспериментальная зависимость тока короткого замыкания ( $I_{\text{sc}}$ ) (в полулогарифмическом масштабе) от напряжения холостого хода ( $V_{\text{oc}}$ ) поли-Si СЭ, полученная при освещении солнечном светом мощностью от 0,05  $\text{kW/m}^2$  до 1,1  $\text{kW/m}^2$ . В соответствии с [1,3], в случае идеального СЭ,  $V_{\text{oc}}$  зависит логарифмически от  $I_{\text{sc}}$  (1),

$$V_{\text{oc}} = \frac{nkT}{q} \ln \left( \frac{I_{\text{sc}}}{I_0} + 1 \right) \quad (1),$$

где,  $I_0$ –обратный ток насыщения,  $n$ –фактор неидеальности диода,  $k$ –постоянная Больцмана,  $T$ –абсолютная температура и  $q$ –величина заряда электрона. Построив зависимость  $\ln I_{\text{sc}}$  от  $V_{\text{oc}}$  (Рис.1) можно определить параметры  $I_0$  и  $n$  [3]. Из экспериментальных результатов следует, что в зависимости  $\ln I_{\text{sc}}$  от  $V_{\text{oc}}$  наблюдается два экспоненциальных участка с различными значениями  $I_0$  и  $n$ . Наблюдаемые экспериментальные результаты на рис.7, с учетом реальной структуры СЭ (рис.8) [3-5], описываются соотношением (2), который состоит из трех членов.

$$I_{\text{sc}} = I_{01} \left( \exp \left( \frac{q}{n_1 kT} U_{\text{oc}} \right) - 1 \right) + I_{02} \left( \exp \left( \frac{q}{n_2 kT} (U_{\text{oc}} - I_{\text{sc}} R_{\text{ser}}) \right) - 1 \right) + \frac{U_{\text{oc}}}{R_{\text{sh}}} \quad (2)$$

Где,  $R_{\text{ser}}$  и  $R_{\text{sh}}$ , последовательное и шунтирующее сопротивления СЭ. Для реального СЭ характерно наличие  $R_{\text{ser}}$ , которое складывается из последовательно включенных сопротивлений контактных слоев, сопротивлений каждой из  $p$ - и  $n$ -областей СЭ, переходных сопротивлений металл-полупроводник.  $R_{\text{sh}}$ -отражает возможные поверхностные и объемные утечки тока по сопротивлению, параллельному  $p$ - $n$ -переходу СЭ [3]. Соотношение (2) даёт возможность полностью описать экспериментальные результаты приведенные на рис.7. В области относительно низкого освещения  $P < 0.2 \text{ AM}$ , где  $J_{01} = 1.9 \cdot 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ ,  $n_1 = 2.0$ , и  $U_{\text{oc}} - I_{\text{sc}} R_{\text{ser}} \approx 0$ , второй и третий член, в соотно-

шении (2), малы и зависимость описывается первым членом в соотношении (2). В этом случае токоперенос определяется генерационно-рекомбинационным механизмом в области объемного заряда p-n-перехода СЭ, где  $n_1 = 2.0$  [3,5]. В области  $P > 0.2$  АМ, где  $J_{o2} = 9.2 \cdot 10^{-10}$  А/см<sup>2</sup> и  $n_2 = 1.36$ , и  $U_{oc} \gg I_{sc} R_{ser}$ , первый и третий член в соотношении малы и зависимость описывается вторым членом в соотношении (2). В этой области освещения токоперенос определяется диффузионным механизмом протекания через тонкий p-n-переход СЭ [3].

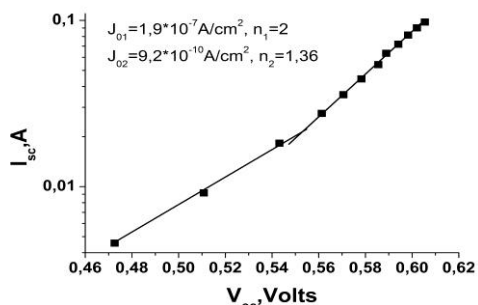


Рис.7 Зависимость тока короткого замыкания ( $I_{sc}$ ) от напряжения холостого хода ( $V_{oc}$ ) поли Si СЭ.

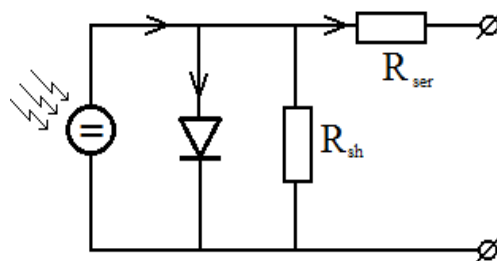


Рис.8. Эквивалентная схема реального солнечного элемента.

На рис.9 и рис.10 представлены экспериментальные результаты зависимости последовательного сопротивления  $R_{ser}$  и шунтирующего сопротивления  $R_{sh}$  поли Si СЭ, рассчитанные из нагрузочной ВАХ, при освещении солнечном светом мощностью от 0,05 кВт/м<sup>2</sup> до 1,1 кВт/м<sup>2</sup>.

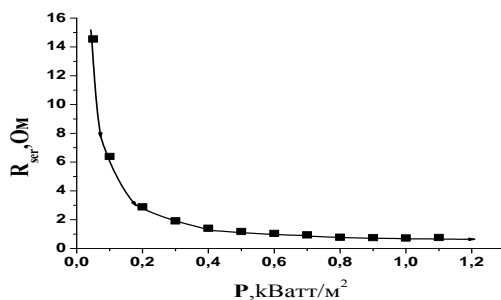


Рис.9. Зависимость последовательного сопротивления ( $R_{ser}$ ) поли Si СЭ от мощности падающего излучения ( $P$ ).

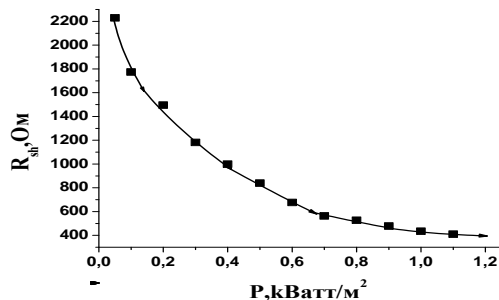


Рис.10. Зависимость шунтирующего сопротивления ( $R_{sh}$ ) поли Si СЭ от мощности падающего излучения ( $P$ ).

$R_{ser}$  и  $R_{sh}$ , для исследованного поли Si СЭ, уменьшаются с ростом  $P$ . Известно, что  $R_{ser,sh} = \rho \cdot l / S$ , где  $l$  – толщина приповерхностного слоя СЭ,  $S$  – площадь СЭ,  $\rho$  – удельное сопротивление материала.  $\sigma = 1/\rho = S / (R_{ser,sh} \cdot l)$ , т.е.,

$$\frac{1}{R_{ser,sh}} = \frac{q((n_o + \Delta n)\mu_n + (p_o + \Delta p)\mu_p)S}{l} \quad (3),$$

где  $\sigma$  – удельная электрическая проводимость,  $\mu_{n,p}$  – подвижность электрона и дырки,  $n_o, p_o$  – равновесная концентрация носителей в приповерхностном слое СЭ,  $\Delta n, \Delta p$  – концентрация неравновесных фотогенерированных носителей в приповерхностном слое СЭ.  $\Delta n = \Delta p$ ,  $\Delta n / \Delta p$  линейно растет от  $P$  [4]. Построив зависимость  $1/R_{ser,sh}$  можно установить закономерность изменения параметров нагрузочной ВАХ СЭ с ростом  $P$ . На рис.11 и рис.12 представлены экспериментальные зависимости  $1/R_{ser}$  и  $1/R_{sh}$  от  $P$  для поли Si СЭ.

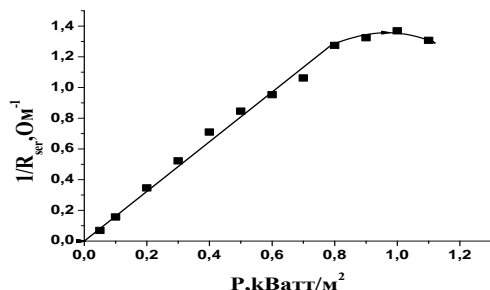


Рис.11 Зависимость  $1/R_{ser}$  поли Si СЭ от мощности падающего излучения (P).

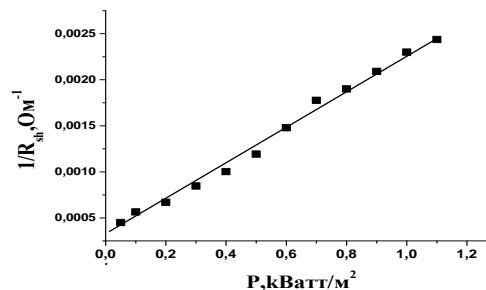


Рис.12 Зависимость  $1/R_{sh}$  поли Si СЭ от мощности падающего излучения (P).

Обратная величина ( $1/R_{ser}$ ) от P (Рис.11) линейно увеличивается с ростом P и выходит на насыщение при величине  $P = 0,9$  кВт/м<sup>2</sup>, т.е., приповерхностное сопротивление полупроводникового материала сравнивается с сопротивлением контактов, и дальнейшая модуляция слоев не приводит к уменьшению общего  $R_{ser}$ . Обратная величина ( $1/R_{sh}$ ), также линейно растет с ростом P (Рис.12).  $R_{sh}$ , в отличие от  $R_{ser}$ , включает в себя объемное сопротивление всей структуры. Согласно (3) ( $1/R_{sh}$ ) от P должна линейно расти (Рис.12), что отрицательно влияет на величину КПД СЭ, что и видно на Рис.6 величина КПД поли Si СЭ перестает расти. Для дальнейшего увеличения КПД поли Si СЭ необходимо достигнуть дальнейшего уменьшения  $R_{ser}$  и ограничить уменьшения  $R_{sh}$ .

#### ССЫЛКИ

- [1] SzeS.M., KwokK.Ng., 2007. Physics of Semiconductor Devices. Hoboken-New Jersey: Wiley-Interscience Publication, 3<sup>rd</sup>ed., P.823. [2] КабуловР.Р., идр. 2013, Физика и техника полупроводников, т. 47. вып. 6, 815-820. [3] Колтун М.М. Оптика и метрология солнечных элементов. 1985, М.: Наука, 280. [4] Фарербрух А., Бьюб Р., 1987. Солнечные элементы: Теория и эксперимент.-М.Энергоатомиздат, 280. [5] D.A.Aronov, R.R.Kabulov, Yu.M.Yuabov., 1988, Phys.Stat.Sol.(a) **109**, 211.

## ПОРТАТИВНАЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ПИТАНИЯ МАЛОМОЩНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Р.А.Муминов<sup>1</sup>, О.Ф.Тукфатуллин<sup>1</sup>, И.М.Комолов<sup>1</sup>

Физико-технический институт НПО «Физика – Солнце» АН РУз  
100084, Узбекистан, Ташкент, Юнусабадский район, ул. Бодомзор йули, 2Б, [oskar.tukfatullin@gmail.com](mailto:oskar.tukfatullin@gmail.com)

#### Аннотация

Рассмотрена конструкция, принцип работы и результаты испытаний переносной фотоэлектрической системы номинальным напряжением 12 В, предназначенной для питания портативной электроники. Проведён анализ процесса заряда аккумуляторной батареи в зависимости от особенностей работы фотоэлектрической панели. Описана методика расчёта электрических параметров контроллера заряда.

**Ключевые слова:** фотоэлектрическая панель, контроллер заряда, аккумуляторная батарея, испытания фотоэлектрической системы

#### 1. Введение

Стремление решить проблемы, связанные с обеспечением электрической энергией объектов испытывающих недостаток в ней или удалённых от электросети, стимулирует развитие техники в двух основных направлениях [1]. Первым, базовым, направлением следует считать создание автономных стационарных энергетических систем, основной задачей которых является обеспечение электрической энергией объектов коммунально-бытового, промышленного или сельскохозяйственного назначения. Ко второму, следует отнести направление, связанное с разработкой переносных источников электрической энергии для питания портативной электроники.

В данной работе рассмотрена конструкция фотоэлектрического портативного источника электрической энергии для питания маломощной электронных приборов, которая решает задачи в рамках второго направления.

## 2.1. Компоненты системы

Портативный источник электрической энергии представляет собой комплекс, состоящий из следующих блоков (рис. 1): фотоэлектрическая панель (ФЭП), блок аккумулялирования энергии (БАЭ) и внешний адаптер питания (АП).



Рис. 1. Структурная схема портативной фотоэлектрической системы.

ФЭП имеет размеры  $35,8 \times 30,5 \times 1,8$  см и состоит из двух последовательно соединённых рядов солнечных элементов. Ряды расположены вертикально. Каждый из них включает восемнадцать поликристаллических солнечных элементов площадью  $20,28 \text{ см}^2$ . Без учёта областей солнечных элементов затеняемых сеткой фронтальных контактов, площадь поверхности ФЭП участвующей в поглощении солнечного излучения превышает 98 % от общей площади. ФЭП способна в точке максимальной мощности генерировать ток  $I_{P\_max} = 0,556 \text{ А}$  и напряжение  $U_{P\_max} = 18 \text{ В}$ , что в стандартных условиях испытаний ( $AM\ 1,5$ ,  $E = 1000 \text{ Вт/м}^2$ ,  $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ) позволяет вырабатывать мощность  $P_{max} = 10 \text{ Вт}$ . Напряжение холостого хода ( $U_{XX}$ ) и ток короткого замыкания данной панели ( $I_{KЗ}$ ) равны  $21,6 \text{ В}$  и  $0,661 \text{ А}$  соответственно. Вольтамперная характеристика ФЭП, измеренная в стандартных условиях испытаний представлена на рис. 2.

БАЭ состоит из аккумуляторной батареи (АБ), контроллера заряда (КЗ), контрольно-измерительных приборов, индикаторов тока, выключателей и разъёмов для подключения источника энергии и внешней нагрузки.

АП представляет собой импульсный преобразователь постоянного напряжения  $12 \text{ В}$  в постоянное напряжение  $5 \text{ В}$ . Данный адаптер имеет два USB-разъёма предназначенных для заряда портативных электронных приборов суммарным током  $2 \text{ А}$ .

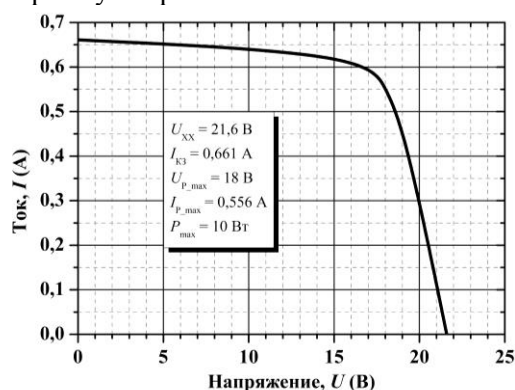


Рис. 2. Вольтамперная характеристика фотоэлектрической панели мощностью  $10 \text{ Вт}$ , измеренная в стандартных условиях испытаний ( $AM\ 1,5$ ;  $E = 1000 \text{ Вт/м}^2$ ;  $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

## 2.2. Принцип работы системы

АБ представляет собой герметизированный свинцово-кислотный химический источник тока призматической конструкции с номинальной ёмкостью  $8 \text{ А}\cdot\text{ч}$ . АБ является чувствительным электрическим устройством, требующим бережного отношения, особенно при зарядке [2]. Основной причиной выхода из строя АБ при зарядке является побочный процесс выделения газов. Выделение водорода начинается при полном заряде отрицательного электрода. Кислород начинает выделяться гораздо раньше: в обычных условиях заряда при  $50\div 80\%$  заряженности (в зависимости от тока заряда). Поэтому отдача положительного электрода по ёмкости составляет  $85\div 90\%$ . Для получения полной разрядной ёмкости при заряде аккумулятору должен быть обеспечен перезаряд на  $10\div 20\%$ . Этот перезаряд сопровождается значительным выделением водорода на отрицательном электроде и кислорода — на положительном. Разрушительные последствия этого процесса можно уменьшить, снизив зарядный ток. Для этого требуется устройство, которое согласует работу ФЭП и АБ таким образом, чтобы ток генерируемый панелью был использован полностью, что позволит заряжать батарею быстро, но при этом не повреждать её. Таким устройством являет-

ся КЗ, который, по существу, следит за уровнем заряда АБ и, в зависимости от него, управляет зарядным током.

Для реализации вышеописанного способа заряда подходит КЗ, работающий по принципу ON/OFF-регуляторов последовательного типа [3]. Рассмотрим процесс заряда батареи КЗ выбранного типа. Для этого проведём анализ на примере использованной в портативной фотоэлектрической системе КЗ, принципиальная схема которого представлена на рис. 3 [4]. Процесс заряда батареи КЗ выбранного типа осуществляется в два этапа. На первом этапе заряд ведётся постоянным током не превышающем  $0,1C$ , где  $C$  — номинальная ёмкость АБ. На втором этапе зарядный ток будет снижен до 2 % от ёмкости батареи. Большинство производителей рекомендуют производить заряд перезаряжаемых свинцово-кислотных батарей при постоянном напряжении  $2,40 \div 2,45$  В на элемент АБ [2].

Рассмотрим, позволяют ли параметры ФЭП обеспечить условия, при которых будет происходить безопасный заряд АБ. В разработанной конструкции портативной системы для АБ требуется количество электричества, превышающее номинальную ёмкость на 20 %, т.е.  $9,6$  А·ч. Для ясности рассмотрим условия, при которых заряд может быть восполнен ФЭП полностью: 1) в ясную погоду продолжительность солнечного свечения равна 10 ч; 2) плоскость батареи всё время перпендикулярна лучам солнца; 3) плотность потока излучения в ясную погоду остаётся неизменной и равной  $E = 1000$  Вт/м<sup>2</sup>; 4) температура ФЭП и окружающего воздуха постоянно равна  $25$  °С; 5) в течение недели имеются три ясных дня, когда и производится зарядка АБ.

Воспользуемся особенностью ФЭП, которая следует из графика вольтамперной характеристики (рис. 2). Точка перегиба на характеристике, определяет состояние панели, в котором вырабатывается максимальная мощность ( $P_{max}$ ). В самом деле, она разделяет два режима работы ФЭП. Выше неё панель выступает в роли генератора тока, а ниже — эквивалентна генератору напряжения. В выбранной конструкции КЗ на двух этапах заряда используется режим генератора тока.

В случае полного разряда АБ (достигнутого при разряде током величиной  $1C$ ) зарядный ток ( $I_{3,1}$ ) на первом этапе будет слабо изменяться в пределах от  $0,64$  А до  $0,63$  А (рис. 2), что в первом приближении следует считать как заряд постоянным током величиной  $I_{3,1} = 0,635$  А. Величина зарядного тока также не нарушает основное требование  $I_{3,1} \leq 0,1C$ . Ток беспрепятственно проходит без существенных потерь от ФЭП, подключенной к разъёму X1 до АБ, клеммы которой соединены с X2. Потерями проводимости на защитном диоде VD4 можно пренебречь (рис. 3). Таким образом, заряд АБ на первом этапе ведётся при постоянном токе величиной не превышающей  $0,1C$ , т.е. максимально возможный ток  $I_{3,1} \geq I_{p,max}$ , который может генерировать ФЭП, полностью используется для заряда АБ до момента, когда начинается процесс газовыделения. В случае полностью разряженной АБ ( $U_{AB,min} = 9,8$  В) потребуется менее 9 ч для достижения 80 % уровня заряда, что соразмерно с продолжительностью светлого времени суток в течение большей части года в широтах занимаемых Республикой Узбекистан.

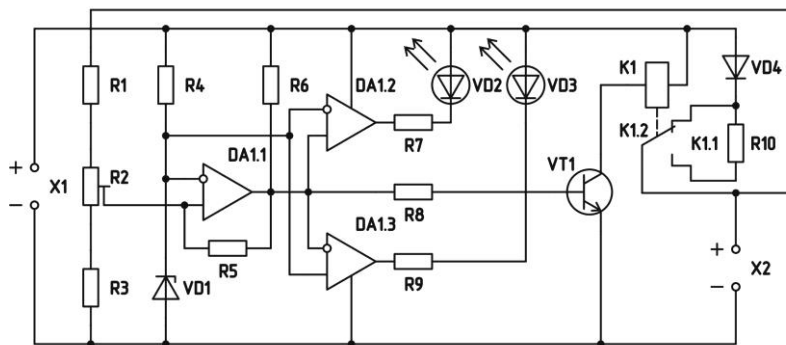


Рис. 3. Принципиальная схема контроллера заряда блока аккумулярования электрической энергии.

На втором этапе зарядный ток снижается до величины подпитывающего тока, равного  $0,16$  А. Определим величину сопротивления токоограничивающего резистора R10. Поскольку количество энергии требуемое для заряда АБ должно превышать номинальное значение минимум на 20%, а также учитывая рекомендации производителя [5] относительно величины зарядного напряжения, которое не должно превышать  $2,48$  В на элемент АБ, то напряжение необходимое для достижения полного заряда должно удерживаться на уровне  $U_{AB,max} = 14,9$  В. Для ранее установ-

ленных условий, за напряжение ФЭП примем значение соответствующее точке максимальной мощности  $U_{P\_max}$ . Выходное напряжение панели следует определить как

$$U_{P\_max} = U_{AB\_max} + U_{VD4} + U_{R10}, \quad (1)$$

где  $U_{VD1}$  — падение напряжения на диоде VD4, изменяющееся в пределах 0,5÷0,6 В,  $U_{R10}$  — падение напряжения на токоограничивающем резисторе R10 равно

$$U_{R10} = I_{3,2} R_{R10}. \quad (2)$$

Здесь  $I_{3,2}$  — безопасный для АБ ток необходимый для достижения полного заряда,  $R_{R10}$  — сопротивление резистора R10. Определим номинал резистора R10, подставив (2) в (1)

$$R_{R10} = (U_{P\_max} - U_{AB\_max} - U_{VD4}) / I_{3,2}, \quad (3)$$

откуда  $R_{R10} = 16,25$  Ом. Мощность, рассеиваемую таким резистором определим из

$$P_{R10} = (I_{3,2})^2 R_{R10}. \quad (4)$$

или  $P_{R10} = 0,416$  Вт. Опираясь на полученные данные, выберем из стандартного ряда E12 [6] резистор с ближайшим номинальным значением равным 15 Ом и мощностью 0,5 Вт. Подставив полученные значения в (1) получим выходное значение напряжения ФЭП  $U_{ФЭП} = 17,8$  В. Условие, при котором  $U_{ФЭП} < U_{P\_max}$  позволяет ФЭП работать в режиме генератора тока, даже при сдвиге точки максимальной мощности вверх, например, связанного с её нагревом в жаркий период года.

Чтобы достичь полного заряда АБ потребуется энергия превышающая на 20 % общий объем энергии, которую требуется запастись, что эквивалентно количеству энергии равному 3,2 А·ч. Такой объем энергии возможно накопить в АБ в течение 20 ч.

Следует отметить, что новые АБ в большинстве случаев выпускаются в заряженном состоянии, что сводит к минимуму период полного заряда перед использованием БАЭ в качестве источника энергии.

### 2.3. Конструкция контроллера заряда

Двухступенчатый способ заряда АБ возможно обеспечить обладая сведениям относительно уровня её заряда. Датчиком уровня заряда служит сама АБ. При достижении уровня заряда равного 80 % начинается процесс газовой выделению, после чего необходимо изменить зарядный ток. У герметизированной свинцово-кислотной АБ номинальным напряжением 12 В этот уровень соответствует напряжению  $U_{AB} = 12,6$  В. Напряжение АБ соответствующее 100 % заряду достигает величины 13,2 В. Для определения порога, при котором следует уменьшить зарядный ток служит компаратор DA1.1. Компаратор представляет собой операционный усилитель с очень высоким быстродействием. Высокое быстродействие для данной схемы имеет принципиальное значение, поскольку скорость изменения сигнала поданного на вход незначительна. Компаратор принимает на свои входы два сигнала, один из которых является эталонным или опорным, другой измеряемым или сравниваемым. Опорное напряжение подаётся на инвертирующий вход компаратора, а сравниваемое — на неинвертирующий вход компаратора. Согласно технической спецификации [7] выберем требуемую микросхему DA1.1. В данном случае выбрана микросхема LM339, состоящая из четырёх компараторов выполненных на одном кристалле.

В качестве источника опорного напряжения выступает параметрический стабилизатор, собранный на элементах VD1 и R4. Напряжение стабилизации достигается за счёт зенеровского диода-стабилитрона VD1. Через него должен протекать некоторый ток, поэтому нужно обеспечить выполнение следующего условия:

$$(U_{вх} - U_{вых}) / R_{R4} < I_{VD1\_max}, \quad (5)$$

где  $U_{вх}$  — нестабилизированное входное напряжение, поэтому в формулу (5) нужно подставить наименьшее возможное значение, которое следует принять за напряжение равное состоянию полностью разряженного аккумулятора  $U_{вх} = U_{AB\_min} = 9,8$  В, что позволит спроектировать схему для жёстких условий работы,  $U_{вых}$  — напряжение соответствующее напряжению пробоя стабилитрона равно порогу срабатывания компаратора при достижении 80 % уровня заряда  $U_{вых} = U_{VD1}$ . В качестве VD1 выберем стабилитрон типа 1N4735A с техническими данными:  $U_{VD1} = 6,2$  В — напряжение стабилизации,  $I_{стаб} = 41$  мА — ток стабилизации,  $I_{VD1\_max} = 146$  мА — максимальный ток стабилизации,  $P_{стаб} = 1$  Вт — максимальная рассеиваемая мощность [8]. Чтобы использовать этот диод в качестве источника опорного напряжения, необходимо обеспечить прохождение через него постоянного тока. Этого можно добиться с помощью резистора R4, номинал которого следует выбрать из стандартного ряда E24 [6] так чтобы рассеиваемая мощность не превышала 1 Вт. Для этого проведём предварительную оценку номинала R4:

$$R_{R4} = (U_{AB\_min} - U_{VD1}) / I_{стаб}, \quad (6)$$



после подстановки значений в (6) получим  $R_{R4} \approx 91 \text{ Ом}$ .

Проверим, не будут ли превышены предельно допустимые параметры стабилитрона при напряжении равном напряжению холостого хода ФЭП  $U_{XX}$ :

$$I_{\text{стаб}} = (U_{XX} - U_{VD1}) / R_{R4}. \quad (7)$$

Ток стабилизации ( $I_{\text{стаб}} \approx 169 \text{ мА}$ ) превышает максимальный ток стабилизации ( $I_{VD1\_max}$ ), поэтому необходимо увеличить номинал резистора R4 до 110 Ом, чтобы удовлетворялось условие (5), а именно  $I_{\text{вых}} < I_{VD1\_max}$ .

Максимальная мощность  $P_{\text{стаб\_max}}$  рассеиваемая стабилитроном VD1 при работе в жёстких условиях:

$$P_{\text{стаб\_max}} = [(U_{XX} - U_{VD1}) / R_{R4} - I_{\text{стаб}}] U_{VD1}, \quad (8)$$

что удовлетворяет условию  $P_{\text{стаб\_max}} < P_{\text{стаб}}$ , т.к.  $P_{\text{стаб\_max}} \approx 0,61 \text{ Вт}$ . Таким образом, максимально допустимые параметры стабилитрона не будут превышены.

Измеряемое напряжение на клеммах аккумулятора X2 делится на два делителем напряжения, состоящим из двух постоянных резисторов R1, R3 и переменного резистора R2 для точной подстройки порога переключения относительно источника опорного напряжения (рис. 3).

Входной ( $I_{\text{вх\_DA1.1}}$ ) ток выбранной микросхемы 0,25 мА. Ток через делитель напряжения ( $I_D$ ) для установки порогового значения напряжения, при котором происходит переключение, найдём исходя из условия:

$$I_D \geq (2 \div 4) I_{\text{нагр}}, \quad (9)$$

где  $I_{\text{нагр}}$  — ток через нагрузку.

Для рассматриваемого случая  $I_{\text{нагр}} = I_{\text{вх\_DA1.1}}$  значит  $I_D \geq (2 \div 4) 0,25 \geq 0,5 \div 1 \text{ мА}$ . Выбираем ток делителя  $I_D = 1 \text{ мА}$ . Определим номиналы резисторов R1, R2 и R3. Согласно закону Ома

$$R_D = U_{AB} / I_D, \quad (10)$$

где  $R_D = R1 + R2 + R3 = 12,6 \text{ кОм}$ . Подберём резисторы R1 и R3 из стандартного ряда E24 так, чтобы номинальная величина переменного резистора R2 была доступна из стандартно ряда величин. Следовательно,  $R1 = R3 = 1,3 \text{ кОм}$ , а  $R2 = 10 \text{ кОм}$ .

Таким образом напряжение на выходе компаратора DA1.1 устанавливается отрицательным, если напряжение AB опустится ниже 12,6 В, т.е. сигнал на неинвертирующем выходе опустится ниже предела определяемого VD1. Транзистор VT1  $n-p-n$ -типа будет закрыт, а значит, коллекторный ток равен нулю и реле K1 выключено. Нормально замкнутые контакты реле K1.1 шунтируют токоограничительный резистор R10. С ростом уровня заряда AB увеличивается напряжение AB и постепенно поднимается выше опорного, после чего на выходе компаратора устанавливается положительное напряжение. Транзистор открывается, и коллекторный ток включает реле. Контакты реле K1.1 переключаются таким образом, чтобы зарядный ток протекал через резистор R10.

Компараторы DA1.2 и DA1.3 предназначены для управления светодиодными индикаторами VD2 и VD3. Инвертирующий вход компаратора DA1.2 и неинвертирующий вход компаратора DA1.3 соединены со стабилитроном VD1, остальные выходы компараторов соединены с выходом компаратора DA1.1. Компаратор DA1.2 включает светодиод VD2 через токоограничивающий резистор R7, когда K3 работает в режиме большого зарядного тока, а компаратор DA1.2 включает светодиод VD3 через R9 во время работы K3 в режиме подпитывающего тока.

Номиналы элементов R1–R4 и R10 полученные в рамках вышеописанного метода отличаются от номиналов элементов рассматриваемых в [4].

### 3. Результаты испытаний

Результаты испытаний портативной фотоэлектрической системы для питания маломощных потребителей представлены семейством кривых на рис. 4. Напряжение AB вначале эксперимента  $U_{AB\_max} = 12,7 \text{ В}$ , что соответствует уровню заряда превышающему 80 %. Работающий индикатор тока VD3 свидетельствовал о работе K3 в режиме подпитывающего тока. Испытания проводились в естественных условиях под открытым небом. Во время испытаний наблюдались следующие показатели окружающей среды: средняя температура окружающего воздуха  $18 \text{ }^\circ\text{C}$ , ветер северо-западный со скоростью потока  $1 \div 3 \text{ м/с}$ , влажность воздуха  $\sim 45 \%$ , атмосферное давление  $\sim 760 \text{ мм рт. ст.}$  Угол наклона ( $\alpha$ ) ФЭП в ходе испытаний оставался неизменным, а величина его соответствовала оптимальной для начала весеннего периода и места испытания ( $\alpha \approx 42,94^\circ$ ). Ориентация относительно движения солнца изменялась с интервалом в 1 ч на величину  $\sim 15^\circ$ . Интенсивность потока солнечного излучения в солнечный полдень превышала  $900 \text{ Вт/м}^2$  после чего с каждым часом уменьшалась в среднем на  $100 \text{ Вт/м}^2$ . Испытания проводились преимущественно

при ясном небе. Однако следует обратить внимание на период 30÷40 мин. с момента начала испытаний, когда одно из рассеянных облаков повлияло на ход кривой зарядного с. 4. Зарядные характеристики портативной фотоэлектрической системы. Характерный для этого события временный провал зарядного тока происходит на фоне процессов связанных с распределением концентрации электролита вблизи поверхностей электродов АБ, которые приводят к кратковременному росту, а затем быстрому спаду, особенно при заряде слабым током. В связи с непродолжительностью процессов происходящих в АБ вначале заряда и трудностями, возникающими при однозначной их дифференциации, наибольший интерес представляет интервал продолжительностью 4,5 ч с 12:30 до 16:30, в течение которого заряд происходит в потенциостатическом режиме.

Средняя величина генерируемого напряжения  $U_{ФЭП\_cp} \approx 17,8$  В (рис. 4, кривая 2) соответствует расчётному значению напряжения ФЭП полученному из (4). Совпадение значения напряжения ФЭП полученного в эксперименте с расчётным значением на первый взгляд позволяет утверждать, что параметры элементов электрической цепи удовлетворяют условиям реальной работы КЗ. Тем не менее, следует уточнить номинал резистора R10 и оценить величину потерь связанных с питанием управляющих цепей КЗ.

Чтобы определить R10 воспользуемся (1) заменив  $U_{P\_max}$  реальным  $U_{ФЭП\_cp}$  и  $U_{АБ\_max}$  — средним значением напряжения на клеммах аккумулятора  $U_{АБ\_cp} = 14,2$  В (рис. 4, кривая 3). В результате подстановок получим  $U_{R10} = 3,1$  В. Ток, протекающий через резистор R10 ( $I_{R10} \approx 207$  мА) превышает максимально допустимый на 47 мА. Данное значение не является критической величиной, к тому же это обстоятельство приводит лишь к незначительному увеличению скорости заряда, что бывает крайне полезно при погоде с изменчивой облачностью. Тем не менее, если изменить номинал резистора R10 на 20 Ом, то это позволит снизить ток до требуемых 160 мА. Средняя величина тока потребляемого КЗ и АБ в интересующем нас интервале имеет среднюю величину  $I_{ФЭП\_cp} \approx 280$  мА. Остаточный ток, связанный с потерями на питание схемы управления следует определить как

$$I_{пот} = I_{ФЭП\_cp} - I_{R10}, \quad (11)$$

что сопоставимо с потерями по току  $I_{пот} = 73$  мА  $\approx I_{K1}$  на обмотке электромагнита реле К1 в условиях эксперимента. Следует подчеркнуть, что включение реле происходит на второй стадии заряда АБ, когда требуется снизить зарядный ток, что позволяет использовать избыток генерируемого ФЭП тока без потерь по току требуемого АБ.

Реальное время, которое потребуется на втором этапе, чтобы достичь состояния 100 % заряженности АБ при токе равном  $I_{R10}$  будет менее 17,5 ч.

#### 4. Выводы

Проведённый анализ режимов работы ФЭП и способов заряда свинцово-кислотной АБ позволил определить оптимальный тип КЗ для портативной фотоэлектрической системы, известный как ON/OFF-регулятор последовательного типа. Представленная методика определения электрических параметров основных элементов КЗ удовлетворяет проведённым испытаниям и может быть использована для проектирования систем большей мощности. В случае использования полностью разряженной АБ и сохранения оптимальных условий её заряда возможно накопление энергии в течение 2–3 дней на протяжении большей части года. Таким образом, рассмотренная конструкция портативной фотоэлектрической системы может использоваться в качестве полноценного источника энергии для питания маломощных потребителей.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1]. Klaus, P., 2003. Photovoltaic Systems, in: Luque, A., Hegedus, S. (Eds.), Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, pp. 753-798.
- [2]. Таганова, А.А., Бубнов, Ю.И., Орлов, С.Б., 2005. Герметичные химические источники тока: Элементы и аккумуляторы. Оборудование для испытаний и эксплуатации: Справ. ХИМИЗДАТ, СПб.
- [3]. Vervaart, M.R., Nieuwenhout, F.D.J., 2001. Solar Home Systems. Manual for the Design and Modification of Solar Home System Components. NetherlandsEnergyResearchFoundation, Petten.
- [4]. Байерс, Т., 1988. 20 конструкций солнечных элементами. Мир, М.
- [5]. Каталог продукции компании NecronEnergy, 2016. Станбул, Турция. (<http://www.necron.com.tr>)
- [6]. Акимов, Н.Н., Вашуков, Е.П., Прохоренко, В.А., Ходоренок, Ю.П., 1994. Резисторы, конденсаторы, трансформаторы, коммутационные устройства РЭА: Справ. Беларусь, Мн.
- [7] Datasheet LM339, LM339E, LM239, LM2901, LM2901E, LM2901V, NCV2901, MC3302. Single Supply Quad Comparators. Semiconductor Components Industries, LLC, 2016. (<http://www.onsemi.ru>)
- [8] Datasheet 1N4728A to 1N4749A. Voltage regulator diodes. NXP Semiconductors, 2009. (<http://assets.nexperia.com>).

## КУЁШ АВТОНОМ СИСТЕМАЛАРИ УЧУН ЭНЕРГИЯ ТЕЖАМКОР ИНВЕРТОР

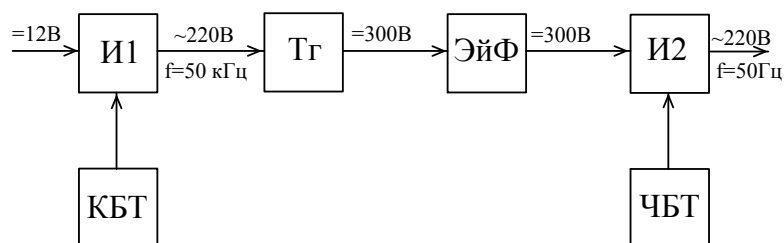
Ю.М.Мамасодиқов<sup>1</sup>, К.Р.Эргашев<sup>1</sup>, З.Ю.Мамасодиқова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ўзбекистон Республика Олий ва ўрта махсус таълим вазирлиги Фазгона политехника институти

<sup>2</sup>Ўзбекистон Республика Олий ва ўрта махсус таълим вазирлиги Андижон машинасозлик институти

Бугунги кунда дунёда энергиядан самарали фойдаланиш ҳамда уни тежаш муҳим масалалардан ҳисобланади. Ҳозирги кунда бутун жаҳон миқёсида долзарб муаммо бўлиб турган электр ва иссиқлик энергиясига кундан кунга эҳтиёж ошиб бормоқда. Бунга сабаб аънавий энергия қазилмабойликларини (нефт, кўмир, газ) камайиб бориши, уларни таннарҳини қимматлашиши, экологияни бузилиши ва шунга ўхшаш турли омилларни келтиришимиз мумкин. Шунинг учун амалиётда қўлланиладиган техник ва иқтисодий ҳарактеристикалари бўйича тежамли бўлган энергия тежамкор қурилмаларни яратиш муҳим аҳамиятга эга бўлиб қолмоқда.

Маълумки куёш батареяси доимий токини керакли кучланишли ўзгарувчан токка айлантиришда асосан инверторлар ишлатилади. Ҳозирги кунда саноатда қўлланилиб келинаётган одатий инверторларнинг умумий блок схемаси 1-расмда кўрсатилган. Улар одатда кириш инвертори И1 ва унинг бошқариш тизими КБТ, чиқиш инвертори И2 ва унинг бошқариш тизими ЧБТ, трансформатордан, тўғрилагич Тг ва энергия йиғувчи ЭйФ филтрдан ташкил топган бўлади [1].



1-Расм. Одатий инверторларнинг блок схемаси.

Одатий инверторларнинг умумий камчилиги уланинг фойдали иш коэффициентининг камлигидир. Чунки уларда доимий токни ўзгарувчан токка ўзгартириш жараёни уч босқичдан иборат.

Биринчи босқичда кучланиши 12 Вольт бўлган доимий токни частотаси 50 кГц ва кучланиши 220Вольт бўлган ўзгарувчан токка ўзгартиради.

Иккинчи босқичда частотаси 50 кГц ва кучланиши 220 Вольт бўлган ўзгарувчан токни доимий токка айлантиради.

Учунчи босқичда доимий токни кучланиши 220 Вольт ва частотаси 50Гц га тенг бўлган ўзгарувчан токка айлантиради.

Шунинг учун одатий инверторларнинг умумий фойдали иш коэффициенти қуйдагича аниқланади [2].

$$\eta_{\text{умум}} = \eta_{\text{И1}} \times \eta_{\text{Тг}} \times \eta_{\text{И2}} \quad (1)$$

бу ерда:  $\eta_{\text{И1}}$ - биринчи инверторнинг фойдали иш коэффициенти;  $\eta_{\text{Тг}}$ - тўғрилагичнинг фойдали иш коэффициенти;  $\eta_{\text{И2}}$ - иккинчи инверторнинг фойдали иш коэффициенти.

Тадқиқотлар натижаси шунини кўрсатдики RFA-1000 русимли ва шунга ўхшаш инверторлар 30-50 фойизли юкламада ишлаганда уни ташкил этувчилари, яъни биринчи ва иккинчи инверторлар ҳамда тўғрилагич энг юқори фойдали иш коэффициенти эга бўлади ва 0.9 ни ташкил қилади.

Шунинг учун RFA-1000 русимли ва шунга ўхшаш одатий инверторларнинг умумий фойдали иш коэффициенти (1) тенгликка асосан қуйдагича тенг бўлади.

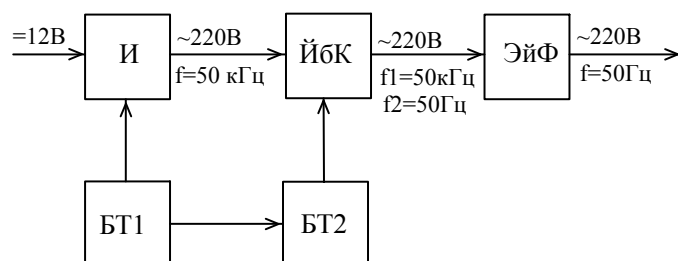
$$\eta_{\text{умум}} = 0.9 \times 0.9 \times 0.9 = 0.729 \quad (2)$$

Инверторларнинг фойдали иш коэффициенти хисоби шунини кўрсатдики инверторларда ҳар бир ўзгартириш босқичини киритилиши инверторларни умумий фойдали иш коэффициенти камайишига олиб келади.

Юқорида келтирилган таҳлилларга асосланиб шуни такидлаш мумкинки инверторларда ўзгартириш жараёни босқичларини камайтириш йўли билан уларнинг умумий фойдали иш коэффициенти оширилиши мумкин.

Демак қуёш автоном системалари учун энергия тежамкор инверторини яратиш учун инверторда ўзгартириш жараёни босқичини камайтилиши лозим.

Худди шу мақсада Фарғона политехника институтида қуёш автоном системалари учун энергия тежамкор инвертор яратилди. Яратилган инверторнинг блок схемаси 2-расмда келтирилган.

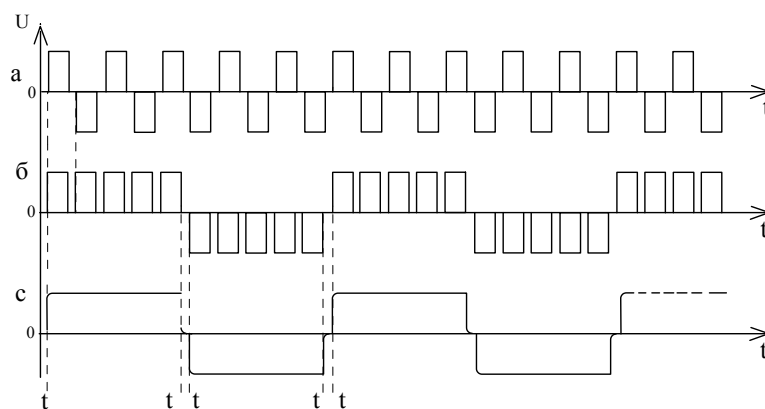


2-Расм. Қуёш автоном системалари учун энергия тежамкор инверторнинг блок схемаси.

бу ерда: И - кириш инвертори; ЙБК - тоқлар йўналишини бошқарувчи қалит; БТ1 - кириш инвертори бошқариш тизими; БТ2 - тоқлар йўналишини бошқарувчи қалит бошқариш тизими; ЭйФ - энергия йиғувчи филтр.

Қуёш автоном системалари учун энергия тежамкор инверторнинг блок схемасидан кўриниб турибдики инверторда ўзгартириш жараёни икки босқичдан иборат (2- расм).

Биринчи босқичда кучланиши 12 Вольт бўлган доимий токни частотаси 50 кГц ва кучланиши 220 Вольт бўлган ўзгарувчан токка ўзгартиради (3-расм, а).



3-Расм. Қуёш автоном системалари учун энергия тежамкор инверторнинг вақт диаграммаси.

Иккинчи босқичда кириш инверторида ҳосил қилинган ўзгарувчан ток, тоқларни йўналиши бўйича бошқарувчи қалит ЙБК орқали махсус усул билан частотаси 50 Гц бўлган ва ҳар бир ярим даври 50 кГц ли импульслар билан тўлдирилган ўзгарувчан токка айлантирилади (3-расм, б). Ҳосил бўлган ўзгарувчан ток энергия йиғувчи филтр ЭйФ да силлиқланиб соф 50 Гц ли ўзгарувчан токка айлантирилади ва керакли юкламага узатилади (3-расм, с).

Ўзгартириш жараёни икки босқичдан иборат инверторлар учун фойдали иш коэффициенти қуйдаги бўлади.

$$\eta_{\text{умум}} = \eta_{\text{и}} \times \eta_{\text{йбк}} \quad (3)$$

Бу ерда:  $\eta_{\text{и}}$ -кириш инверторининг фойдали иш коэффициенти;  $\eta_{\text{йбк}}$ -тоқлар йўналишини бошқарувчи қалитнинг фойдали иш коэффициенти.

Токлар йўналишини бошқарувчи калитлар худди кириш инвертори калитлари каби импульсли тўйиниш иш режимда ишлаганликлари учун уларнинг фойдали иш коэффициентини хам кириш инверторининг фойдали иш коэффициентига тенг қилиб олиш мумкин. Яъни  $\eta_{\text{йбк}} = 0.9$

У холда ўзгартириш жараёни икки босқичдан иборат инверторлар учун фойдали иш коэффициенти қуйдагига бўлади.

$$\eta_{\text{умум}} = 0.9 \times 0.9 = 0.81 \quad (4)$$

Агар яратилган инверторни фойдали иш коэффициентини RFA-1000 русимли инвертор фойдали иш коэффициенти билан таққосласак яратилган инверторда фойдали иш коэффициенти ютуғи қуйдагича бўлади.

$$\eta_{\text{умум}} = \eta_{\text{и1}} - \eta_{\text{и2}} \quad (5)$$

Яъни

$$\eta_{\text{умум}} = 0.81 - 0.729 = 0.081 \quad (6)$$

Охирги тенгликдан кўриниб турибдики инверторларда ўзгартириш жараёнини битта босқичга камайтириш орқали инверторларнинг фойдали иш коэффициентини 0.081 га оширилган.

## АДАБИЁТЛАР

- [1] Саидахмедов С.С., Хошимов О.О. Ўзгартиргич техникаси ва таъминот манбалари. Тошкент – 2003 й. [2] Славкин И.Т. Конструирование силовых полупроводниковых преобразователей. М. Энергоатомиздат, 1988 г.

## УПРАВЛЕНИЕ ПОТОКОМ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЕФОРМИРУЕМОЙ ОПТИКОЙ

И. Асфандияров

Астрономический институт АН РУз

Ташкент, 100052, Астрономическая 33, Узбекистан, ildar@astrin.uz

### Аннотация

*В работе представлены результаты исследования возможности управления потоком оптического излучения методами адаптивной оптики с помощью вторичного деформируемого зеркала для компенсаций неравномерности концентрации излучения возникающих в результате статических и тепловых деформаций первичных отражающих поверхностей и концентрирующих зеркал. Также, рассмотрены возможности управления деформируемым зеркалом с концентрацией излучения в фокальной плоскости в виде определенной формы с заданным распределением интенсивности, и возможности управления наклонами всего деформируемого зеркала для компенсации погрешностей при слежении системы за объектом излучения, такими как звезды или Солнце. Описанная система деформируемой оптики может быть использована для корректной фокусировки, авто-фокусировки и максимальной концентрации излучения в оптических телескопах или гелиоконцентраторах. Система может найти применение в астрономии для повышения углового разрешения и улучшения качества получаемых изображений, в гелиотехнике для эффективной фокусировки и управления формой распределения лучистой энергии Солнца или для равномерной концентрации излучения на фотоэлектрических преобразователях нового поколения.*

**Ключевые слова:** адаптивная оптика, деформируемое зеркало, концентрация излучения, управление потоком излучения, авто-фокусировка.

### 1. Введение

Для решения ряда задач связанных с концентрацией, фокусировкой и управлением лучистой энергией в таких областях как возобновляемая солнечная энергетика, лазерная физика, астрономия, гелиотехника, офтальмология и в других смежных областях фундаментальной физики и прикладной области, все большее значение приобретает внедрение и использование методов адаптивной оптики (АО). Интенсивное развитие современной электроники, уменьшение стоимости серийного производства различных электронных и оптических компонентов, постоянное развитие методов управления и программного обеспечения, делает возможным применение относительно недорогих адаптивно-оптических систем в различных областях физики, а также АО систем, которые могут найти широкое прикладное применение [1,2].

В настоящее время все более широкое прикладное значения АО системы приобретают в промышленных лазерных установках для термической обработки и высокоточной резки различ-

ных металлов и материалов. Применение АО системы в недорогой лазерной установке небольшой мощности, дает возможность значительно повысить КПД, эффективность, фокусировку и стабильность излучения, делая установку сопоставимой по качеству и мощности с дорогими системами и лазерами большой мощности. В фундаментальной физике применения АО систем дает возможность не только компенсировать искажения волнового фронта, но и управлять модовым и спектральным составом излучения. Также АО системы находят широкое применение в больших наземных астрономических телескопах, где позволяют компенсировать искажения, созданные атмосферной тепловой турбулентностью и получать качество изображений звезд сопоставимой с качеством с космических телескопов [3].

Применение простых решений и недорогих АО систем в области гелиотехники и прикладного применения концентрации энергии Солнца, может позволить повысить эффективность и стабильность работы гелиоконцентраторов за счет возможности более эффективной концентрации лучистой энергии, увеличения температуры в точке фокуса и возможности управления этой температурой. Более того, управляемые деформируемые зеркала АО систем могут позволить изменять форму и распределение интенсивности фокусируемого излучения Солнца на обрабатываемом изделии или на нагревателе в виде точки, круга, узкой полосы, прямоугольника. Это, может позволить получить требуемое качество обработки материала, или повысить эффективность поглощения своей сконцентрированной тепловой энергии Солнца. Также применение АО в концентраторах солнечной энергии может понизить стоимость изготовления главного параболического концентратора в результате снижения требований к жесткости и материалоемкости конструкции ферм и креплений отражающих поверхностей.

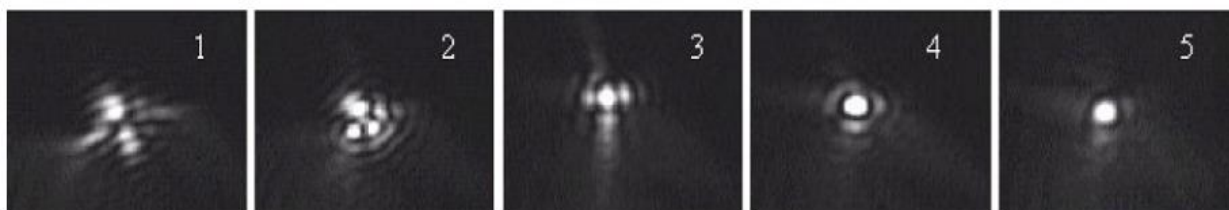


Рис.1. Результаты фокусировки лазерного излучения адаптивно оптической системой полученного менее чем за 1 секунду в результате 5 итераций.

Небольшие искажения, концентрируемого излучения, которые могут возникать в результате менее жесткой, но менее дорогой фермы и креплений, могут компенсироваться АО системой. Однако отметим, что качество, степень и зеркальность отражающей поверхности гелиоконцентратора должно быть максимально высокой, без матовости и царапин на поверхности и без создания диффузного рассеяния света, которые невозможно скомпенсировать даже с помощью АО. Также предпочтительней покрытие отражателей гелиоконцентраторов зеркальным алюминиевым слоем, как в астрономических зеркалах, так как алюминий имеет более лучшую отражающую способность к тепловому инфракрасному излучению Солнца, например, по сравнению с серебряным покрытием. Достаточно эффективными может оказаться применение АО систем в гелиоустановках параболического тарельчатого типа при преобразовании тепловой энергии в электрическую, при совмещении установки с двигателем Стирлинга.

На рисунке 1 показан результат авто-фокусировки лазерного излучения в результате работы АО системы полученного методом апертурного зондирования.

## 2. Искажения излучения

За редким исключением почти любая оптическая система неидеальна, что не позволяет максимально сфокусировать или сконцентрировать излучение. Искажения концентрируемого излучения возникают в результате статических и динамических деформаций в оптической установке, а также в результате искажений волнового фронта самого входящего излучения. Такие искажения волнового фронта входящего излучения создаются атмосферной тепловой турбулентностью, и проявляются, например как мерцание звезд. Даже при наличии идеальной оптики телескопа, атмосферная турбулентность не позволит получить изображение дифракционного качества ограниченного диаметром главного зеркала.

Статические деформации в оптических системах могут медленно и систематически изменяться от 1 до 10 лет и более, в зависимости от степени однородности материала линз, зеркал и жесткости монтажки, например в старых телескопах. Динамические деформации имеют харак-



терный диапазон изменения частот, 1-10 Гц и до суток, в зависимости от скорости изменения положения установки, вибраций монтировки, перепадов температур и сезонов года. Искажения в результате атмосферной тепловой турбулентности имеют характерный диапазон изменения частот 1-1000 Гц и более, в зависимости от степени турбулентности на луче зрения установки или телескопа. Статические искажения отражающих поверхностей образуются в результате изготовления, полировки или крепления концентраторов излучения. Как правило, большинство оптических концентраторов, такие как линзы и зеркала телескопов, отражающие резонаторы лазеров или параболоиды гелиоконцентраторов, имеют неидеальную отражающую форму, которая не позволяет максимально сфокусировать изображение до возможного дифракционного качества, или не позволяют максимально сконцентрировать лучистую энергию Солнца.

Динамические деформации, также присутствующие в любой оптической системе, обусловлены температурными изменениями форм зеркал, металлических систем креплений, или в результате деформации всей оптической системы или инструмента при наведении и слежении за излучающими объектами, такими как звезды или Солнце. Статические и динамические деформации зеркал относятся к инструментальным деформациям и существенно зависят от качества и стоимости изготовления оптики и компонентов инструмента.

### 3. Адаптивные оптические системы

Одним из эффективных решений максимальной концентрации энергии в существующих и проектируемых оптических системах, может быть применение систем АО. Общий принцип работы всех АО системы заключается в том что, часть излучения с оптического пути концентрирующей системы отводится для анализа его параметров, которые обрабатываются в реальном времени вычислительным устройством, для управления дополнительным деформируемым зеркалом, установленным в концентрирующую систему. Такая АО система работая по принципу обратной связи, позволяет сфокусировать излучение и компенсировать искажения волнового фронта, возникающих в результате статических и динамических деформаций узлов оптической системы, а также в результате атмосферных возмущений.

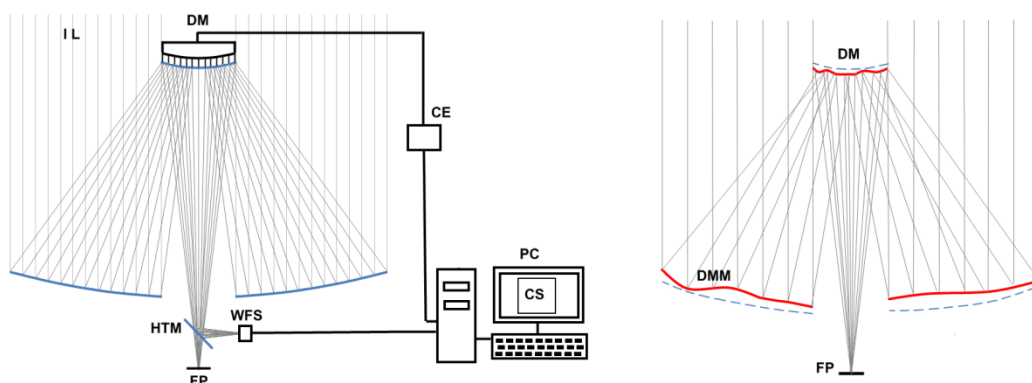


Рис.2. Слева – общая схема работы системы управления потоком излучения с деформируемой оптикой. Справа – принцип компенсации статически деформированного главного зеркала концентратора с помощью гибкого вторичного зеркала. Неровности главного зеркала и их компенсации вторичным деформируемым зеркалом (показано красным), сильно преувеличенны для наглядности. Пунктирными линиями показаны идеальные отражающие поверхности

В самом простейшем случае АО системы, например в гелиоконцентраторе солнечного излучения, может применяться статическое неуправляемое вторичное деформируемое зеркало, которое корректируется вручную с визуальным контролем степени фокусировки или корректируется для создания определенного распределения сконцентрированного излучения на мишени. Применение такого вторичного деформируемого зеркала снижает требования к точности изготовления формы главного концентратора, хотя жесткость его фиксации формы должна быть достаточной для стабильной работы для различных положений при направлении концентратора на Солнце.

На рисунке 2 показаны схема работы и основные узлы АО системы и схема компенсации статических деформаций главного зеркала. IL (incoming light) – поступающее излучение, DM (deformable mirror) – деформируемое зеркало, CE (control electronics) – электроника контроля гибкого зеркала, WFS (wave-front sensor) – датчик волнового фронта, HTM (half-transparent mirror) – полупрозрачное зеркало, FP (focal plane) – фокальная плоскость, PC (personal computer) – компьютер, CS (control software) – программа управления, DMM (deformed main mirror).

В зависимости от поставленной задачи, АО система для гелиоконцентратора может быть более совершенной с управляемым деформируемым зеркалом, датчиком фокусировки и управляющей электроникой, но оставаясь при этом достаточно простой и доступной по стоимости по сравнению с АО системами для лазерной техники или астрономии.

АО система астрономического телескопа является наиболее сложной, многокомпонентной и дорогой, так как имеет дело со сверхмалыми потоками излучения звезд, с большими частотами искажений и большим количеством и малым размером характерных ячеек турбулентности. Сверхмалый поток излучения звезд требует применения дорогих сверхвысокочувствительных приемников излучения.



Рис.3. Виды деформируемых зеркал. Слева деформируемое управляемое зеркало размером 220 x 220 мм. В центре - охлаждаемое деформируемое зеркало лазерного резонатора диаметром 100 мм. Справа – деформируемое зеркало в виде микросхемы размером 20 x 20 мм.

Высокая частота искажения входящего излучения, в результате турбулентности и ветра в атмосфере, требует получения высокоскоростных корректирующих изображений с датчиков волнового фронта и скоростной вычислительной обработки данных. А большое количество характерных ячеек турбулентности и их малые размеры в поле зрения телескопа требует применения нескольких многосегментных деформируемых зеркал с большими динамическими диапазонами и большими скоростями реакции.

#### 4. Система апертурного зондирования

Наряду с развитием и совершенствованием оптической и электронной составляющих АО систем, интенсивно совершенствуются методики контроля и программного обеспечения управления всей АО системой. Для эффективной фокусировки излучения, прошедшего через оптическую неоднородную среду, предпочтительно использовать метод апертурного зондирования.

Метод апертурного зондирования (или пробных возмущений) заключается в измерении реакции фокусируемого излучения на небольшие, преднамеренно вносимые фазовые искажения создаваемые деформацией управляемого гибкого зеркала. Контролируемым параметром в этом случае является либо яркость излучения, либо распределение интенсивности, либо некоторый функционал в сфокусированном пятне или рассеянного мишенью. Метод апертурного зондирования проводится с использованием частотного или временного способа. При частотном способе возбуждаются малые гармонические колебания  $a_i \sin(\omega_i t)$  с амплитудой  $a_i$  различных участков гибкого зеркала с различными частотами  $\omega_i$ . Дальнейший спектральный анализ результирующего сигнала позволяет установить величину и направление необходимых изменений формы и скорости фокусируемого излучения. Такой способ используется при больших частотах искажений, например искажения вносимой турбулентностью атмосферы.

Во втором, временном способе коррекции, проводятся возбуждения колебаний или малых деформаций отдельных участков гибкого зеркала осуществляемых последовательно во времени, и анализируется реакция распределения фокусируемого изображения. Далее, результаты апертурного зондирования анализируются с применением различных математических методов для поиска экстремумов функций и получения максимально возможной концентрации энергии. Заметим что, в зависимости от качества оптики установки, функционал фокусировки может иметь несколько экстремумов.

#### 5. Вывод

Таким образом, использование методов адаптивной оптики во многих областях прикладной и фундаментальной физики может привести к существенному прорыву, увеличению и качественному изменению получаемых результатов, а также к созданию совершенно новых полностью оптически управляемых систем и новых технологий.

## ЛИТЕРАТУРА:

[1] С.О. Галецкий, А.И. Беляков, Т.Ю.Черезова, А.В.Кудряшов, СОЗДАНИЕ МОДЕЛИ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ГЛАЗА МЕТОДАМИ АДАПТИВНОЙ ОПТИКИ // Оптический Журнал том 73, 7 стр.79-82(2006). [2] Baumhacker H., Pretzeler G., Witte K.J., Hegelich M., Kaluza M., Karsch S., Kudryashov A., Samarkin V., Rukosuev A., Correction of wavefront distortions and fluence profile modulation by closed-loop adaptive optics in a multi-stage Ti:S laser // Opt. Lett. 2002. V. 27. 17. P. 1570–1572. [3] C. Faure, D. Sluse, N. Cantale, M. Tewes, F. Courbin, P. Durrer, G. Meylan, VLT adaptive optics search for luminous substructures in the lens galaxy towards SDSS J0924+0219, // Astron. Astrophys. 536 (2011) A29

## СОЛНЕЧНАЯ ФОТОЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ ОБСЕРВАТОРИИ МАЙДАНАК

**И. Асфандияров, Ш.Эгамбердиев, Р.Салямов, Х. Султанов, Б. Хафизов, К. Эргашев**

*Астрономический институт АН РУз*

Ташкент, 100052, Астрономическая 33, Узбекистан, ildar@astrin.uz

### **Аннотация**

*В работе представлены результаты проектирования создания и эксплуатации солнечной фотоэлектрической станции (ФЭС) на 10 кВт в высокогорной астрономической обсерватории Майданак АН РУз, а также результаты энергоэффективной модернизации телескопа ЦЕЙСС-1000. Фотоэлектрическая станция была установлена для бесперебойного электроснабжения и непрерывной работы оптических телескопов астрономической обсерватории Майданак АН РУз с внедрением интеллектуальных электронных систем контроля, распределения энергии и дистанционного управления.*

**Ключевые слова:** солнечная фотоэлектрическая станция, энергоэффективность, интеллектуальные системы контроля, дистанционное управление.

### **Введение**

Правительство Узбекистана придает большое значение развитию альтернативной энергетики в стране. Этому существенно способствуют принятие необходимых законов и постановлений. Так за последнее время принято постановление № ПП-2343 «О Программе мер по сокращению энергоемкости, внедрению энергосберегающих технологий в отраслях экономики и социальной сфере на 2015-2019 гг.», а также в 2015 г. Правительством утверждена дорожная карта «Развитие солнечной энергетики в Узбекистане».

Для получения ощутимого эффекта от использования солнечной электроэнергетики и солнечной теплоэнергетики необходим основательный экономический и инженерный расчет учитывающий комплекс мер как по внедрению и запуску современного оборудования, так и по энергоэффективному потреблению и интеллектуальному распределению полученной энергии [1].

Обоснованный экономический и инженерный расчет необходим в каждом конкретном случае для реальной оценки эффективности внедрения альтернативной энергетики с учетом технических возможностей и потребностей, географического положения, ряда параметров поступающей солнечной энергии, стоимости оборудования и других факторов.

Применение современного оборудования позволит максимально эффективно преобразовывать и аккумулировать солнечную электрическую или тепловую энергию. Энергоэффективное потребление и интеллектуальное распределение полученной энергии подразумевает комплекс мер по модернизации потребителей энергии с целью внедрения энергосберегающих технологий энергопотребления и теплопотребления [2], модернизации или замены морально устаревшего оборудования для уменьшения энергопотребления и повышения КПД, а также внедрение интеллектуальных электронных систем для контроля, управления и распределения полученной солнечной энергии.

Одним из примеров внедрения альтернативной солнечной энергетики и энергоэффективной модернизации является введение в строй фото-электрической станции (ФЭС) на 10 кВт в обсерватории Майданак АН РУз и проведение масштабной модернизации оптического телескопа ЦЕЙСС-1000 для его эффективной работы с возможностью проведения непрерывных и дистанционных астрономических наблюдений по международным программам.

Обсерватория Майданак является уникальной научной астрономической обсерваторией по астроклиматическим показателям, и по географическому расположению. Обсерватория, с количеством ясных ночей более 2000 в год и превосходной стабильностью и качеством получаемых

изображений звезд со средним значением 0.7 угловых секунд может уверенно конкурировать с обсерваториями Европейских Южных Обсерваторий (ЕЮО) в Чили и с обсерваториями на Гавайских и Канарских островах [3]. Это также делает обсерваторию Майданак очень важным пунктом для мониторинговых наблюдений уникальных астрофизических объектов в международных проектах.

Создание ФЭС на обсерватории Майданак АН РУз выполнялось в рамках темы АН РУз ФА-А3-Ф015 «Создание системы автономного электропитания телескопов на основе солнечных фотоэлементов и интеллектуальных систем накопления и распределения энергии».

На рисунке 1 представлен общий вид ФЭС обсерватории Майданак АН РУз с общей площадью солнечных панелей 180 м<sup>2</sup>. На заднем фоне ФЭС, виден белый купол телескопа ЦЕЙСС-1000 на котором проведены масштабные работы по энергоэффективной модернизации. Солнечные панели подключены к блоку управления к которому также подключены аккумуляторных батареи.

### Проектирование, создание и запуск станции

В результате проведенных работ по созданию солнечной станции была подготовлена вся проектная документация, проведено компьютерное моделирование конструкций и расположение ФЭС на 10 кВтс учетом высокогорных метеоусловий, затенения и траектории Солнца. Были установлены панели типа YEG-72 CELL от производителя YINGLISOLAR, проведен монтаж электрической системы, гелиевых аккумуляторов типа 6-GFMJ-200 (12В 200Ач) с общей рабочей емкостью 43 кВт·ч. Также была подключена, сконфигурирована и запущена вся система ФЭС в тестовом режиме на 10 кВт с подачей солнечной электроэнергии на модернизированный телескоп ЦЕЙСС-1000.



Рис. 1. Общий вид солнечной фотоэлектростанции обсерватории Майданак

На рисунке 2 представлена общая схема созданной ФЭС обсерватории Майданак. Центральным узлом подключения является интеллектуальный блок управления инвертер-контроллер ETS-30KVA, выполняющий функцию контроля заряда аккумуляторов и отслеживания точки максимальной мощности на вольт-ампер характеристиках (ВАХ) солнечных элементов. К инвертеру-контроллеру ETS-30KVA подключены массив солнечных панелей, аккумуляторы энергии, телескоп ЦЕЙСС-1000 и внешняя электросеть.

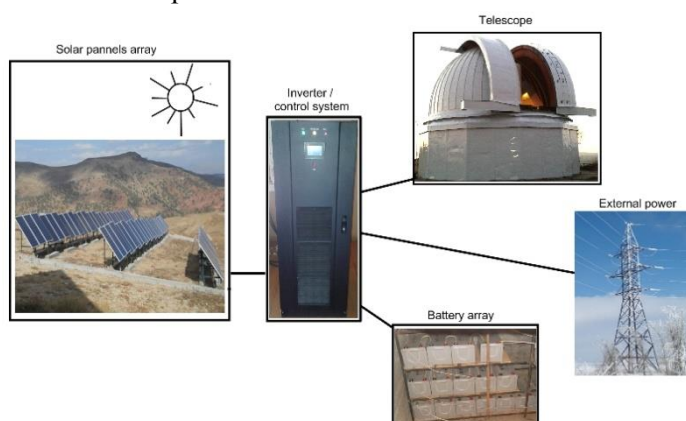




Рис.2.Общая схема созданной фото-электростанции обсерватории Майданак АН РУз

На рисунке 3 представлены результаты компьютерного 3-D моделирования расположения ФЭС обсерватории Майданак и диаграмма азимутальных координат траектории Солнца по месяцам и взаимное затенение панелей.

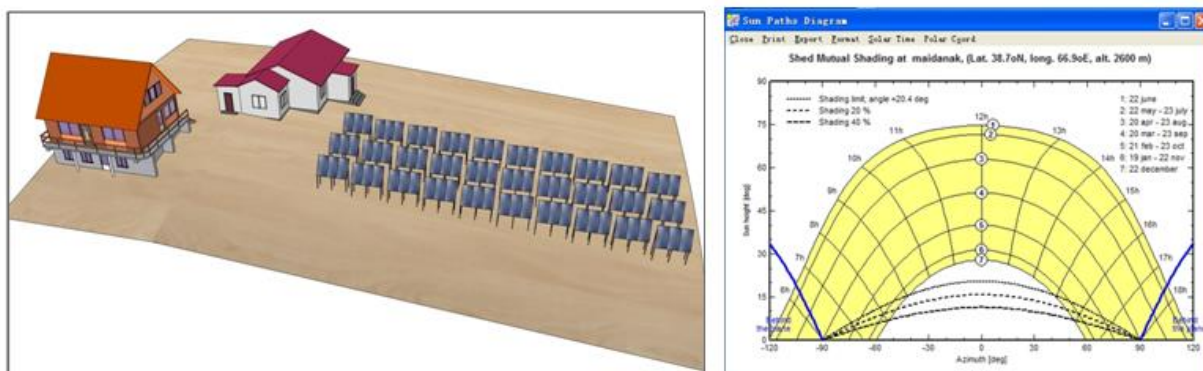


Рис. 3 . Моделирование расположения 90 солнечных панелей общей площадью 180 м<sup>2</sup> с учетом расположения зданий, наклона рельефа, затенения, сезонной инсоляции.

Работы по запуску ФЭС и модернизации телескопа ЦЕЙСС-1000 были проведены в сотрудничестве с Национальными астрономическими обсерваториями АН КНР (НАОК) Китая. Данное сотрудничество, осуществляемое в рамках Программы мероприятий по реализации положений Программы развития стратегического партнерства между Республикой Узбекистан и Китайской народной республикой, утвержденной протоколом № 72 заседания Президиума Кабинета министров РУз от 22 декабря 2014г. в п. 41, в котором предусмотрено «Развитие сотрудничества в области фундаментальных и прикладных исследований по астрономии между Академиями наук двух стран».

Результатом энергоэффективной модернизации проведенных совместных работ на телескопе ЦЕЙСС-1000 было получено среднее общее уменьшение энергопотребления работы телескопа и башни на 89%.

#### Результаты эксплуатации и анализ данных тестовой работы ФЭС-Майданак

ФЭС обсерватории Майданак была запущена с 22 сентября 2016 г. и продолжает работу в тестовом режиме с небольшой электрической нагрузкой в виде самого инвертера-контроллера ETS-30KVA и 36 гелиевых аккумуляторов используемых в режиме заряда. Как показывает анализ данных ежедневной выработки электроэнергии, в зимние периоды возможны даты, как с максимальной солнечной инсоляцией, так и даты полным отсутствием поступления на панели солнечного излучения (см. Рис. 4). Даты с максимальной инсоляцией, в некоторые зимние дни, можно объяснить максимальной чистотой неба от пыли, аэрозолей и отрицательной температурой с вымораживанием и выпадением всей воды из атмосферы над обсерваторией Майданак. Отсутствие и минимальные даты инсоляции объясняются обильным снегопадом в предыдущие даты и накоплением плотного слоя снега на фотоэлектрических панелях, а также абсолютной безветренностью в эти даты и продолжающимися осадками.

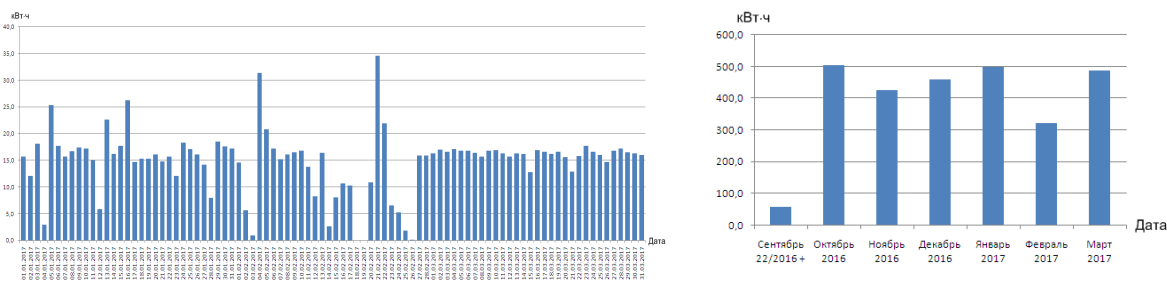


Рис.4 Слева - график ежедневной выработки электроэнергии ФЭС-Майданак с января по март 2017 г., которые также отображают метеоусловия и поступающее излучение от Солнца за эти периоды в обсерватории Майданак. Справа- график суммарной ежемесячной выработки электроэнергии ФЭС-Майданак с начала запуска станции с 22 сентября 2016 г. по март 2017 г.

Ветра в зимние месяцы в обсерватории Майданак не позволяют существенно скапливаться рыхлому снегу на плоскостях фотоэлектрических панелей, хотя могут приводить к заметаниям объемов снега за солнечными панелями.

ФЭС обсерватории Майданак АН РУз продолжает непрерывную работу с 22 сентября 2016г. по 31 марта 2017г. в тестовом режиме с минимальной нагрузкой, с общей выработанной электроэнергией в объеме 2293 кВт·ч.

## ЛИТЕРАТУРА:

[1] I. Kougiyas, K. Bódis, A. Jäger-Waldau, M. Moner-Girona, F. Monforti-Ferrario, H. Ossenbrink, S. Szabó, The potential of water infrastructure to accommodate solar PV systems in Mediterranean islands // Solar Energy 136 (2016) 174–182 [2] T. E. Kuhn // State of the art of advanced solar control devices for buildings, Solar Energy (2016) in press. [3] S. A. Ehgamberdiev, A. K. Bajumanov, S. P. Ilyasov, M. Sarazin, Y. A. Tillayev, A. A. Tokovinin, and A. Ziad, The astroclimate of Maidanak Observatory in Uzbekistan // Astron. Astrophys. Suppl. Ser. 145, 293-304 (2000)

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТОДИОДНОЙ ЛЮСТРЫ С ТЕПЛОВЫМИ ТРУБАМИ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ПИТАНИЯ ЕЕ ОТ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

<sup>1</sup>Ю.Е.Николаенко **1**, А.В.Баранюк<sup>2</sup>, Т.Ю.Николаенко

<sup>1</sup>Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»,  
г. Киев, проспект Победы, 37, 03056, Украина.

**E-mail:** [yunikola@ukr.net](mailto:yunikola@ukr.net)

[y.nikolaenko@kpi.ua](mailto:y.nikolaenko@kpi.ua)

<sup>2</sup> Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,  
г. Киев, ул. Владимирская, 60, 01033, Украина.

### Аннотация

С целью расширения областей использования возобновляемых источников энергии предложено для освещения жилых помещений широко использовать светодиодные подвесные люстры принципиально новой конструкции с электропитанием от солнечных панелей. Приведена структурная схема построения комбинированной системы электропитания подвесной люстры с тепловыми трубами с использованием солнечной энергии. Впервые разработан, изготовлен и исследован действующий макет светодиодной люстры принципиально новой конструкции, каркас которой выполнен из тепловых труб с резьбовой капиллярной структурой, а в качестве источников света использованы объемные светодиодные модули, что вдвое увеличило световой поток по сравнению со светодиодными лампами прямой замены. Приведены температурные зависимости светодиодных источников света при потребляемой электрической мощности светодиодного модуля в диапазоне от 2,3 до 26,7 Вт.

**Ключевые слова:** солнечная энергия, люстра, светодиодный модуль, тепловая труба, резьбовая капиллярная структура.

### 1. Введение

К 2030 году потребление энергоресурсов в мире увеличится в 1,5 раза, причем в его структуре будут преобладать органические виды топлива: нефть – 33%, уголь – 26 % и природный газ – 22 % (Долинский и Драган, 2015). Вместе с тем, при сжигании органического топлива с целью получения энергии в атмосферу выделяется значительное количество углекислого газа, приводящего к глобальному потеплению, и миллионы тонн вредных частичек, 15% из которых имеют размеры меньше 5 мкм. При вдыхании они попадают в легкие, а дальше в кровь и другие важные органы человека, что может стать причиной тяжелых заболеваний (Долинский и Драган, 2015). Кроме того, при сжигании угля, в котором содержатся естественные радионуклиды (уран, торий, радий, свинец и другие радиоактивные изотопы), происходит постоянный выброс в атмосферу радиоактивных веществ. Риск заболеваний, обусловленных радиоактивными выбросами тепловых электростанций, на два порядка выше, чем риск, обусловленный радиоактивными выбросами атомных электростанций при условии их нормальной эксплуатации (Коваленко, 2015).

Улучшения экологического состояния окружающей среды можно достичь путем уменьшения энергопотребления, снижения использования органических видов топлива и расширения использования вместо них возобновляемых источников энергии. Одним из эффективных возобнов-



ляемых источников энергии является солнечная энергия. Солнечные электростанции широко используются для получения электрической энергии в промышленных целях. Возможность размещения солнечных панелей на крышах, балконах и фасадах жилых зданий создает благоприятные условия для индивидуального использования солнечной энергии в бытовых целях. Значительным, до настоящего времени практически неиспользованным, потенциальным резервом экономии электроэнергии является освещение жилых помещений с использованием солнечной энергии.

## **2. Постановка проблемы, анализ известных решений, цель и задачи исследования**

На освещение тратится от 19 до 22 % электроэнергии, вырабатываемой в мире (Zakgeim, 2013), значительная часть которой идет на освещение жилых помещений. В качестве бытовых осветительных приборов широко используются декоративные подвесные люстры с несколькими источниками света. Наиболее часто в качестве источников света по-прежнему применяются недорогие лампы накаливания, обладающие достаточно низкой световой отдачей и непродолжительным сроком службы, и компактные люминесцентные лампы, содержащие ртуть и требующие специальных мероприятий по их утилизации. В связи этим, разработка экологически чистых и энергосберегающих осветительных приборов для бытового освещения с возможностью использования для их энергоснабжения возобновляемой солнечной энергии, является актуальной проблемой.

Решение указанной проблемы в настоящее время осуществляется в основном двумя путями:

- в многоквартирных домах – путем перехода на использование в подвесных люстрах вместо ламп накаливания светодиодных ламп прямой замены (СДЛПЗ), подключенных к централизованной электросети, которые по конструктивному исполнению идентичны лампам накаливания;
- в индивидуальных домах, оснащенных фотоэлектрическими установками (ФЭУ), преобразующими солнечную энергию в напряжение 220 В переменного тока, необходимое для питания мощной бытовой техники, – путем подключения осветительных приборов к этой сети.

Рассмотрим более подробно особенности и ограничения этих двух путей энергосбережения в сфере внутреннего освещения жилых помещений.

Световая отдача серийных светодиодов (СД) достигает значений 125–150 лм/Вт и с каждым годом растет, в то время, как световая отдача ламп накаливания остается неизменной и составляет 8–13 лм/Вт. Американская компания Cree уже создала белые светодиоды со светоотдачей, равной 303 лм/Вт (Cree, 2014), что в 30 раз экономичней ламп накаливания. В настоящее время выпускается большое разнообразие СДЛПЗ (Lishik et. al., 2010). Однако их мощность, а соответственно и световой поток, ограничены значениями порядка 10–13 Вт. Это ограничение связано с тепловой проблемой. Как известно, около 75 % потребляемой СД электроэнергии выделяется в виде теплоты, что приводит к росту температуры кристаллов СД. С повышением температуры существенно снижается срок службы и ухудшаются световые и цветовые характеристики СД. Хотя СДЛПЗ и снабжаются средствами охлаждения, такими как радиаторы, воздушные каналы, заполнение баллона лампы инертным газом и т.п. (Lishik et. al., 2010), из-за ограничений на габаритные размеры ламп не удается существенно развить поверхность теплообмена и повысить их мощность, а соответственно, и световой поток. При установке СДЛПЗ в плафон люстры тепловой режим СД дополнительно ухудшается из-за ухудшения условий теплообмена внутри плафона.

Повышение эффективности охлаждения светодиодных источников света в составе люстры может быть осуществлено реализацией принципиально новых конструктивно-технологических решений (Nikolaienko and Nikolaenko, 2015), суть которых заключается в выполнении каркаса люстры из тепловых труб (ТТ) (Kozak and Nikolaenko, 2016; Kravets et. al., 2007), обладающих в десятки и сотни раз более высокой эквивалентной теплопроводностью по сравнению с металлами. При этом источниками света вместо СДЛПЗ служат объемные светодиодные модули (СДМ), устанавливаемые в зоне испарения ТТ. Предварительные оценочные расчеты, выполненные нами, показали, что благодаря высокой эффективности отвода теплоты с помощью ТТ, мощность СДМ в люстре, а соответственно и их световой поток, могут быть увеличены, по меньшей мере, вдвое по сравнению со СДЛПЗ без нарушения нормального теплового режима СД. Это позволяет вдвое уменьшить количество источников света в люстре или количество люстр, необходимое, например, для освещения помещений большой площади или помещений с высокими потолками. Вместе с тем, отсутствие экспериментальных исследований в этом направлении сдерживает разработку и внедрение в практику бытового освещения мощных энергоэффективных светодиодных люстр с ТТ.

Что касается использования ФЭУ для питания бытовых осветительных приборов, то такие технические решения все чаще используются в индивидуальных домах с установкой солнечных

панелей на крыше дома. В многоквартирных домах более ранней постройки, преобладающих в жилищном секторе на постсоветском пространстве, установка ФЭУ не была предусмотрена, что не позволяет использовать солнечную энергию для освещения. В последнее время появилось сообщение о возможности выдачи в Российской Федерации разрешений на индивидуальную установку солнечных панелей на фасадах и крышах многоквартирных домов (Россиянам, 2017). В связи с этим актуальной является разработка комбинированных систем энергоснабжения подвесных светодиодных люстр с учетом особенностей питания и теплового режима СДМ и возможности использования индивидуальных для каждой квартиры многоэтажного дома небольших солнечных ФЭУ, панели которых можно было бы устанавливать на балконах или фасадах зданий.

Целью данной работы является расширение возможностей использования солнечной энергии для освещения жилых помещений. Задачами исследования являются разработка структурной схемы комбинированного электропитания светодиодной люстры с ТТ с использованием солнечной энергии и разработка, изготовление и экспериментальное исследование тепловых и электрических характеристик действующего макетатакой люстры.

### 3. Основные типы светодиодных люстр с тепловыми трубами и структурная схема их электропитания с использованием солнечной энергии

На рис. 1 внизу приведено схематическое изображение трех типов светодиодных люстр, декоративный каркас которых изготовлен из тепловых труб 1: с отогнутыми вверх концами ТТ с установленными на них СДМ 2; с отогнутыми вниз концами ТТ; с концами ТТ, расположенными горизонтально, соответственно. СДМ 2 находятся в светорассеивающих плафонах 3. Противоположные от СДМ концы ТТ снабжены радиаторами 4 и подвесами 5. С помощью электропроводов 6 люстры подключены к небольшой солнечной ФЭУ 7.

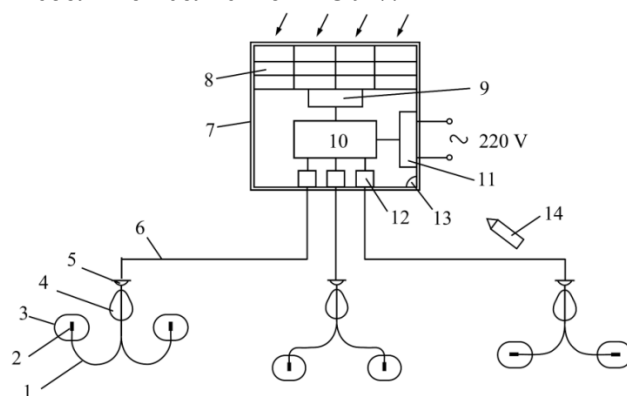


Рис. 1. Структурная схема комбинированного электропитания светодиодной люстры с тепловыми трубами

Особенностью электропитания и работы СД является использование источников постоянного тока и небольшое значение прямого падения напряжения на СД (например, на СД типа Cree XLamp MX-6 при токе питания 350 мА падает всего 3,4 В, а при токе 700 мА – 3,8 В). Это дает возможность питать светодиодные люстры постоянным током от небольших маломощных солнечных ФЭУ без промежуточного преобразования постоянного тока в переменный ток напряжением 220 В, как это имеет место в более мощных ФЭУ, устанавливаемых в индивидуальных домах для питания мощной бытовой техники (стиральных машин, холодильников, утюгов и т.п.).

Предпочтительным вариантом структурной схемы электропитания светодиодной люстры представляется схема комбинированной системы электропитания на основе небольшой солнечной ФЭУ с использованием контроллера заряда 9 и аккумуляторной батареи (АКБ) 10 с возможностью зарядки ее также от централизованной электросети с использованием электронного устройства 11 (см. рис. 1). Это обеспечит возможность работы люстры в периоды года, когда интенсивности падающего солнечного излучения может оказаться недостаточно для зарядки АКБ до необходимых режимов. Устройства формирования токов питания 12 формируют постоянный ток с параметрами, необходимыми для питания СДМ. Для включения и выключения светодиодной люстры предусмотрены датчик 13 приема и обработки сигналов и пульт дистанционного управления (ПДУ) 14.

Принцип работы светодиодной люстры с такой системой электропитания заключается в следующем. В светлое время суток энергия солнечного излучения (на рис. 1 поток солнечного излу-

чения условно показан стрелками) падает на фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) солнечной панели 8 и преобразовывается ими в электрическую энергию. Электрическая энергия с помощью контроллера заряда 9 заряжает АКБ 10 до рабочих параметров. В темное время суток с помощью ПДУ 14 подают сигнал включения на датчик 13, который обеспечивает подачу электрической энергии от заряженной АКБ 10 к устройствам формирования токов питания 12. Последние формируют постоянный ток с параметрами, необходимыми для питания СДМ 2. При прохождении тока через СДМ они излучают световой поток, который с помощью плафонов рассеивается в пространство жилого помещения. При этом в СДМ выделяется теплота, которую необходимо отводить. Теплота отводится тепловыми трубами 1к радиатору 4 и рассеивается им в окружающий воздух свободной конвекцией воздуха, что обеспечивает заданный тепловой режим и надежную работу СДМ. Выключение светодиодной люстры осуществляется с помощью ПДУ 14.

С наступлением светлого времени суток на следующий день АКБ 10 автоматически подзаряжается до необходимых рабочих параметров от солнечной панели 8, что обеспечивает дальнейшую автономную работу люстры в темное время суток. Необходимость использования электроэнергии для подзарядки АКБ от централизованной электрической сети может возникнуть лишь в периоды года с низким уровнем освещенности поверхности ФЭП солнечным излучением.

#### 4. Экспериментальный макет светодиодной люстры с тепловыми трубами

Для проведения экспериментальных исследований был разработан и изготовлен действующий макет светодиодной люстры второго типа –с отогнутыми вниз концами ТТ (рис. 2).

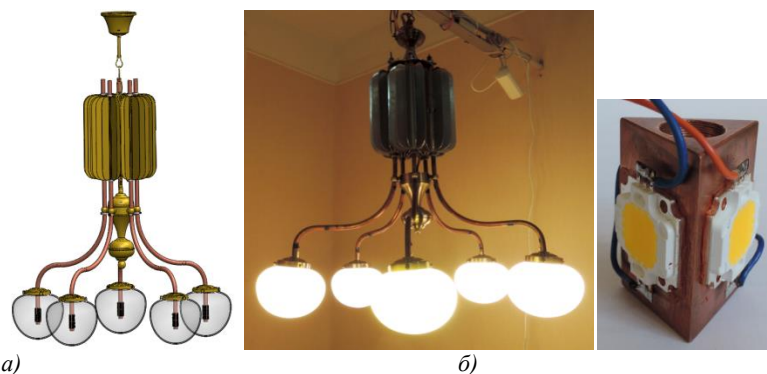


Рис. 2. Трехмерная компьютерная модель (а) и внешний вид (б) макета пятирожковой светодиодной люстры с тепловыми трубами; внешний вид объемного светодиодного модуля (в).

Каркас светодиодной люстры одновременно является системой теплоотвода и выполнен из пяти изогнутых ТТ, на которых установлены объемные СДМ, размещенные в светорассеивающих плафонах. Плафоны и другие декоративные элементы для экспериментального макета взяты из серийной люстры FERNANDEZ 92109, E27, 5x60 Wавстрийской компании EGLO.Для повышения эффективности теплообмена в зоне испарения ТТ на ее внутренней поверхности выполнена резьбовая капиллярная структура. Внутренняя поверхность ТТ в зонах транспорта и конденсации капиллярной структурой не покрывалась. В качестве теплоносителя использовался хладон 141b. В зоне конденсации ТТ закреплены пластинчатые радиаторы. Площадь поверхности каждого радиатора  $-3040 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ . Теплота, выделяемая светодиодными модулями, эффективно отводится с помощью ТТ на удаленное расстояние и рассеивается в окружающий воздух с помощью радиаторов.

Три светодиодные матрицыкомпании Epistar устанавливались с помощью теплопроводного герметика на плоских гранях основания СДМ со сквозным резьбовым отверстием (см. рис.2, в), и соединялись между собой в последовательную электрическую цепь. Мощность светодиодной матрицы при токе 1000 мА-10Вт, световой поток-800 лм.С помощью резьбового отверстия СДМ устанавливался на нижний конец изогнутой ТТ с нанесенной резьбой, диаметр и шаг которой были такими же, как и у СДМ. В зону резьбового соединения вводилась теплопроводная паста КПП-8.

#### 5. Экспериментальная установка, методика и результаты исследований

Экспериментальная установка включала в себя рабочий участок (рис. 3), систему электропитания постоянным током и систему измерения температурного поля. В качестве источника электропитания постоянного тока использовался прибор типа Б5-49, позволяющий подавать на СДМ постоянный ток в пределах от 0 до 1000 мА.

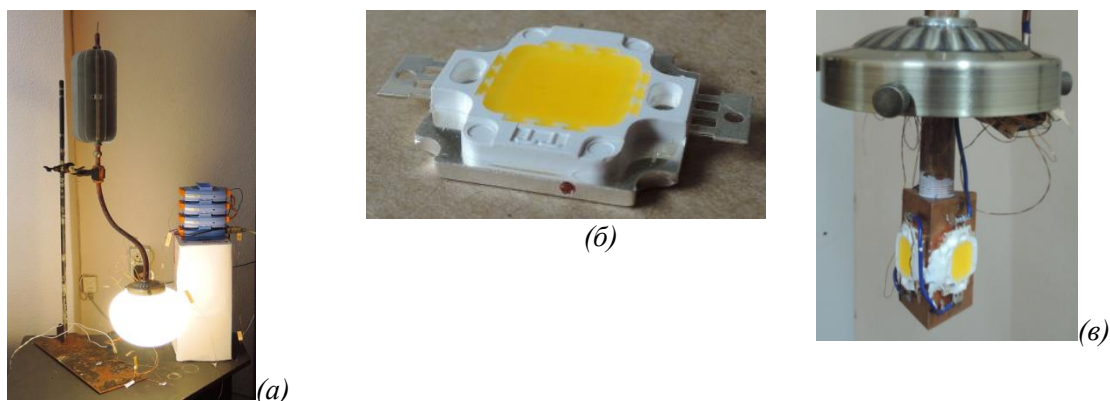


Рис. 3. Рабочий участок: (а) внешний вид одного рожка люстры на штативе; (б) светодиодная матрица с отверстием под установку термопары; (в) СДМ с термопарами, установленный на ТТ, без плафона.

Система измерения температурного поля состояла из 19 медь-константановых термопар с диаметром электродов 0,2 мм и 0,16 мм соответственно. Спаи термопар были зачеканены в отверстиях диаметром 0,5 мм, глубиной 6 мм, просверленных в теплопроводном основании каждой светодиодной матрицы (см. рис. 3,б). Электроды термопар были подключены к трем аналого-цифровым преобразователям модели i-7018 фирмы ICP CON. С помощью преобразователя интерфейсов модели i-7520 аналого-цифровые преобразователи сигналов подключались к ПЭВМ. Программа EZDataLoggerBasicEdition v. 4.1.0 фирмы ICP CON обеспечивала сбор и обработку информации от термопар через каждые 0,5 с.

В процессе исследований определялись значения потребляемой СДМ мощности и их температура. Потребляемая мощность определялась по току и напряжению на СДМ. Ток питания изменялся в пределах от 100 до 1000 мА ступенчато через каждые 100 мА. При изменении тока в широких пределах изменение падения напряжения на СДМ было незначительным. Так, например, при изменении тока питания СДМ в 10 раз (от 100 до 1000 мА) падение напряжения на модуле изменялось всего в 1,14 раз (от 23,4 до 26,7 В). При этом потребляемая электрическая мощность СДМ находилась в пределах от 2,3 до 26,7 Вт. Во всех исследованных электрических режимах после установления стационарного теплового режима измерялось температурное поле СДМ.

В качестве примера, на рис. 4 приведена зависимость температуры трех светодиодных матриц компании Epistar (1, 2, 3 – их порядковые номера) одного из пяти СДМ люстры от потребляемой модулем электрической мощности в диапазоне исследованных значений от 2,3 до 26,7 Вт.

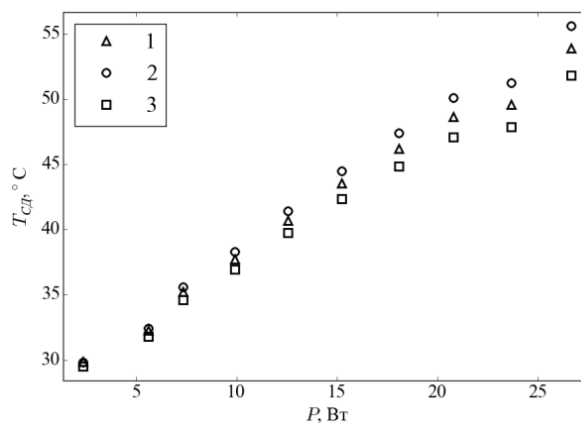


Рис. 4. Зависимость температуры  $T_{CD}$  светодиодных источников света от потребляемой ими мощности  $P$

Как видно из графика, температура основания светодиодных матриц  $T_{CD}$  увеличивается с увеличением мощности  $P$  и при максимальной потребляемой мощности 26,7 Вт не превышала 56 °С при температуре окружающего воздуха  $25 \pm 1$  °С. Характер температурной зависимости для других СДМ от потребляемой электрической мощности был аналогичным и близким к линейному.

## 6. Выводы

1. Использование преобразования экологически чистой возобновляемой солнечной энергии в электрическую энергию для питания объемных светодиодных модулей подвесной люстры с ТТ позволит при широком внедрении таких систем в многоквартирных и индивидуальных домах зна-

чительно снизить потребление электроэнергии из централизованной электросети в жилищном секторе, сократить использование органических видов топлива на производство электроэнергии и уменьшить количество вредных выбросов в атмосферу.

2. Выполнение каркаса светодиодной люстры из тепловых труб позволяет за счет использования замкнутого испарительно-конденсационного цикла передачи теплоты по меньшей мере вдвое увеличить мощность объемных светодиодных модулей по сравнению со светодиодными лампами прямой замены при соблюдении нормального теплового режима светодиодных источников света, и, соответственно, вдвое увеличить световой поток люстры и за счет этого – уменьшить необходимое количество источников света или осветительных приборов.

3. Тенденция роста стоимости централизованно поставляемой электрической энергии для населения, с одной стороны, и тенденция снижения себестоимости электроэнергии, вырабатываемой автономными солнечными ФЭУ, с другой стороны, делают привлекательным практическое использование небольших солнечных ФЭУ для экономии электроэнергии в жилищном секторе. Размещение солнечных панелей в непосредственной близости от потребителя – на крышах, балконах и фасадах зданий создает благоприятные реальные условия для индивидуального использования солнечной энергии в освещении жилых помещений с помощью светодиодных люстр с ТТ как в индивидуальных, так и в многоквартирных домах.

Авторы выражают благодарность к.т.н. Кравцу В.Ю. за помощь в изготовлении ТТ.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

[1] Долинский А.А., Драган Б.Х. 2015. Гидродинамика техногенных выбросов в окружающую среду: монография. К.: ИТТФ НАНУ, 104 с. [2] Коваленко Г.Д. 2015. Оценка ущерба, наносимого окружающей среде и здоровью населения радиоактивными выбросами электростанций Украины. Экология и промышленность. 3, 77-81. [3] Россиянам могут разрешить использовать ВИЭ в многоквартирных домах. 27 февраля 2017. <http://www.c-o-k.ru> [4] Cree First to Break 300 Lumens-Per-Watt Barrier. March 26, 2014. [www.cree.com](http://www.cree.com) [5] Kozak D.V., Nikolaenko Yu. E. 2016. The Working Characteristics of Two-Phase Heat Transfer Devices for LED Modules. 2016 International Conference on Electronics and Information Technology (EIT). IEEE, 2016, 1–4. DOI: 10.1109/ICEAIT.2016.7500980; <http://ieeexplore.ieee.org> [6] Kravets V.Yu., Nikolaenko Yu.E., Nekrashevich Ya.V. 2007. Experimental Studies of Heat-Transfer Characteristics of Miniaturized Heat Pipes. Heat Transfer Research. 38 (6), 553–563. DOI: [7] Lishik S.I., Pautino A.A., Posedko V.S., Trofimov Yu.V., Tsvirko V.I. 2010. Structural and Technological Solutions for Light-Emitting Diode Lamps of Direct Replacement. Light and Engineering. 18 (3), 57–63. [8] Nikolaienko T.Yu., Nikolaenko Yu.E. 2015. New circuit solutions for the thermal design of chandeliers with Light Emitting Diodes. Light and Engineering. 23 (3), 85–88. URL: <http://www.scopus.com> [9] Zakgeim A.L. 2013. Light-emitting Diode Illumination Systems: Energy Efficiency, Visual Perception, and Safety for Health (Review). Light and Engineering. 21 (2), 25–40.

## СОЛНЕЧНЫЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ – ПУТЬ К БЕСПЕРЕБОЙНОМУ ОБЕСПЕЧЕНИЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИЕЙ

Х.К. Ташматов<sup>1</sup>, И.А. Юлдашев<sup>1</sup>, Bernd Wurl<sup>2</sup>, Э.Б. Саитов<sup>1</sup>, Н.Р. Умирова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ташкентский государственный технический университет имени И. Каримова  
г.Ташкент, 100095, Узбекистан, E-mail: [yuldashev.i2004@gmail.com](mailto:yuldashev.i2004@gmail.com)

<sup>2</sup>BAE Batterien GmbH, Wilhelminenhofstr. 69 D-122459 Berlin and Pretherm Solutions GmbH, Friedrichstr. 90 D-10117 Berlin

#### Аннотация

В данной статье описывается внедрение солнечной фотоэлектрической станции мощностью 20 кВт, интегрированной с локальной электрической сетью Ташкентского государственного технического университета. Приведены схемы функционирования ФЭС, принцип работы каждого комплектующего оборудования, мониторинг выработка электроэнергии ФЭС, экономии традиционных видов топлива, а также предотвращение выбросов CO<sub>2</sub> в окружающую среду.

**Ключевые слова:** трехфазный сетевой инвертор (SMA, Sunny TRIPOWER 22000TL), однофазный аккумуляторный инвертор (SMA, Sunny Island invertors), плавкий предохранитель (BATFUSE–B.03), электрический счетчик, контролируемая нагрузка, локальный электрический сеть



Использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) для получения электрической энергии является неотъемлемой частью современной энергетики Узбекистана. Если речь идет об энергетике на основе ВИЭ, то в первую очередь упоминают именно солнечную энергетику. В связи с тем, что 98,6% всего энергетического потенциала ВИЭ в Узбекистане приходится на долю солнечной энергии и считается важнейшим определяющим фактором при планировании доли ВИЭ в общем энергобалансе страны [1].

Фотоэлектрическая станция (ФЭС) - экологически чистый и надежный при эксплуатации источник энергии.

В настоящее время весьма актуальным является непрерывное обеспечение электроэнергией компьютерных и лабораторных аудиторий, измерительных приборов, осветительных систем зданий на основе солнечной фотоэлектрической станции является одним из основных задач высшего учебного заведения.

По инициативе консорциума Берлина Prethezm Solutions/BAE Batterien (Германия) безвозмездно 12 июня 2016 г. на крыше главного корпуса Ташкентского государственного технического университета имени И. Каримова была установлена ФЭС мощностью 20 кВт (Рис.1).



Рис.1. Общий вид солнечной фотоэлектрической станции мощностью 20 кВт

ФЭС включает в себя последовательно и параллельно соединенные шестьдесят фотоэлектрических панелей (ФЭП), трехфазный сетевой инвертор (SMA, Sunny Tripower 22000TL) мощностью 22 кВт, три аккумуляторного инвертора напряжения (SMA, Sunny Island invertors) общей мощностью 9,9 кВт, плавкий предохранитель (Batfuse-B.03), систему аккумулирования электрической энергии, состоящую из двадцати четырех последовательно соединенных аккумуляторных батарей (АБ) общей ёмкостью 660 А·час и суммарным напряжением 48 В (рис.2), электрического счетчика, SMA Energy meter и системой дистанционного управления. В состав ФЭС входят Wi-Fi-Router, регулятор солнечного дома (Sunny Home Manager) и монитор для представления данных (Sunny Portal).



Рис.2. Энергетический блок управления и контроля ФЭС мощностью 20 кВт

ФЭП состоит из шестидесяти последовательно соединенных цепочек солнечных элементов на основе монокристаллического кремния с эффективностью 19% изготовленных в Германии.



Информация о паспортных данных ФЭП приведена на тыльной стороне модуля: Sky (AR) 290 Вт. Электрические характеристики были получены в стандартных условиях тестирования (при плотности потока солнечного излучения  $1000 \text{ Вт/м}^2$ , температура окружающей среды  $T=25^{\circ}\text{C}$ , AM 1,5) Соответствующие данные приведены в таблице 1.

Табл.1: Электрические характеристики ФЭП в стандартных условиях тестирования

Ток короткого замыкания $I_{к.з.}$	Напряжение холостого хода $U_{х.х.}$	Максимальной ток при номинальной мощности $I_{н.м.}$	Максимальное напряжение при номинальной мощности $U_{н.м.}$	Максимальное значение тока $I_{max}$
9,6 А	39,8 В	9,1 А	32,2 В	18 А

Все ФЭП установлены на специальных стационарных конструкциях, которые обеспечивают их охлаждение за счет циркуляции воздушного потока. Для максимальной производительности энергии ФЭП относительно Солнца располагают так, чтобы рабочая поверхность фотоэлектрических батарей была ориентирована перпендикулярно потоку солнечного излучения. Обычно рекомендуется менять угол наклона ФЭП три раза в год для фиксации положения в опорной конструкции. ФЭП ФЭС на крыше главного корпуса Ташкентского государственного технического университета имени И. Каримова установлены в фиксированном летнем положении. Поэтому в течение года фотоэлектрические батареи вырабатывают значительно меньшее количество энергии.

Представленная на рис. 3 ФЭС мощностью 20 кВт построена на базе двух типов инверторов, что обеспечивает ее высокую надежность и эффективность. Аккумуляторный инвертор Sunny Island обеспечивает надежную зарядку аккумуляторных батарей. Сетевой инвертор SunnyTripower представляет собой бестрансформаторный фотогальванический инвертор с двумя MPPT – трекерами, которые преобразует постоянный ток вырабатываемой ФЭС в трех-фазный переменный ток, совместимой с сетью, и подает переменный ток в общественную сеть электроснабжения. Инвертор марки SunnyTripower можно эксплуатировать только с фотоэлектрическими батареями, соответствующими классу защиты II в соответствии с IEC 61730, класса применения А.

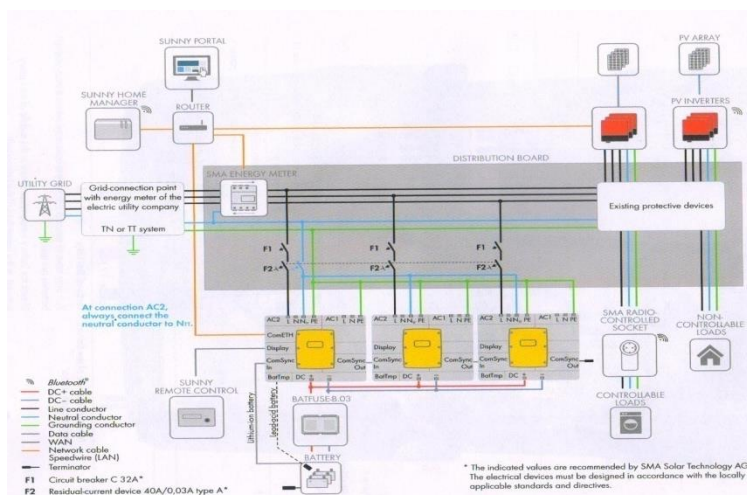


Рис.3. Структурная схема фотоэлектрической системы электроснабжения с функцией резервного питания

При наличии напряжения в электрической сети и в дневное время суток, ФЭС через сетевой инвертор обеспечивает электроэнергией потребителей (Controllableloads). Если нагрузка потребляет меньше энергии, чем вырабатывает фотоэлектрические батареи, излишки энергии направляются на зарядку аккумуляторов. Если нагрузка потребляет больше энергии, чем генерируют фотоэлектрических батарей, то недостающая энергия берется из электрической сети. При отключении электрической сети (в аварийных ситуациях) аккумуляторные инверторы переключаются на работу от аккумуляторов и формирует опорное напряжение для сетевого инвертора, оставляя его в работе. В этом случае фотоэлектрические батареи, использующие солнечную энергию, также будут снабжать сетевую нагрузку (локальную электрическую сеть).

Только в случае недостатка энергии от фотоэлектрической батареи, недостающая энергия берется не из электрической сети, а от аккумуляторов. В случае избытка энергии от фотоэлектрических батарей и при полностью заряженном аккумуляторе, аккумуляторный инвертор отключает сетевой инвертор до тех пор, пока напряжение на аккумуляторе не снизится до заданного значения.

Данная структура может использоваться для построения и автономных энергетических систем, однако в этом случае мощность аккумуляторного инвертора должна быть увеличена до полной мощности нагрузки.

Изложенная выше ФЭС содержит специализированное устройство SunnyHomeManager, с помощью которого производится мониторинг и контроль параметров системы, в частности обеспечивается дистанционное управление параметрами аккумуляторного инвертора. Для учета отпущенной потребителю электроэнергии из электрической сети в состав системы входит электронный счетчик электроэнергии и SMAEnergyMeter. Для обеспечения безопасности обслуживающего персонала в главную электрическую цепь системы установлен автоматический выключатель, который обеспечивает отключение питающей сети при авариях.

С более подробным описанием продукции компании SMA Solar Technology AG, а также спецификацией и техническими характеристиками можно ознакомиться на сайте компании [2].

Такие ФЭС могут быть использованы, как для решения локальных энергетических задач, так и глобальных проблем энергетики. В целях рационального использования электрической энергии ФЭС энергия направлена к нагрузке осветительных систем мощностью 520 Вт·час в учебном здании факультета “Инженерных систем”. Ежедневная потребляемая электрическая энергия осветительных систем составляет 5,2 кВт·час. Предусмотрено, также подключение к нагрузке компьютерных аудиторий, лабораторных и научно-исследовательских кабинетов кафедры “Альтернативные источники энергии” Ташкентского государственного технического университета.

Ежедневный и ежемесячный мониторинг передается на монитор установленный в входной части данного факультета (Рис.4). Данные о выработке ФЭС, аккумулированной энергии и потребляемой электрической энергии фиксируется в электрическом счетчике.

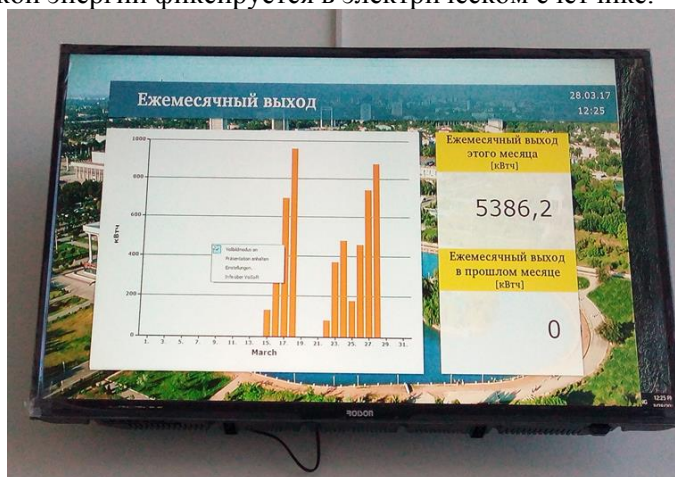


Рис.4. Монитор для представления ежедневных и ежемесячных параметров ФЭС (на 28.03.2017г.)

Кроме того, программа моментально рассчитывает эквивалент экономии традиционных видов топлив (дрова, уголь и мазут) и выбросы вредного газа  $CO_2$  в атмосферу. В течении 12 дней эквивалент выработанной электроэнергии была равна 225,7 кг дров или 108 кг угля, что равносильно 90,3 кг мазута, которое привело к уменьшению выбросов вредного газа  $CO_2$  на 452 кг в окружающую среду.

С целью повышения квалификации студентов ФЭС служит в качестве наглядной демонстрационной и учебно-ознакомительной базой для студентов, обучающихся в области возобновляемых источников энергии.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Х.К. Зайнутдинова, 2015. Использование солнечной энергии в Узбекистане: вопросы рынков и маркетинга, Ташкент, 336 с. [2] Сайт компании SMA Solar Technology AG – URL: [www.SMA.de](http://www.SMA.de)

## PERFORMANCE EVALUATION OF A SOLAR PHOTON-ENHANCED THERMIONIC HYBRID SYSTEM COMBINED WITH A STIRLING ENGINE

Guanghua Zheng<sup>1</sup>, Gang Xiao<sup>2,\*</sup>, Mingjiang Ni<sup>3</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University  
Hangzhou 310027, China, guanghuazheng@zju.edu.cn

<sup>2,\*</sup>State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University  
Hangzhou 310027, China, xiaogangtianmen@zju.edu.cn

<sup>3</sup>State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University  
Hangzhou 310027, China, ceu\_ni@zju.edu.cn

### Abstract

*In order to improve the efficiency of solar power generation, a photon-enhanced thermionic emission (PETE) system is proposed to be combined with a Stirling engine. The overall efficiency is discussed with varying bandgap and electron affinity of cathode, work function and temperature of anode, etc. The PETE converter can transform concentrated solar radiation to electricity with an optimal efficiency of 40.9% at the cathode's bandgap of 1.4 eV and electron affinity of 1.3 eV. The overall efficiency can be further improved to over 63% by combining a bottoming Stirling cycle. It is expected to provide guidance for practical design of solar PETE hybrid systems.*

**Key words:** photon-enhanced thermionic emission, concentrated solar radiation, Stirling engine

### 1. Introduction

Currently, most of energy is supplied by fossil fuels, which causes increasingly serious environmental pollution. Renewable energy is probably a solution to realize sustainable development with less emission. Solar power generation is a promising alternative technology due to its remarkable advantages: abundant, clean and almost inexhaustible. However, commonly commercial solar power techniques, both photovoltaics and thermal power, exhibit relatively low efficiencies. For example, monocrystalline silicon produces electricity with an efficiency of ~17% [1], while solar Dish-Stirling system has an efficiency of ~30% [2]. An innovative solar power generation, i.e. photon enhanced thermionic emission (PETE), which combines photovoltaic and thermionic effects into a single process, has a theoretical conversion efficiency of up to 45% [3]. Furthermore, a bottoming heat engine can be applied to improve the overall efficiency, considering the high temperature of anode of a PETE converter.

Several numerical researches were conducted about PETE hybrid systems [4,5]. Schwede et al. firstly proposed a PETE system combined with a bottoming thermal cycle, which has an invariable efficiency of 31.5% [3]. Su et al. presented a model of PETE-thermoelectric system and determined the optimal material parameters [6]. It is observed that the optimal bandgap of the cathode in the hybrid system deviates from that in PETE converter alone. Segev et al. firstly reported an isothermal PETE hybrid system, where the cathode and anode were at the same temperature [7]. However, the bottoming thermal cycle was assumed to be an ideal Carnot engine, which is impossible in reality. It is necessary to investigate the performance of a PETE hybrid system combined with a practical heat engine, e.g., Stirling engine, steam turbine, etc.

A model is proposed for a solar PETE converter combined with a practical Stirling engine, which is simple, without emission and suitable for various heat sources. The influences of system parameters on the overall efficiency are analyzed in detail here.

### 2. Model of photon-enhanced solar thermionic hybrid system

The solar PETE hybrid system, as shown in Fig.1, consists of a PETE converter on the top and a Stirling engine on the bottom. The PETE converter is usually composed of a semiconductor cathode and a metallic anode, which are separated from each other by a vacuum space. When the concentrated solar radiation is incident on the PETE converter, the electrons in the Fermi level are elevated to the conduction band, thermalized to vacuum and collected by the anode. In order to conveniently determine the performance of PETE converter, some assumptions are given as follows: The energy bandgap of the cathode is independent of the operating temperature; The space charge effect is ignored so that PETE converter is in flat band condition; The electrons from the anode do not contribute to the population of the cathode's conduction band.

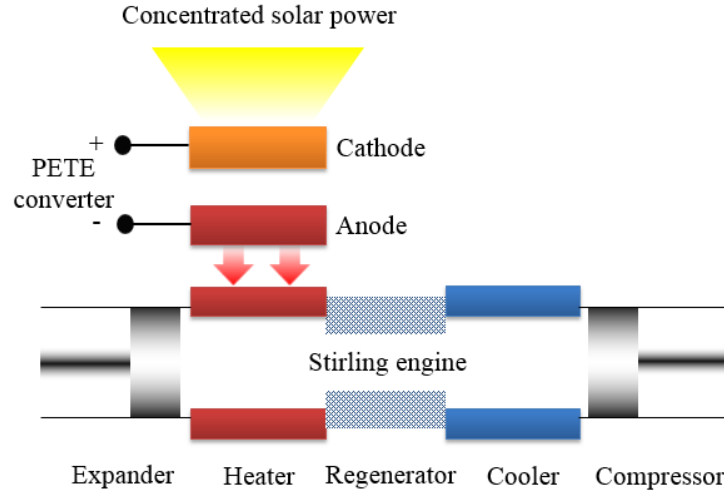


Fig. 1 The schematic diagram of a solar PETE hybrid system combined with a Stirling engine.

According to the first law of thermodynamics, the energy balance equations of the cathode and the anode can be expressed as

$$P_{sun} - J_C(\phi_C + 2kT_C) + J_A(\phi_C + 2kT_A) - P_r - \sigma T_C^4 = 0 \quad (1)$$

and

$$J_C(\phi_A + 2kT_C) - J_A(\phi_A + 2kT_A) = Q/S \quad (2)$$

where  $P_{sun}$  is the concentrated AM1.5 direct circumsolar spectrum,  $J_C$  and  $J_A$  are the thermionic current density from the cathode and anode, respectively,  $\phi_C$  and  $\phi_A$  represent the work function of the cathode and anode,  $T_C$  and  $T_A$  are the temperatures of the cathode and anode,  $P_r$  is the photon enhanced radiative energy flow,  $Q$  is the waste heat in the PETE converter,  $S$  is the area of the electrode.

The waste heat from the PETE converter can be used to drive a Stirling engine to improve the overall conversion efficiency. The Stirling engine usually consists of an expansion chamber, a heater, a regenerator, a cooler and a compression chamber. The displacer piston shuttles the working fluid back and forth through these components at constant volume to absorb and release heat, and ultimately generates work [8]. For simplicity, the Schmidt analysis is used to describe the performance of the Stirling engine and assumptions are made as follows: There are no flow losses and spatial pressure losses; The regenerator is perfect and the working fluid is treated as ideal gas; The volume variation in the working space is sinusoidal; The thermal power from the Stirling engine is totally converted to electricity; The temperature in the heater and expansion space is isothermal and is equal to the waste heat temperature of PETE converter  $T_A$ , the temperature in cooler and compression space is determined by the environmental temperature  $T_R$ , and the temperature in the regenerator is  $(T_A + T_R)/2$ .

The heat absorbed by Stirling engine, namely, the waste heat in PETE converter, is [9]

$$Q = \frac{f\pi V_0 p_m \delta \sin\theta}{1 + \sqrt{1 - \delta^2}} \quad (3)$$

The power output of Stirling engine is

$$P_{stirling} = \frac{f\pi V_0 p_m \delta \sin\theta}{1 + \sqrt{1 - \delta^2}} (1 - \tau) \quad (4)$$

where  $\delta = \frac{\sqrt{\tau^2 + k^2 + 2\tau k \cos\varphi}}{\tau + k + 4k\tau/(1 + \tau)}$ ,  $\theta = \tan^{-1}[k \sin\varphi / (\tau + k \cos\varphi)]$ ,  $\varphi$  represents the mean phase angle advance,  $\tau$  represents  $T_R/T_A$ ,  $k$  is the swept volume ratio,  $V_0$  is the expansion space swept volume,  $P_m$  is the mean pressure,  $f$  is the rotational speed.

Therefore, the overall conversion efficiency of the hybrid system becomes

$$\eta = \frac{(J_C - J_A)(\phi_C - \phi_A) + P_{stirling}}{P_{sun}} \quad (5)$$

The following parameters were adopted for all the results below unless stated otherwise. The cathode is a p-type semiconductor at  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  doping. The solar concentration is 1000 and the anode work function is 0.9 eV [3]. The area of the electrode is assumed to  $0.01 \text{ m}^2$ . A gamma-type Stirling engine with air as working fluid is utilized for waste heat recovery, where the key parameters are as follows: the clearance volumes of compression space and expansion space are  $334$  and  $334 \text{ cm}^3$ , respectively; the swept

volume of compression chamber and expansion chamber are 334 and 335 cm<sup>3</sup>; the mean phase angle advance is 90°; the rotational speed is 600 rpm and the mean pressure is 1.2 MPa [9]. The environmental temperature is chosen to be 300 K.

### 3. Results and discussion

Fig. 2 shows the effects of cathode's bandgap and electron affinity on the performance of a PETE hybrid system. When the cathode's bandgap or electron affinity increases, the temperature of the cathode increases, whereas the temperature of the anode decreases, as shown in Fig. 2(a) and (b). It is observed that the PETE converter achieves an optimal efficiency of 40.9% at the bandgap of 1.4 eV and electron affinity of 1.3 eV. However, the overall efficiency increases with the decreasing of the bandgap or electron affinity. This result can be illustrated that the contribution of the bottoming Stirling cycle increases with the increasing of anode's temperature and is the dominant contribution in this case.

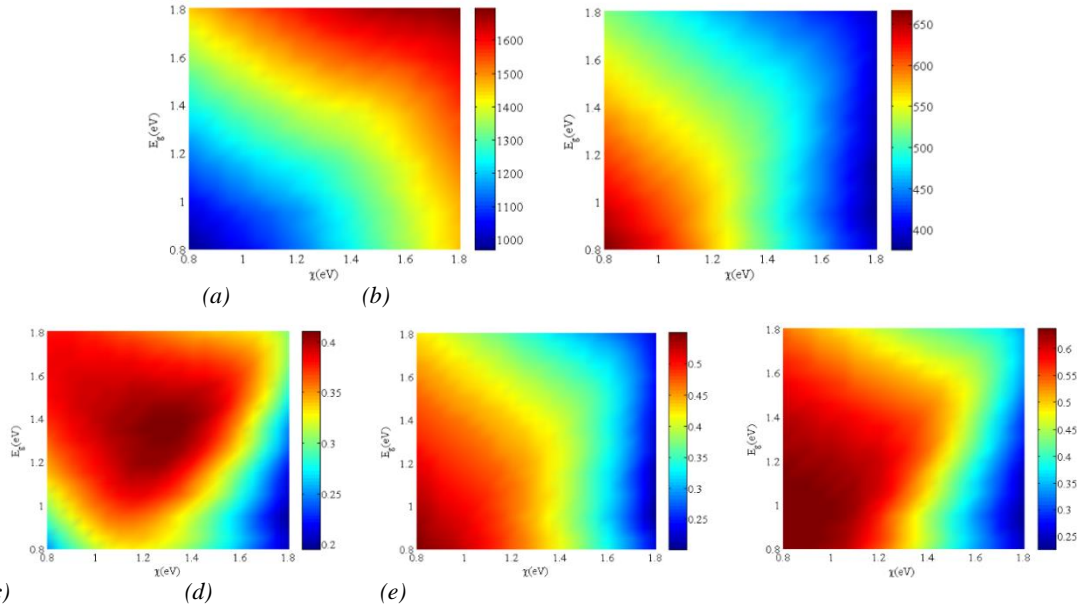


Fig. 2. (a) The temperature of cathode, (b) the temperature of anode, (c) the efficiency of the topping PETE converter, (d) the efficiency of the bottoming Stirling engine and (e) the overall efficiency of the hybrid system as a function of cathode's bandgap and electron affinity.

The temperatures of the cathode and anode as a function of the work function of anode are presented in Fig. 3(a). The temperature of the anode increases with the increasing of the work function of anode, while the temperature of the cathode decreases and approaches to a stable value of 1405 K. It is because that more kinetic energy of electrons is deposited to waste heat as the work function of anode increases. It is observed in Fig. 3(b) that the efficiency of the PETE converter decreases when the work function of anode increases, which can be attributed to the increasing of the anode temperature. On the other hand, the efficiency of Stirling engine increases with the increasing of the work function of anode. Therefore, an optimal overall efficiency of 57.6% can be obtained when the work function of anode is 0.69 eV.

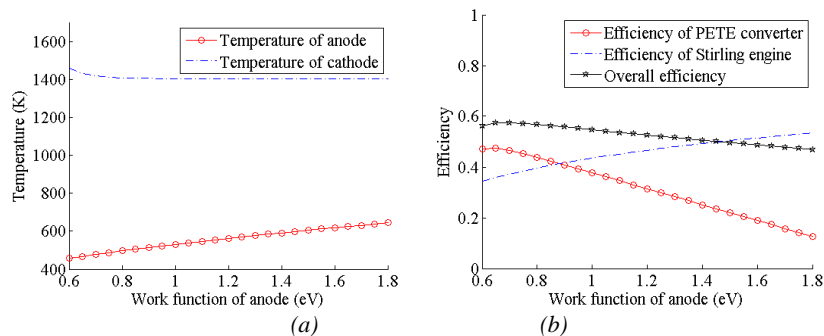


Fig. 3. (a) The temperatures of cathode and anode as a function of the work function of anode; (b) the efficiency of PETE, Stirling engine and overall efficiency as a function of the work function of anode. The cathode's bandgap and electron affinity are 1.4 eV and 1.3 eV, respectively.

The effect of anode temperature on the performance of the PETE hybrid system is shown in Fig. 4. The temperature of cathode is almost unchanged when the temperature of anode increases from 400 K to



550 K, as shown in Fig. 4(a). As the anode temperature increases further, the cathode temperature rises rapidly from 1410 K to 1690 K, which can be ascribed to the heating effect of the reverse electron from the anode. The quantity of waste heat from PETE converter and the output power of Stirling engine are shown in Fig. 4(b). The quantity of waste heat remains unchanged when the temperature of anode increases from 400 K to 600 K. A minimum quantity of waste heat is located at the anode temperature of 720 K, which can be attributed to the difference of the energy carried by electrons from cathode and that from anode. The efficiency of Stirling engine increases with the increasing of anode temperature, while the efficiency of PETE converter decreases, as shown in Fig. 4(c). Therefore, an optimal conversion efficiency of 58.3% is achieved at the anode temperature of 620 K.

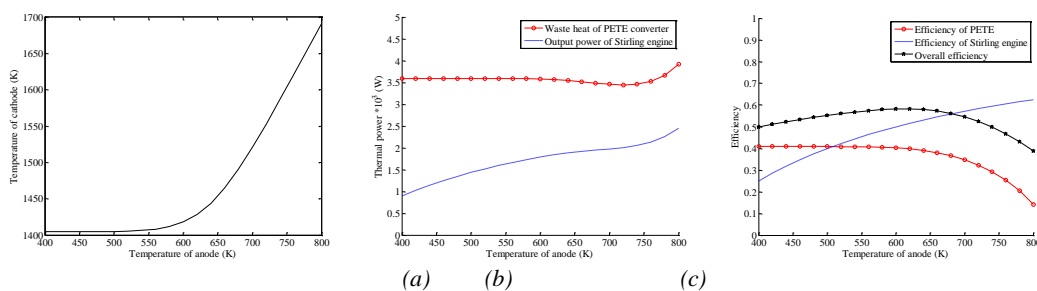


Fig. 4. (a) The temperature of cathode as a function of the temperature of anode; (b) the quantity of waste heat and output power of Stirling engine as a function of the temperature of anode; (c) the efficiency of PETE converter, Stirling engine and overall efficiency as a function of the temperature of anode. The cathode's bandgap and electron affinity are 1.4 eV and 1.3 eV, respectively.

#### 4. Conclusions

A new configuration of solar PETE hybrid system is proposed with a bottoming Stirling cycle. The effects of some parameters, i.e. cathode's bandgap, electron affinity, work function and temperature of anode on the performance of the hybrid system are analyzed. An optimal efficiency of topping PETE converter can be achieved at the cathode's bandgap of 1.4 eV and electron affinity of 1.3 eV, while the efficiency of bottoming Stirling engine and the overall efficiency monotonically decrease with the increasing of cathode's bandgap or electron affinity. In order to investigate the influence of work function and temperature of anode on the performance of PETE system, the cathode's bandgap and electron affinity are fixed at 1.4 eV and 1.3 eV, respectively. An optimal overall efficiency of 57.6% can be obtained at the anode's work function of 0.69 eV, where the efficiency of topping PETE converter is 46.9% and that of bottoming Stirling engine is 36.8%. On the other hand, when the anode temperature is located at 620 K, the hybrid system achieves an optimal efficiency of 58.3%, where the efficiency of PETE converter is 39.9% and that of Stirling engine is 51.6%.

#### Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge the support from the National Natural Science Foundation of China (NO. 51476140) and State's Key Project of Research and Development Plan (NO: 2016YFE0124700).

#### REFERENCES

- [1] Parida B., Iniyar S., Goic R., 2011. A review of solar photovoltaic technologies. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 15, 1625-1636.
- [2] Kongtragool B., Wongwiset S., 2003. A review of solar-powered Stirling engines and low temperature differential Stirling engines. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 7, 131-154.
- [3] Schwede J. W., Bargatin I., Riley D. C., et al, 2010. Photon-enhanced thermionic emission for solar concentrator systems. *Nat. Mater.* 9, 762-767.
- [4] Segev G., Rosenwaks Y., Kribus A., 2015. Limit of efficiency for photon-enhanced thermionic emission vs. photovoltaic and thermal conversion. *Sol. Energ. Mat. Sol. C.* 140, 464-476.
- [5] Reck K., Hansen O., 2014. Thermodynamics of photon-enhanced thermionic emission solar cells. *Appl. Phys. Lett.* 104, 023902.
- [6] Su S., Wang Y., Wang J., et al, 2014. Material optimum choices and parametric design strategies of a photon-enhanced solar cell hybrid system. *Sol. Energ. Mat. Sol. C.* 128, 112-118.
- [7] Segev G., Kribus A., Rosenwaks Y., 2013. High performance isothermal photo-thermionic solar converters. *Sol. Energ. Mat. Sol. C.* 113, 114-123.
- [8] Ni M., Shi B., Xiao G., et al, 2016. Improved Simple Analytical Model and experimental study of a 100W  $\beta$ -type Stirling engine. *Appl. Energ.* 169, 768-787.
- [9] Urieli I., Berchowitz D. M., 1984. *Stirling cycle engine analysis*. Taylor&Francis.



## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ЖАЛЮЗИЙНЫМ ГЕЛИОСТАТОМ НЕСЛЕДЯЩЕГО СОЛНЕЧНОГО КОНЦЕНТРАТОРА

Д.С.Стребков, А.Е.Иродионов, Н.С.Филиппченкова

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ)

РФ, Москва, 109456 1-й Вешняковский пр-д, д.2, [nauka-ds@mail.ru](mailto:nauka-ds@mail.ru)

### Аннотация

В работе предложено решение по интеграции неследящих солнечных концентраторных модулей в фасады зданий. Разработан алгоритм управления жалюзиным гелиостатом, с помощью которого имеется возможность расширить временной интервал работы концентраторного модуля. Наиболее приемлемый вариант для рассматриваемого солнечного модуля является реализация системы управления жалюзиным гелиостатом неследящего концентратора на базе предустановленной программы и сервопривода.

**Ключевые слова:** жалюзиный гелиостат, неследящий солнечный концентратор, сервопривод

### 1. Введение

В 70-80-х годах XX столетия родилась идея превратить здания и городские постройки из потребителей энергии в генерирующие электростанции при помощи установки на них фотоэлектрических модулей. Так родилась идея децентрализованной генерации и накопления электроэнергии, т.е. фактически, то, что сейчас принято называть «умной сетью электроснабжения» (Smart Grid). Практически одновременно возникла необходимость разработки различных вариантов интеграции фотоэлектрических модулей в конструкцию здания, так как дискуссии о нарушении эстетики и архитектурной целостности зданий стали новым препятствием на пути реализации этой идеи.

Особый интерес для интеграции представляют солнечные концентраторы с низким коэффициентом концентрации (менее 10 крат), поскольку они имеют линейную геометрию и для их эффективной работы достаточно слежения только по одной оси [4]. Высокая концентрация системы требует слежения по двум осям с высокой точностью (допуски ниже 0,28). Интегрируемость такой системы будет сильно затруднена. Проблема интеграции высоко концентрирующих систем может быть решена, если слежение обеспечивается движением приемника, в то время как сам концентратор неподвижен. Однако установка на фасадах таких систем представляет определенные проблемы: зеркала затрудняют прохождение света в здание и мобильный приемник должен выступать наружу из здания, что создает дополнительную нагрузку на конструкции здания.

В работе [2] предложено решение по интеграции концентраторных солнечных модулей в фасады здания. Предлагаемый концентратор основан на отражающей системе Френеля. Концентрация солнечной радиации на статический приемник достигается при помощи множества зеркал, которые вращаются совместно. Все оси вращения находятся в одной плоскости и параллельны. Это позволяет использовать один двигатель, что дает важные механические и экономические преимущества. Максимальное достигнутое соотношение концентрации 20,42 крат. На рис. 1 представлены 3D изображение отражателя Френеля и схема концентратора Френеля.

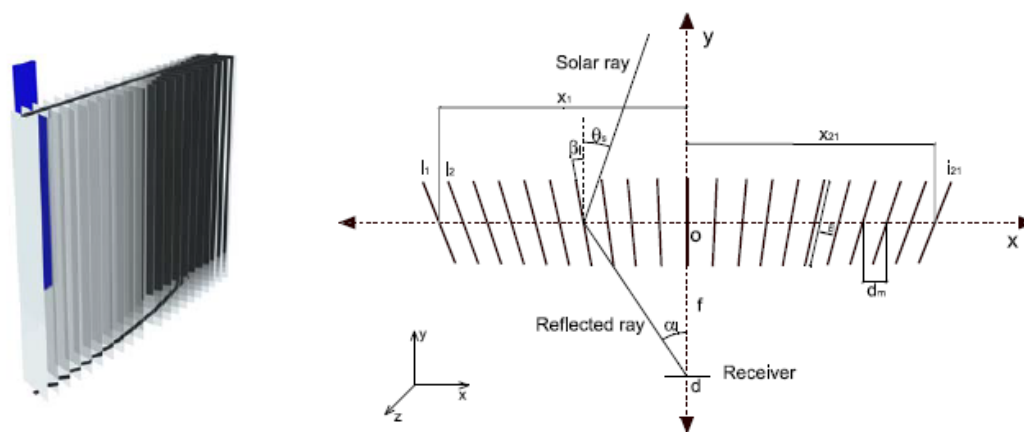


Рис. 1 Слева: 3D изображение отражателя Френеля; справа: схема концентратора Френеля [2].

На рис. 2 представлен вид здания (фасад) со встроенными концентраторами солнечной энергии. Установка может быть использована для отопления или кондиционирования здания.

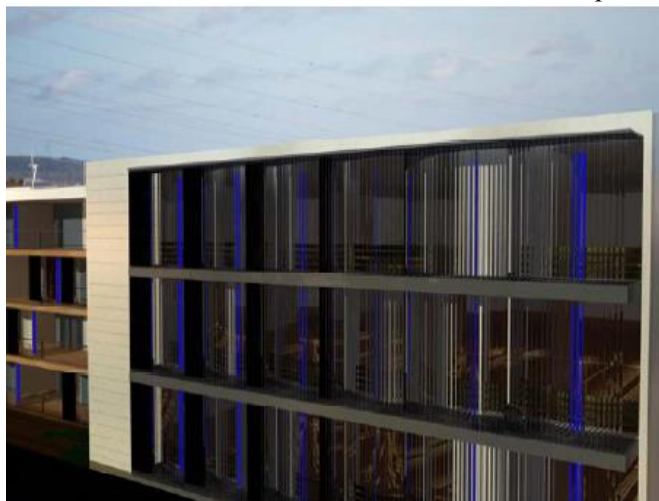


Рис. 2 Внешний вид здания (фасад) со встроенными концентраторами солнечной энергии [2].

В зданиях, проектируемых для строительства в районах со среднемесячной температурой июля  $21^\circ$  и выше (к таким районам относится весь Южно-Российский регион), в помещениях с постоянным пребыванием людей и помещениях, где по технологическим и гигиеническим требованиям не допускается проникновение солнечных лучей или перегрев, световые проемы при ориентации в пределах  $130-315^\circ$  должны быть оборудованы солнцезащитой. Для защиты оконных проемов, ориентированных на южный сектор горизонта, от избыточной инсоляции рекомендуется устраивать наружные горизонтальные жалюзи, навесы, тенты, козырьки и другие солнцезащитные элементы [9].

Новым шагом в архитектуре являются здания с цельностеклянными фасадами. Компания ТАТПРОФ производит системы солнцезащитных ламелей, обеспечивающих такое расположение и наклон своих элементов, чтобы сократить влияние солнечного излучения летом и увеличить его доступ в зимнее время [10].

Ввиду выше изложенного особую актуальность приобретают фасадно-интегрированные солнечные концентраторные модули с жалюзийными гелиостатами.

## 2. Фасадно-интегрированные солнечные концентраторные модули с жалюзийными гелиостатами.

В работах [6,7] показана возможность расширения временного интервала работы неследящего солнечного концентратора с помощью жалюзийного гелиостата, рассмотрены особенности использования жалюзийных гелиостатов, проанализированы условия возникновения межламельных эффектов, снижающих оптическую эффективность этих устройств. Также получена функциональная зависимость, связывающая положение Солнца, шаг зеркальных ламелей гелиостата и их ориентацию для устранения эффектов блокировки и самозатенения, показано, что достаточно управлять наклоном зеркальных ламелей, не меняя расстояния между ними.

Напомним, что через  $h$  обозначена проекция на плоскость симметрии гелиостата угла между направлением на Солнце и базовой плоскостью. На рис. 3 показана схема прохождения солнечных лучей для трех возможных направлений вектора  $\vec{L}$ .

Исходя из рис. 3, угол  $h$ :

$$h = \mu + \arctg \left( \frac{Z_L}{Y_L} \right) \quad (1)$$

где  $\mu$  – краевой угол параболоцилиндрического концентратора,  
 $Z_L, Y_L$  – координаты вектора солнечного луча в системе координат, связанной с параболоцилиндрическим концентратором.

Зная угол  $h$ , по полученным в [6,7] зависимостям относительного шага ламелей для одно-временного предотвращения эффектов самозатенения и блокировки, легко определить угол наклона зеркальных ламелей для определенной даты и времени дня.

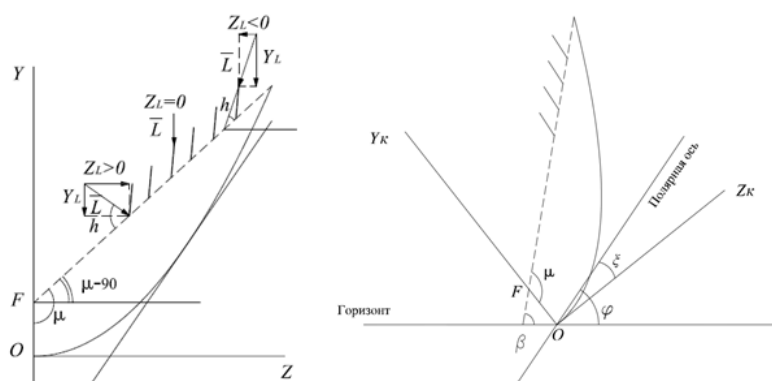


Рис. 3 – Схема прохождения лучей

Как видно из рис. 3 угол разворота системы координат, связанной с параболоцилиндрическим концентратором, может быть найден следующим образом:

$$\xi = \mu - \beta - 90^\circ + \varphi \quad (2)$$

где  $\beta$  – угол наклона поверхности входа концентратора к горизонту;  
 $\varphi$  – широта местности.

### 3. Алгоритм управления жалюзийным гелиостатом.

Для разработки алгоритма управления системой жалюзийных гелиостатов в среде электронных таблиц MS Excel реализована программа расчета координат солнечного луча и соответственно угла наклона ламелей в зависимости от дня года, времени суток, широты/долготы местности, краевого угла и угла наклона поверхности входа концентратора, представляющая собой рабочую книгу, состоящую из отдельных взаимосвязанных листов. Далее приведем алгоритм этой программы.

Последовательность расчета следующая:

1. Задаемся широтой, долготой местности, часовой зоной, углом наклона поверхности входа параболоцилиндрического концентратора относительно горизонта.
2. Рассчитываем угол разворота системы координат, связанной с параболоцилиндрическим концентратором по формуле (2).
3. Рассчитываются координаты вектора солнечного луча в системе координат, связанной с параболоцилиндрическим концентратором [6,7].
4. Задаемся датой и рассчитываем уравнение времени [1] в минутах с поправкой знака для восточной долготы.
5. Задаемся необходимым шагом вычислений и просчитываем координаты солнечного луча для различного времени заданного дня года.

Особенности фасадов зданий таковы, что возможности для интеграции солнечных модулей ограничены. Так на плоскую крышу можно установить планарные модули под оптимальным углом, однако при такой установке на крышу, особенно мансардную, есть риск нарушить ее герметичность крепежом от солнечных батарей, расположение других элементов на крыше, таких как каминные трубы, различного рода надстройки, антенны и т.д. могут затенять поверхность батарей. Также не всегда имеется возможность установить панели на крышу, поэтому можно смонтировать их на стены. Но такое расположение ведет к снижению выработки электроэнергии планарных модулей примерно на 5-10 % зимой и на 30-35 % летом для средней полосы России. Этот недостаток можно устранить регулированием угла наклона, что приводит к увеличению эксплуатационных затрат.

Для разработанной конструкции концентраторного модуля имеется возможность установки на фасад здания под углом  $90^\circ$  («вертикальная стенка»), что позволит более гармонично вписать концентратор в архитектурную концепцию здания, не ухудшая его внешний облик.

В настоящей работе приводится предварительный расчет алгоритма управления жалюзийным гелиостатом неследящего концентраторного модуля с учетом положения Солнца в течение года, т.е. солнечной геометрии. Однако, это не единственный критерий оптимального проектиро-

вания и эффективного использования неследящего солнечного концентратора. Окончательный выбор в пользу того или иного алгоритма управления может быть сделан после исследования энергетических характеристик модуля, что будет проделано в последующих работах.

Поскольку допускаем, что угол наклона поверхности входа концентратора к горизонту постоянен в течение года и составляет  $90^\circ$  («вертикальная стенка»), то все расчеты приведем для этого значения. Рассмотрены алгоритмы управления жалюзийным гелиостатом для параболоцилиндрического концентратора с угловой апертурой  $26^\circ$  (геометрический коэффициент концентрации 4,3) и  $18^\circ$  (геометрический коэффициент концентрации 5,5) для характерных дней в году [1], указанных в таблице 1. Относительный шаг зеркальных ламелей 0,5.

Таб. 1– Характерные дни для определения алгоритма управления жалюзийным гелиостатом

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Дата	17.01	16.02	16.03	15.04	15.05	11.06	17.07	16.08	15.09	15.10	14.11	10.12
Склонение $\delta,^\circ$	-20,9	-13,0	-2,4	9,4	18,8	23,1	21,2	13,5	2,2	-9,6	-18,9	-23,0

На рисунках 4, 5 показаны зависимости угла наклона зеркальных ламелей жалюзийного гелиостата от времени суток для параболоцилиндрического концентратора с угловой апертурой  $26^\circ$  и  $18^\circ$ . Как видно из рисунков, начиная с апреля по сентябрь требуется непрерывное слежение в течение дня, в остальные месяцы график регулирования ступенчатый.

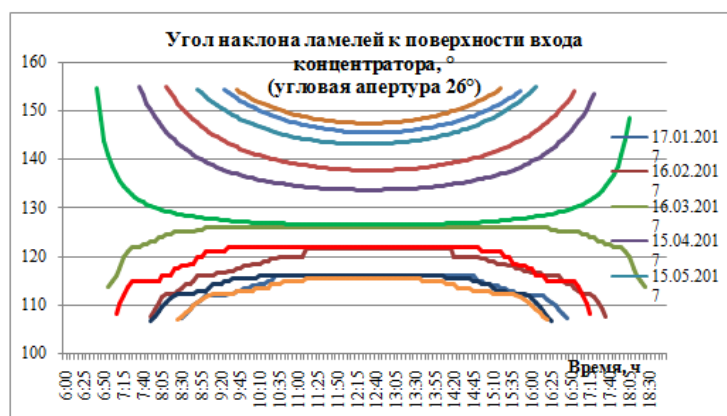


Рис. 4 – Зависимость угла наклона зеркальных ламелей жалюзийного гелиостата от времени суток для параболоцилиндрического концентратора с угловой апертурой  $26^\circ$

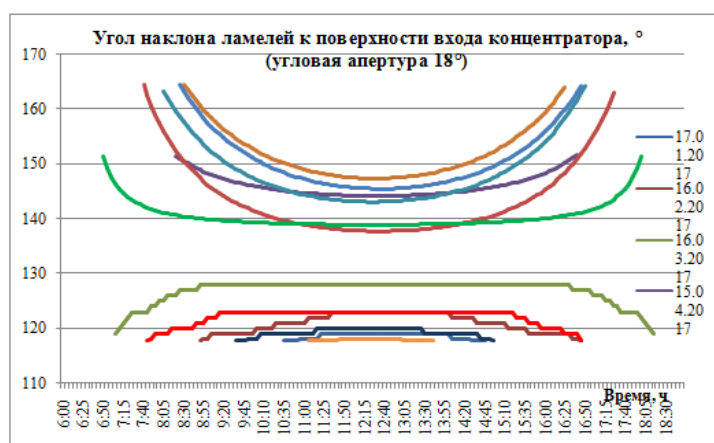


Рис. 5 – Зависимость угла наклона зеркальных ламелей жалюзийного гелиостата от времени суток для параболоцилиндрического концентратора с угловой апертурой  $18^\circ$

#### 4. Привод жалюзийного гелиостата

Основными вариантами проектирования систем ориентации на солнце являются реализация слежения на основе предустановленных астрономических параметров (широты, долготы, высоты

над уровнем моря, времени) и слежение по датчикам солнечного излучения, не требующее предварительного ввода данных о географическом положении и времени.

В работах [3,5] исследуется зависимость эффективности системы ориентации на солнце от величины шага двигателя. Показано, что с увеличением величины шага количество затраченной на ориентацию энергии быстро снижается, но при этом фотоприемник чаще выходит за границы светового пятна, что создает необходимость уменьшения геометрических размеров фотоприемника и, следовательно, снимаемой мощности при неизменной плотности потока солнечного излучения. Значения оптимального шага системы ориентации в рассмотренных составляют  $0,5...2^\circ$  [5]. Экономия денежных средств максимальна при величине шага  $1^\circ$  [3].

В работе [8] рассмотрено создание системы ориентации на солнце, использующей датчик угловой ошибки и метод суммарно-разностного определения направленности. В условиях длительного затенения такая система требует особых мер для обеспечения согласования поворота системы слежения с «движением» солнца.

Устройства ориентации на основе датчиков солнечного излучения (т.е. без необходимости ввода данных о положении и времени) не показывают себя надежными и зачастую дают сбой, особенно при сильной облачности и высоком альбедо поверхности земли, запылении, загрязнении световоспринимающих поверхностей датчиков. В этой связи большую привлекательность приобретают способы ориентации на основе программных методов. В подобных системах ориентации слежение за солнцем осуществляется благодаря шаговому двигателю или серводвигателю. Основным достоинством сервоприводов является наличие обратной связи, благодаря которой такая система может поддерживать точность позиционирования на высоких скоростях и высоких моментах. Также систему отличает высокая перегрузочная способность, низкоинерционность, высокие динамические характеристики, отсутствие эффекта потери шагов (как в шаговом двигателе). К недостаткам сервоприводов по сравнению с шаговыми двигателями относится более высокая цена (в среднем на 15-20% выше, чем у шаговых [11]).

Наиболее приемлемый вариант для рассматриваемого солнечного модуля является реализация системы управления жалюзийным гелиостатом неследящего концентратора на базе предустановленной программы и сервопривода.

## 5. Выводы

Основными преимуществами разработанного солнечного концентраторного модуля с жалюзийным гелиостатом является возможность использования не только теплового приемника, но и теплофотоэлектрического и фотоэлектрического, поскольку концентрация низкая; конструкция концентратора позволяет легко вписать его в проемы между окнами здания, не ухудшая архитектурную концепцию фасада; все оси вращения зеркальных ламелей находятся в одной плоскости и параллельны, что позволяет использовать один серводвигатель, что дает значительный экономический эффект.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Dufflie J.A., Beckman W.A. Solar engineering of Thermal Processes: second ed. New York: John Wiley and Sons Inc, 1991. 919 p. [2] D. Chemisana, J. López, A. Coronas, J.I. Rosell. Building integration of concentrating systems for solar cooling applications. 2nd European Conference on Polygeneration – 30th March-1st April, 2011– Tarragona, Spain; 2011. [3] Пшеннов В.Б. Методика определения энергетической эффективности электроприводов гелиоустановок с концентрацией потока лучистой энергии: автореферат дис. к. т. н.: 05.09.03. Москва. 2009. [4] Tripanagnostopoulos Y. Building integrated concentrating PV and PV/T systems. In: Proceedings of the Eurosun 2008; 2008. [5] Сорокин Г.А. Электроприводы энергетических гелиоустановок без концентрации излучения : автореферат дис. к. т. н.: 05.09.03. Москва. 2005. [6] Стребков Д.С., Иродионов А.Е., Филиппченкова Н.С. Неследящие солнечные концентраторы с жалюзийными гелиостатами: межламельные эффекты// Гелиотехника. 2015 №4.С. 72-78 [7] Стребков Д.С., Иродионов А.Е., Филиппченкова Н.С. Неследящие солнечные концентратора с жалюзийными гелиостатами: алгоритм расчета// Applied Solar Energy. 2017 №1 (статья в печати). [8] Тхеин Л.У. Исследование и разработка автоматических систем управления мобильных солнечных энергетических установок в условиях длительного затенения: автореферат дис. к. т. н.: 05.13.06. Москва. 2010. [9] Шевченко Л.П. Архитектура и климат Южно-Российского региона: Учеб. пособие для вузов/Под ред. Шевченко Л.П. – Ростов-на-Дону: Рост. гос. арх. ин-т, 1998. – 183 с. [10] Электронный ресурс: <https://tatprof.ru> (дата обращения 04.03.2017). [11] Электронный ресурс [http://kipservis.ru/kipia\\_primenenie/servoprivod\\_i\\_shagovie\\_dvigateli.htm](http://kipservis.ru/kipia_primenenie/servoprivod_i_shagovie_dvigateli.htm) (дата обращения 08.03.2017)



## ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ В ФОКАЛЬНОЙ ЗОНЕ БОЛЬШОЙ СОЛНЕЧНОЙ ПЕЧИ

Р.Ю. Акбаров, М.С. Пайзуллаханов

Институт Материаловедения НПО "Физика-Солнце" АН РУз  
e-mail: [r.akbarov@inbox.uz](mailto:r.akbarov@inbox.uz)

Синтез тугоплавких материалов, лучевая термообработка материалов с целью улучшения их эксплуатационных свойств, определение теплофизических, спектрально-оптических характеристик, получение сверхчистых материалов, испытание на тепловую стойкость узлов техники и другие подобные задачи реализуются при высоких температурах. Для решения этих задач наряду с традиционными методами, широко используются концентраторы солнечной энергии (КСЭ) и во многих случаях их использование является предпочтительным или единственным способом для решения многих вышеуказанных задач.

В последние годы в нашей Республике уделяется особое внимание вопросам использования альтернативных источников энергии. Одним из перспективных направлений использования солнечной энергии является гелиоматериаловедение. В нашей Республике в данной области достигнуты значительные результаты. На Большой Солнечной Печи мощностью 1000 кВт (БСП) синтезированы несколько десятков новых материалов с уникальными свойствами. Эти материалы обладают высокими механическими и диэлектрическими свойствами, высокой стойкостью к экстремальным средам и т.д. Выявлены физические основы многих процессов взаимодействия концентрированного солнечного излучения с веществом, изучены свойства различных тугоплавких материалов и др. Общеизвестно, что БСП является уникальным инструментом для проведения полномасштабных исследований в области высокотемпературного синтеза материалов и изучения их свойств.

За прошедшие годы в институте Материаловедения осуществлено систематическое исследование многокомпонентных оксидных систем высшей огнеупорности. На БСП синтезированы практически вся группа материалов различных классов - высокоогнеупорные оксиды, стекла и ситаллы. Анализ характеристик технологических режимов синтеза и термообработки материалов, т.е. временные карты распределения плотности энергии в фокальной зоне БСП, показывает, что они очень разнообразны. Важными характеристиками технологических процессов являются: мощность, максимальные и средние плотности энергии, равномерность распределения, размер фокального пятна, характер распределения плотности энергии и его изменение по времени, длительность процесса, скорость загрузки и выгрузки режимов и др. При этом для некоторых процессов важными могут быть только некоторые вышеприведенные характеристики.

Характерным недостатком КСЭ, в частности БСП[1], является непостоянство формы фокального пятна во времени. Это связано, с одной стороны временным изменением значения прямой солнечной радиации и с другой стороны состоянием оптических и механических элементов БСП, т.е. состоянием юстировки зеркал, ошибок поверхности зеркал, коэффициента отражения зеркал, люфты системы слежения, состояния солнечных датчиков гелиостатов и др.

Отличительные особенности БСП от простых концентраторов заключается в следующем:

1. Большая мощность.
2. Большой размер фокального пятна
3. Наличие 8 полог и 62 гелиостатов, что позволяет манипулировать фокальным распределением.
4. Как бы много узкоапертурных концентраторов.

Целью данной работы является определение способов и методов для создания на фокальной зоне БСП возможных энергетических режимов в штатном режиме работы гелиостатов.

Когда речь идет об энергетических характеристиках печи, необходимо принимать во внимание многих факторов, которые находятся в определенном временном состоянии. Поэтому, когда говорят конкретно что-нибудь о состоянии энергетики печи, необходимо их сопровождать соответствующей информацией. Несмотря на это, можно выделить некоторые общие особенности энергетических характеристик БСП.



Для этого потребуется детальная информация о распределении энергии от отдельных гелиостатов и полк гелиостатов для различных состояний системы. На основе анализа можно будет выявить определенные закономерности для создания различных технологических режимов.

Энергетическое пятно БСП формируется от энергетических вкладов отдельных фацет. Энергетические вклады фацет зависят от коэффициента отражения, ошибок зеркал, состояния юстировки.

Одним из практических задач является реализация заданного технологического режима печи (заданная плотность, размер пятна, равномерность, длительность и др) с помощью стандартных возможностей печи. В эту задачу входит выбор необходимого числа гелиостатов, их режим работы, солнечная радиация, ориентация солнечных датчиков и др.

В работах [2-4] представлены особенности методов расчета энергетических характеристик БСП и их реализация на специфические задачи. В этих работах отсутствует детальный расчетно-экспериментальный анализ энергетических характеристик БСП.

Для уточнения вопросов по этой проблематике, нами разработана программа по методике [2] для расчета энергетических характеристик БСП с учетом реальных влияющих факторов и понятным и удобным интерфейсом на платформе Windows. С использованием данной программы проведены варианты расчеты энергетических характеристик БСП.

Для сужения вариантов расчетов считаем, ошибки гелиостата и концентратора одинаковые. Проведены расчеты для ошибок зеркал до 10 минут. На рис.1. представлена распределение энергии в фокальной зоне БСП. Из рисунка видно, что при изменении ошибки характер распределения энергии изменяется плавно и приблизительно равномерно. Поэтому можно выполнять расчеты для характерных параметров системы и по ним проводить анализ энергетических характеристик печи.

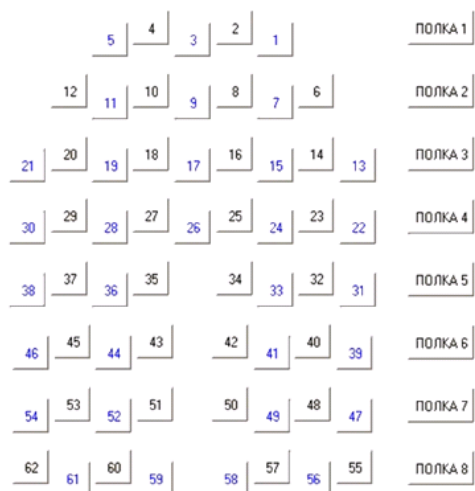


Рис.1. Гелиостаты.

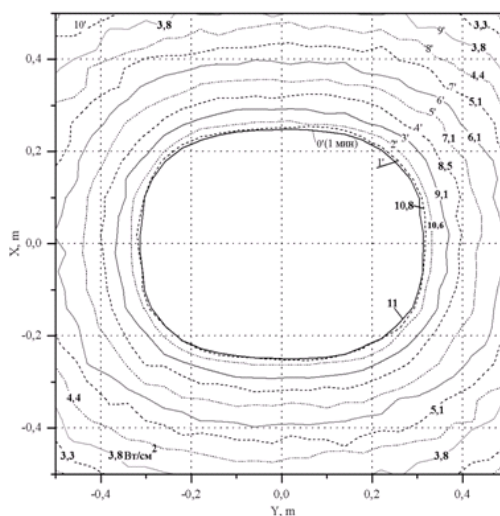


Рис.2. Распределение энергии при различных ошибках.

Анализ данных показал, что максимальная фокальная облученность хорошо аппроксимируется функцией

$$E_F = \frac{43578E_0R_{sc}R_{sg}}{1 - 0.034\sigma + 0.028\sigma^2} \left[ \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2} \right]$$

где  $E_0$  задается в  $\text{Вт}/\text{см}^2$ ,  $R_{sc}$ ,  $R_{sg}$  коэффициент отражения зеркал концентратора и гелиостата,  $\sigma$  - ошибка в минутах.

При этом, относительная ошибка не более 1.2%

В качестве характерных значений параметров состояния БСП можно использовать : радиацию 700, коэффициент отражения 0.6, ошибки концентратора и гелиостатов по 7 угловых минут. Для этих параметров определены распределение плотности энергии в фокальной зоне. На рис.2 представлены эти данные.

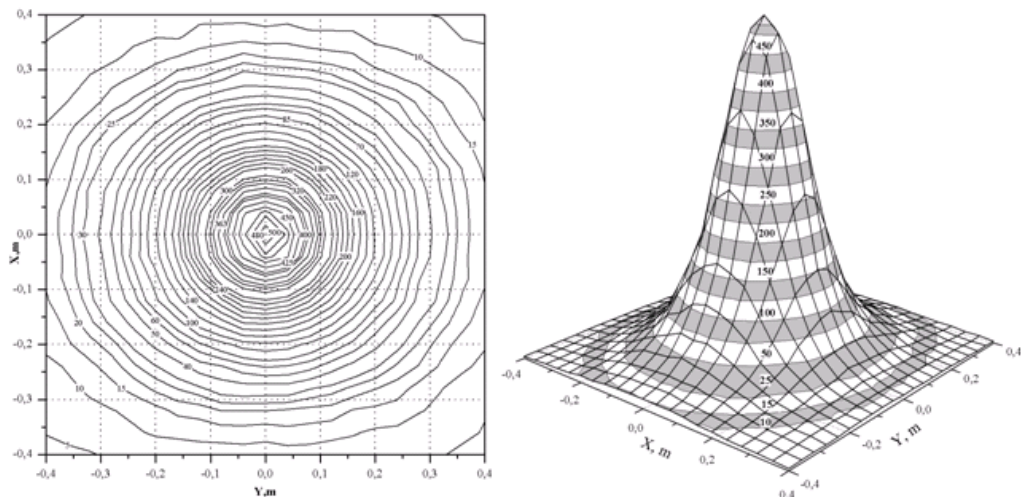


Рис.3. Распределение плотности энергии от всей системы

Аналогичные расчеты проведены для каждой полки гелиостатов. Рис.3. представлен результаты расчетов.

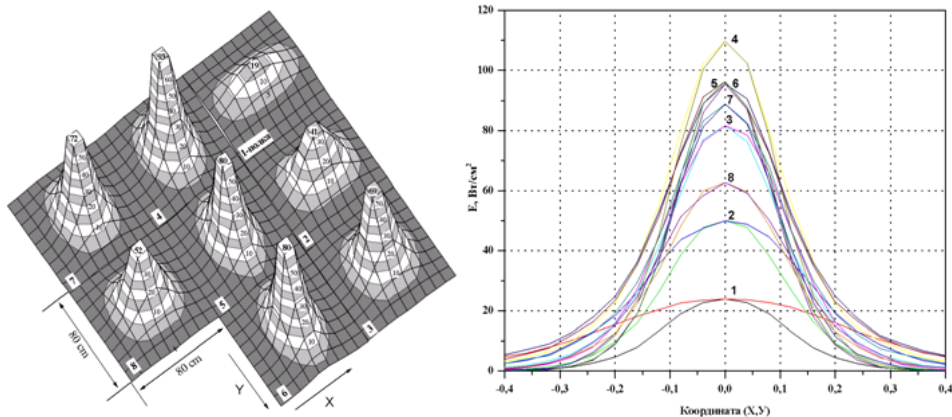


Рис.4. Распределение плотности энергии от отдельных полок гелиостатов

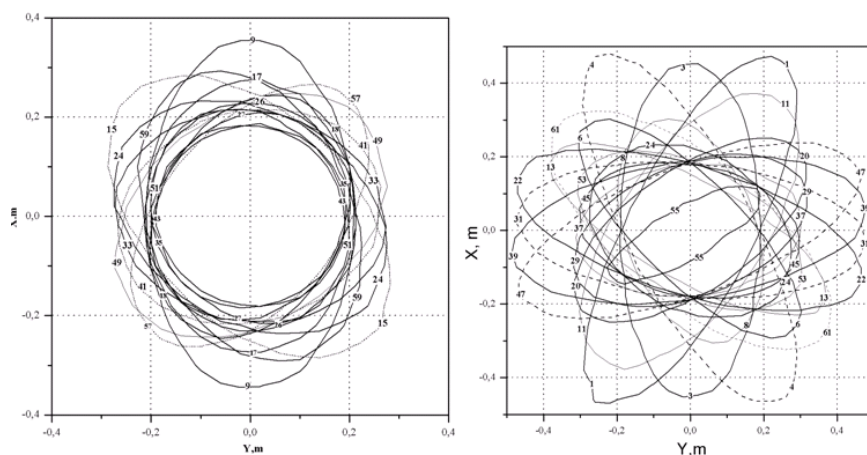


Рис.5. Форма и расположения пятна отдельных гелиостатов.

Нами также изучены распределение плотности энергии от отдельных гелиостатов. На рис.5. представлены пятна отдельных гелиостатов. В качестве границы пятна принято 10 процентное значение максимальной плотности энергии. Для удобства, гелиостаты разделены на 2 группы.

В заключении отметим, что вышприведенные данные являются очень востребованными для анализа и выбора требуемого технологического режима БСП.

Работа выполнена по гранту ФПФИ АН РУз.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] С.А.Азимов. "Научно-Производственный комплекс "Солнце". Бизеркальная полигелиостатная Солнечная печь тепловой мощностью 1000 квт", Гелиотехника, 1987, № 6, стр.3-6. [2] Abdurakhmanov A.A., Akbarov R.Yu., Riskiev T.T., Lewandowski A. "On calculation of optical-enrgetical characteristics of double mirror concentrating systems", Гелиотехника, 2002. №2. стр.16-19. [3] Акбаров Р.Ю., Пирматов И.И., Riskiev T.T. "Регулирование распределения плотности энергии в фокальной зоне большой солнечной печи". Гелиотехника, 1998г, №1, стр.58-64. [5] Акбаров Р.Ю., Пирматов И.И., Riskiev T.T. "Особенности формирования фокального пятна крупных солнечных печей с полигелиостатными системами", Гелиотехника, 1998, №5, стр.45-48.

## МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ СОЛНЕЧНОГО СИЯНИЯ НА ОСНОВЕ МЕТЕОДАНЫХ И МОДЕЛЬНЫХ РАСЧЕТОВ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ

Р.Ю.Акбаров

Институт Материаловедения НПО "Физика-Солнце" АН РУз  
e-mail: [r.akbarov@inbox.uz](mailto:r.akbarov@inbox.uz)

### Аннотация

*В работе рассматривается метод определения продолжительности солнечного сияния на базе метеорологических данных и модельных расчетов солнечной радиации. Расчеты проведены на основе данных Паркентской метеостанции для месячного наблюдения. Рассматривается корреляционное соотношение между глобальной радиацией и продолжительностью солнечного сияния с использованием формулы Ангстрем-Прескота.*

**Ключевые слова:** Продолжительность солнечного сияния, продолжительность астрономического дня, солнечная радиация, глобальная радиация, прямая солнечная радиация, дневная радиация, средняя месячная радиация, склонение Солнца, солнечная постоянная, ясное небо, время восхода и захода Солнца, метеорологические данные, пиранометр, пиргелиометр, интерполяция, фактор мутности, масса воздуха, формула Ангстрем-Прескота, БСП.

Республика Узбекистан обладает высоким потенциалом альтернативных источников энергии. Одним из важных показателей потенциала использования солнечной энергии является продолжительность солнечного сияния местности (в часах). По данным [1], продолжительность солнечного сияния на севере Узбекистана составляет в среднем 2800 ч/год. К югу значения возрастают, и на крайнем юге (Термез) продолжительность солнечного сияния достигает 3050 ч/год. Распределение продолжительности солнечного сияния по равнинной территории широтное, в предгорьях и горных областях определяется влиянием закрытости горизонта и экспозицией склонов. В зимне-весенний период продолжительность солнечного сияния минимальна – в среднем 80-100 ч в месяц. Пасмурные дни без солнечного сияния в Узбекистане отмечаются редко. В северных и горных районах их число достигает 45-50 в год, снижаясь на крайнем юге до 25. Наибольшее число таких дней приходится на декабрь-январь: от 10 до 25 (в сумме за два месяца). С июня по сентябрь включительно наблюдается от 1 до 4 дней без солнечного сияния в среднем за 10 лет.

Продолжительность солнечного сияния (ПСС или SD) является важной характеристикой местности и измеряется в часах и минутах. Данные о SD играют важную роль в медицине, туризме, аграрном секторе, авиации и др. В различных изданиях также используются термины, такие как число солнечных дней, ясных дней, бессолнечных дней и др. Однако, обычно в течение одного дня можно наблюдать и солнце, и облачности другие. Поэтому эти термины менее информативны и в определенной степени являются абстрактными, и следует их использовать в определенном контексте. Например, если число бессолнечных дней в году  $N$  (где не наблюдается Солнце), то число солнечных дней в году равно  $365-N$ .

Для ясности Всемирная Организация метеорологии (WMO) определил продолжительность солнечного сияния как сумму промежутков времени, в которых прямая солнечная радиация имеет значение не менее чем  $120 \text{ Вт/м}^2$  [2]. Термин SD используется применительно к периодам времени как день, декада, месяц, год и так далее.

Следует отметить, что в метеорологии ПСС широко используется для определения других характеристик ресурсов солнечной энергии. Например, используя данные о ПСС, можно опреде-

лить глобальную солнечную радиацию (формула Ангестрема), изучены взаимосвязи ПСС и температуры воздуха и др.

ПСС измеряются специальными приборами – гелиографами. Раньше в метеостанциях использовались Кампбелл-Стокес (Campbell-Stokes) и Джордан (Jordan) рекордеры ПСС. Сейчас из-за их цены, невысокой точности измерения и недостатков в эксплуатации от них отказываются. В последние годы разработаны компактные измерители на базе фотосенсоров. Такие приборы также выпускаются в странах СНГ, например, в России и Белоруссии. К сожалению, с такими приборами не снабжены многие метеорологические станции (МС), в частности и в Узбекистане. Также обсуждается вопрос о достаточности пиранометров и пиргелиометров для этих измерений. В ресурсах интернета встречаются данные о ПСС для Ташкента, базированные на оценках и/или данных сторонних метеостанциях (например, Ленинадская метеостанция (Таджикистан), видимо из-за близости местностей). По этим данным ПСС по месяцам следующее: 117.8; 127.1; 164.3; 216.0; 303.8; 363.0; 384.4; 365.8; 300.0; 226.3; 150.0; 105.4;

Поэтой причине актуальными являются расчетные исследования ПСС на основе данных МС и модельных расчетов солнечной радиации [3-6] на территории Узбекистана. ПСС вычисляются непосредственным подсчетом за весь рассматриваемый период наблюдений. Относительная величина ПСС представляет собой отношение наблюдавшейся продолжительности к теоретически возможной.

На примере Узбекистана, можно отметить, что современные данные о ПСС отсутствуют, МС не ведутся измерения ПСС и мало удалено внимание к таким исследованиям. К сожалению, приведенные в литературе информации базируются на устаревших данных. Представляется, что некоторые общие характеристики ресурсов солнечной энергии, например, приведенные выше, являются корректными в плане среднестатистической характеристики. Однако, для многих прикладных задач по освоению ресурсов солнечной энергии и корректного прогнозирования решения проблем, необходимо детальная информация по данному вопросу.

В данной работе рассматривается метод определения продолжительности солнечного сияния на основе данных метеостанций и модельных расчетов солнечной радиации.

Для определения относительных показателей ПСС необходимо знать астрономическую продолжительность дня. Время восхода ( $t_r$ ) и захода Солнца ( $t_s$ ) можно определить по формуле

$$t_{r,s} = \pm \arccos(-tg\varphi tg\delta) / k \quad (1)$$

здесь  $\delta$ -склонение Солнца,  $k=15$  град./час=0.2618 рад./час,  $\varphi$  -географическая широта.

Склонение Солнца определяется по формуле Спенсера [7] ( $g$  в градусах):

$$\delta = \left(\frac{180}{\pi}\right)(0.006918 - 0.399912 \cos(g) + 0.070257 \sin(g) - 0.006758 \cos(2g) + 0.000907 \sin(2g) - 0.002697 \cos(3g) + 0.001480 \sin(3g)), g = 360(n-1)/365 \quad (2)$$

Здесь  $n$  – номер дня с начало года. (например, для 15 января  $n=15$ , для 31 декабря  $n=365$ ). Связь между  $n$  и месяцем ( $m=1\div 12$ ) и днем ( $d=1\div 31$ ) имеет вид

$$n = \left[ \frac{275m}{9} \right] - 2 \left[ \frac{m+9}{12} \right] + d - 30 \quad (3)$$

В таблице представлены номер дня для первого числа каждого месяца.

Таб. 1: Номер дня первого числа каждого месяца

Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
1	32	60	91	121	152	182	213	244	274	305	335

Для суммы длительности астрономического дня на определенный период можно написать выражение

$$t_{nm} = \frac{2}{k} \sum_{i=n}^{i=n+m} \arccos(-tg\varphi tg\delta_i) = \frac{2}{k} \sum_{i=n}^{i=n+m} \arccos x_i, \quad x_i = -tg\varphi tg\delta_i \quad (4)$$

здесь  $n$  – номерпервогодня,  $m$  – число дней в рассматриваемом периоде. Если  $n=1$  и  $n+m=365$ , то имеем годовую сумму. Для месяца в качестве  $n$  надо взять номер первого дня месяца, а  $m$  число дней в месяце. Для вычисления арккосинуса воспользуемся рядом Фурье

$$\arccos x = \frac{\pi}{2} - \arcsin x = \frac{\pi}{2} - \left( \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2n)!}{4^n (n!)^2 (2n+1)} x^{2n+1} \right) = \frac{\pi}{2} - \left( x + \frac{x^3}{6} + \frac{3x^5}{40} + \frac{5x^7}{112} + \frac{35x^9}{1152} + \dots \right)$$

Тогда

$$t_{nm} = \frac{m\pi}{k} - \frac{2}{k} \sum_{i=n}^{i=n+m} \left[ x_i + \frac{x_i^3}{6} + \frac{3x_i^5}{40} + \frac{5x_i^7}{112} + \frac{35x_i^9}{1152} + \dots \right] \quad (5)$$

Как показываютпредварительные расчеты, для практических расчетов достаточно два члена ряда, т.е.

$$t_{nm} = \frac{m\pi}{k} + \frac{2}{k} \sum_{i=n}^{i=n+m} \text{tg} \varphi \text{tg} \delta_i + \frac{2}{k} \sum_{i=n}^{i=n+m} \frac{\text{tg}^3 \varphi \text{tg}^3 \delta_i}{6} = \frac{m\pi}{k} + \frac{2\text{tg} \varphi}{k} \sum_{i=n}^{i=n+m} \text{tg} \delta_i + \frac{\text{tg}^3 \varphi}{3k} \sum_{i=n}^{i=n+m} \text{tg}^3 \delta_i \quad (6)$$

Используя формулуСпенсера, выполнены численные расчеты для каждого месяца. Полученные формулы имеют вид:

$$\begin{aligned} t_1 &= 372 - 90.15\text{tg} \varphi - 2.22\text{tg}^3 \varphi & t_2 &= 336 - 49.52\text{tg} \varphi - 0.50\text{tg}^3 \varphi & t_3 &= 364 - 8.43\text{tg} \varphi - 0.02\text{tg}^3 \varphi \\ t_4 &= 360 + 38.72\text{tg} \varphi + 0.24\text{tg}^3 \varphi & t_5 &= 372 + 80.28\text{tg} \varphi + 1.6\text{tg}^3 \varphi & t_6 &= 360 + 97.54\text{tg} \varphi + 2.95\text{tg}^3 \varphi \\ t_7 &= 372 + 92.23\text{tg} \varphi + 2.37\text{tg}^3 \varphi & t_8 &= 372 + 58.50\text{tg} \varphi + 0.67\text{tg}^3 \varphi & t_9 &= 360 + 12.51\text{tg} \varphi + 0.03\text{tg}^3 \varphi \\ t_{10} &= 372 - 35.55\text{tg} \varphi - 0.19\text{tg}^3 \varphi & t_{11} &= 360 - 75.6\text{tg} \varphi - 1.44\text{tg}^3 \varphi & t_{12} &= 372 - 100.36\text{tg} \varphi - 3.01\text{tg}^3 \varphi \end{aligned}$$

Графики этих функций представлены на рис.1. Вертикальная ось – месячные суммы продолжительности дней (в часах), горизонтальная ось – географическая широта местности (в градусах), цифры на графике показывают кривую, соответствующую номеру месяца.

Аналогичные расчеты можно проводит и для года. Результаты следующие

$$\sum_{i=1}^{365} \text{tg} \delta_i = 2.638, \quad \sum_{i=1}^{365} \text{tg}^3 \delta_i = 0.37064$$

$$t_{year} = 4380 + 20.153\text{tg} \varphi + 0.472\text{tg}^3 \varphi \quad (7)$$

Полагая  $\varphi=0$ , для экватора имеем  $t_{эк}=4380$  часов.

Отметим, что для крайней южной точки Республики –  $t_{year} = 4395.48$  часов ( $\varphi=37.17^\circ$ ), для Паркента, БСП –  $4398.19$  часов ( $\varphi=41.53^\circ$ ) и для крайней северной точки Республики –  $4401.11$  часов ( $\varphi=45.59^\circ$ ), т.е  $t_{year}$  слабо зависит от географической широты. Расчеты показывают, что при изменении  $\varphi$  по всему Земному шару,  $t_{year}$  изменяется всего на 56 часов. Это означает, что годовая продолжительность дня для любой местности Земли приблизительно одинакова, что отмечено в некоторых публикациях.

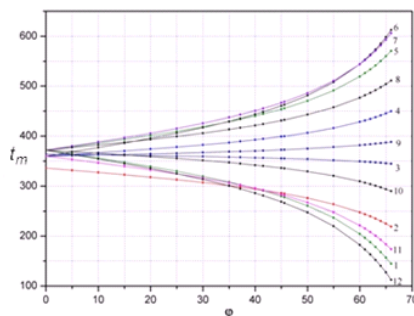


Рис.1. Длительность дня для различных месяцев.

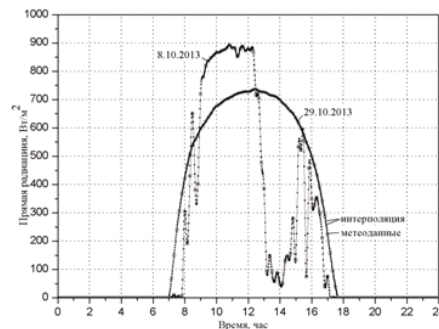


Рис.2. Интерполяция метеоданных



Сравнительные расчеты показывают, что погрешности формул не более 0.12%. Анализ этих данных показывает, что в южных территориях Республики время нахождения Солнца над горизонтом составляет 4387 часов в году, а в северных территориях 4393 часов, из них на теплый период приходится (март-октябрь) соответственно 3188 и 3281 часов (73%,75%).

Рассмотрим теперь вопрос об определении продолжительности солнечного сияния(*SD*) на основе метеоданных. На объекте “Солнце”, в институте Материаловедения, (в 6 км от центра Паркентского района, г.Паркента) также расположена метеорологическая станция (MS4-12-01) с современными солнечными датчиками и другими измерительными приборами (пиранометры RSP-4G, пиргелиометры СНР1 (актинометры), термометры Campbell Sci CS215, барометры Campbell Scientific CS100 и др.). Объект “Солнце” имеет следующие географические данные: 41.32° – географическая широта, 69.74°- долгота, 1081м – высота над уровнем моря. В расчетах используются данные этой станции.

На станции отсутствуют приборы для непосредственного измерения *SD* и не реализован автоматический расчет *SD*. Интервал записи солнечной радиации составляет 10 мин (раньше в метеостанциях этот интервал был 30 минутам), хотя измерения производятся чаще. Нами используется прямая солнечная радиация(*E<sub>bm</sub>*), показания пиргелиометра СНР1. Непосредственно по этим данным можно только оценить *SD*, причем в изменчивой погоде оценка ухудшается. Для корректного определения дневного *SD* необходимо вычислить интеграл

$$SD = \int_{t_1}^{t_2} \eta(E_{bm}(t))dt \quad (8)$$

где подынтегральная функция  $\eta$  равно единице, если  $E_{bm} \geq 120 \text{ Вт/м}^2$ , в противном случае равно нулю.  $t_1, t_2$  - время восхода и захода Солнца или начало и конец временного интервала. Таким образом, следует интерполировать функцию  $E_{bm}(t)$ . Нами использована кубическая сплайн интерполяция. Алгоритмы взяты из книги [8] (подпрограммы Spline и Seval). Для примера рассмотрены данные метеостанции от 8.0.2013 и 29.10.2013. Результаты интерполяции представлены на рис.2. На рисунке крупные точки относятся к метеоданным, а мелкие результат интерполяции. Из рисунка видно, что результат интерполяции хороший (нет необходимости вычислять параметры интерполяции). В численных расчетах интервал времени равен 1 минутам. Поэтому данный интеграл можно заменить на простое суммирование. Результаты расчета *SD* для октября месяц 2013 года представлены на рис.3 (кривая 1).

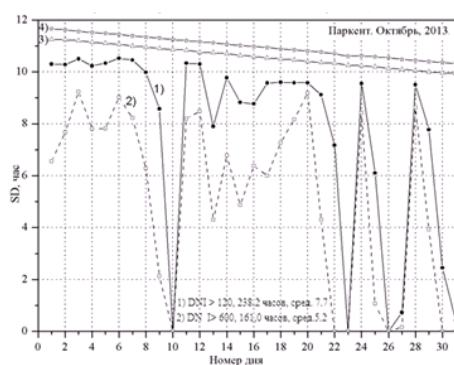


Рис.3. Зависимость SD от номера дня

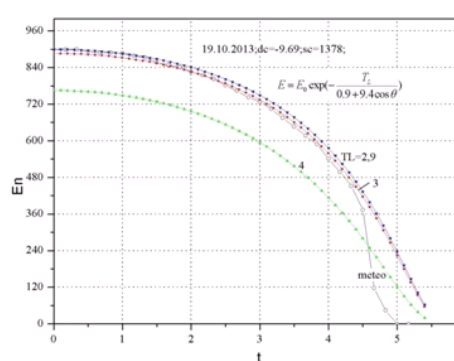


Рис.4. К выбору параметров модели

На этом же рисунке приведена зависимость продолжительности астрономического дня(кривая 4). Данная кривая 4 вместо кривой 1 показывает взаимосвязь *SD* и продолжительности астрономического дня  $t_r - t_s = SD_{ast}$ .

Определим теперь максимально возможную продолжительность солнечного сияния. Не следует идентифицировать эту зависимость с кривой 4. В этом случае необходимо вместо экспериментальных данных прямой солнечной радиации следует использовать прямую солнечную радиацию при ясном (безоблачном) небе. Существует много моделей (простые и сложные) данной зависимости для различных случаев. Для сухого и стабильного климата Узбекистана достаточно простые модели. Нами рассматривался модели, в которых процесс уменьшения солнечной радиации описывается экспоненциальной функцией, т.е.

$$E_{bm} = e^{-x \cdot AM} \quad (9)$$



В расчетах нами была использована наиболее распространённая модель [9], вид которой имеет вид

$$E_{bm} = E_{sc} \exp\left(-\frac{T_L}{0.9 + 9.4 \cos \theta}\right) \quad (10)$$

Где  $T_L$  – фактор мутности атмосферы (фактор мутности Линке),  $E_{sc}$  – солнечная константа. Максимальное значение  $T_L$  для индустриальных зон может достигать величину 5,8. Для высокогорных местностей интервал изменения составляет 0,5÷2,3, а для сельских местностей 2÷3,5 в течение года. Для годового изменения солнечной константы можно использовать формулу [7]

$$E_{sc}(n) = 1367(1.000110 + 0.034221 \cos(B) + 0.001280 \sin(B) + 0.000719 \cos(2B) + 0.000077 \sin(2B)), \quad B = (n-1) \frac{360}{365} \quad (11)$$

Для определения параметров рассматриваемой модели из метеоданных выбрали день (визуально из графика метеоданных, в нашем случае 19.10.2013), в котором ясное безоблачное небо и применили к нему модель прямой радиации с соответствующими коэффициентами. На рис.4 показаны результаты численных расчетов для различных значений  $T_L$  и данные метеостанции (сплошная кривая). Видно, что при  $T_L = 2.9$  в большом участке имеется неплохое совпадение, а после 4.4 часов характер кривой метеоданных изменяется (из-за ухудшения погоды), что не существенно для рассматриваемой задачи. Статический анализ корреляции метеоданных и рассмотренной модели не входит задачу данной работы и его целесообразно проводить для большого массива данных.

Теперь, если в формуле  $SD = \int_{t_1}^{t_2} \eta(E_{bm}(t)) dt$  вместо экспериментальных данных использовать

формулу выбранной модели, можно получить максимально возможную продолжительность  $SD_{max}$  солнечного сияния. На рис.3 кривая 3 соответствует этому случаю. Из графика видно, что зависимость  $SD_{max}$  и  $SD_{ast}$  от номера дня линейная. Среднеарифметическое отклонение этих величин за месяц составляет 0.382 и поэтому можно написать соотношение  $SD_{max} = SD_{ast} \cdot 0.382$ .

Нетрудно понять, что отношение наземной и внеатмосферной дневной солнечной радиации пропорционально отношению ПСС и длительности астрономического дня. Уравнение для данного соотношения впервые предложено Ангстромом в 1924 году и модифицировано Прескотом в 1940 году. Данное уравнение имеет вид

$$\frac{H}{H_0} = a + b \left( \frac{S}{S_0} \right) \quad (12)$$

Здесь  $H$  – наземная дневная горизонтальная глобальная радиация,  $H_0$  – внеатмосферная дневная радиация,  $a$  и  $b$  – эмпирические константы,  $S = SD$  – ПСС в день,  $S_0 = L_d$  – длительность астрономического дня. Отметим, что для улучшения точности соотношения различными авторами были предложены модифицированные варианты формулы (12), например, Ogelmani Samuel [10]

$$\frac{H}{H_0} = a + b \left( \frac{S}{S_0} \right) + c \left( \frac{S}{S_0} \right)^2, \quad \frac{H}{H_0} = a + b \left( \frac{S}{S_0} \right) + c \left( \frac{S}{S_0} \right)^2 + d \left( \frac{S}{S_0} \right)^3 \quad (13)$$

и формулы для вычисления эмпирических коэффициентов, например, [11].

Из формулы (1) имеем  $L_d = t_s - t_r$

$H_0$  вычисляется из следующей формулы, приведенной в [7]

$$H_0 = \frac{24}{\pi} E_{sc}(n) [\cos \varphi \cos \delta \sin kt_s + kt_s \sin \varphi \sin \delta] \quad (14)$$

Теперь, используя для  $H$  значения горизонтальной глобальной радиации из метеоданных Паркентсой станции, можно определить коэффициенты  $a$  и  $b$  для данного региона. Детальное проведение численных расчетов и их анализ является предметом отдельного исследования.

В заключение отметим, что на Большой Солнечной Печи (БСП) высокотемпературные процессы начинаются при радиации  $600 \text{ Вт/м}^2$ . Если в рассмотренной задаче вместо порогового значения прямой солнечной радиации использовать 600 (замена 120 на 600), то можно определить время эффективной работы БСП  $SD_{600}$ . На рис.3. кривая 2 соответствует к этому случаю. Таким об-

разом, в октябре месяц 2013 года, БСП эффективно работал 161 часом, в среднем каждый день по 5.2 часов.

## ЛИТЕРАТУРА

[1]. В. Е. Чуб. Изменение климата и его влияние на гидрометеорологические процессы, агроклиматические и водные ресурсы республики Узбекистан. Узгидромет. НИГМИ. Ташкент 2007. [2]. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. WMO-No. 8. Seventh edition 2008. © World Meteorological Organization. [3]. Cecilia Stanghellini. A simple method for evaluating sunshine duration by cloudiness observations // Journal of applied meteorology. 1981, Volume 20. pp.320-323. [4]. Stefanie Neske. About the relation between sunshine duration and cloudiness on the basis of data from Hamburg // Journal of Solar Energy. Volume 2014, Article ID 306871. [5]. YVONNE B. L. HINSEN AND WOUTER H. KNAP. Comparison of Pyranometric and Pyrhelimetric Methods for the Determination of Sunshine Duration. // JOURNAL OF ATMOSPHERIC AND OCEANIC TECHNOLOGY. 2007, VOLUME 24. PP.835-846. [6]. Francis Massen. Sunshine duration from pyranometer readings. ver. 1.0 03 June 2011. <http://meteo.lcd.lu> (meteoLCD). [7]. John A. Duffie (Deceased), William A. Beckman. Solar Engineering of Thermal Processes. Fourth Edition. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2013. [8]. Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К. Машинные методы математических вычислений. Изд. МИР, Москва, 1980. [9]. Matthew J. Reno, Clifford W. Hansen, Joshua S. Stein. Global Horizontal Irradiance Clear Sky Models: Implementation and Analysis. Sandia National Laboratories. SANDIA REPORT. SAND2012-2389. 2012. [10]. N.N. Gana and D.O. Akpootu. Angstrom type empirical correlation for estimating global solar radiation in North-Eastern Nigeria. // The International Journal of Engineering and Science (IJES). Vol.2, Issue 11, pp.58-78. 2013. [11]. Griffin Salima, Geoffrey M. S. Chavula. Determining Angstrom Constants for Estimating Solar Radiation in Malawi. // International Journal of Geosciences, 2012, 3, 391-397.

## КАТТА ҚУЁШ ПЕЧИ ГЕЛИОСТАТЛАРИНИ АВТОМАТИК БОШҚАРИШ ТИЗИМИНИНГ КОНСТРУКТИВ АЛГОРИТМИ

М. Атаханов<sup>1</sup>, Б. Солиева<sup>3</sup>, Э.Т. Жўраев<sup>2</sup>, Х.Х. Саидов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно-инновационного центра ИКТ при ТУИТ им. Мухаммада ал-Хоразми  
Ташкент, ул. Кичик халка йўли 2, 100084, Узбекистан, [mavlonbekax@gmail.com](mailto:mavlonbekax@gmail.com)

<sup>2</sup>ФТИ АН РУз

Ташкент, ул. Бодомзор йўли 2-Б, 100084, Узбекистан, [ejuraev@gmail.com](mailto:ejuraev@gmail.com)

<sup>3</sup>Научно-инновационного центра ИКТ при ТУИТ им. Мухаммада ал-Хоразми  
Ташкент, ул. Кичик халка йўли 2, 100084, Узбекистан, [barnoxon76@mail.ru](mailto:barnoxon76@mail.ru)

Маълумки, энергия масаласи дунёда энг долзарб муаммолардан бири бўлиб қолмоқда. Энергия муаммосини ҳал қилиш борасида дунёда кўплабишланмалар ва ёндашувлар мавжуд. Кундалик ҳаётимизда электр энегияси, газ ва нефит маҳсулотларидан кенг фойдаланамиз. Ушбу ресурслар ҳам чегараланганлиги ҳисобга олиб, буларни ўрнини қоплайдиган муқобил энергия манбааларидан аниқлаш ва улардан фойдаланишни йўлга қўйиш узоқ йиллардан бери соҳа мутахасисларини олдида турган долзарб масалалардан биридир ва ўз навбатида қуёш энергияси, шамол энергияси ва ҳ.к.лар каби энергиядан фойдаланиб келинмоқда.

Ўзбекистонда ҳам муқобил энергия манбаларидан унумли фойдаланиш анча аввалдан бошланган. Бирок, уларни замонавий информацион-технологияларнинг дастурий ва техник воситалари ёрдамида автоматик бошқарув тизимларини интеграция қилиш орқали модернизация қилиш зарур. Бу эса, республика ҳалқхўжалининг барча жабхаларига ижобий таъсирини ўтказди. Шу билан бирга республикадаги ГЭС, ИЭС, ТЭЦ ларга қўшимча мадад куч бўлиб хизмат қилади.

Катта қуёш печигелиостатларини (КҚПГ) бошқариш тизимини ҳам замон талабидаги технологиялар асосида янгилаш долзарб муаммолардан бири бўлиб қолмоқда.

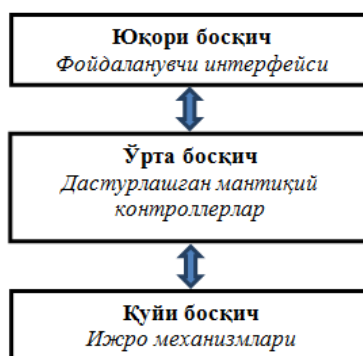
Бундай технологик жараёнларни автоматик бошқариш тизими (АБТ) ўзаро боғлиқ бошқарув мажмуалари сифатида қаралади. Автоматлаштирилган бошқарув тизимларининг асосий мақсади, бошқарилаётган объектнинг потенциал имкониятларидан максимал фойдаланишдан иборат.

АБТ уч йўналишда қуйидагича функцияларини бажаради:

- Режалаштириш ва башоратлаш;
- Ҳисоб, назорат ва таҳлил;
- Координациялаш ёки регулировка қилиш.

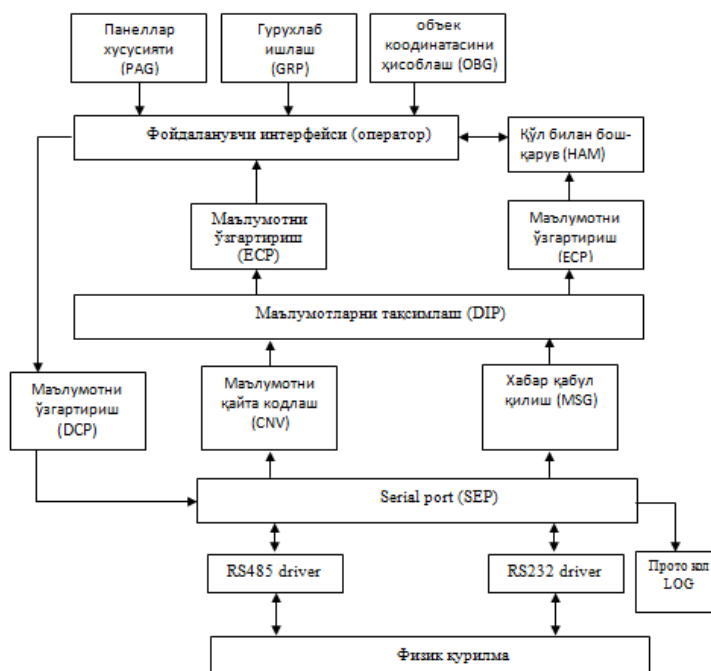
Мазкур ишда “координациялаш ёки регулировка қилиш” функцияси қаралади.

АБТ технологик жараёнларни учта босқичга ажратиб ва ўзаро мос ҳолда боғлаб ишлашни таъминлайди.



1-расм. АБТ технологик жараёнларни бошқариш босқичлари

КҚПГ ни бошқариш алгоритми бир нечта модуллардан ташкил топган бўлиб, улар қуйидагилардагича конструкцияга эга:



2-расм. КҚПГ автоматлаштирилган бошқарув системасининг дастурий таъминот структураси

SEP – асосий модул бўлиб кета-кет портлар ресурсларидан фойдаланиш учун метод ва хусусиятларни ўз ичига олган.

RS485 driver, RS232 driver – физик қурилманинг тизим драйверлари. Физик қурилма билан ишлашдан аввал, тизимнинг инициализация модуллари соzланган бўлиши шарт. Созлаш маълумот алмашиш тезлиги, маълумот форматлари, буферлар ҳажми каби параметрлар билан амалга оширилади.

CNV – RS485 тармоғидан маълумотларни олиш ва коддан ечиш мудули.

MSG – RS232 тармоғидан буйруқларни бажарилганлик ҳақидаги хабарларни олиш модули.

DIP – келган маълумотларни асосий ва қўл билан бошқариш ойналарига бўлувчи модул. Бу модул буйруқлари қайси ойнадан юборилган бўлса, келган маълумотни айнан ана шу ойнага юбориш учун хизмат қилади.

ECP – қабул қилинган маълумотни фойдаланувчи (оператор) учун тушинарли кўринишга келтириш ҳамда маълумотни бир санок системасида бошқа санок системасига ўтказишни таъминлайди.

HAM – ҳар бир гелостат билан алоҳида ишлашни ва у ҳақидаги статистик маълумотларни кўришни таъминловчи модул.

PAG – панелнинг барча хусусиятлари ва маълумотларни ўзида сақлайди ҳамда уларни визуал кўринишда экранга чиқаришни таъминлайди.

GRP – модулнинг вазифаси гелиостатларни гуруҳларга бўлиш ва уларни гуруҳлаб бошқариш.

OBG – объект координатсини аниқланган вақт бўйича ҳисоблаш модули. Қуёш координатасини аниқлаш алгоритми (Solar Position Algorithm (SPA) ) ёрдамида бажарилади.

DCP – юбориладиган маълумотни физик қурилма учун мос кўринишга келтиришни таъминлайди.

LOG – тизим фаолияти баённомасини тузиш модули. Система холати хақидаги маълумот фойдаланувчи интерфейсидан олинади.

Қурилма ва компьютер ўртасида маълумотлар алмашинуви учун командалар рўйхати келтирилган. Командалар 4 гуруҳга бўлинган бўлиб улар қуйидагилар:

- режимларни бошқарувчи буйруқлар гуруҳи;
- маълумотларни юборувчи буйруқлар гуруҳи;
- маълумотларни ўқувчи буйруқлар гуруҳи;
- бошқарув буйруқлар гуруҳи.

Компьютер ва гелиостат ўртасидаги маълумотлар алмашинувини ASCII форматда бажариш ҳам мумкин, лекин бу маълумот алмашинуви ҳамда иккилик санок системасига ўтказишни секинлаштириб юборади.

Шу сабабли 3-расмда келтирилган формат танланган.

Манзил		Буйруқ		Маълумот				Белги	
A	A	C	C	D	D	...	D	D	T

3-расм. RS485 тармоғи учун пакет формати

бу ерда AA - RS485 тармоғидаги гелиостат манзили, CC – гелиостатга юбориладиган буйруқлар, DD - гелиостатга юбориладиган ва қабул қилинадиган маълумотлар, T – пакет яқунланганлигини билдирувчи белги. Барча белгилар ўн олтилик санок системасида берилади.

Будай кетма-кетликни пакет кўринишига келтириш, ҳар бир пакетнинг майдонини ўз идентификатори билан боғлашдир. Ҳар бир ўн олтилик рақам 4 бит маълумотни ўз ичига олади. Яна 2 бит майдонни тўрт типини кодлаштириш учун талаб этилади. Бу 2 бит ўн олтилик рақамга катта бит қилиб жойлаштирилади. Агарда бошқарув белгисини 0, майдон манзилини 1, буйруқ майдонини 2, маълумот майдонини 3 идентификаторлари билан белгиласак пакет формати 3-рамдаги кўринишга эга бўлади.

Манзил		Буйруқ		Маълумот				Белги	
1A	1A	2C	2C	3D	3D	...	3D	3D	0T

4-расм. RS485 тармоғи учун пакет формати формат идентификаторлари билан бирга

Гелиополяни бошқариш системаси яратишда C/C++ дастурлаш тилилари ҳамда Qt 5.6 Framework, маълумотлар алмашиш учун QtSerialPort кутубхонасидан фойдаланилди.

Хулоса ўрнида шуни айтиш мумкинки, ишлаб чиқилган автоматик бошқариш тизими қуйидагича афзалликларга эга:

- қарор қабул қилувчи шахсга (ҚҚҚШ) релевант ахборотларни тақдим қилади;
- тўпланган ва қайта ишлов берилган маълумотлар орқали алоҳида амалларни тез

бажаришини қулайлаштиради;

- Назорат ва ижро дисциплиналари даражасни оширади;
- ҚҚҚШ реал қарор қабул қилиш харажатларини камайтиради.

## АДАБИЁТЛАР

- [1] Стенли Б, Лажое и др. Язык программирования С++ базовый курс. Москва, 2014 [2] Чиртик А. А. Программирование на С++. Трюки и эффекты (+CD). Питер, 2010 [3] Земсков Ю. Qt 4 на примерах. Санкт-Петербург, 2008 [4] Макс Шлее. Qt 5.3. Профессиональное программирование на С++. БХВ-Петербург, 2015 [5] IbrahimRedaandAfshinAndreas. SolarPositionAlgorithmforSolarRadiationApplications. NationalRenewableEnergyLaboratory. 2008.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СОЗДАНИЯ П ОБРАЗНОЙ ФОРМЫ ОПТИЧЕСКОГО ПЯТНА НА ФОКАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ БСП С ГЕЛИОСТАТАМИ ОДНОЙ ПОЛКИ

Ш.И.Клычев, Л.Ражапов, Р.Х.Рахимов, А.Фазилов, Ю.Б.Собиров

### Аннотация

На этой работе показывается, что при выборочном использовании гелиостатов гелиостатного поля можно получить на фокальной плоскости БСП желаемое солнечное оптическое пятно на примере П образного равномерного распределения плотности мощности. Результаты работы можно использовать при накачке лазеров сконцентрированными солнечными лучами на БСП.

**Ключевые слова:** гелиотехника, гелиостат, большая солнечная печь, концентрация солнечных лучей.

### 1. Введение.

Работа относится к гелиотехнике и позволяет расширить функциональный рабочий диапазон Большой Солнечной Печи (БСП) в Паркенте, в области преобразования энергии, в частности, для использования его для накачки сконцентрированными солнечными лучами мощных лазеров [1– 3].

Задача – регулирование светового потока на БСП, была поставлена отечественными учеными в конце семидесятых годов прошлого столетия еще до создания БСП в Паркентском районе Ташкентской области [4]. Только спустя почти двадцать лет удалось решить теоретическую сторону поставленной задачи в виде регулируемого распределения плотности энергии в фокальной зоне БСП [5]. Однако в последней работе была рассмотрена задача равномерного регулирования облученности фокального пятна только в радиальном направлении. В тоже время, задача осуществления заданного формообразования облученности фокальной плоскости является более общей и следовательно достаточно сложной. Имеется единственная работа [6] в которой рассмотрена теоретический метод расчета формообразования оптического пятна на фокальной плоскости БСП. На этой работе был представлен алгоритм расчета создания П образной формы оптического пятна со всеми 62 –мя гелиостатами БСП. Там с учетом новизности этой задачи были введены необходимые понятия и были сформулированы прямой и обратной задачи.

**Прямой задачей** названо определение распределения плотности мощности облучения на фокальной плоскости БСП соответствующее определенному состоянию гелиостатного поля (система отводов гелиостатов).

**Обратной задачей** названо определение состояния гелиостатного поля (системы отводов гелиостатов) которое обеспечивает максимально близкое к заданному распределению плотности мощности облучения на фокальной плоскости БСП.

**2. Прямая задача.** Там же [6] для распределения плотности мощности  $W(X, Y)$  оптических лучей на фокальной плоскости БСП было представлена следующая формула

$$W(X, Y) = \sum_{J=1}^{62} W_J(X - X_{F, J}, Y - Y_{F, J}), \quad (1)$$

где  $W_J(X - X_{F, J}, Y - Y_{F, J})$  – распределение плотности мощности на фокальной плоскости от  $J$ -го гелиостата,  $X_{F, J}, Y_{F, J}$  – координаты на фокальной плоскости оси  $J$ -го оптического пучка возникающий от солнечных лучей отраженных сначала от  $J$ -го гелиостата, потом от параболического концентратора,  $X, Y$  – координаты фокальной плоскости (рис.1).

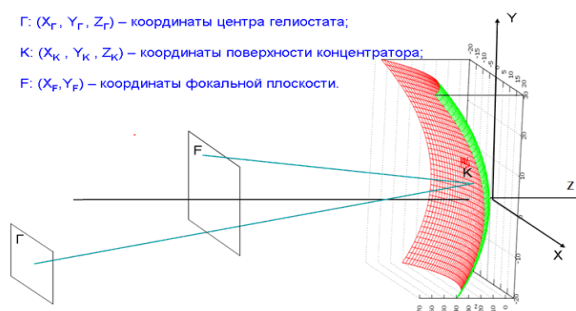


Рис. 1. Схема поясняющая ход оптического луча в системе гелиостат – концентратор – фокальная плоскость. Здесь Г – гелиостат, К – концентратор, F – фокальная плоскость. Для простоты в обозначениях опущен индекс  $J$  указывающий номер гелиостатов.

Однако на практике не все гелиостаты бывают работоспособными (исправными). При этом негодность или неисправность гелиостатов нужно понимать в широком смысле. Вот один пример негодности гелиостата. Бывают гелиостаты с достаточно плоско расположенными facets, коэффициенты отражения зеркал тоже в норме, но управление поворота гелиостата на определенный угол выполняется с люфтом или выполняется некорректно.

В таких случаях для получения необходимой картину оптического пятна необходимо использовать только исправные гелиостаты. При этом общая мощность облучения фокальной плоскости, естественно, уменьшается, а формула (1) приобретает дополнительный коэффициент  $A_J$  в выражении под суммой и имеет следующий вид

$$W(X, Y) = \sum_{J=1}^{62} A_J W_J (X - X_{F, J}, Y - Y_{F, J}), \quad (2)$$

где  $A_J = 1$  для используемых гелиостатов (с номером  $J$ ),  $A_J = 0$  для неиспользуемых гелиостатов (с номером  $J$ ). Нужно отметить, что на практике неиспользуемые гелиостаты не участвуют в концентрации солнечного излучения на фокальной плоскости БСП.

На этой работе рассматриваются расчет создания равномерного П образного распределения плотности мощности облучения фокальной плоскости только гелиостатами четвертой полки (гелиостаты с номерами 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30) БСП. Для такого случая формула (2) приобретает следующий вид

$$W(X, Y) = \sum_{J=22}^{30} W_J (X - X_{F, J}, Y - Y_{F, J}). \quad (3)$$

При решении поставленной задачи теоретически придется более или менее идеализировать условия задачи. Следовательно, прямая задача и на ее основе обратная задача была решена на основе следующей принятой модели оптической системы: гелиостат-концентратор-фокальная плоскость + оптический пучок, которую мы в дальнейшем будем называть моделью прямой задачи.

#### Модель №1:

1. Каждый гелиостат вне зависимости от места нахождения облучает фокальную плоскость с одинаковой мощностью (поток излучения)  $W_0 = 10000 \text{ (Вт)}$ .
2. Пространственное распределение интенсивности оптического пучка соответствующего каждому гелиостату составляет круговой гауссиан в поперечном сечении с полушириной  $d = 30 \text{ см}$ .
3. Отражающая поверхность концентратора БСП является идеальным параболоидом (с параметром  $P = 36 \text{ м}$  и фокальным расстоянием  $F = 18 \text{ м}$ ).
4. Затенение концентратора корпусом приемника и гелиостатами друг другу не учитывается.

Авторами [6] было получена аналитическая формула распределения облученности фокальной плоскости по выше описанной модели в таком виде

$$W(X, Y) = W_0 \ln 2 / \pi d^2 \sum_{J=22}^{30} \cos(\alpha_J) \exp\{-\ln^2[(X - X_{F, J})^2 (\cos^2 \varphi_J / a_J^2 + \sin^2 \varphi_J / d^2) \quad (4)$$

$$- (X - X_{F, J})(Y - Y_{F, J}) \sin^2 \varphi_J (1/a_J^2 - 1/d^2) + (Y - Y_{F, J})^2 (\sin^2 \varphi_J / a_J^2 + \cos^2 \varphi_J / d^2)]\},$$

$a_J = d / \cos(\alpha_J)$ , где  $d$  – полуширина оптического пучка, что для простоты считается одинаковым для всех гелиостатов,  $\alpha_J$  – угол падения оптического луча на фокальную плоскость,  $\varphi_J$  – угол между проекцией оптического луча на фокальную плоскость и осью  $OX$  (рис. 2).

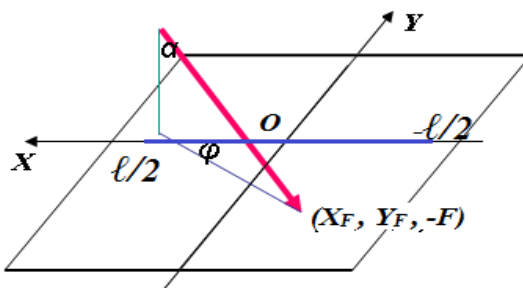


Рис. 2. Схема падающего оптического луча на фокальную плоскость. Здесь для простоты в угловых обозначениях  $\alpha, \varphi$  и других координатах опущен индекс  $J$  указывающий номер гелиостатов.

Существует такой режим работы БСП, при котором  $\alpha_J \equiv 0$ , т. е. оптические лучи от всех гелиостатов будут направлены параллельно оси концентратора (см. рис. 1, 2). Именно в таком режиме на фокальной плоскости создается колоколообразное распределение с максимальной плотностью мощности в его центре, что и является основным назначением БСП. Направления (нормалей) гелиостатов обеспечивающие такой режим вне зависимости от угловой координаты Солнца которая в свою очередь является зависимой от времени дня, месяца и года [5], называются **стан-**



дартными направлениями гелиостатов. Отклонения гелиостатов от этих направлений называются отводами.

При выводе формулы (4) ход оптических лучей (лучистого вектора [7]) определен на основе уравнениям геометрической оптики и по закону Декарта – Снеллиуса [8]. Здесь ещё, нужно отметить,  $W(X, Y)$  определена аналитической формулой что очень важно при решении обратной задачи. В последней формуле на уровне принятой модели автоматически учитываются растяжении проекции на фокальной плоскости БСП распределения интенсивности от каждого гелиостата и повороты проекции (см. рис. 2). Коэффициенты  $\ln 2 / \pi d^2 \cos(\alpha_j)$  служат для нормировки полного потока мощности.

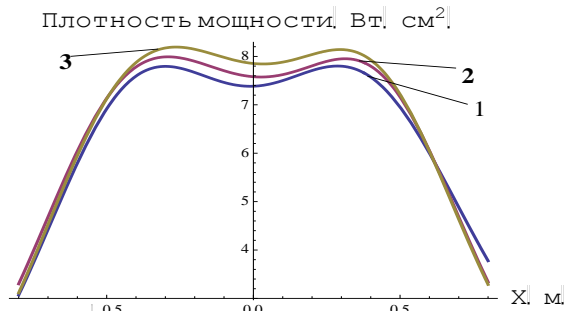


Рис. 3. Графики П – образного распределения плотности мощности облучения  $W(X, Y=0)$  на оси  $OX$  фокальной плоскости для значений параметра  $W_A = 7.6$  (1 – график),  $W_A = 7.8$  (2 – график),  $W_A = 8.0$  (3 – график), полученные теоретическим отводом гелиостатов четвертой полки БСП ( $d=0.3\text{ м}$ ,  $\ell=1\text{ м}$ ).

**3. Метод решения обратной задачи.** Алгоритм обеспечивающий получения П образного распределения облученности вдоль отрезка (активного элемента твердотельного лазера) длиной  $\ell$  находящиеся на оси  $OX$  фокальной плоскости БСП имеет вид

$$m(X_{K,J}^0, Y_{K,J}^0, Z_{K,J}^0) = \min \left[ \int_{-\ell/2}^{\ell/2} [W(X, Y=0) - W_A]^2 dX \right], \quad (5)$$

где  $W_A$  – желаемая (постоянная) функция на которую стремится  $W(X, Y=0)$ ,  $(X_{K,J}^0, Y_{K,J}^0, Z_{K,J}^0)$  – координаты точки поверхности концентратора от которых отражаясь лучистые вектора оптического пучка отраженного от  $J$ -го гелиостата падает в точку  $F(X_F, Y_F)$  фокальной плоскости БСП (рис. 1, 2).

**4. Обсуждение результатов.** На рис.3 приведены графики П – образного распределения плотности мощности облучения  $W(X, Y=0)$  на оси  $OX$  фокальной плоскости для трех значений параметра  $W_A$  и длины лазера  $\ell = 1\text{ м}$ . Для количественной оценки какое из распределений показанные на рис. 3 больше подходит для накачки лазера принимаем следующую математическую критерию для выбора  $M_0$

$$M_0 = \min(\text{по } i) M_i, \quad (6)$$

где  $M_i = \int_{-\ell/2}^{\ell/2} [W(X, Y=0) - W_{A,i}]^2 dX$ ,  $W_{A,i}$  – есть список значений  $W_A$ . Для значений  $W_{A,i} = 7.6 ; 7.8 ; 8.0$  были получены соответственно значения для  $M_i = 0.042 ; 0.040 ; 0.056$ .

Таким образом критерия (6) сделал выбор параметра со значением  $W_A = 7.8$ , что соответствует 2 – графику на рис. 3. Визуальное сравнения графиков дает такой же выбор.

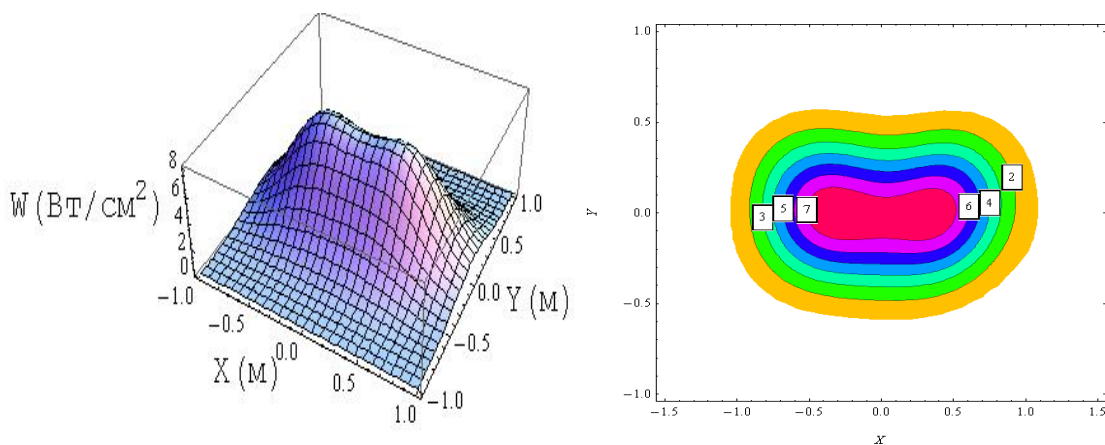


Рис. 4. Трехмерное изображение (сверху) и контурное изображение (снизу) П – образного распределения плотности мощности облучения  $W(X, Y)$  для значения параметра  $W_A = 7.8$ . Другие данные:  $d=0.3\text{ м}$ ,  $\ell=1\text{ м}$ .

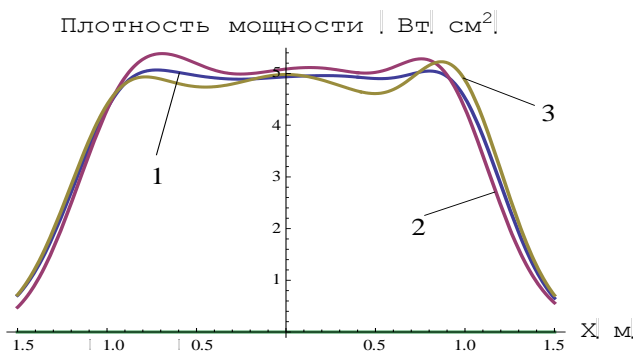
Из рис.4 видно, что объемное распределение плотности мощности  $W(X, Y)$  имеет седлообразную форму. Колебание сечения  $W(X, Y=0)$  в интервале  $-0.5 \leq X \leq 0.5$  составляет всего 6%. В середине контурного изображения распределения  $W(X, Y)$  имеется область очкообразной формы. Площадь этой области составляет  $\approx 0.9 \times 0.4 = 0.36 \text{ м}^2$  и плотность мощности облучения  $W(X, Y)$  изменяется в этой области от 7.0 до 8.1 Вт/см<sup>2</sup>. Расчёты показали, что энергетическая эффективность последней области составляет  $\approx 30\%$ .

**Таблица 1.** Значение отводов гелиостатов четвертой полки БСП для получения  $W(X, Y)$  приведенные на рис. 3 и 4 ( $d=0.3\text{м}, \ell=1\text{м}$ ).

№ Гелиостатов	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$\theta_{\Gamma}$	0.165	-0.305	-0.509	-0.078	-0.63	0.582	0.531	0.297	-0.049
№ Гелиостатов	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$\theta_{\text{В}}$	-0.077	0.067	0.052	0.005	-0.039	0.006	0.053	0.065	-0.022

При этом  $\theta_{\Gamma}$  – отвод по горизонтали,  $\theta_{\text{В}}$  – отвод по вертикали, значения углов даны в угловых градусах. В квадратной скобке указаны номера гелиостатов. В квадратной скобке указаны номера гелиостатов.

На табл. 1 даны значения отводов гелиостатов четвертой полки БСП для получения П образной формы распределения  $W(X, Y)$  приведенные на рис. 3 и 4. Из таблицы видно, что максимальное значение отвода (по абсолютному значению)  $< 0.65^{\circ}$ , что достаточно хорошо обеспечивается условия работы модели № 1 (пункт 2).



**Рис. 5.** Графики П – образного распределения плотности мощности облучения  $W(X, Y=0)$  на оси  $OX$  фокальной плоскости для значений параметра  $W_A = 5.0$  (1 – график),  $W_A = 5.2$  (2 – график),  $W_A = 4.8$  (3 – график), полученные теоретическим отводом гелиостатов. Другие данные:  $d=0.3\text{м}, \ell=2\text{м}$ .

На рис. 5 приведены графики П – образного распределения плотности мощности облучения  $W(X, Y=0)$  на оси  $OX$  фокальной плоскости для трех значений параметра  $W_A$  и длины лазера  $\ell = 2\text{м}$ . В результате количественной оценки по критерию (б) и визуального сравнения графиков приведенных на рис. 5 был сделан выбор: 1 – график.

На рис. 6 приведены трехмерное изображение и контурное изображение П – образного распределения плотности мощности облучения  $W(X, Y)$  для значения параметра  $W_A = 5.0$  и для длины лазера  $\ell = 2\text{м}$ . Как видно из рис. 5 и 6, что распределение  $W(X, Y)$  имеет такую же форму как на рис. 3 и 4 (для  $\ell = 1\text{м}$ ), только при  $\ell = 2\text{м}$  ширина распределения  $W(X, Y)$  почти на два раза шире, что следовало ожидать. При этом колебание сечения  $W(X, Y=0)$  в интервале  $-1 \leq X \leq 1$  составляет 8%, а в интервале  $-0.85 \leq X \leq 0.89$  это колебание составляет всего 2.3%. Площадь в выделенной центральной области контурного изображения распределения  $W(X, Y)$  составляет  $\approx 1.8 \times 0.4 = 0.72 \text{ м}^2$  и плотность мощности облучения  $W(X, Y)$  изменяется в этой области от 4.8 до 5.1 Вт/см<sup>2</sup>. Расчёты показали, что энергетическая эффективность последней области составляет  $\approx 40\%$ .

**Таблица 2.** Значение отводов гелиостатов четвертой полки БСП для получения  $W(X, Y)$  приведенные на рис. 5 и 6 ( $d=0.3\text{м}, \ell=2\text{м}$ ). При этом  $\square \Gamma$  – отвод по горизонтали,  $\square \text{В}$  – отвод по вертикали, значения углов даны в угловых градусах. В квадратной скобке указаны номера гелиостатов.

№ Гелиостатов	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$\theta_{\Gamma}$	-4.38	-0.599	-0.431	-0.961	0.012	0.516	0.981	0.726	0.332
№ Гелиостатов	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$\theta_{\text{В}}$	0.171	0.115	0.047	-0.072	0	0.01	0.023	0.129	0.133

Как видно из **таблицы 2** обеспечивающая распределение  $W(X, Y)$  показанных на рис. 5, 6 максимальное значение отвода (по абсолютному значению)  $< 1^0$ . При таких значениях отвода, как выше было сказано, достаточно хорошо работает **модель № 1** (пункт 2).

Таким образом на этой работе было показано на примере гелиостатов четвертой полки БСП, что даже при использовании не всех гелиостатов гелиостатного поля можно получить желаемое оптическое фокальное пятно, в частности, П образное распределение плотности мощности на фокальной плоскости БСП.

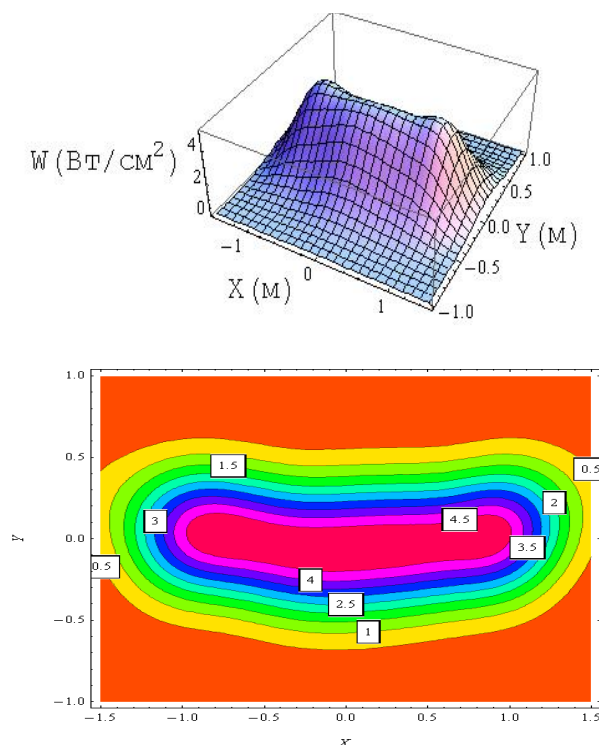


Рис. 6. Трехмерное изображение (сверху) и контурное изображение (снизу) П образного распределения плотности мощности облучения  $W(X, Y)$  для значения параметра  $W_A = 5.0$ . Другие данные:  $d=0.3\text{ м}$ ,  $\ell=2\text{ м}$ .

Таким образом на этой работе было показано на примере гелиостатов четвертой полки БСП, что даже при использовании не всех гелиостатов гелиостатного поля можно получить желаемое оптическое фокальное пятно, в частности, П образное распределение плотности мощности на фокальной плоскости БСП.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Sh. Payziev, S. Bakhranov, Sh. Klichev, A. Kasimov, T. Riskiev, A. Abdurakhmahov, A. Fazilov. “Thermal lensing in high power solar pumped solid state lasers”, SPIE 6542, (2007). [2] Sh. Payziev, S. Bakhranov, Sh. Klichev, A. Kasimov, T. Riskiev, A. Abdurakhmahov, A. Fazilov. Big Solar Furnace as pumping source for highpower lasers. *Proceedings of spie. Solid State LasersXVII: Technology and Devices*. San Jose, USA, 2008, Vol. 6871, p. 68712E-1. [3] А. Фазилов, М. М. Мансуров, А. А. Абдурахманов. Расчетные характеристики твердотельного лазера с солнечной накачкой. // Гелиотехника, 2010, №3. [4] С. А. Азимов, Х. М. Маллаева, И. И. Пирматов, Т. Т. Рискиев, С. Х. Сулейманов // Гелиотехника. 1979. № 2. [5] С. А. Азимов, Р. Ю. Акбаров, И. И. Пирматов. Расчет характеристик солнечных энергетических установок. // Гелиотехника. 1982. №3. [6] Рахимов Р.Х., Ражапов Л., Собиров Ю. Б., Фазилов А. Метод расчета оптимальной формы распределения плотности потока солнечного излучения для равномерного возбуждения активных элементов лазеров заданной формы. Возобновляемые источники энергии: технологии и установки. Материалы конференции. 28-29 июня 2016 г. [7] Р. А. Захидов, А. А. Вайнер. Распределение лучистого вектора в поле излучения параболического концентратора. // Гелиотехника. 1974. №3. [8] Р. А. Захидов. Зеркальные системы концентрации лучистой энергии. Ташкент, «Фан», 1986.

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ ЛУЧИСТОГО ПОТОКА ОТ СОЛНЦА В ФОКАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ ЗКС ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

М.Маматкосимов, А. Кучкаров, А. Абдурахманов

Институт Материаловедения НПО «Физика-Солнце» АН РУз.  
100084, г. Ташкент, ул. Бодомзор йули 2Б, e-mail: ims-79@mail.ru

### Аннотация

В данной статье рассмотрены вопросы оптимизации оптико-геометрических и оптико-энергетических характеристик фокального пятна в зависимости от точности изготовления ( $\Delta\alpha$ ), с необходимым аппретурным углом ( $2U$ ) зеркально-концентрирующих систем (ЗКС) работающих поступающим на их отражающую поверхность лучистых потоков от Солнца с видимым угловым размером ( $2\gamma_0$ ).

**Ключевые слова:** концентратор, солнца, большая солнечная печи, зеркальных концентрирующих систем, приемник.

Обеспечение заданного, обычно достаточно равномерного распределения плотности потока концентрированного солнечного лучистого потока на лучевоспринимающей поверхности приемника - основное требование для концентраторов солнечных технологических и энергетических установок.

В многих известных и ранее предложенных методиках расчета [1-7] распределения плотности лучистого потока в фокальной области часто принимаемых параболоидных, параболоцилиндрических или френелевских ЗКС употребляется производные от указанной величины плотности светотехнические или фотометрические параметры относящийся к источнику лучистого потока – яркость, освещённость и др. что приводит к усложнению предварительно применяемой математической модели расчета оптико-геометрических и оптико-энергетических характеристик практически изготавливаемых установках преобразующих энергию лучистого потока Солнца в лучевоспринимающих поверхностях приемников конкретного или оптимального размера и их свойств спектрально селективного лучепоглощения. Солнце является как принято в физической оптической астрономии абсолютно черным телом (АЧТ) с температурой поверхности  $5800\text{ }^{\circ}\text{K}$  стационарным источником лучистого потока с определенной плотностью и размерностью (Диаметром- $2R_s$ ) и на основании фундаментальных законов Планка (имеет спектральное распределение энергии лучистых потоков согласно выражению  $E_{\lambda,T} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$ ) и Стефана –Больцмана (имеет интегральную плотность  $E_s = \sigma T^4 = 6414\text{ Вт/см}^2$ ) и эта плотность уменьшается в зависимости от расстояния до Солнца  $L$  пропорционально к величине  $(R_s/L = tg\gamma_0 \approx tg16^\circ)$  (где  $\gamma_0$  – видимый угловой размер Солнца на расстояние  $L_s$ ,  $2\gamma_0$  на орбите Земли равна  $32$  угл.мин.). Кроме того, расчеты распределения концентрированного лучистого потока упрощаются при учете размерности получаемого оптического изображения Солнца.

Как известно экспериментальные измерения распределения лучистых потоков от газообразного состояния поверхности Солнца подчиняется выведенной ранее Жозе эмпирическому выражению [8] или если считать Солнце как абсолютно черное тело (АЧТ) в виде шара с температурой поверхности  $5800\text{ }^{\circ}\text{K}$ , подчиняется, как принято в физической оптике Ламбертовскому закону излучения шаровидных излучателей. Мы не можем изменить поступающие выше указанные распределения из-за закона сохранения энергетической возможности лучистого потоков от Солнца. Поэтому поступающие от Солнца плотность лучистого потока около Земной орбиты является постоянной и изменяется только благодаря эллиптичности этой орбиты в пределах  $1340 \div 1432$ . Необходимо отметить изменения этой величины, более указанной приводит различным катаклизмам. Если указанная величина была бы другой и изменчивой жизнь на Земля была совсем другой или невозможной.

Ранее в работе [9] мы приводили изменения этих величин на различных планетах расстояниях. Необходимость знания конкретных значений этой величины на различных расстояниях от Солнца является необходимым параметром, определяющим возможности концентрации оптическими установками. Это особенно важно при создании имитационных установок с искусственными источниками для создания космических условий для испытания различных материалов и установок,

новой техники на лучевую стойкость, а также энергопитания для жизнеобеспечения в искусственных спутниках Земли.

ЗКС технологического назначения требуют наиболее технически изготавливаемых (с точностью на примере изготовления наиболее оптимальной оптической поверхности параболоида) достижимых значений концентрации  $C_{\max}$  в определенной зоне фокального пятна [10].

Например уникальные Большие солнечные печи в основном технологического назначения построенные в Одейо (Франция) и в Паркенте (Узбекистан) требовали достижения максимальных значений степени концентрации ( $C_{\max}$ ) которые достигаются при апертурном угле стремящийся  $2U \rightarrow 180^\circ$  но при увеличении значения апертурного угла  $2U$  энергетический вклад лучистых потоков в фокальной плоскости расположенной перпендикулярно оптической оси и приходящей от краевых зону уменьшается на величину отношения площади центральной зоны  $\pi r_0^2$  к  $\pi r_4^2$  (значение величины  $r_4$  было дано в работе [11]) формируемого оптического изображения источника излучения. Например, от Солнца с достаточно большим значением видимого углового размера ( $2\gamma_0$ ) к площади  $\pi r_4^2$ . То есть величина энергетического вклада плотности лучистого потоков от точек ЗКС расположенных на апертурном угле  $2U_i$  уменьшается на величину  $\left(\frac{r_0}{r_4}\right)^2$ . Необходимо отметить при угле  $U=90^\circ$  степень среднего значения концентрации становится равным 1, а фокальное пятно становится равным размерности миделя ЗКС.

Для параболоидной ЗКС  $y = ftg^2 \frac{u}{2}$ ,  $x = 2ftg \frac{u}{2}$  при  $U=90^\circ x \rightarrow f$ ,  $y \rightarrow 2f$ . Где  $x$  и  $y$  координаты соответствующих точек ЗКС параболоидной формы. В ранее рассмотренных методах расчета распределения энергетической плотности лучистого потока Солнца от параболоидной поверхности [11] в основном рассмотрено зона  $0 \div r_0$  а перераспределение энергии в зонах  $r_0 \rightarrow r_2$ ,  $r_2 \rightarrow r_3$ ,  $r_3 \rightarrow r_4$  не учитывались. Впервые нами были определены эти характерные зоны, рассмотрены размерности формируемого оптического изображения в фокальной плоскости с учетом размера миделя концентрирующих систем и абберационных свойств параболоидной ЗКС с достаточно большими значениями апертурного угла ( $2U$ ). Изменение значения апертурного угла, и точности изготовления, отражающие поверхности, а также размерности миделя ЗКС, видимого углового размера Солнца, является основными параметрами, определяющими размерности и структуры фокального пятна. Это позволило более точно описать экспериментальные результаты полученные при измерениях плотности лучистого потока в зонах  $0 \rightarrow r_0$ ,  $r_0 \rightarrow r_2$ ,  $r_2 \rightarrow r_3$ ,  $r_3 \rightarrow r_4$  [11].

Одним из основным моментом при осуществлении, расчетов энергетических возможностей оптического зеркального отражения лучистого потока от Солнца с видимым углом  $2\gamma_0$  является законы изменения после отражения плотности лучистого потока на различных расстояниях в зависимости от вогнутой или плоской формы зеркальных элементов. Элементарная точка отражающей поверхности без изменения отражает пучок с видимым углом  $2\gamma_0$ . Пространственно симметрично относительно нормали к этой точке (см.рис. 1а,б).

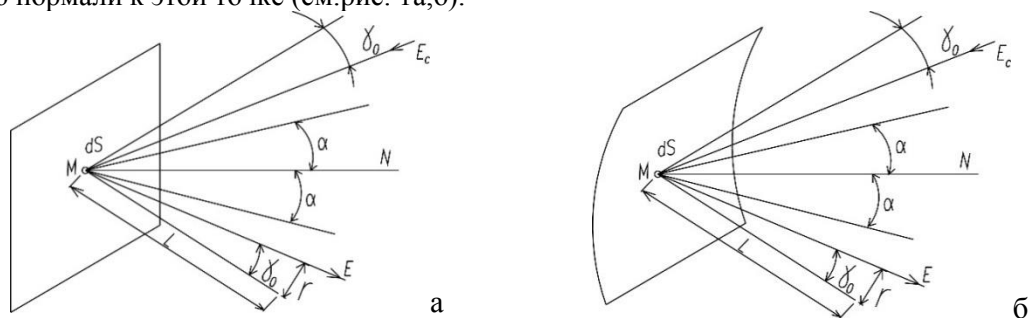


Рис. 1а,б. Основные моменты оптического отражения лучистых потоков от различных зеркальных поверхностей. а) Отражающая плоская поверхность. б) Вогнутая оптическая отражающая поверхность.

В зависимости от точности изготовления  $\sigma$  (где  $\sigma$  пространственное отклонение нормали  $N$  от её номинального направления) элементарная зона  $dS$  в точке  $M$  отражающей поверхности, без изменения структуры падающего пучка лучей, отклоняется на величину  $\Delta\alpha=4\sigma$  [12]. При этом плотности в элементарных пучках после отражения от зоны  $dS$  зеркальной поверхности уменьшается в зависимости от расстояния где этот отраженный пучок рассматривается на величину  $E=E_c R_z L t \gamma_0$ . Где  $E_c$ - величина плотности падающего лучистого потока (см.табл.1). В таблице

проведены изменения плотности поступающей лучистого потока после отражения в зависимости от отражения.

Табл.1. Экспериментальные изменения плотности отраженного лучистого потока в зависимости от расстояния

№	Размер facets ахb м	$E_c$ Вт/м <sup>2</sup>	Rz	L, метр	E1, Вт/м <sup>2</sup>	E2, Вт/м <sup>2</sup>	г, м
1	0.5x0.5 м	803	0.79	20	638	627	0.3
2	0.5x0.5 м	803	0.79	75	638	308	0.5
3	0.5x0.5 м	847	0.79	100	669	187	0.7
4	0.5x0.5 м	847	0.79	230	669	33	1
5	0.5x0.5 м	847	0.79	340	669	22	1.63

Rz- коэффициент зеркального отражения, E1-плотность отраженного лучистого потока после учета коэффициента зеркального отражения, E2- изменения плотности отраженного лучистого потока в зависимости от расстояния L; r-размер пятна рассеяния на измеренной зоне после отражения.

В концентрирующих системах энергетического назначения, где коэффициент полезного действия преобразования энергии лучистого потока Солнца в другие виды являются наиболее высокими, возникает необходимость оптимизации степени концентрации с в зависимости от полного размера формируемого фокального пятна к размеру миделя концентратора [13-14].

$$C = \frac{S_M}{S_{\text{фп}}} = \frac{\text{Площадь миделя концентратора}}{\text{Площадь фокального пятна}} = \frac{\pi R_k^2}{\pi r_4^2} = \left(\frac{R_r}{r_4}\right)^2 \text{ то есть}$$

$$dC=0 \text{ откуда } \text{tg}(U/2)_{\text{опт}} = -\text{tg} \gamma + \sqrt{\text{tg}^2 \gamma + 1}.$$

Предлагаемая нами методика расчета выше указанных систем основаны первоначально на получение оптического изображения Солнца в около фокальной плоскости в зависимости от различных значений размерности миделя апертурного угла и требуемых точностных характеристик изготовления ( $\Delta\alpha$ ) с учетом видимого углового размера Солнца  $2\gamma_0$ .

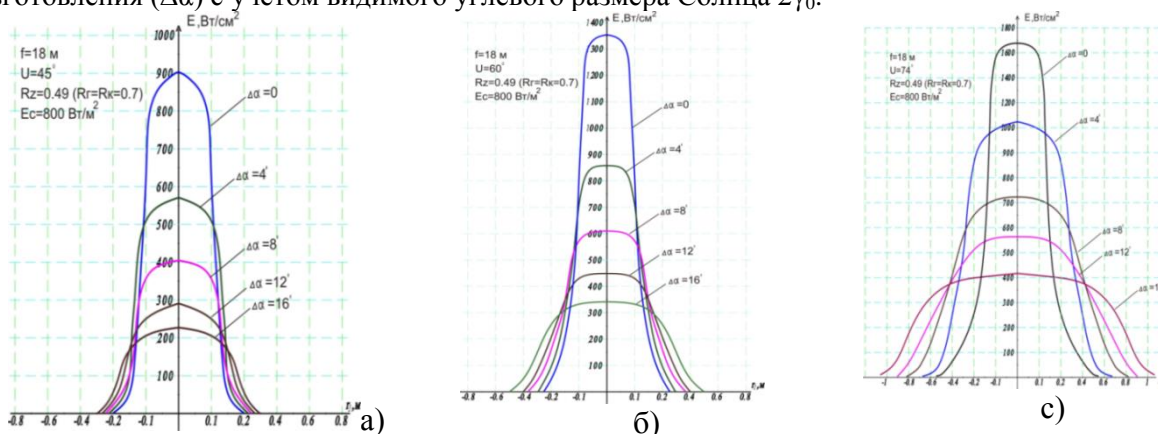


Рис 3а,б,с. Распределения отраженного потока лучистой энергии в фокальной плоскости БСП.

С учетом получаемых от различных точек ЗКС характерных зон перераспределения энергии ( $0 \rightarrow r_0, r_0 \rightarrow r_2, r_2 \rightarrow r_3, r_3 \rightarrow r_4$ ). На примере расчета оптика-геометрических и опτικο-энергетических БСП мегаватность мощности постройной в Паркенте (Узбекистан) из за большого размера апертурного угла концентратора величина  $r_4$  размер фокального пятна становится равном 0.27 м. А при апертурного угла  $89^\circ$  размер  $r_4$  становится равным 22 м.

#### Выводы:

1. На основание закона сохранения энергии распределения плотности лучистого потока от Солнца нельзя изменить и её величина на орбите Земли может изменяться в пределах 1340†1432 из-за эллиптичности орбиты.
2. Установки технологического назначения требуют максимально достижимых величин плотности то есть максимальных значений концентрации С.
3. Установки энергетического назначения требует оптимальных значений отношения размерности концентратора к размерностей получаемого пятна рассеяния то есть ( $S_M/S_{\text{фп}}$ ) для достижения максимальных значений коэффициента полезного действия.



4. В зависимости от значения апертурного угла в концентрирующих системах происходит значительное перераспределения плотности фокального пятна от центра к краю пятна рассеяния.

#### ЛИТЕРАТУРА

[1] Умаров Г.Я., Захидов Р.А., Вайнер А.А., Теория и расчет гелиотехнических концентрирующих систем. Ташкент, ФАН, 1977, 144с. [2] Апариси Р.Р. Экспериментальная установка для получения высоких температур //Использование солнечной энергии. – М.: Изд-во РАН, 1957 – С. 151-152.[3] Баум В.А., Апариси Р. Р., Тепляков Д. И. Об объективной оценке точности оптических систем солнечных установок // Теплоэнергетика; под ред. Баума В. А.– М.: Изд-во РАН, 1960. – с. 142-148. [4] Грилихес В.А. Метод расчета распределения лучистых потоков в приемниках солнечных установок. В сб. «Солнечные высокотемпературные печи». М.: ИЛ.1960.С.229-238. [5] Тепляков Д.И. Особенности переноса и распределения энергии в высокотемпературных солнечных установках. Гелиотехника, 1967, № 3, С.13-19. [6] Вейнберг В.Б., Оптика в установках для использования солнечной энергии., М: Оборонгиз, 1959, 236с. [7] Клычев Ш.И. Исследование узкоапертурных зеркальных концентрирующих систем (гелиостатов) солнечных энергетических установок. дис. к.т.н. Ашхабад, 1988, 187с.[8] Жозе П. Распределение плотности энергии в фокальном изображении солнечной печи. в сб. Солнечные высокотемпературные печи, под ред. Баума В.А., ИЛ, Москва, 1960, С.229-238.[9] Kuchkarov A. A., Abdurakhmanov A. A., Mamatkosimov M. A., Akhadov Zh. The optimization of the optical-geometric characteristics of mirror concentrating systems. Applied Solar Energy 2014. v.50.№4.pp,244-251. [10] А.А. Кучкаров, А.А. Абдурахманов, Ж.З. Ахадов, М.А.Маматкосимов. Расчет оптико - геометрических параметров параболических и параболоцилиндрических зеркально концентрирующих систем. Журнал Доклады Академии наук. 2014.№3. С.41-45. [11] А. Abdurakhmanov, A.A.Kuchkarov, M. and Yu.V. Sobirov. The calculation procedure of the optical-energy characteristics of mirror concentrating systems for technological and energy application. Applied Solar Energy 2015. v.51.№4. pp,301-305. [12] О.И. Кудрин. Солнечные высокотемпературные космические энергодвигательные установки. Москва “Машиностроение”, 1987г. -248с. [13] О.И. Кудрин. Солнечные высокотемпературные космические энергодвигательные установки. Москва “Машиностроение”, 1987г. -248с. [14] Ш.И. Клычев. Моделирование приемно – концентрирующих устройств солнечных теплоэнергетических установок.: Дис. д.т.н... Т.: ФТИ. 2004. - 268с.

## АЛГОРИТМ КОМПЕНСАЦИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ОСЕЙ ВРАЩЕНИЯ ГЕЛИОСТАТОВ ПРИ ПРОГРАММНОМ СЛЕЖЕНИИ ЗА СОЛНЦЕМ

С. Орлов<sup>1</sup>, Ш.И. Клычев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт АН РУз, 100084-Ташкент, Узбекистан, Ул. Бодомзор йули 2-Б

<sup>2</sup> Ташкентский государственный технический университет. 100095-Ташкент, Талабалар ш., Ул. Университетская 2. [nich-tstu@rambler.ru](mailto:nich-tstu@rambler.ru)

*Вопросы программного слежения за Солнцем существенно важны для плоских и фокусирующих гелиостатов СЭС башенного типа. Как известно, особенность программного слежения, в том, что, в отличие от оптических систем здесь отсутствует обратная связь с объектом слежения. В связи с этим на точность программного слежения влияет большое количество факторов. В частности, это погрешности установки осей вращения и погрешности отработки углов в осях вращения. В работе предложен алгоритм компенсации погрешностей установки азимутальной и зенитальной оси гелиостатов при программном слежении. Проведены оценки влияния этих погрешностей, а также точности отработки углов в осях вращения на точность программного слежения. Показано, что погрешности осей вращения гелиостатов имеют тот же порядок влияния, что и в концентраторах, однако требования к точности отработки углов в гелиостатах практически в два раза выше, чем для концентраторов.*

**Ключевые слова:** гелиостат, программное слежение за Солнцем, точность слежения

Вопросы обеспечения слежения за видимым движением Солнца систем, концентрирующих солнечное излучение наиболее важны для концентраторов солнечных энергетических станций башенного типа (СЭС). Эти концентраторы, число, которых достигает сотен и тысяч, работают в гелиостатном режиме (гелиостат) - отражают солнечные лучи на неподвижный приемник, установленный на башне [1,2].

При этом каждый гелиостат должен управляться индивидуально – имеет свой диапазон углов поворота и свои угловые скорости. При оптическом слежении эти задачи решаются, однако вопросы управления полем гелиостатов – слежение при облачности, при "кризисе скоростей", ава-



Переход от СК <sub>К</sub> к СК <sub>М</sub>			
	X <sub>К</sub>	Y <sub>К</sub>	Z <sub>К</sub>
X <sub>М</sub>	cosα <sub>у</sub>	α <sub>х</sub> *α <sub>у</sub>	-α <sub>у</sub> *cosα <sub>х</sub>
Y <sub>М</sub>	0	cosα <sub>х</sub>	α <sub>х</sub>
Z <sub>М</sub>	α <sub>у</sub>	-α <sub>х</sub> *cosα <sub>у</sub>	cosα <sub>х</sub> *cosα <sub>у</sub>

Переход от СК <sub>М</sub> к СК <sub>К</sub>			
	X <sub>М</sub>	Y <sub>М</sub>	Z <sub>М</sub>
X <sub>К</sub>	cosα <sub>у</sub>	0	α <sub>у</sub>
Y <sub>К</sub>	α <sub>х</sub> *α <sub>у</sub>	cosα <sub>х</sub>	-α <sub>х</sub> *cosα <sub>у</sub>
Z <sub>К</sub>	-α <sub>у</sub> *cosα <sub>х</sub>	α <sub>х</sub>	cosα <sub>х</sub> *cosα <sub>у</sub>

(2)
(3)

где

$$\alpha_y = \varepsilon \cdot \cos\theta \quad (4)$$

$$\alpha_x = \varepsilon \cdot \sin\theta$$

Схема перехода СК<sub>К</sub>→СК<sub>2</sub> приведена на рис.2. Как видно, при наклоне зенитальной оси, оси вращения становятся неперпендикулярными. В этом случае, так же как и для концентратора для определения углов азимута и высоты векторов **c**, **n**, **b** необходимо использование сферических треугольников. Схема решения задачи для вектора **c** приведена на рис.3.

Так из матрицы (3) получаем, что проекции вектора Солнца в СК<sub>К</sub>, учитывая малость углов α<sub>х</sub> и α<sub>у</sub> равны

$$\begin{aligned} c_{XК} &= \cosh_K \cdot \cos A_K = c_{XМ} + 0 \cdot c_{YМ} + \alpha_y \cdot c_{ZМ} \\ c_{YК} &= -\cosh_K \cdot \sin A_K = \alpha_x \cdot \alpha_y \cdot c_{XМ} + c_{YМ} - \alpha_x \cdot c_{ZМ} \\ c_{ZК} &= \sinh_K = -\alpha_y \cdot c_{XМ} + \alpha_x \cdot c_{YМ} + c_{ZМ} \end{aligned} \quad (5)$$

Из системы (5), учитывая, что известны c<sub>ХМ</sub>, c<sub>УМ</sub>, c<sub>ЗМ</sub> и α<sub>х</sub> и α<sub>у</sub> можем определить азимутальный A<sub>К</sub> и зенитальный h<sub>К</sub> углы Солнца в СК<sub>К</sub>.

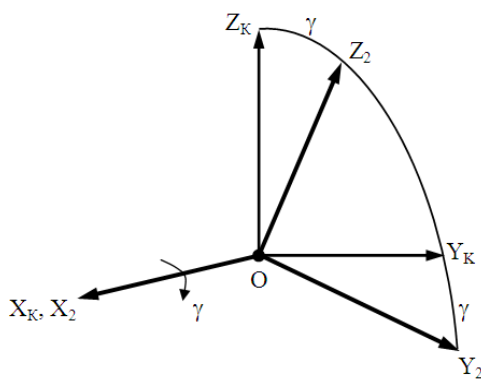


Рис.2. Угловые погрешности γ зенитальной оси.

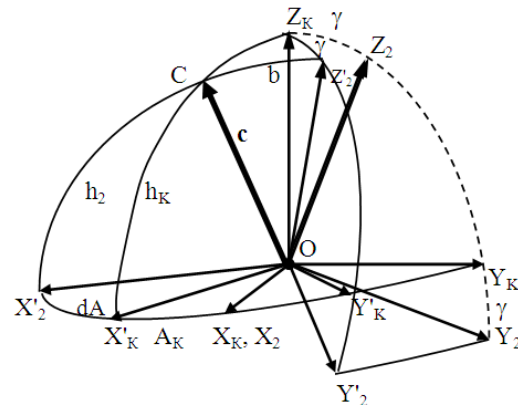


Рис.3. Схема определения углов азимута A<sub>2C</sub> и высоты h<sub>2C</sub> Солнца, при наличии погрешностей азимутальной и зенитальной оси гелиостата.

Далее из рис.3 определяем добавки к этим углам dA<sub>К</sub> и dh [4], или в осях вращения OZ<sub>К</sub> и OY'<sub>2</sub> азимутальный и зенитальный углы Солнца будут равны

$$A_{2C} = A_{КC} + \text{sign}(\gamma) \cdot dA_C; \quad h_{2C} = h_{КC} + \text{sign}(\gamma) \cdot dh_{2C} \quad (6)$$

Аналогичным образом определяем углы азимута A<sub>2</sub> и высоты h<sub>2</sub> гелиостата в осях вращения. Вектор отраженного от гелиостата луча **b** в СК<sub>2</sub>, при этом можем определить из (1), которое представлено относительно **b**, или в векторном виде из уравнения

$$\mathbf{b} = 2\mathbf{n} \cdot (\mathbf{n} \cdot \mathbf{c}) - \mathbf{c} \quad (6)$$

Таким образом, выражения (1) - (6) с учетом формул для добавок [4], являются алгоритмом, позволяющим компенсировать погрешности осей вращения гелиостатов при программном слежении.

На основе этого алгоритма была создана программа на Бейсике для оценивания на точность программного слежения следующих важных случаев. Первый, когда не учитываются наклоны осей вращения и, второй, когда имеют место погрешности при обработке углов азимута dA<sub>р</sub> и зенита dh<sub>р</sub>. При этом имеем углы рассогласования между точным и приближенным направлениями отраженного луча. На рис. 4 приведены значения углы рассогласования, в случае, когда не учитываются погрешности выставления осей вращения для двух характерных случаев: θ = 0 – углы наклона осей ε и γ в перпендикулярных плоскостях (рис.4а) и θ = 90° – углы наклона осей в одной плоскости (рис.4б).

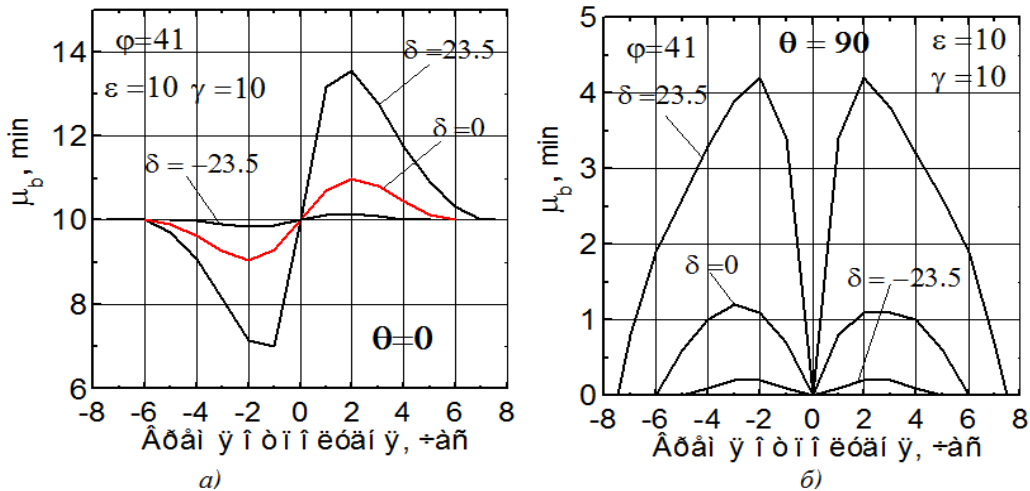


Рис.4. Влияние погрешностей выставления осей вращения, азимутальной ( $\epsilon$ ) и зенитальной ( $\gamma$ ) на точность программного слежения для случаев:  $\epsilon$  и  $\gamma$  в перпендикулярных плоскостях  $\theta = 0$  (а) и в одной плоскости  $\theta = 90$  (б).

На рис.5 приведено влияние неточности отработки углов в осях вращения гелиостата (рис.5а), а на рис.5б для концентратора. Как видно, по сравнению с концентраторами неточности отработки углов вращения для гелиостатов ухудшают точность слежения практически в два раза.

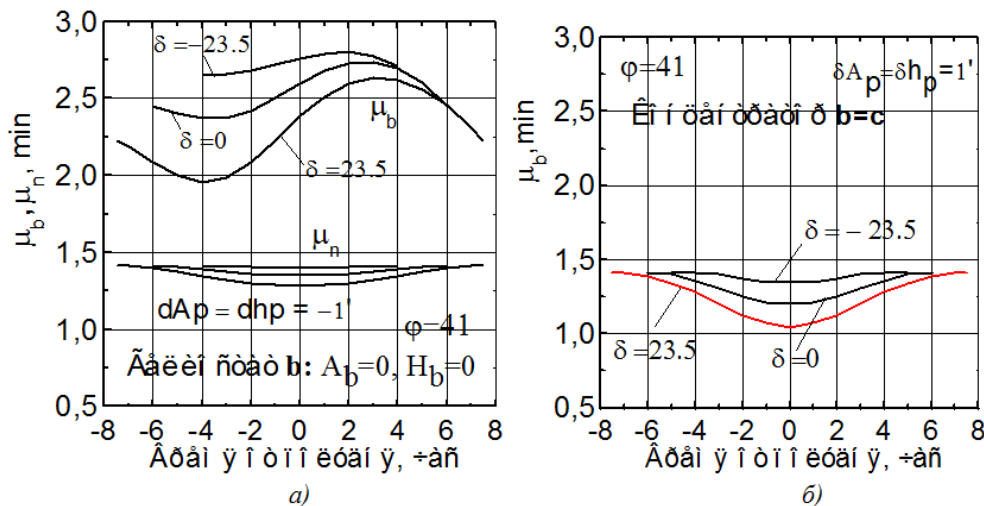


Рис.5. Влияние погрешностей отработки углов вращения для гелиостата (а) и концентратора (б) в зависимости от времени дня и сезона года ( $\delta$ ).

По результатам исследований можно отметить:

1. Разработан алгоритм компенсации погрешностей выставления азимутальной и зенитальной оси вращения гелиостата при программном слежении.
2. Получено, что влияние погрешностей азимутальной  $\epsilon$  и зенитальной оси  $\gamma$  на точность программного слежения в гелиостатах существенно меньше, чем в концентраторах, причем особенно, когда  $\epsilon$  и  $\gamma$  находятся в одной плоскости.
3. Если в концентраторах точность программного слежения пропорциональна погрешностям отработки углов в осях вращения, то в гелиостатах это приводит практически к двукратному ухудшению точности слежения. Полученные закономерности могут быть использованы для оценки точности слежения и при других значениях погрешностей отработки углов в осях вращения, вплоть до 5 градусов.

#### ЛИТЕРАТУРА

[1] Захидов Р.А. Технология и испытания гелиотехнических концентрирующих систем. Ташкент, Фан, 1978, 184с. [2] Клычев Ш.И. Концентраторы солнечного излучения – моделирование и расчет. Гер-

мания, LAP LAMBERT Academic Publishing RU, 2016, P 190. [3] Атабаев И.Г., Ахатов Ж.С, Мухамедиев Э.Д., Зиёвадинов Ж.. Модернизация автоматической системы управления гелиополем Большой солнечной печи. // Гелиотехника. 2016, №3, с 36-43. [4] Орлов С.А., Клычев Ш.И. Алгоритм компенсации погрешностей осей вращения концентраторов при программном слежении за Солнцем (см. наст. сборник). [5] Абдурахманов А. Саробаев А.С., Акбаров Р.Ю. Юлдашев А.К. Кинематическая и динамическая характеристика гелиостата большой солнечной печи «Возобновляемые источники энергии и гелиоматериаловедение». Тр. межд. конф. 29-30 сентября 2005, Ташкент. [6] Абдурахманов А.А., Орлов С.А., Саробаев А.С., Фазилов Х.К. Влияние неперпендикулярности азимутальной оси вращения концентратора (гелиостата) на точность программного слежения. // Гелиотехника, 2010, №4 с 80-82.

## ГОМОГЕНИЗАТОР ДЛЯ МАТРИЦЫ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, РАБОТАЮЩИХ НА КОНЦЕНТРИРОВАННОМ СОЛНЕЧНОМ ИЗЛУЧЕНИИ

С.А.Бахрамов, А.А.Симонов, К.Е.Васильковский,  
Ш.Д.Пайзиев, О.К.Махамаджонов

Институт Ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз  
г.Ташкент, 100125, Узбекистан, [bahramov@mail.ru](mailto:bahramov@mail.ru), ул. Дурмон йули 33

### Аннотация.

Целью представленной работы было исследование возможностей получения однородного распределения интенсивности солнечного излучения в фокальной плоскости солнечных концентраторов для улучшения эффективности преобразования солнечной энергии матрицей солнечных элементов. Предложен эффективный метод трансформирования колоколообразного распределения интенсивности солнечного излучения в фокусе концентратора в равномерное распределение с прямоугольным сечением.

**Ключевые слова:** солнечный концентратор, гомогенизатор, распределение интенсивности

### 1. Введение

Солнечные элементы, работающие на концентрированном потоке солнечного излучения (concentrating photovoltaic (CPV)) в последнее время становится многообещающим направлением для использования экологически чистой энергии благодаря достигнутой высокой эффективности (более 40%) в этих фотоэлектрических системах. В системах CPV основными элементами являются приемник (матрица солнечных элементов), фокусирующая оптика и система слежения. Фокусирующая оптика, как правило, линза Френеля или параболический концентратор концентрирует солнечную энергию на небольшую площадь матрицы солнечного элемента. Это концентрация может быть осуществлена на одну стадию, с помощью первичных концентраторов, или в два этапа, где кроме первичного концентратора используется и вторичная оптика.

Использование вторичной оптики обусловлено необходимостью получения равномерного распределения по всей площади матрицы солнечного элемента, а также для дополнительной концентрации излучения [1]. Известно, что неравномерность распределения интенсивности на поверхности матрицы солнечного элемента создает локализованные горячие точки, могущие привести к выходу элементов из строя. Кроме того, распределение интенсивности излучения в фокальном пятне солнечного концентратора близко к распределению Гаусса, что приводит к недостаточной эффективности работы элементов по краям и к перегрузке солнечных элементов в центре рабочей матрицы.

Поскольку технологически выгодно собирать солнечные элементы в строки в матрице, то важно чтобы все элементы были одинаково освещены, для того чтобы фототок в каждом из них не сильно отличался от фототока соседних элементов, иначе слабоосвещенные фотоэлементы будут являться нагрузкой для более освещенных, что приведёт к дополнительному перегреву матрицы, к уменьшению эффективности и может привести даже к выходу их строя некоторых элементов.

В связи с вышеназванными проблемами является актуальной разработка и изготовление гомогенизаторов для получения однородного распределения интенсивности солнечного излучения на поверхности матрицы элементов.

В данной работе предлагается использование прозрачного материала в виде параллелепипеда, изготовленного из кварца, в качестве гомогенизатора распределения интенсивности в фокальной плоскости солнечного концентратора. Для этого нами были проведены численные эксперименты.



менты, с помощью компьютерного моделирования концентрирующей системы с вышеописанным гомогенизатором.

## 2. Результаты численных экспериментов

Моделирование проводилось с использованием методов Монте-Карло и «прослеживания лучей». В качестве первичного концентратора рассматривался параболический концентратор с различными размерами и фокусным расстоянием. На рисунке 1 показан один из вариантов таких концентраторов, который был разработан нами для исследования возможности получения эффективного преобразования энергии концентрированного потока солнечного излучения в электрическую энергию с помощью матрицы солнечных элементов. Один из вариантов такой матрицы, состоящая из 15 ячеек, которая также была собрана нами показан на рисунке 2.

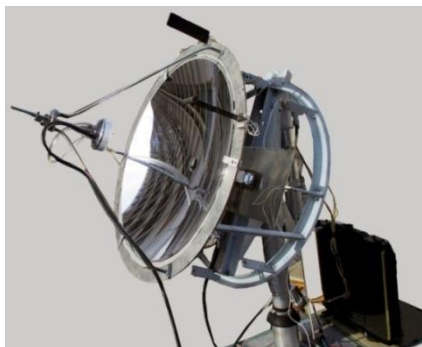


Рис. 1. Параболический концентратор с системой слежения за солнцем



Рис. 2. Матрица электрически связанных солнечных элементов с общей площадью  $30 \times 24 \text{ мм}^2$  с водяным охлаждением

В качестве гомогенизатора рассматривались прямоугольные кварцевые пластины, представляющие собой световод, показанный на рисунке 3. Принцип работы световода, основан на эффекте полного внутреннего отражения, что позволяет уменьшение потерь при прохождении через него светового потока.

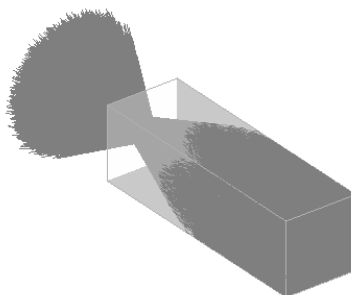


Рис. 3. Гомогенизатор в фокальной плоскости солнечного концентратора

Для нахождения оптимальных вариантов решений исследование проводилось для различных размеров кварцевого световода (гомогенизатора), установленного в фокусе солнечного концентратора, где интенсивность распределения является сильно неоднородной как это показано на рисунке 4.

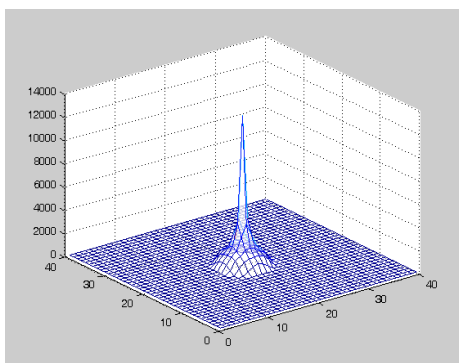


Рис. 4. Распределение интенсивности в фокусе солнечного концентратора

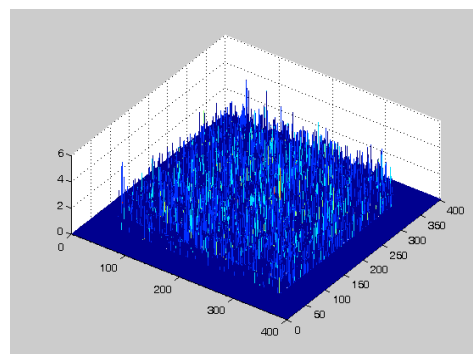


Рис. 5. Распределение интенсивности на выходе гомогенизатора



Проведенное исследование показало, что предложенный метод для преобразования неоднородного распределения в фокальной плоскости концентратора в равномерное распределение интенсивности для обеспечения эффективной работы матрицы солнечных элементов является работоспособным и даёт превосходные результаты. На рисунке 5 показан один из таких результатов, где представлено распределение интенсивности на выходе гомогенизатора.

В принципе, как показали проведенные исследования, подбором размеров гомогенизатора можно получить равномерное распределение интенсивности на участках с различной площадью. Важной особенностью таких гомогенизаторов является возможность трансформирования пучков круглого сечения в пучки прямоугольного сечения, что позволяет эффективно применять более технологичные прямоугольные матрицы.

#### ЛИТЕРАТУРА:

[1] S. El-Yahyaoui, S. El Himer, A. Mechagrane and A. Ahaitouf, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 186 (2017) 012037

## РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНОЙ КОНЦЕНТРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Н.С.Филиппченкова<sup>1</sup>, А.В.Харченко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ)

РФ, Москва, 109456 1-й Вешняковский пр-д, д.2. [natalja.filippchenkowa@yandex.ru](mailto:natalja.filippchenkowa@yandex.ru)

<sup>2</sup>Федеральное государственное учреждение высшего профессионального образования «Волгоградский государственный университет» (ФГОУ ВПО ВолГУ)

РФ, Волгоград, 400062 пр-т Университетский, д.100. [Ralf2234@mail.ru](mailto:Ralf2234@mail.ru)

#### Аннотация

*Разработана система автоматической системы регистрации основных параметров солнечной концентраторной установки на базе микроконтроллера Arduino, позволяющая не только экономить время при обработке информации, но и получать более достоверную информацию о динамике протекающих процессов. Такой комплекс обеспечивает возможность получать более точную информацию о поведении солнечной концентраторной установки в процессе работы и на качественно новом уровне проводить оценку её параметров.*

**Ключевые слова:** Arduino, микроконтроллеры, солнечная концентраторная установка, автоматическая система регистрации параметров.

#### 1. Введение

При проведении экспериментальных исследований солнечных концентраторных установок большое значение имеет источник излучения. Использование искусственных источников света при эксперименте позволяет проводить его в помещении и в любое время суток. Но при этом такие источники в разной степени соответствуют естественному спектру солнечного излучения [1]. Натурные эксперименты позволяют более качественно исследовать работу солнечной концентраторной установки, а также схему ее функционирования, выявить проблемы и решить их на этапе научно-исследовательской работы, и тем самым подтвердить обоснованность теоретических положений.

При проведении натурных испытаний экспериментального образца солнечной концентраторной установки необходимо обеспечить точность и сопоставимость получаемых результатов, а также адекватную их интерпретацию, для чего желательно отслеживать процессы в динамике. Поток солнечного излучения, поступающий к поверхности приемника непостоянен из-за воздействия ряда факторов (облачность, запыленность и загазованность атмосферы и др.), что приводит к тому, что основные узлы установки в течение дня работают в разных температурных условиях. Поэтому особое значение приобретает сбор данных по температуре этих узлов в динамике.

В связи с этим была создана система автоматической регистрации основных параметров солнечной концентраторной установки в процессе натурных исследований. Поскольку в солнечных концентраторных установках могут быть использованы различные типы приемников в зави-

симости от степени концентрации, необходимо учесть набор основных измеряемых параметров в соответствии с назначением установки. В настоящей работе рассматриваются установки с низким коэффициентом концентрации (менее 10 крат), поэтому в качестве приемника излучения могут быть выбраны фотоэлектрический, комбинированный теплофотоэлектрический и тепловой. В этой связи основными параметрами будут являться: ток короткого замыкания, температура фотопреобразователя, температура теплоносителя на входе и выходе установки.

## 2. Основные элементы системы автоматической регистрации параметров солнечной концентраторной установки.

Предлагаемый комплекс автоматической регистрации основных параметров солнечной концентраторной установки разработан на базе микроконтроллера **ATmega328-PU** от фирмы Atmel. Данный микроконтроллер был выбран по экономическим соображениям т.к. является не дорогим и содержит достаточный объем энергонезависимой FLASH, оперативной SRAM памяти для исполнения программного кода. Программный код разработан на платформе **Arduino** — это электронный конструктор и удобная платформа быстрой разработки электронных устройств. Платформа стала популярной во всем мире благодаря удобству языка программирования (основан на C/C++), а также открытой архитектуре и программному коду. Программируется через USB без использования программаторов [3].

На рис. 1 представлен внешний вид платформы **ATmega328-PU**.

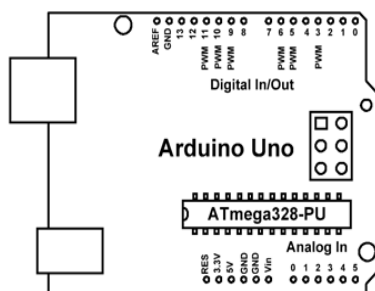


Рис. 1 Внешний вид платформы Arduino Uno (вид сверху)

В качестве температурного сенсора использовался цифровой датчик температуры **DS18B20** [2]. Датчик очень прост в использовании, поскольку, во-первых, он цифровой, а во-вторых - у него всего лишь один контакт, с которого получают полезный сигнал. Кроме того, имеется возможность подключения к одному микроконтроллеру (МК) одновременно большое количество этих сенсоров (до 127 штук). Цифровые датчики намного точнее аналоговых, у датчика температуры **DS18B20** погрешность составляет всего 1%, а разрешающая способность 12 бит, что позволяет более точно измерять температуру.

### Основные характеристики датчика DS18B20:

1. Уникальный интерфейс OneWire. Требуется только один контакт для связи.
2. Каждое устройство имеет уникальный 64-битный серийный адрес устройства, который хранится в ROM.
3. Питание датчика в диапазоне напряжений от 3 В до 5,5 В.
4. Диапазон измеряемых температур от -55 °С до +125 °С .
5. Программное обеспечение совместимо с DS1822.

На рис. 2 представлена схема подключения температурного датчика к МК. Датчик подключается следующим образом: контакт GND с DS18B20 подключается к GND на МК, контакт Vdd с DS18B20 подключается к +5V на МК, контакт Data с DS18B20 подключается к любому цифровому пину на МК. Единственное, что необходимо добавить из внешней дополнительной обвязки – это подтягивающий резистор на 4,7 кОм. Можно подключить несколько цифровых датчиков температуры DS18B20 параллельно, но для большого количества сенсоров (более 10), необходимо использовать резисторы с меньшим сопротивлением (например, 1,6 кОм или даже меньше).

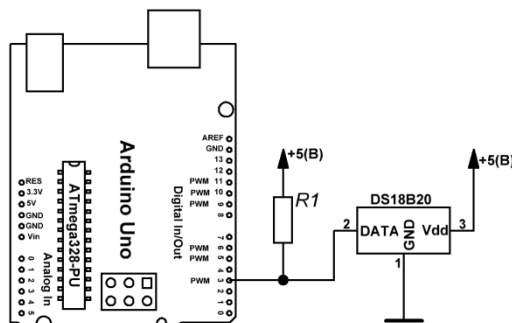


Рис. 2 Схема подключения DS18B20 к МК расположенного на плате ArduinoUno

В настоящей системе регистрации данных необходим надежный контроль времени без прерываний. Если питание микроконтроллера исчезнет, то счетчик времени собьется. Поэтому в разработанной системе используется внешний **модуль часов реального времени RTC (Real time clock)** со встроенным резервным источником питания (литиевый элемент питания тип – CR1225) [5]. Стандартная батарея типа CR1225 выдаёт напряжение 3(B) и обладает емкостью в 47(мА\*ч). RTC модуль содержит чип DS1307, ток потребления которого составляет 300(нА), то при запитывании от литиевого элемента типа CR1225, модуль сможет проработать приблизительно 17 лет без внешнего питания ( $47\text{мАч} / 300\text{нА} = 156666,67$  часов = 6527, 78 дней = 17,87 лет). Чип, который используется в подобных часах, отслеживает года и даже знает, сколько дней в месяце. Шаг регистрации данных задается в программе в зависимости от требуемой периодичности измерений, поэтому регистрировать данные можно как ежечасно, так и с большей частотой.

Поскольку экспериментальные исследования должны проводиться на протяжении длительного времени, для удобства был использован универсальный высокоскоростной **модуль карт ридер SD+MicroSD и SD-карта**, на которой создавался файл в формате CSV, содержащий массив собранных экспериментальных данных [5]. Формат CSV очень удобен, поскольку данный формат поддерживается распространенным программным обеспечением Microsoft Excel. По зарегистрированным данным, полученным из CSV файла можно строить графики, диаграммы и т.д. для обработки полученных результатов экспериментальных исследований непосредственно в этом файле. Объем файла с полученными данными за сутки составил – 1084 Кбайт. Максимальный объем используемой SD-карты составляет – 2 Гбайт.

При проведении натурных исследований солнечных модулей зачастую сложно оперативно определять некоторые параметры, к примеру, вольт-амперные характеристики. По этой причине измеряются другие величины, также определяющие фотоэлектрические параметры, такие как напряжение холостого хода  $U_{ХХ}$  и ток короткого замыкания  $I_{КЗ}$ .

Поскольку система мониторинга разрабатывалась для конкретного экспериментального образца солнечного концентраторного модуля с коэффициентом концентрации 4,3 (на рис. 3 представлена ВАХ и кривая мощности фотоэлектрического приемника без концентратора, измеренные с помощью имитатора солнечного излучения с одиночной длинно-импульсной вспышкой PICOSOLAR) для измерения тока короткого замыкания используется датчик тока ACS712. Датчик определяет значение тока в цепях постоянного и переменного тока в диапазоне до 20 А. Погрешность датчика ACS712 составляет 1,5%, а диапазон измеряемого тока от –20 до +20 А [5]. Для других конструкций необходимо выбирать датчик тока в соответствии с данными о токе короткого замыкания, а также коэффициенте концентрации.

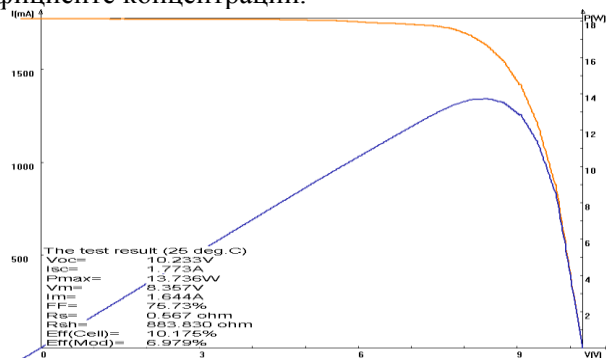


Рис. 3 Вольтамперная характеристика фотоэлектрического приемника

На рис. 4 показана блок-схема комплекса мониторинга параметров солнечной концентраторной установки. Такая система позволяет нам получать основную информацию о состоянии гелиоустановки в динамике (температуре основных узлов установки, токе короткого замыкания) с учетом прихода солнечной энергии и времени суток.

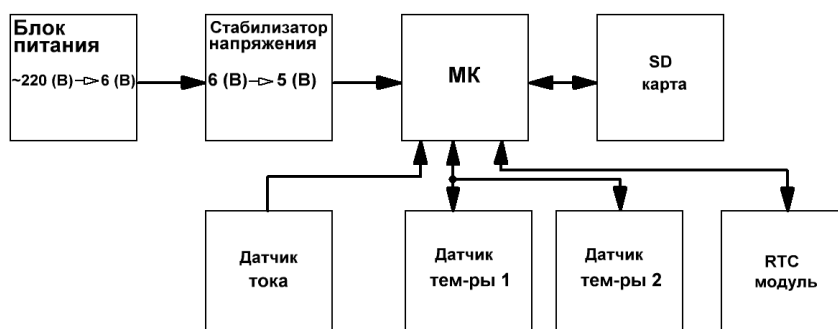


Рис. 4 Блок-схема системы автоматической регистрации параметров солнечной концентраторной установки

### 3. Предварительные результаты

На рис. 5 представлены предварительные экспериментальные данные о температуре теплоносителя на входе и на выходе теплового приемника, полученные 10 марта 2017 года, средняя температура окружающего воздуха в течение дня составляла +8 °С (средняя температура днем +10°C, в вечерние и утренние часы +6°C). Замеры проводились с 8:00 до 18:30 (мск).

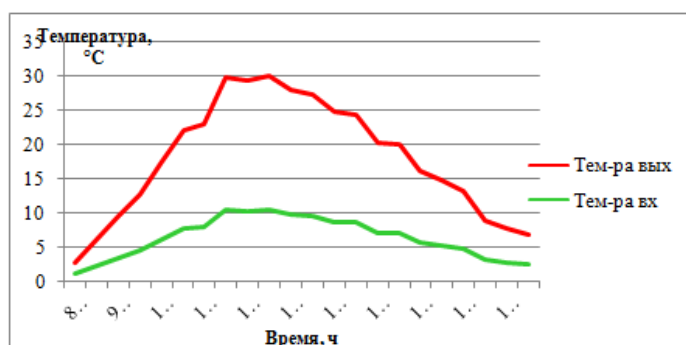


Рис. 5 Экспериментальные данные, полученные с помощью системы автоматической регистрации параметров солнечной концентраторной установки

Дальнейшие исследования будут направлены на измерение определяющих параметров фотоэлектрического и теплофотоэлектрического приемников солнечной концентраторной установки, такие как напряжение холостого хода  $U_{ХХ}$  и ток короткого замыкания  $I_{КЗ}$ .

### 4. Выводы

Таким образом, разработанная система автоматического измерения основных параметров солнечной концентраторной установки с фотопреобразователями и тепловыми приемниками представляет собой комплекс мониторинга, позволяющий не только экономить время при обработке информации, но и получать более достоверную информацию о динамике протекающих процессов. Такой комплекс обеспечивает возможность получать более точную информацию о поведении солнечной концентраторной установки в процессе работы и на качественно новом уровне проводить оценку её параметров.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Strebkov D.S., Kharchenko V.V., Nikitin B.A., Tikhonov P.V., Gusarov V.A. Determination of conformity of the spectra of artificial light sources of the spectrums of standard solar radiation // Moldavian Journal of the Physical Sciences. 2013. V. 12. P. 82-86. [2] Джереми Блум. Изучаем Arduino: инструменты и методы технического волшебства. – СПб.: БВХ – Петербург, 2015 – 336с. [3] Петин В.А. Arduino и Raspberry Pi в проектах Internet of Things. – СПб.: БВХ – Петербург, 2016 – 320с. [4] Петин В.А. Проекты с использованием контроллера Arduino. Издательство. – СПб.: БВХ– Петербург, 2017 – 464с. [5] Техническое описание микросхемы ACS712. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://files.amperka.ru/store-media/products/troyka-current-sensor/media/acs712.pdf> свободный (дата обращения: 01.03.2017).

## РАСЧЕТ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СОЛНЕЧНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ПОДОГРЕВА МАЗУТА НА ТЕПЛОИСТОЧНИКАХ

Н. Ташбаев<sup>1</sup>, Б.Махмудов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ташкентский государственный технический университет  
Ташкент, 100002, Узбекистан, conf\_tstu@mail.ru

### Аннотация

В статье рассмотрен вопрос использования на существующих теплоисточниках высокотемпературных солнечных установок для подогрева мазута в целях экономии топлива. Определен расход тепловой энергии на различных технологических участках подготовки мазута для сжигания в котлах. Приведен расчет конструктивных параметров трубчато-вакуумированного теплоприемника и концентратора солнечного излучения, исходя из требуемого расхода пара при задаваемой температуре подогрева мазута.

**Ключевые слова:** высокотемпературные солнечные установки, трубчато-вакуумированный теплоприемник, концентратор солнечного излучения, расхода пара, конструктивные параметры.

### 1. Введение

В настоящее время на котельных и ТЭС республики сжигаются значительные объемы мазута. Согласно отраслевым инструкциям [1], при переводе энергетических и водогрейных котлов на сжигание природного газа в качестве основного топлива, предусматривается сохранение в качестве резервного топлива угля - для энергетических котлов и мазута – для водогрейных котлов. При этом возникают вопросы с его качеством как энергетического и печного топлива: повышенная вязкость и сильное поверхностное натяжение, что может ухудшить условия его распыливания в котлоагрегате. Повышение температуры мазута до 170-180<sup>0</sup>С снижает вязкость мазута вдвое, ускоряет процесс выделения и сгорания летучего и коксового остатка, т.е. улучшает процесс сжигания мазута. Поэтому основной проблемой при эксплуатации мазутных хозяйств остаются значительные затраты энергии на подогрев при хранении мазута и подготовке его к сжиганию. Эксплуатационные затраты на содержание мазутного хозяйства наибольшие по сравнению с газом и углем и составляют более 9 % от нагрузки котла [1].

Данная статья рассматривает возможность высокотемпературного подогрева мазута до оптимальной температуры для водогрейных котлов при использовании солнечных тепловых установок с концентраторами. Это позволит повысить экономичность и надежность их работы, а также уменьшить вредные выбросы в атмосферу с продуктами сгорания.

Для каждого конкретного проекта электростанции или котельной, для каждого конкретного набора оборудования вариант модернизации или самих подогревателей или изменения теплотехнологической схемы мазутного хозяйства за счет применения высокотемпературной солнечной установки с концентратором должен определяться отдельно.

### 2. Определение требуемых параметров теплоносителя мазутного хозяйства

На рассматриваемой котельной установлено 4 котла марки ПТВМ-100, теплопроизводительностью 100 (116) Гкал/ч (МВт), каждый котел оборудован шестью вихревыми газомазутными горелками с паромеханическими форсунками, которые расположены встречно треугольником с вершиной на боковых стенках сверху. Котлы рассчитаны на сжигание природного газа и мазута. Мазут М-100 поставляется железнодорожным транспортом в цистернах. Разогрев мазута до 170-180<sup>0</sup>С осуществляется паром с параметрами температуры на выходе  $T_{вых}=200\div 250^{\circ}\text{C}$  и давлением  $p=0,8\div 1,2$  МПа через подогреватели. Топливо самотеком сливается в сливной желоб. Затем согласно схемы на рис.1 выполняется подогрев мазута.

Расход тепла на нужды мазутного хозяйства, Гкал, определяется как сумма потерь (расходов) тепловой энергии при сливе мазута ( $Q_{слм}$ ), обогреве в резервуарах при хранении ( $Q_{хрм}$ ), обогреве мазутопроводов ( $Q_{зм}$ ), подогреве в мазутоподогревателях и (или) расходных емкостях ( $Q_{лм}$ ) и паром распыле мазута форсунками ( $Q_{р.м}$ ).

Определено, что при расходе пара давлением 0,8 МПа и температурой 200<sup>0</sup>С [1]:

на разогрев, слив и зачистку 10 железнодорожных цистерн емкостью 60 т равняется равным 7,65 т/ч (85 ÷ 120 кг пара/т мазута); расход пара на сливные лотки на 10 м двухпутной эстакады 0,1 т/ч, всего -0,35 т/ч (35 м); - на промежуточные емкости объемом: 1000 м<sup>3</sup> - 2,0 т/ч.

Расход тепловой энергии на подогрев мазута в высокотемпературном мазутоподогревателе или расходных емкостях осуществляется до температуры, указаны в таблице 1.

Таб. 1 Расход тепловой энергии на подогрев мазута в высокотемпературном мазутоподогревателе

Тип форсунок	Расход пара (кг на 1 т мазута)	
	М-40; М-60	М-80; М-100
паровые; воздушные высоконапорные	247	239
механические; паромеханические	42	39
воздушные низконапорные	48	34

Подогреватель – теплообменник поверхностного типа, с поверхностью нагрева  $15 \text{ м}^2$ , рассчитан на расход мазута  $B_m = 12800 \text{ кг/ч}$  при подогреве мазута от  $110^\circ\text{C}$  до  $170^\circ\text{C}$ . Расход пара  $G_{пм} = 1,536 \text{ т/ч}$ .

Расход тепловой энергии на паровой распыл мазута,  $\Gamma \text{ ккал}$ , рассчитывается в случае комплектации котлоагрегатов паромеханическими форсунками по формуле:

$$Q_{рм} = q_p \cdot B_m \cdot (I_n - I_{нв}) \cdot 10^{-3} \quad (1)$$

где  $q_p$  - удельный расход пара на распыливание,  $\text{кг/кг}$  мазута; принимается  $0,02 - 0,03$  в зависимости от вязкости мазута;  $B_m$  - количество распыляемого мазута,  $\text{т}$ ;  $I_n, I_{нв}$  - энтальпия соответственно пара, используемого для распыла мазута  $200^\circ\text{C}$ , и питательной воды  $T_6 = 10^\circ\text{C}$

При  $Q_{рм} = 0,512 \text{ ккал/кг}$  непосредственно определяется расход пара

$$G_{рм} = Q_{рм} / (c_T \cdot (T_{ввых} - T_{вк})) \quad (2)$$

где  $c_T$  - теплоемкость теплоносителя - пара.  $G_{рм} = 0,984 \text{ т/ч}$ .

Всего расход пара на данных технологический участках теплоисточника

$$G_{слм} + G_{хрм} + G_{мм} + G_{пм} + G_{рм} = 12,52 \text{ т/ч}$$

В настоящей статье использована модель системы ТВТ-КСИ, приведенная в [2] с точки зрения привязки параметров концентратора к требованиям мазутного хозяйства теплоисточников.

### 3. Алгоритм расчета системы трубчато-вакуумированный теплоприемник концентрирующий элемент в стационарном режиме

Как показывают исследования в [2] анализ для стационарного режима систему целесообразно строить на интегральных уравнениях теплообмена. При этом в систему уравнений теплообмена характеристики концентратора входят в виде параметра  $C''$ . Составлен алгоритм расчета конструктивных параметров системы трубчато-вакуумированный теплоприемник (ТВТ) – концентратор солнечного излучения (КСИ) в стационарном режиме.

Исходными данными расчета являются расход теплоносителя - пара  $G$  на выходе системы ТВТ-КСИ, а также температура теплоносителя на входе –  $T_{вк}$  и на выходе -  $T_{ввых}$  и соответственно параметры теплоносителя, а также плотность прямого солнечного излучения  $E_0$  и коэффициент зеркального отражения  $R_z$ .

Учитывая, что обычно известны диапазон скорости движения теплоносителя  $w$ , можем определить площадь внутреннего сечения трубчатого приемника  $S_{п}$

$$S_{п} = G / (w \cdot \rho_o) 0,5 \quad (3)$$

где  $\rho_o$  - плотность теплоносителя на входе в приемник.

И так как, обычно используются круглые трубчатые приемники, то определяем и внутренний диаметр трубы  $d_B$

$$d_B = (4 \cdot G / (\pi \cdot w \cdot \rho_o)) 0,5 \quad (4)$$

Исходя из толщины стенок  $h_T$ , то определяем наружный диаметр трубы приемника

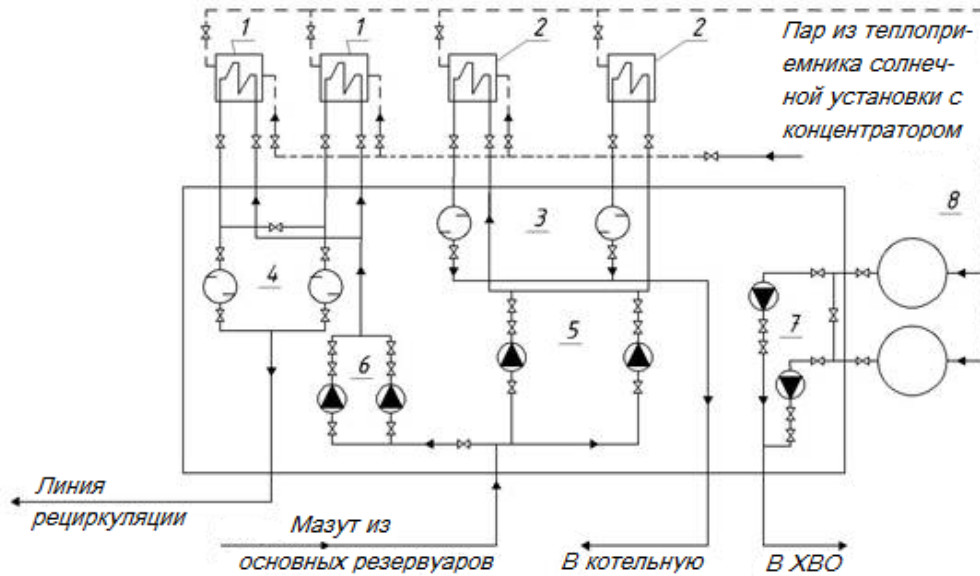
$$d = d_B + 2h_T \quad (5)$$

Далее, задаваясь тепловым КПД приемника –  $\eta_{п}$ , который зависит от  $T_{ввых}$  и средней концентрации  $C'$ , а также коэффициентом улавливания приемником потока, отраженного от концентратора -  $\Phi k$ , определяется поток отраженный от концентратора

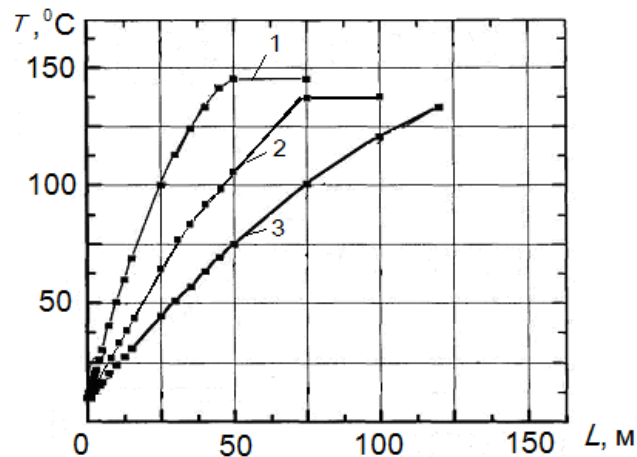
$$\Phi k = Q / (\eta_{п} \cdot \eta_y) \quad (6)$$

По результатам исследований КСИ [2], рекомендуется  $\eta_y$  принимать значение  $0.95$ . КПД ТВТ имеет порядка  $\eta_{п} = 0.8$ .

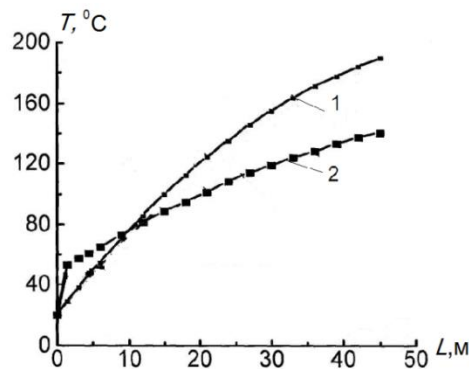




**Рис.1.** Принципиальная схема одноступенчатой мазутонасосной: 1— мазутные рециркуляционные подогреватели; 2 — основные мазутоподогреватели; 3 — фильтры тонкой очистки; 4 — фильтры грубой очистки; 5 — основные мазутные насосы; 6 — рециркуляционные насосы; 7 — конденсатные насосы; 8 — баки для конденсата



**Рис.2.** Изменение температуры теплоносителя по длине трубы ТВТ-КСИ в зависимости от скорости теплоносителя на входе в трубу  $w$ : 1- 0,01 м/с, 2 – 0,02м/с, 3 – 0,03м/с.



**Рис.3.** Динамика нагрева в ТВТ-КСИ при  $w=0,01$  м/с: 1- теплоносителя  $T_{\text{вых}}$ ; 2-температуры стенок прозрачного ограждения  $T_s$ .

Теперь, зная поток, отраженный от концентратора определяем площадь апертуры концентратора -  $S_{mk} = Lk \cdot D$ , где  $Lk$  -длина и  $D$  – ширина КЭ

$$S_{mk} = \Phi k / (E_0 \cdot Rz) \quad (7)$$

Значения  $Lk$  и  $D$  выбираются из конструктивных соображений (ограничений), в том числе с учетом возможных диаметров приемника  $d$  и диаметра его прозрачного ограждения  $d_{по}$ , при этом  $D$  находится в диапазоне от 2 до 6 м.

В частности была определена более детальная связь между параметрами диаметром приемника ТВТ-  $d$  и числом концентрации КСИ -  $C''$ . Указанные результаты были учтены в алгоритме и программе численного расчета температуры нагрева теплоносителя, по длине трубчатого приемника, обогреваемого концентрированным солнечным излучением.

Учитывая результаты исследований в [2] выбираются  $U_0$  порядка  $90^\circ$  и возможных  $\alpha_T$  - порядка  $10'$ . При заданных  $U_0$  и  $\alpha_T$ , возможно определить среднюю концентрацию  $C'$  по всей поверхности приемника для случая полного перехвата потока ( $\eta_y=1$ ), или

$$C' = \sin U_0 / [\pi \cdot (\varphi_0 + 2 \cdot \alpha_T)] \quad (8)$$

Откуда, с учетом полученного универсального соотношения определяется реальная средняя степень концентрации  $C''$  для  $\eta_y = 0.95$

$$C'' = 1,6 \cdot C' \quad (9)$$

а также, учитывая приближенную аналитическую зависимость между диаметрами приемника  $d_0$  (для  $\eta_y = 1$ ) и  $d$  ( для  $\eta_y = 0.95$ )

$$d/d_0 = 0,6 \quad (10)$$

определяется первое значение диаметра концентратора  $D$

$$D = \pi \cdot d_0 \cdot C' = \pi \cdot (d/0,6) \cdot C' \quad (11)$$

Далее определяется

$$Lk = Smk/D \quad (12)$$

Уравнение для определения температуры теплоносителя на выходе  $T_{вых}$  из высокотемпературной солнечной установки в зависимости от длины приемной трубки длиной  $L$  и температуры теплоносителя на входе  $T_{вх}$  выражается [3]

$$\frac{T_{вых} - T_0 - \alpha_0 \cdot E_0 \cdot C''}{T_{вх} - T_0 - \alpha_0 \cdot E_0 \cdot C''} = \exp\left(-\frac{d \cdot L}{w \cdot \rho_0 \cdot c_T}\right) \quad (13)$$

где  $\alpha_0$  - пропускательная способность прозрачного ограждения ТВТ.

#### 4. Результаты расчета ТВТ – КСИ для мазутного хозяйства .

Расчеты проводились для следующих исходных данных:  $E_0 = 650$  Вт/м<sup>2</sup>,  $Rz = 1$ ,  $C'' = 15$ ,  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ ,  $T_в = 10^\circ\text{C}$ ,  $d = 15$ мм,  $d_{II} = 17$ мм,  $d_3 = 1.2 \cdot d_{II}$ ,  $d_{23} = d_3 + 2$ мм,  $\alpha_0 = 0.9$ .

Как видно из рис. 2, на начальном участке и при малых скоростях теплоносителя, в целом, в области рабочих температур, модель достаточно хорошо отражает изменение температуры теплоносителя по длине приемника. С увеличением скорости теплоносителя изменение КПД и температуры теплоносителя происходит медленнее. Это показывает, что для обеспечения требуемой температуры разогретого пара на выходе требуется 50 м модулей системы ТВТ-КСИ.

Температуры нагрева воды и прозрачного ограждения ТВТ, для рассмотренного выше случая приведены на рис.3. Как видно, действительно с увеличением длины (до определенных пределов) температура воды растет вначале быстрее, но так как равновесные температуры практически одинаковы, то далее эффекты уменьшаются. В то же время можно отметить, что достаточно высокие и температуры нагрева стенок прозрачного ограждения ( $t_{Эi}$ ).

Из кривых также видно, что расстояние, на котором температура теплоносителя становится практически равновесной, на длине составляет треть общей длины ТВТ-КСИ.

Характерные результаты исследования на основе разработанной модели, могут быть практически использованы при расчетах параболоцилиндрических концентраторов в высокотемпературных установках с температурами нагрева теплоносителя более  $200^\circ\text{C}$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Назмеев Ю.Г. Мазутные хозяйства ТЭС. - М.: Изд-во МЭИ, 2002. [2] Захидов Р.А., Клычев Ш.И., Максимальная концентрирующая способность параболоцилиндрических зеркал. //Гелиотехника, 1993, № 4, с46-47. [3] Крейт Ф., Блек У. Основы теплопередачи. М.1983. 512 с.

## Ti:SAPPHIRE AS A FREQUENCY CONVERTER FOR SOLAR PUMPED Nd:YAG LASERS

Sh. Payziyev<sup>1</sup>, Kh. Makhmudov<sup>1</sup>, Yasser A. Abdel-Hadi<sup>2</sup>

1-Institute of Ion-plasma and Laser technologies of Uzbekistan Academy of Sciences,

Tashkent 100125, Uzbekistan, Durmon yuli st. 33

e-mail: [payziyev\\_sh@mail.ru](mailto:payziyev_sh@mail.ru),

2-National Research Institute of Astronomy and Geophysics (NRIAG),

Helwan 11421, Cairo, Egypt

### Abstract

*The possibility of more than two-fold increase of Nd:YAG solar pumped lasers pumping efficiency with the use of Ti:Sapphire as a solar spectrum frequency-down-shifting element is shown by the simulation calculation method.*

**Key words:** Ti:Sapphire, solar pumped laser, frequency converter

### 1. Introduction

One of the ways in which the solar pumped lasers efficiency may be improved by better exploitation of the solar spectrum is the use of frequency-down-shifting, where one high energy photon is converted to a low-energy-photon. This mechanism can introduce a new approach in the field of solar-pumped laser through decreasing the threshold power and accordingly increasing the efficiency of the solar laser which is still lying in the range of few percents.

Since the first solar pumped laser was reported by Yung [1] in 1966 it has been realized a number of solar-pumped laser systems [2 - 16]. However the maximum recorded efficiency for Nd:YAG from sunlight to laser is 4.3% [16], which is still low and not enough for wide spreading of solar-pumped lasers commercially.

The idea of frequency down-shifting that we are going to consider in this work is to use additional media helping to decrease the frequency of unabsorbed high energy photons of solar spectrum shifting it to the range well-matching with absorption bands of active medium. In other words, we propose a new approach based on the increase of absorption in Nd:YAG via external frequency conversion of large amount of unabsorbed solar photons and returning them back to the Nd:YAG with minimal losses. It is well-known that the Nd:YAG absorption spectrum sharing in the laser pumped by the sun is about 0.15. This means that the whole solar radiation spectrum is not sharing in the laser process. Moreover, the rest part of the solar radiation can cause some undesirable effects such as thermal effects in the crystal and cavity which affect the whole efficiency of the solar laser system.

In present work we consider the possibility of increase in absorption efficiency of Nd:YAG using Ti:Sapphire as an external frequency converter.

### 2. Description

The considered scheme is depicted in fig.1. It consists of two parts. The main part representing water cooled active medium made of composite YAG/Nd:YAG ceramic or diffusion bonded crystalline material surrounded with metallic tube internal surface of which is silver coated and the plug-in part which is the parabolic frequency converter of solar spectrum with separate water cooling; Lateral surface of active medium is polished to provide total internal reflection and right-hand end is HR coated to reflect lasing wavelength at 1064nm and transmit wavelengths below 900nm. The parabolic shape of frequency converter in plug-in part was due to necessity of forming a flux with angular aperture limited by total internal reflection angle from frequency down-shifted photons to minimize transmission losses. Outward parabolic surface of frequency converter is also silver coated.

Performance analyses have been conducted by simulation method. Simulation calculations for considered scheme of solar laser were carried out using Monte-Carlo and ray-tracing methods [17]. The multi-reflection, refraction and absorption processes were modeled in three-dimensional coordinates. The main difference of simulation model from that used in our preceding works was inclusion of emission process in frequency converter in arbitrary direction within  $4\pi$  solid angle after absorption process. Time delay between absorption and emission processes is assumed to be zero because it is not important in CW mode of operation of a laser. In simulation calculations in addition to the absorption spectrum of active medium and solar spectrum the absorption and emission spectra of frequency converter are used as well.

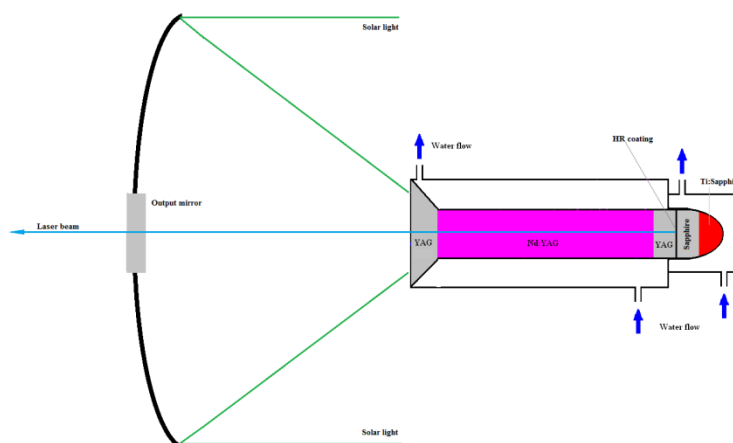


Fig.1. Schematic of laser head with frequency converter

To qualitative analyses and for comparisons different spectra are presented in figure 2. As it is evidently seen from these figure there is an excellent match of the emission spectrum of Ti:Sapphire and the absorption bands of Nd:YAG on the one hand and relatively lesser overlap between absorption spectra of both Ti:Sapphire and Nd:YAG on the other hand. We note that overlap between absorption spectra of active and sensitizing ions is one of the disadvantages of co-doped materials. However the scheme proposed in this work is free of such lacks due to that the frequency converter transforms only the part of solar spectrum unabsorbed in Nd:YAG active medium.

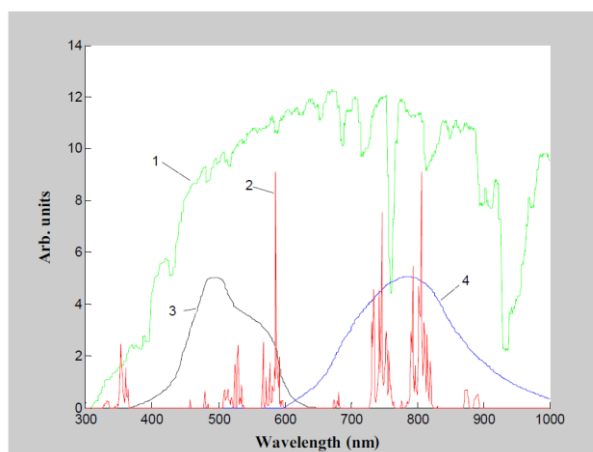


Fig.2. 1- standard solar spectrum, 2- Nd:YAG absorption spectrum, 3,4- Ti:Sapphire absorption and emission spectra respectively

Quantitative analyses of carried out simulation results (figure 3) have confirmed this assumption, showing the possibility of more than five-fold increase of solar-to-laser power efficiency of Nd:YAG laser with external Ti:Sapphire frequency converter for typical solar insolation of  $800\text{W}/\text{m}^2$  at the Earth surface (around  $700\text{W}$  in the figure). Calculations have been carried out for parabolic concentrator with a diameter of  $1\text{m}$  and the standard parameters of Nd:YAG sizes of  $10 \times 50\text{mm}$  and titanium concentration of  $0.5\%$  for Ti:Sapphire. The reflection coefficient of silver coated outward parabolic surface of a frequency converter is assumed to be  $97\%$ . The loss at the interfaces between laser active medium and frequency converter can be reduced to less than  $5\%$  (in one direction) in principle using index matching optical gels and therefore is assumed to be  $10\%$ . As the pumping source the parabolic dish concentrator with a diameter of  $1\text{m}$  and focal length of  $0.5\text{m}$  is considered. Simulation calculations have been done to determine the main figure of merit, the overall pumping efficiency which is equal to maximal slope efficiency that would be attained if the extraction efficiency were unity. Thus the result we have obtained was  $0.21$  for the Nd:YAG + Ti:Sapphire versus pumping efficiency of  $0.14$  for Nd:YAG alone.

On the base of these results using expression for the four-level laser the dependencies of output laser power on the incidence solar power are calculated for the output mirror reflectance of  $95\%$ . Some results are plotted in figure 3 for comparisons. Note that  $1000\text{W}$  in figure 3 of solar power can not be col-

lected at the focal plane of the concentrator with a diameter of 1m on the Earth surface but it can be collected in Space since solar radiation intensity is about  $1350\text{W/m}^2$ . Also, as we can see from the figure 3, a significant increase of the output laser power in the case of adding the Ti:Sapphire than using the Nd:YAG only. For example for 700 W of input solar power, about 20 W of output laser power can be obtained using Nd:YAG only, while about 60 W of the output laser power can be obtained using a combination Nd:YAG and Ti:Sapphire. Also, a significant reduction of the threshold pumping power is noticed in the case of using the mentioned combination. From the figure, the threshold pumping power for the Nd:YAG alone is more than 500 W, while it is about 350 W in the case of using that combination.

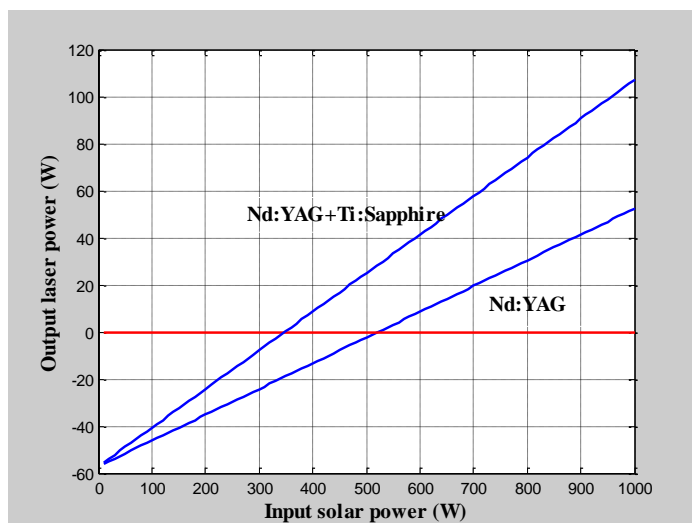


Fig. 3. Output laser power vs. input solar power for parabolic concentrator with a diameter of 1 m.

### 3. Conclusion

The use of Ti:Sapphire as a frequency converter of large amount of unabsorbed solar photons is proposed. The pumping efficiency of 21% has been obtained which is equal to maximal slope efficiency that would be attained if the extraction efficiency were unity. Main advantages of used scheme would be the reduced thermal load on the active medium, less rigid requirements for thermal properties (thermally induced birefringence, lens effect) of frequency converter and also possibility of independent control of temperature in active medium and frequency converter when needed.

### REFERENCES

- [1] C.G. Young, "A Sun-Pumped cw One-Watt Laser", *Applied Optics*, Vol. 5, No. 6, pp 993-997, (1966)
- [2] M. Weksler and J. Schwartz, "Solar-Pumped Solid-State Lasers", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. 24, No. 6, pp. 1222 - 1228, (1988)
- [3] R. M. J. Benmair, J. Kagan, Y. Kalisky, Y. Noter, M. Oron, Y. Shimony, and A. Yogev, "Solar-Pumped Er, Tm, Ho:YAG Laser", *Optics Letters*, Vol. 15, No. 1, pp. 36-38, (1990)
- [4] Kyong H. Kim, Dementius D. Venable, and Lamarr A. Brown, "Thermal Effects on Cavity Stability of Chromium- and Neodymium-doped Gadolinium Scandium Gallium Garnet Laser under Solar-Simulator Pumping" *Journal of Applied Physics*, Vol. 69, No. 5, pp. 2841-2848, (1991)
- [5] I.H. Hwang and J. H. Lee, "Efficiency and Threshold Pump Intensity of CW Solar-Pumped Solid-State Lasers", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. 27, No. 9, pp.2129-2134, (1991)
- [6] U. Brauch, J. Muckenschnabel, H. Opower, and W. Wittwer, "Solar-pumped Solid State Lasers for Space to Space Power Transmission", *Space Power, Resources, Manufacturing and Development*, Vol. 10, No. 3-4, pp. 285-294, (1991)
- [7] U. Brauch, J. Muckenschnabel, G. A. Thomson, H. Bernstein, A. Yogev, A. Reich, and M. Oron, "Influence of Operating Temperature on the Power, Divergence, and Stress-Induced Birefringence in Solar-Pumped Solid State Lasers", *Optical Engineering*, Vol.31, No. 5, pp. 1072-1078, (1992)
- [8] N. Naftali, I. Pe'er, and A. Yogev, "Power Transmission Using Solar Pumped Laser", *SPIE*, Vol. 3139, pp. 259 - 265, (1997)
- [9] M. Lando, Y. Shimony, R. M. J. Benmair, D. Abramovich, V. Krupkin and A. Yogev, "Visible Solar-Pumped Lasers", *Optical Materials*, Vol. 13, Issue 1, pp. 111 -115, (1999)
- [10] M. Lando, Y. Shimony, Y. Noter, R. M. J. Benmair and A. Yogev, "Passive Q Switching of A Solar-Pumped Nd:YAG Laser", *Applied Optics*, Vol. 39, No. 12, (2000)
- [11] M. Lando, J. Kagan, B. Linyekin, V. Dobrusin, "A solar-pumped Nd:YAG laser in the high collection efficiency regime", *Optics Communications*, 222, pp. 371-381, (2003)
- [12] T. Funatsu, T.Yabe, T. Ohkubo, S. Uchida, K. Yoshida, B. Bagheri, T. Oishi, K. Daito, M. Ishioka, Y. Nakayama, N. Yasunaga, K. Kido, M. Nakatsuka, M. Yoshida, S. Motokoshi, Y. Sato, C. Baasandash, K. Kato, T. Yanagidani, and Y. Okamoto. Study of Solar Pumped Laser for

Fossil-fuel-free Energy Cycle Using Magnesium. Rev. Laser Eng. **36**, 1153 (2008) [13] D. Liang and R. Pereira, "A Simple Approach for Enhancing the Output Performance of Solar-Pumped Solid-State Lasers", International Journal of Optics, Volume 2009, Article ID 730165, 8 pages, doi:10.1155/2009/730165 [14] D. Liang, J. Almeida, D. Garcia. Comparative study of Cr:Nd:YAG and Nd:YAG solar laser performances. Proc. of SPIE Vol. 8785, 87859Y (2013) [15] D. Liang, J. Almeida, E. Guillot. Side-pumped continuous-wave Cr:Nd:YAG ceramic solar laser, Applied Physics B, Volume 111, Issue 2, pp 305-311, (2013) [16] T.H. Dinh, T. Ohkubo, T. Yabe, H. Kuboyama, 120 watt continuous wave solar-pumped laser with a liquid light-guide lens and an Nd:YAG rod, Opt. Lett. **37**, 2670-2672 (2012) [17] Sh Payziyev, Kh Makhmudov, A new approach in solar-to-laser power conversion based on the use of external solar spectrum frequency converters, J. Renewable and Sustainable Energy **8** (1) (2016).

## ОПТИМАЛЬНЫЕ СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ УЗЛОВ СОЛНЕЧНЫХ ЛАЗЕРОВ НА ПАРАБОЛИЧЕСКИХ КОНЦЕНТРАТОРАХ

С.А.Бахрамов, Ш.И.Клычев, Ф.Ф. Шайимов

Ташкентский Государственный Технический Университет имени И.А.Каримова. Инженерно-физический факультет.

Ташкент, 100095, Узбекистан, [fayzullo.sh@mail.ru](mailto:fayzullo.sh@mail.ru). (ул. Университетская, 2)

### Аннотация.

Проведено численные эксперименты по определению зависимостей эффективности накачки солнечных лазеров от угла раскрытия параболического концентратора, размеров вторичного концентратора и длины активного элемента. В модели для проведения расчетов поглощенной мощности, распределения инверсия населенности и по определению эффективности накачки использовался статистический метод Монте-Карло и метод прослеживания лучей. Показано, что эффективность накачки солнечного лазера на параболических концентраторах зависит от параметров и геометрических форм системы.

**Ключевые слова:** эффективность накачки, угол раскрытия, метод Монте-Карло и слежения лучей.

### Введение

Известно, что в настоящее время исследование солнечных лазеров на малогабаритных параболических концентраторах привлекает многих исследователей, так как преобразование солнечной энергии в энергию лазерного излучения является актуальной и представляет большой интерес не только дополнительной возможностью для эффективного использования экологически чистой энергии, но и является серьезной альтернативой. Лазеры с солнечной накачкой в последние годы приобрели постоянно увеличивающийся интерес. По сравнению с лазерами с электрической накачкой, лазеры с солнечной накачкой проще и надежнее вследствие полного исключения необходимости использования электрической энергии и дополнительного оборудования. Данная технология имеет огромный потенциал для многих приложений, например, высокотемпературная обработка материалов, лазерная коммуникация в свободном пространстве, беспроводная передача энергии в землю из космоса, получение топливных материалов и так далее [1-10]. На сегодняшний день предложено много схем для солнечных лазеров [11-17]. Особый интерес представляет собой лазеры на малогабаритных параболических концентраторах. Это связано с их компактностью, удобностью эксплуатации, широкой распространенности малогабаритных концентраторов и т.д. В таких схемах солнечных лазеров для увеличения эффективности накачки и обеспечения однородности накачки используются вторичные концентраторы в разных формах. Известно, что в лазерных схемах геометрия и размеры составных частей и оптимальные соотношения между ними существенно влияют на значения эффективности накачки. При разработке солнечных лазеров на малогабаритных концентраторах необходимо учесть размеры, формы вторичных концентраторов и параметры концентраторов, например, угол раскрытия, степень концентрации и т.д. Как известно, такие данные в настоящее время практически отсутствуют. Поэтому поиск оптимальных вариантов лазерных схем с геометрическими особенностями на малогабаритных концентраторах, разработка программного обеспечения позволяющая определить оптимальных вариантов являются актуальной задачей.

Настоящая работа посвящена исследованию зависимостей эффективности накачки от параметров лазерной системы и на основании результатов этих исследований определению оптимальных соотношений между различными параметрами узлов солнечных лазеров на параболических концентраторах.



Надо подчеркнуть, что в этой работе рассмотрена схема солнечного лазера на параболическом концентраторе при поперечной накачке. Мы считаем, что эта одна из надежных схем накачки, которую можно успешно применять в солнечных лазерах на параболических концентраторах. В параболических концентраторах диаметр фокуса зависит от угла раскрытия. Следовательно, изменяя диаметр фокуса, можно получить высокие концентрации солнечного излучения, направляемого в активную среду, чтобы достичь порога генерации.

## 2. Описание модели

В этой работе проведены численные эксперименты по определению зависимости эффективности накачки от угла раскрытия параболического концентратора, размеров вторичного концентратора и от длины активного элемента. В модели для выполнения расчетов поглощенной мощности, распределения инверсии населенности и определения эффективности накачки использовался статистический метод Монте-Карло и метод прослеживания лучей.

Для описания параболического концентратора использовано следующее общеизвестное уравнение:

$$y^2 + z^2 = 2px \quad (1)$$

где  $p$  – параметр.

В численных экспериментах рассмотрены концентраторы с радиусами 0.25м, 0.5 м, 0,75 м, 1.0 м, 1.25м, 1.5м, 1.75м и 2.0м с разными углами раскрытия.

Вторичный концентратор имеет прямоугольную форму и для описания вторичного концентратора использовались следующие уравнения его плоскостей.

$$x = -0.3 \quad (2.1)$$

$$y = -0.5 \quad (2.2)$$

$$y = 0.5 \quad (2.3)$$

$$z = 0.26 \quad (2.4)$$

$$z = -0.26 \quad (2.5)$$

Разумеется, используется только часть этих плоскостей при определении точек пересечения фотонов с поверхностями. При необходимости используемые границы этих плоскостей были изменены. Исходные внутренние размеры прямоугольного вторичного концентратора были 5.6x10x5.2мм. На рис.1. приведено расположение вторичного концентратора и кварцевая трубка с жидкостной активной средой.

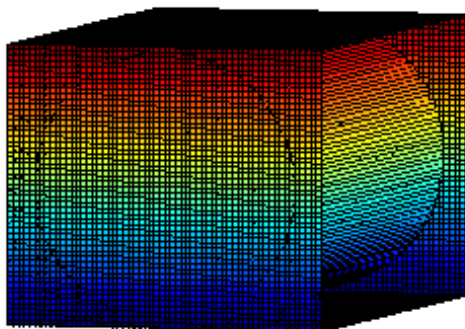


Рис.1. Вторичный концентратор и кварцевая трубка с активной средой.

В качестве активной среды мы выбрали неодимсодержащую жидкостную активную среду оксихлорид фосфора ( $\text{POCl}_3\text{-SnCl}_4\text{-Nd}^{3+}$ ). В качестве обоснования выбора данной активной среды можно привести несколько преимуществ оксихлорид фосфора:

1. Возможность создания активных элементов любой формы и размеров.
2. Возможность использования самой активной жидкости для охлаждения лазера посредством её циркуляции.
3. Относительно низкий коэффициент поглощения на длине волны генерации 1052нм.

Предполагалось, что жидкостная активная среда находится в фокусе концентратора в кварцевой трубке. В модели для описания цилиндра использовались следующие уравнение:

$$x^2 + z^2 = R^2 \quad (3.1)$$

$$y = 0 \quad (3.2)$$

Ширина вторичного концентратора выбрана равной длине кварцевой трубке. Для определения оптимальных соотношений параметров узлов солнечного лазера на параболическом концентраторе численные эксперименты проводились по следующему алгоритму:

1) Изменяя угол раскрытия вычисляется эффективность накачки для каждого значения угла. Таким образом, получается зависимость эффективности накачки от данного параметра параболического концентратора и определяется оптимальное значение. При этом, не изменяются остальные параметры узлов лазерной системы (например, радиус концентратора, форма и размеры вторичного концентратора, толщина и длина активной среды).

2) Симметричным увеличением высоты вторичного концентратора и, не изменяя остальных параметров лазерной системы, получается зависимость эффективности накачки от размера вторичного концентратора. При этом угол раскрытия концентратора принимает оптимальное значение, полученное на первом этапе численного эксперимента.

3) Симметричным увеличением длины активной среды (соответственно увеличивается ширина вторичного концентратора) получается соответствующая зависимость. Угол раскрытия параболического концентратора и высота вторичного концентратора принимают оптимальные значения, полученные в предыдущих этапах.

### 3. Результаты численных экспериментов

На рис.2. приведен результат первого этапа численных экспериментов для параболического концентратора с радиусом 1.5м.

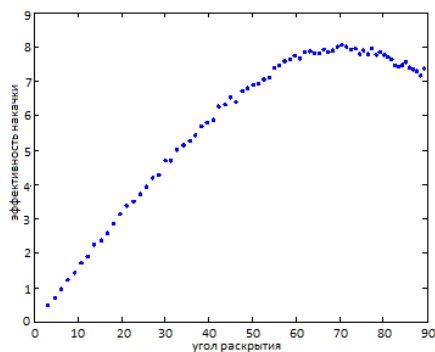


Рис.2. Зависимость эффективности накачки солнечного лазера от угла раскрытия параболического концентратора.

Видно, что значение эффективности накачки существенно зависит от угла раскрытия параболического концентратора. Оптимальный угол раскрытия для данного концентратора равнялся  $\sim 70^\circ$ .

На рис.3. приведена зависимость эффективности накачки от относительной высоты вторичного концентратора, определяемой как отношение высоты вторичного концентратора к диаметру фокуса. Отметим, что минимальное значение эффективности накачки соответствует максимальному значению предыдущей зависимости. Это обусловлено тем, что мы использовали результат из предыдущего этапа численного эксперимента, т.е. в качестве значения угла раскрытия брали его оптимальное значение  $70^\circ$ . Оптимальное значение относительной высоты вторичного концентратора равнялся  $\sim 0.16$ .

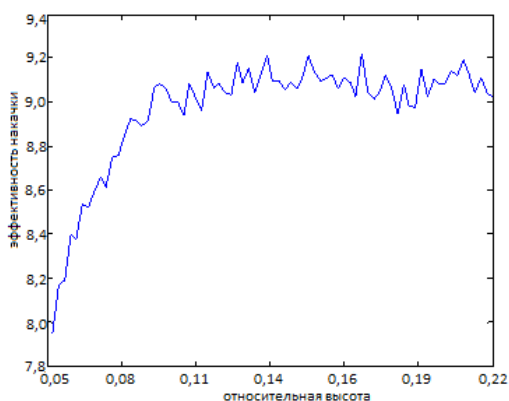


Рис.3. Зависимость эффективности накачки от высоты вторичного прямоугольного концентратора.

Результат третьего этапа для данной системы солнечного лазера показан на рис.4.

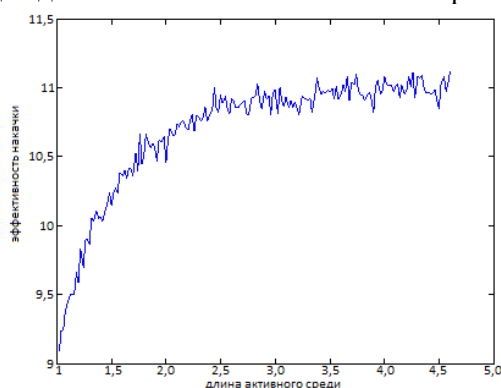


Рис.4. Зависимость эффективности накачки от длины активного элемента.

Здесь тоже видно, что минимальное значение эффективности накачки равнялся максимальному значению эффективности накачки, которое было получено при выполнении второго этапа численного эксперимента. При проведении данного этапа в расчетах были использованы оптимальные значения предыдущих этапов численного эксперимента для угла раскрытия и относительной длины активного элемента. Видно, что эффективность накачки достигает наибольшей величины при длине активного элемента 3-4 см.

Таким образом, мы определяли оптимальную связь между параметрами узлов для данной схемы солнечного лазера с точки зрения достижения наибольшей эффективности накачки.

В таблице приведены результаты численных экспериментов для концентраторов с различными значениями радиуса.

Таблица. Оптимальные параметры солнечного лазера на параболических концентраторах

Радиус концентратора, см	Оптимальный угол раскрытия концентратора,	Оптимальный параметр концентратора, $p$	Оптимальное значение относительной высоты вторичного концентратора	Оптимальная длина активной среды, см	Диаметр фокуса, см
25	32°	89,3	0,71	1,25	1,06
50	39,6°	138,9	0,39	1,3	1,9
75	48,8°	165,5	0,26	1,4	2,84
100	58,5°	178,6	0,25	1,9	4,24
125	67,2°	188,3	0,17	2,3	6,66
150	70,5°	212,3	0,16	3,5	9,1
175	75,3°	226,85	0,138	4	13,76
200	78°	253	0,11	5	19,6

Полученные результаты показывает существенную зависимость эффективности накачки от размеров и геометрических форм лазерной системы. Отметим, что с увеличением радиуса концентраторов максимальное значение эффективности накачки уменьшается. Это может быть обусловлено тем, что диаметр пятна прямо пропорционален радиусу концентратора и вследствие этого степень перекрытия концентрированного солнечного излучения активным элементом снижается.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] R.J. De Young, G.D.Walberg, E.J.Conway, and L.W.Jones, “A NASA High-power space-based laser research and application program”, NASA LangleyResearch Center,NASA-SP-464, Langley AFB,VA, 1983. [2] M.Lando, J.Kagan,Y.Shimony,Y.Kalisky,Y.Noter,A.Yogev,S.Rotman,S.Rosenwaks, “Solar pumped solid state laser program”, SPIE V.3110, 196-201,1997. [3] A.Yogev, “Large scale solar projects at the Weizmann institute”, SPIE V.3139,186-190,1997. [4] U.Brauch, J.Muckenschnabel, H.Opower,W.Winter, “Solar Pumped Solid State Lasers for Space to Space Power Transmission”, *Space Power*, 10, 285-294,1991 [5] M.Duchet, L.Cabaret, A.Laurens, J.C de Miscault, “Space Power Supply Networks Using Laser Beams”, *Space Power*, 11,241-250,1992. [6] R.B.Hall,”

Lasers in industrial chemical synthesis”, Laser Focus, September 1992,57-62. [7] V.Krupkin, Y.Kagan and A.Yogev, “Non Imaging Optics and Solar Laser pumping at the Weizmann Institute”, *SPIE* V.2016, 50-60, 1993. [8] V.Krupkin, G.Thompson, A.Yogev, M.Oron, “Compound Parabolical Concentrator as Pumping Device For Solid-State Solar Lasers”, *SPIE* V.1971,400-407,1992. [9] M.Weksler and J.Shwarz, “Solar-Pumped Solid State Lasers”,*IEEE Quantum Electron.*,V.24, № 6,1222-1228,1988. [10] T.Yabe, T.Ohkubo et al. High-efficiency and economical solar-energy-pumped laser with Fresnel lens and chromium codoped laser medium, *Appl.Phys.Letters* 90, 21120, 2007 [11] S. Bakhramov, Sh. Payziyev, A. Kasimov and F. Shaiimov, “Possibility of Creating Liquid Lasers on Big Solar Furnase”, *Applied Solar Energy*, V.45, No:4, pp.276-278, 2009.[12] S. Bakhramov, Sh. Payziyev and A. Kasimov, «Feasibility of creation of ceramic disk laser pumped by concentrated solar flux of Big Solar Furnace», *Journal Renewable and Sustainable Energy*, (American institute of physics, USA) V.1, No:6, 2009.[13] S. Bakhramov, Sh. Payziyev and A. Kasimov, « Transformation of concentrated sunlight into laser radiation on small parabolic concentrators», *Journal Renewable and Sustainable Energy*, (American institute of physics, USA) V3, No:5, 2011.[14] Ш.Д.Пайзиёв, С.А.Бахрамов, Ф.Ф.Шайимов. «Исследование возможности создания Nd:Cr:GSGG дискового лазера солнечной накачкой». *Узбекский физический журнал*. Том 15. №5-6. С. 270-276. 2013 [15] Sh. D. Payziyev, S.A. Bakhramov, F.F. Shayimov, A. Sh. Fayziev. “Effect of Cr<sup>4+</sup> impurities in Nd:Cr:GSGG and Nd:Cr:YAG laser materials on parameters of lasers at solar pumping” *Узбекский физический журнал*. Том 17. №4. С.254-260. 2015. [16] Sh. D. Payziyev, S.A. Bakhramov, F.F. Shayimov “Enhancing of solar pumped liquid laser efficiency”. *Applied Solar Energy*. №1. 2016. [17] Sh. Payziyev, Kh. Makhmudov, «A new approach in solar-to-laser power conversion based on the use of external solar spectrum frequency converters”, *Journal Renewable and Sustainable Energy*, V.8, Issue 1, 2016

## ИССЛЕДОВАНИЕ МИНЕРАЛПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ МЕСТНЫХ СЫРЬЕВЫХ КОМПОНЕНТОВ И ВЕЩЕСТВ

И.Атабаев<sup>1</sup>, Ш.Ирматова<sup>1</sup>, С.Мухсимов<sup>1</sup>, Ш.Файзиёв<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт Материаловедения НПО «Физика-Солнце» АН РУз.

Ташкент, 100084, Узбекистан, ул. Бодомзорйули 2 «б».

E-mail: [Sh.fayziev@gmail.com](mailto:Sh.fayziev@gmail.com)

### Аннотация

*В работе приведены результаты исследования минералполимерных композитов на основе местного сырья. В частности приведены результаты по выбору наполнителей, связующих и отработке технологии создания синтегран.*

**Ключевые слова:** минералполимер, полимербетон, композит, синтегран, керамогранит, гранит, габбро, габбро – диабаз

### Введение

Как известно, последние десятилетия нашли широкое применение плиты из керамогранита - искусственного гранита [1-3]. На сегодняшний день они занимают более половины рынка керамических облицовочных, напольных и фасадных плит. Вместе с тем достаточно активно внедряются во многие отрасли экономики синтетические граниты, которые имеют существенно широкие возможности в их практическом применении, вытесняя керамогранит в ряде секторов облицовочных строительных материалов. В частности, синтетические граниты, как их называют также синтегран, гранитан, сингран, а в некоторых изданиях и полимербетонами, находят всё более широкое применение в обустройстве кухонь, столовых, ресторанов и ванных помещений, оказывая конкуренцию керамограниту.

Причём, возможности применения синтеграны существенно шире [4]. Синтеграны представляют собой высоконаполненные композиционные материалы на основе эпоксидных связующих на базе эпоксидных смол, а также наполнителей и заполнителей различных фракций и мелкодисперсных порошков высокопрочных гранитов, габбро, габбро – диабазов, диабазов и т.д. Надо заметить, что в последнее время часто вместо эпоксидной смолы используют акриловые и полиэфирные смолы, большой выбор, которых отличается меньшей токсичностью и отсутствием резкого запаха. Синтеграны относятся к разряду полимерных бетонов и имеют высокие физико – механические характеристики, что позволяет им найти широкое применение в различных сферах. В таблице 1 приставлены основные характеристики чугуна, минералполимерных композитов (МПК) и гранита.

Как видно из таблицы технические свойства МПК и чугуна различаются существенно. Если говорить о прочности, то видно, что прочность чугуна выше чем МПК на порядок. Но с другой стороны эксплуатационные нагрузки станков где могут быть использованы МПК в создании станин, не превышают 5-10% от прочности чугуна [4]. А демпфирующая способность МПК, что очень важно, в 3 раза выше чем у чугуна. Теплопроводность МПК на 1,5 порядка меньше чем у чугуна, что обеспечивает его высокую термостабильность в условиях кратковременных колебаний температуры. Преимуществом МПК также являются его высокая коррозионная стойкость.

Таб. 1: Основные характеристики чугуна, минералполимерных композитов МПК и гранита

№	материал	чугун	Минералполимерный композит	гранит
1	Плотность, кг\ м <sup>3</sup>	7000 -7500	2500-2700	2600-3000
2	Прочность, МПа: При сжатии При растяжение При изгибе	400-900 15-20 100-400	160 -200 15 -20 25 -35	150-300 3-5 35-50
3	Коэффициент теплопроводности, Вт/ м с	75,0	1,6 -1,75	3,5
4	Водопоглощение за 24 ч. %	-	0,02-0,05	0,05-0,1
5	Удельная теплоемкость, Дж/кгс	500-600	920-940	980
6	Температурный коэффициент линейного расширения, °С 10 <sup>6</sup>	9-12	16-20	7-10
7	Модуль упругости при изгибе Мпа, 10 <sup>-4</sup>	10-12	2,5 – 4,5	4-6
8	Относительная демпфирующая способность	0,2	0,8 – 1,0	0,5
9	Коэффициент Пуассона	0,26	0,25 – 0,40	0,25

Положительные качества МПК используются при изготовлении базовых деталей и узлов станков, а это обеспечивает в свою очередь повышение точности и чистоты обрабатываемых поверхностей, а также стойкости режущего инструмента.

Как известно в стране производятся механообрабатывающие станки токарной, фрезерной, заготовительной группы и т.д. и имеется большой интерес в применении МПК для изготовления базовых деталей вышеупомянутого оборудования. Не менее привлекательно наладить производство изделий из МПК отделочно – строительных материалов: подоконников, столешниц, облицовочных плит, различных вспомогательных изделий для столовых, кухонь, ванн.

Нами начаты исследования по выбору наполнителей, связующих и отработке технологии создания синтегранна. В качестве наполнителей были использованы частицы различных фракций габброАкчинского интрузива, наполнителем кварцевая мука. В качестве связующей составляющей была использована эпоксидная диановая смола ЭД-20, отвердителем – полиэтилэнполиамин ПЭПА, парафиновый углеводород C<sub>12</sub>H<sub>22</sub> – C<sub>11</sub>H<sub>24</sub>, полиметилсликосан и разбавитель(диэтиленгликоль ДЭГ-1).

Исследования проводились для отработки технологии создания синтегранна для базовых деталей станочного оборудования, который позволяет по сравнению со сталью и чугуном существенно уменьшить вибрацию и резонансные колебания.

Процесс изготовления синтегранна включает в себя следующие операции: помол и рассев по фракциям наполнителей, тщательная промывка полученных наполнителей и заполнителей; сушка наполнителей и заполнителей; подогрев смолы; добавка отвердителя и других компонентов, включая разбавитель; перемешивания связующих компонентов; тщательное смешивание наполнителей, заполнителей и смеси подготовленной связующей; заливка в формы, установленных на вибростоле.

Результаты экспериментальных работ приведены в таблицах 2 и 3.

Таб. 2: состав деталей и компоненты для синтегранна

№	Сырьевые компоненты	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8	№9
1	Эпоксидная диановая смола ЭД-20	4.2	4.5	4.8	5.1	5.4	6	6.6	6.9	10.0
2	Аминовой отвердитель	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	3	3.6	3.9	1.0
3	Смесь парафинового углеводо-	0.50	0.8	1.1	1.4	1.7	2.3	2.9	3.2	

	рода и полиметилсиликолана $C_{12}H_{22} - C_{11}H_{24}$									
4	Разбавитель ДЭГ-1	1.5	1.8	2.1	2.4	2.7	3.3	3.9	4.2	
5	Твердокаменная порода, фракция $-0,10 + 0,063$ мм	15	15	15	15	15	15	15	15	
6	Твердокаменная порода, фракция $0,315 + 0,063$ мм	77.6	76.4	75.2	74	72.8	70.4	68	66,8	25
7	Твердокаменная порода, фракция $0,315 + 6$ мм									64

Таб. 3: Физика – технические характеристики образцов синтегран

№	Технические характеристики	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8	№9
1	Плотность $г/см^3$	2.07	2.06	2.05	2.03	2.01	2.0	1.9	2.1	2.14
2	Водопоглощение. %	3.0	3.0	2.9	2.8	2,8	2.8	2.1	2.0	2.0
3	Механическая прочность на изгиб, МПа	13.0	13.1	13.0	12.9	12.9	13	13.1	13.2	13.3
4	Механическая прочность на сжатие, МПа	140	143	145	149	150	152	155	158	170

Как видно из таблицы Наиболеевысокими характеристиками обладают образцы 7, 8, 9. Также наблюдается тенденция роста физико – технических характеристик полученных образцов с увеличением связующих компонентов и фракций наполнителей. Это указывает на необходимость продолжения исследований по оптимизации компонентов связующих, а также фракций наполнителей и заполнителей.

#### ЛИТЕРАТУРА:

[1] Адылов Г. Т., Файзиев Ш.А. и др. \ керамогранит - современный строительный материал высшего класса. Журнал Химия и химическая технология, 2007 №2.[2]. Файзиев Ш.А., Исмагов А.А., и др. Искусственный гранит на основе традиционного сырья. \ Материалы научно технической конференции. ТАСИ. Тошкент 2008. С 247-252. [3] <http://chem21.info/info/1532704/> Свойства полимерных композиционных материалов. [4] Рогов В. А, Позняк Г. В. \ Современные машиностроительные материалы и заготовки. М, изд. Центр «Академия», 2008, С. 336.

## КЕРАМИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ ВЫСОКОЙ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ МЕДИЦИНСКОГО ИНВЕНТАРЯ

М.Пайзуллаханов, Ж.Шерматов

Институт Материаловедения НПО «Физика-Солнце» АН РУз

#### Аннотация

Показано, что на базе местного сырья обработанного концентрированным световым потоком возможно получение материала с высокой износостойкостью, которого можно использовать в линиях производства стеклянного оборудования для медицинского препарата.

**Ключевые слова:** солнечная печь, синтез, износостойкие материалы

#### Введение

Медицинская промышленность является одной из развивающихся отраслей экономики Республики Узбекистан и играет важную роль в развитии экономики, укреплении экспортного потенциала.

В Ташкентской области функционируют не менее 5 заводов и цехов по производству разных стеклотар для медицинской отрасли. Анализ показывает, что только одним заводом по производству медицинской тары в год выпускаются 100 млн. штук 12 граммовых ампул, 40 млн. штук 10 граммовых, 60 млн. штук 5 граммовых, 45 млн. штук различных флаконов. Важно отметить, что эти показатели растут год за годом. Как выявлено некоторые комплектующие и расходные материалы всё ещё покупаются за счет валютных средств, при том, что Республика имеет все запасы сырьевых материалов и комплектующих для импортозамещения. Керамические стержни используются в станках резки и формовки стеклянных изделий в качестве держателей стеклянных



ных исходных трубок, и места контакта стержней с стеклянной трубкой подвергается воздействию огня и для охлаждения стержней используется масло. Это приводит к резкой теплосмене и в результате они часто выходят из строя. При использовании металлов особого сплава они тоже подвергаются сильному износу и при этом повышается процент разбраковки стеклянной тары. К тому же особые сплавы очень дороги и покупаются за счет валютных средств. Этих недостатков можно избежать, применяя вставляемые керамические стержни. По сравнению со стержнями, получаемыми из жаропрочных металлов, вставляемые керамические стержни во время процесса сохраняют более точные размеры, обеспечивают более качественную поверхность, стержни поддаются обработке, шлифованию, устойчивы против эрозии жидким стеклом, газопроницаемы, хорошо противостоят тепловым ударам и имеют высокую прочность на изгиб. Освоение технологии производства керамических износо- и огнестойких стержней для производственных линий выпуска медицинских стеклянных изделий приводит к экономии валютных средств, а также обеспечит бесперебойную работу линий заводов по выпуску стеклотары. При этом стержни будут выпускаться 100% ным использованием местного сырья и рабочей силы. Таким образом, налаживание выпуска новых износо- и огнестойких керамических стержней для производственных линий производства стеклотары для медицинских нужд позволило бы сэкономить расход газа, сырья (*энерго- и ресурсосбережение*), валютных средств, а также создать новые рабочие места (*занятость*).

Согласно литературным данным керамические стержни изготавливают почти всеми способами, которые используются для изготовления керамики в других отраслях промышленности (выдавливанием, трамбовкой, литьем и т. п.). Выбор технологии изготовления стержней определяется главным образом формой стержней и их требуемым количеством.

#### **Исходное сырьё для изготовления КИТС.**

Исходным сырьём для стержней будет служить основные горные породы, а также промышленные отходы соответствующим минеральным составом. В частности, нами ранее исследована возможность использования отхода газоперерабатывающих заводов катализаторов на основе оксида алюминия, а также каолин Ангренский, местный кварцевый песок. На первом этапе соответствующий смесь вышеуказанных сырьевых материалов плавят на БСП при мощностях светового потока 90-150 Вт/см<sup>2</sup>. Расплав подвергается термоудару сливанием в воду и далее измельчается на шаровых мельницах до тонины менее 0,063 мм. Из подготовленной массы для проведения испытательных изготавливают штабики, стержни путем полусухого или горячего литья использованием парафина. Далее образцы обжигают при температурах 1300-1320 °С в течении 1-1,5 часов, полное спекание образца обуславливается нулевым водопоглощением (менее 0,002%). Нужно отметить что при использовании горячего литья процесс обжига проходит в двух стадиях. Это- предварительный обжиг в засыпке для удаления парафина и обречения твёрдого тела при температурах 700-750 °С, и окончательный обжиг при вышеуказанных температурах. При больших объёмах, выпускаемых КИТС для окончательного обжига используется газопламенная печь. Полученные имеют контролируемые параметры как плотность, водопоглощение, коэффициент усадки при обжиге, прочность при поперечном изгибе, термостойкость.

Требования к выпускаемому изделию такие:

- коэффициент истирания- 0,035 кг/ м<sup>2</sup>
- прочность при изгибе -65 мПа
- прочность при сжатии – 235 мПа
- термостойкость – 1000-1200 °С
- водопоглощение – 0,02 %
- плотность – 2,35 г/см<sup>2</sup>
- кислотостойкость – 98,85 %

Анализ ранее полученных результатов показывает, что совершенная микроструктура – плотная упаковка и мелкозернистая структура обуславливают высокие физико-механические свойства материалов что, позволяет использовать их для изготовления КИТС в станках по выпуску стеклотары медицинского назначения.

Следует отметить, что износостойкость материалов, полученных на солнечной печи 2-3 раза выше, чем в случае керамической технологии. Имеются патенты на состав массы для изготовления керамического материала *UZ IAP 03766 Адылов Г.Т., Файзиев Ш.А., Руми М.Х. и др. «Шихта*

для изготовления керамики», UZ IAP 03766 Адылов Г.Т., Файзиев Ш.А., Руми М.Х. и др JAP 2007-0112.. «Шихта для получения керамики»

## REFERENCES

[1] Патент РФ № 2296102 от 27.03.07 дата приоритета 03.10.2005 (заявка №200530570) Способ получения карбида кремния из рисовой шелухи. Викулин В.В., Шкарупа И.Л., Гурина Т.В., Пайзуллаханов М.С., Файзиев Ш.А., Адылов Г.Т. [2] Патент РФ № 2299177 от 27.03.07 дата приоритета 07.10.2005 (заявка №2005131153) Способ получения порошка карбида кремния из рисовой шелухи. Викулин В.В., Шкарупа И.Л., Гурина Т.В., Пайзуллаханов М.С., Файзиев Ш.А. [3] JAP 2009 0172 (22) 10.06.2009(51) 8 С 01 В 31/30 UZ. Абдурахманов А.А., Файзиев Ш.А., Пайзуллаханов М.С., Нурматов Ш.Р. Способ получения карбида кальция [4] JAP 2009 0027 (22) 29.01.2009(51) 8 С 03 С 10/04 UZ. Нодирматов Э.З., Файзиев Ш.А., Исмаилов А.А., Пайзуллаханов М.С., Акбаров Расулжон Юлдашевич, Стекло для получения стеклокристаллического материала. [5] Патент JAP 2008 0373 Адылов Г.Т., Файзиев Ш.А., Меносманова Г.С., Ирматова Ш.К., Пайзуллаханов М.С., Нурматов Ш.Р. Шихта для изготовления керамического пигмента. [6] Мустафакулов А.А., Муртазин Э.Р., Жураев О. “Источники возобновляемой энергии и автоматическая система учёта электрической энергии. “Модернизация ресурсосберегающих сельскохозяйственных машин и увеличения их рентабельности”. Сборник научных статей. Ташкент. “Гулбахор”, 20-21 ноября 2014.-с.398-400.

## ФЕРРИТ ВИСМУТА, СИНТЕЗИРОВАННЫЙ В ПОТОКЕ КОНЦЕНТРИРОВАННОГО СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

М.Пайзуллаханов, Ж.Шерматов

Институт Материаловедения НПО «Физика-Солнце» АН РУз

### Аннотация

Показано, что при воздействии концентрированным световым потоком на смесь  $\text{BiO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$  появится возможность синтеза феррита висмута  $\text{BiFeO}_3$  с определенными магнитными свойствами.

**Ключевые слова:** солнечная печь, синтез, магнитные материалы

### Введение

Ферриты на основе систем  $\text{BaO}-\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SrO}-\text{Fe}_2\text{O}_3$  с гексагональной кристаллической структурой имеют высокое электрическое сопротивление 104-107 Ом и большую коэрцитивную силу  $H_K > 0,5 \cdot \text{МА/м}$ , и широко применяются в качестве постоянных магнитов, материалов СВЧ-техники и др.

Феррит висмута ( $\text{BiFeO}_3$ ) перовскитовой структуры проявляет магнитоэлектрический (МЭ) эффект при комнатной температуре, в то время как у большинства магнитоэлектриков МЭ-эффект той же величины наблюдается только при экстремально низких температурах (ниже -160 градусов Цельсия).

Значение коэрцитивной силы определяется факторами, препятствующими перемагничиванию образца. Наличие в образцах примесей, дефектов кристаллической решётки, различного рода неоднородностей, а также дисперсность затрудняет движение границ магнитных доменов и тем самым повышает  $H_c$ .

Доменная структура ферритов зависит от симметрии кристаллов и часто связана с природой и характером распределения в них дефектов. Дефекты в кристаллических решетках, их количество и тип зависят от параметров технологического процесса синтеза. Поэтому при синтезе материалов необходимо применять всячески доступные приемы изменения параметров технологического процесса. Предыдущие исследования показали, что синтез в потоке концентрированного солнечного излучения на Большой солнечной печи (БСП) оказывает наиболее сильное влияние на дефектную структуру структурируемого материала, следовательно появляется возможность контролировать степень дефектности варьированием технологических параметров лучистого нагрева.

Однако всестороннее исследование процессов взаимодействия концентрированного солнечного потока с веществом еще не выявили физико-химические, а также радиационно- и теплофизические механизмы структурирования или деструкции целого ряда материалов в поле концентрированного солнечного излучения. Также вызывает большой практический интерес не только возможность получения, но и прогнозирования, создание новых перспективных материалов с высокими техническими характеристиками синтезируемые по специальной технологии посредством управления оптико-энергетическими параметрами БСП.

## 2. Экспериментальные результаты

Феррит висмута ( $\text{BiFeO}_3$ ) перовскитовой структуры проявляет магнитоэлектрический (МЭ) эффект при комнатной температуре, в то время как у большинства магнитоэлектриков МЭ-эффект той же величины наблюдается только при экстремально низких температурах (ниже  $-160$  градусов Цельсия).

Значение коэрцитивной силы определяется факторами, препятствующими перемагничиванию образца. Наличие в образцах примесей, дефектов кристаллической решётки, различного рода неоднородностей, а также дисперсность затрудняют движение границ магнитных доменов и тем самым повышает  $H_c$ .

К фундаментальным особенностям ферритов относится их способность разбиваться на большое число крошечных областей, называемых доменами. Домены отделены друг от друга доменными стенками - переходными областями, в которых магнитные моменты изменяют свое направление, характерное для одного домена, на направление в другом.

Анализ литературных данных показывает, что гексагональные ферриты бария и стронция  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ ,  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ , приготовленные из высокочистого сырья по керамической технологии с добавкой оксида бора, при спекании в атмосфере кислорода проявляют магнитоэлектрический эффект [1-5]. Значения мультиферроидных характеристик образцов  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ ,  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  существенно превышают таковые пленочных образцов наиболее изученного классического высокотемпературного мультиферроика  $\text{BiFeO}_3$ .

На сегодняшний день феррит висмута является самым известным и наиболее изученным магнитным ферритом с реализацией магнитных и сегнетоэлектрических характеристик при комнатной температуре. Благодаря этим свойствам, с пленками  $\text{BiFeO}_3$  связывают перспективы построения многих приборов на магнитоэлектрическом эффекте. Остаточная намагниченность образцов  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  и  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  в сотни раз больше остаточной намагниченности для пленочного образца.

Феррит висмута  $\text{BiFeO}_3$  относится к классу перовскитоподобных соединений  $\text{ABO}_3$  с магнитными ионами, которые занимают полностью или частично октаэдрические позиции В (рис.1).

Большинство магнитных диэлектриков способно кристаллизоваться в перовскитоподобные структуры. Это и ортоферриты  $\text{MFeO}_3$ , и перовскитоподобные манганиты  $\text{MMnO}_3$ , и мультиферроики  $\text{FeTiO}_3$ ,  $\text{BiMnO}_3$ ,  $\text{BiFeO}_3$ . Большое количество работ посвящено изучению свойств феррита висмута, так как это соединение обладает достаточно высокими температурами Кюри и температурой Нееля, а также обладает простой кристаллической структурой.

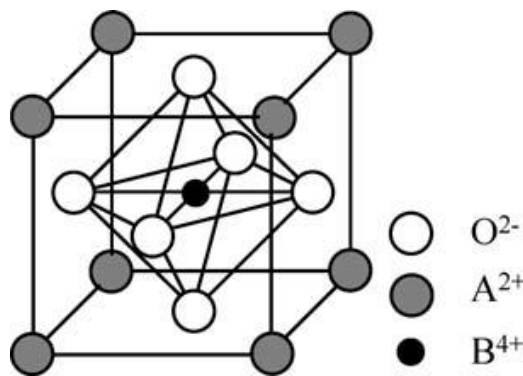


Рис.1. Кубическая перовскитовая структура  $\text{ABO}_3$ .

Оксидная система  $\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{Bi}_2\text{O}_3$  характеризуется возможностью образования трёх фаз:  $\text{BiFeO}_3$ ,  $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{39}$  и  $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$ . Соединения 25:1 ( $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{39}$ ), 1:1 ( $\text{BiFeO}_3$ ) и 1:2 ( $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$ ) плавятся инконгруэнтно при  $785^\circ\text{C}$ ,  $930^\circ\text{C}$  и  $960^\circ\text{C}$ , соответственно. Феррит висмута  $\text{BiFeO}_3$ - наиболее известный сегнетомагнетик. Температура перехода из сегнетоэлектрического в параэлектрическое состояние составляет  $T_c = 830^\circ\text{C}$ , а из антиферромагнитного в парамагнитное –  $T_N = 370^\circ\text{C}$ . Феррит висмута обладает элементарной ячейкой с группой симметрии  $\text{Pm}\bar{3}\text{m}$ . В вершинах куба располагаются ионы  $\text{Bi}^{3+}$ , в центре которого находится ион  $\text{Fe}^{3+}$ .

При  $T < T_c$  структура феррита висмута переходит в структуру с группой симметрии  $\text{R}\bar{3}\text{c}$ .

При пониженной температуре в структуре феррита висмута возникает искаженная ячейка перовскита. При этом происходит смещение всех ионов, а именно: октаэдры, в вершинах которых ионы кислорода, в соседних перовскитных кубах изменяют направление в противоположные стороны вокруг оси [111]. Это вращение приводит к смещению ионов  $\text{Fe}^{3+}$  и  $\text{Bi}^{3+}$  вдоль оси [111] и ионов  $\text{O}^{2+}$  в обратном направлении. Вследствие чего происходит деформация октаэдров. В том пространстве, куда сместились ионы  $\text{Fe}^{3+}$ , увеличиваются кислородные октаэдры. В противоположной же области они сжимаются. В результате ионы  $\text{O}^{2+}$  смещаются в плоскости [111] по направлению к оси в одной части октаэдра и от нее в другой, вследствие чего три иона  $\text{O}^{2+}$  располагаются на расстоянии 1.96 Å от  $\text{Fe}^{3+}$ , и три – 2.11 Å – поляризация решетки.

Ферриту висмута присуща локальная антиферромагнитная структура G-типа, когда наблюдается упорядочение спинов типа «шахматный» порядок. При данном виде упорядочения локальная спиновая структура в феррите висмута представляет структуру, где каждый ион  $\text{Fe}^{3+}$  окружен шестью ионами  $\text{Fe}^{3+}$  с противоположно направленными спинами. Взаимодействие в магнитных диэлектриках между магнитными ионами и диамагнитными ионами (например, ионом кислорода) приводит к нарушению антипараллельной ориентации спинов, которые в свою очередь формируют сложное по геометрии распределение спинов (несоизмеримую спиновую циклоиду), с периодом 620 Å.

Анализ показывает, что применяющиеся методы синтеза материалов (конденсация из паровой фазы, механическое измельчение, лазерная абляция, механохимический синтез, термическое разложение, осаждение из водных растворов, золь-гель синтез) в зависимости от типа задач представляют различную эффективность. Синтез в солевом расплаве (KCl или  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) позволяет получать нанокристаллические слабо агломерированные порошки сложных оксидов с размером частиц до 200 нм. Для получения наноразмерных частиц эффективнее использовать конденсацию из газовой фазы (не всегда доступно, дорого). Механоактивационный синтез долгий, малоэффективный. Осаждение из водных растворов и золь-гель методы также пригодны для получения наноразмерных частиц с различной степенью агломерации. Термическое разложение или высокотемпературный синтез непригоден для получения агломерированных наноразмерных частиц. Как показывает анализ результатов исследований синтез в потоке концентрированного солнечного излучения оказывает наиболее сильное влияние на дефектную структуру структурируемого материала, тем самым появится возможность контролирования степени дефектности варьированием технологических параметров лучистого нагрева.

*Солнечные лучи являются высокопотенциальными источниками энергии, так как видимая температура поверхности солнца, равна порядка 5770 К, а её угловой радиус достаточно мал и составляет около 16 угл.мин. Именно эти обстоятельства создают предпосылки для применения оптических концентрирующих систем с целью повышения плотности потока прямого солнечного излучения и получения температур, необходимых для эффективного поглощения приемником и осуществления высокотемпературных технологических процессов (получения сверхчистых материалов и сплавов, лучевая сварка и т.п.).*

Воздействие концентрированного солнечного излучения на расплав и техника фиксации высокотемпературных состояний в сложных оксидных системах приводят к формированию метастабильных структурных формирований. Такие состояния будут определять направленное изменение структурно-чувствительных свойств, в первую очередь, электрических и оптических. Создание

требуемого комплекса свойств материалов в значительной степени обеспечивается новыми технологиями. При этом необходимо развитие таких процессов с использованием концентрированной солнечной энергии, которые позволят фиксировать наносостояния и далее осуществлять на их основе направленный синтез материалов с требуемыми свойствами. Возможность получения ультрадисперсных и нано-структур может заключаться в воздействии на расплав заданной области солнечного спектра с целью изменения энергии межатомных связей, формировании в расплаве кластеров определенного состава и фиксации их быстрой закалкой.

Кроме того известные механизмы управления процессами синтеза по модельным представлениям физической химии на основе «состав-структура-свойства» посредством высокотемпературного нагрева на традиционных источниках (электротермический, газопламенный, плазменный, высокочастотный) позволяют получить материал с заданной структурой и необходимыми свойствами. Применение традиционных источников нагревания всегда являются подходящими. Осо-

бенно когда требуются высокочистые, нанодисперсные материалы то применение Солнечных технологий способствует достижению создания целевого ряда материалов с высокими эксплуатационными параметрами вместе с высокой эффективностью и экологичностью процессов. Однако всестороннее исследование процессов взаимодействия концентрированного солнечного потока с веществом еще не выявили физико-химические, а также радиационно- и теплофизические механизмы структурирования или деструкции материалов в поле концентрированного солнечного излучения, а также возможности получения и прогнозирования новых материалов посредством управления оптико-энергетическими параметрами БСП.

## REFERENCES

[1] А.А.Абдурахманов, Х.К.Зайнутдинова, М.А.Маматкосимов, М.С.Пайзуллаханов, Г.Сарагоза, Солнечные технологии в Узбекистане: состояние, приоритеты и перспективы развития. Гелиотехника, 2012, №2, с.23-31. [2] А.А.Абдурахманов, М.С.Пайзуллаханов, Ахадов Ж. Синтез алюминатов кальция на большой солнечной печи. Гелиотехника 2012 №2, с.77-80 [3] А.А.Абдурахманов, Ю.Б.Собиров, М.С.Пайзуллаханов, М.А.Маматкосимов Наблюдение и контроль освещенности местности расположения БСП с тепловой мощностью 1000 кВт. Гелиотехника, 2012, №3[4] M.S.Payzullahanov. Particularities of the syntheses BaTiO<sub>3</sub> in the field of concentrated light energy. Horizon Research Publishing, USA Manuscript ID:16200286. 2013, №27. [5] М.С.Пайзуллаханов, Ш.Р.Нурматов, Ж.З.Шерматов. Титанатыбарияистронция, синтезированные в поле концентрированной световой энергии. Стекло и керамика. - 2013. - № 9. - С. 14-16

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ПАРКЕНТСКОЙ КРАСНОЙ ГЛИНЫ

М. Х. Руми, Ш.К. Ирматова, Ш.Р.Нурматов,  
Э.П.Мансурова, М.А.Зуфаров, Н.А. Кулагина.

*Институт Материаловедения НПО «Физика-Солнце» АН РУз  
Ташкент, 10084, Узбекистан, e-mail: marina@uzsci.net*

*Приведены результаты исследований по изучению возможности использования глин Узбекистана для создания защитных покрытий труб паровых котлов тепловых электростанций. Показано, что основным материалом покрытий может стать красножгущаяся глина, благодаря ее химическому составу, включающему значительные количества оксида железа. Дополнительное введение карбоната кальция позволяет повысить прочность и коррозионную стойкость покрытия.*

**Ключевые слова:** покрытия, глина, кислотостойкость, щелочестойкость, коррозионная стойкость, прочность при ударе.

Разработка покрытий для защиты металлических изделий от воздействия агрессивных сред постоянно привлекает внимание исследователей. Одной из серьезных проблем в данной сфере является защита поверхности стальных труб котлов тепловых электростанций, работающих на высококалорийном угле. Одним из способов защиты является нанесение покрытий, обладающих высокой химической и абразивной стойкостью. При этом, учитывая значительные площади поверхностей, нуждающихся в защите, предпочтительно чтобы материал покрытий был недефицитным и недорогим. Условия эксплуатации и обеспечение защиты на уже работающих ТЭС вносит большие ограничения в способы их нанесения и использование целого ряда материалов, обладающих необходимым комплексом свойств.

Задачей данного исследования было определение возможности использования в качестве основного компонента Паркентскую красную глину. Поскольку известно, что плавление на БСП различных минералов и оксидных композиций способствует повышению свойств материалов и изделий, было проведено сравнительное исследование свойств материалов и покрытий на их основе с использованием, как сырой глины, так и плавленной на БСП.

Подготовку покрытий проводили следующим способом: глину измельчали до размера частиц менее 63 мкм, затем добавляли жидкое стекло с модулем 2,8 и плотностью 1,46 г/см<sup>3</sup>, размешивали до получения однородной суспензии в течение 5 мин. Содержание глины и жидкого стекла составляло 15 и 85 масс% соответственно. Также для улучшения свойств суспензии, в нее добавляли 0,02 масс.% (сверх 100%) олеиновой кислоты.

Полученную суспензию кистью наносили на предварительно очищенную стальную поверхность в один или два слоя, затем образцы с покрытиями сушили на воздухе в течение 2 часов. После сушки производили обжиг в диапазоне 20-500°C с выдержкой при максимальной температуре в течение 1 часа. Температура обжига была выбрана с учетом реальных условий эксплуатации стальных труб в паровых котлах. Часть подготовленной суспензии отливали в форме таблеток, высушивали и обжигали при тех же условиях, что и образцы трубы с покрытиями. На полученных образцах определяли износостойкость путем шлифовки образцов на абразивном круге зернистостью 300-500 мкм в течение 5 мин. со скоростью 160 об/мин. под нагрузкой 0,4 кг, а также химическую устойчивость на измельченных до размера частиц 1÷1,6 мм порошках. Кислотостойкость по потере массы определяли путем кипячения в течение 30 мин в 20%- растворе H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, а щелочестойкость в 35% растворе NaOH.

Полученные образцы с покрытиями были подвергнуты испытаниям на устойчивость к коррозии и удару. Коррозионную стойкость покрытия определяли путем воздействия 20% раствора H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> до коррозионных язв или вспучивания покрытия.

Измерение прочности покрытий определяли путем ударас определенной высоты металлическим шаром весом 0,13 кг и диаметром 0,03 м. Испытания проводили, начиная с высоты 0,3 м с дальнейшим постепенным увеличением до появления первых повреждений. Энергию удара по покрытию вычисляли по формуле:

$$E = mgh,$$

где

m – масса шара, кг

h – высота нанесения удара, м

g = 9,8 м / с<sup>2</sup> – ускорение свободного падения.

Для определения минералогического состава глин использовали рентгенофазовый анализ (РФА) с применением рентгеновского дифрактометра ДРОН- УМ-1 ( CuK<sub>α</sub> излучение, Ni фильтр).

По данным РФА на дифрактограмме плавленной глины, помимо стеклофазы были отмечены следы плохо окристаллизованного муллита (рис.1а). Фазовый состав сырой глины представлен каолинитом, кварцем и гематитом (рис. 1б), что хорошо согласуется с данными химического анализа (таблица 1), которые показывают наличие значительного количества оксида железа. В таблице 2 приведены свойства масс и покрытий на основе исследуемых составов.

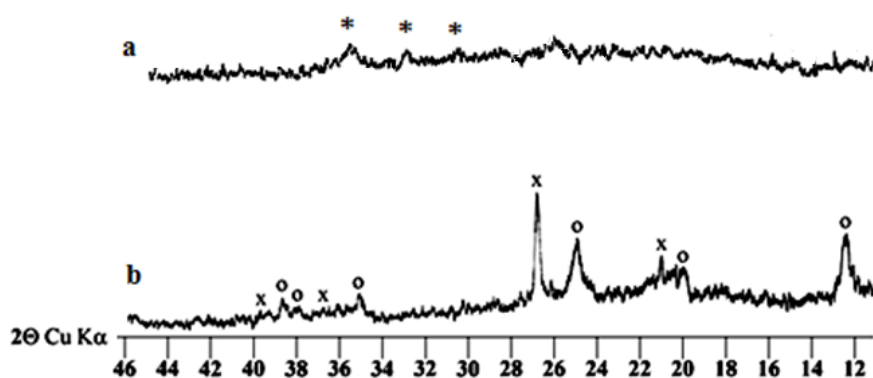


Рис.1 Дифрактограммы глины-сырья: а) глина плавная б) глина сырая  
x – α-SiO<sub>2</sub>, o – каолинит, v – Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, \* - муллит

Таб. 1.Химический состав исходных материалов (в расчете на прокаленное вещество).

Материалы	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> общ	В том числе		Mg O	Mn O	Ca O	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
					Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO 3						
Красная глина	52	0,18	6,28	15,74	6,95	7,92	1,6	1,3	20, 19	1,7	0,6 5	0,3 6
Красная глина плавная	42,65	1,17	28,01	22,8	11,3 6	10,3	1	0,0 8	1,9 4	1,3 7	0,7 6	0,2 2



Таб. 2. Свойства масс и покрытий

Свойства масс	Основной компонент	
	Глина сырая	Глина плавная
Кислотостойкость, %	97,8	82,15
Щелочестойкость, %	93,7	70,3
Износостойкость, г/см <sup>2</sup>	0,005	0,03
<b>Свойства покрытий</b>		
Коррозионная стойкость, кол-во дней	30	22
Стойкость к удару, Дж	0,38	1,27

Как видно из приведенных данных, показатели материалов и покрытий на основе сырой красной глины, за исключением стойкости к удару, заметно выше аналогичных по соотношению компонентов, но при изготовлении с использованием плавной глины. Такое улучшение свойств обусловлено различным взаимодействием композиций минерал-жидкое стекло. Композиция плавная глина-жидкое стекло представляет собой гетерогенную смесь, компоненты которой не взаимодействуют между собой. В то же время, порошок сырой красной глины представлен агрегатами коллоидных частиц, размер которых менее 0,5 мкм. При смешении с жидким стеклом, прежде всего за счет высокой дисперсности, увеличивается площадь поверхности контакта частиц глины с жидким стеклом. При взаимодействии частиц глины с коллоидным раствором жидкого стекла происходит образование нерастворимых солей и геля кремниевой кислоты, обладающего высокой химической стойкостью и цементирующим действием [1].

*Относительно влияния оксида железа на химическую и коррозионную стойкость мнения исследователей неоднозначны. С одной стороны, присутствие гематита в обожженных глинах [2] приводит к понижению химической стойкости. В то же время  $Fe_2O_3$  является основным компонентом многих коррозионностойких покрытий. По мнению авторов [3], в случае использования пигментов, обладающих комплексообразующим действием (пигменты, содержащие  $Cr^{3+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ), повышение адгезии обусловлено включением функциональных групп пленкообразователя и гидроксильных групп металлической поверхности во внутреннюю сферу комплекса, т.е. образованием координационной связи между молекулами пленкообразователя и поверхностью металла. В нашем случае, в роли пленкообразователя выступает жидкое стекло, которое хотя и не относится к полиамидным веществам, но является неорганическим полимером. Поэтому можно предположить, что улучшение свойств покрытий при использовании железосодержащих глинистых материалов, происходит аналогичным образом. Повышенное содержание оксида железа в плавной глине обуславливает увеличение стойкости к удару покрытий на ее основе.*

Таким образом, проведенные нами исследования показали, что основой защитных покрытий для труб теплообменников паровых котлов может стать такое недорогое и доступное сырье, как красножгущая глина, благодаря ее химическому составу, включающему значительные количества оксида железа.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Смирнов К.В. Разработка композиционных материалов на основе соединений силиката натрия и каолина. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Иваново – 2007. [2] Абдрахимов В. З., Колпаков А. В., Денисов Д. Ю. Кристаллизация муллита при синтезе керамических материалов из отходов производств // Научно-методический электронный журнал «Концепт». 2013. Т. 3. С. 2716–2720. [3] Павлович А.В., Изюмский В.Н., Владенков В.В.. Антикоррозионные грунтовки на основе алкидных смол. Технологии производства лакокрасочных материалов. Лакокрасочная промышленность 7. 2009. С. 28–33.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ МАТЕРИАЛОВ ПО ДИНАМИКЕ НАГРЕВА И ОХЛАЖДЕНИЙ

Ф.Ф. Тураев, У.Ф. Тураева

Анализ методики определения излучательных характеристик ( $\epsilon_T$ ) по равновесным температурам показывает, что на этой основе возможно создание и нестационарного метода определения  $\epsilon_T$ . Метод заключается в том, что излучательная способность определяется не по отдельной равновесной температуре, а в целом по кривой охлаждения.

В этом методе также идет нагрев двух образцов – рабочего и «АЧТ» (абсолютная черная тело), далее по достижении равновесной температуры, источник излучения выключается и строится экспериментальная кривая охлаждения обоих образцов.

Учитывая геометрию образцов (плоские пластины) на основе одномерной нестационарной модели [1] определяются расчетные кривые охлаждения. Далее, для черного тела проводится сравнение расчетной и экспериментальной кривой в результате подбирается расчетный коэффициент конвективной теплоотдачи  $\alpha_K$ . Считая, что  $\alpha_K$  для черного и рабочего образца равны для рабочего образца путем варьирования излучательной способностью добиваемся совпадения расчетной и экспериментальной кривой и для рабочего образца. Отличие данного способа от разработанного выше метода определения  $\varepsilon_T$  только по одной равновесной температуре в том, что здесь идет сопоставление по нескольким температурам.

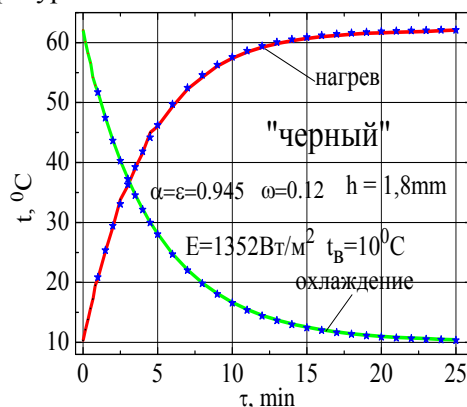


Рис. 1. Динамика охлаждения тонкой (1.8мм) зачерненной медной пластины

На рис.1. приведены расчетные и экспериментальные (точки) кривые охлаждения и нагрева (для сравнения) медной тонкой пластины покрытой со всех сторон сажей.

Как видно, возможно обеспечение достаточно хорошего совпадения расчетных кривых с экспериментом.

Дальнейший анализ динамики изменения температур показал, что возможно определение излучательной способности и по динамике нагрева. Важным здесь моментом является обеспечение условия:

$$\alpha_1 = \varepsilon_1 \text{ и } \alpha_2 = \varepsilon_2 \quad (1)$$

Оно заключается в том, что условие (1) накладывает ограничение на температуры источника излучения ( $T_{\text{изл}}$ ). Т. е. в общем случае температуры источника должны быть такими, чтобы большая часть падающего излучения находилась в области длин волн собственного излучения. Например, для солнечного приемника НПУ, собственное излучение находится в области длин волн более 3 мкм. Оценки показывают, что для солнечного приемника температура источника не должны превышать  $320^\circ\text{C}$ , только в этом случае более 90% энергии падающего излучения лежит в области длин волн более 3 мкм, а если ограничится условием 80% попадания, то температура источника может быть поднята до  $520^\circ\text{C}$ . Таким образом, для приемников НПУ условие (1) может быть обеспечено как за счет температуры источника, так и увеличения его габаритов (создание распределенного источника). Причем важно, что при этом практически нет требований по равномерности температуры по поверхности источника, главное, чтобы в эксперименте оба образца облучались равномерно.

Рассмотрим методику определения излучательной способности приемника  $\varepsilon_T$  по динамике нагрева.

Известно, что при одинаковой плотности потока падающего излучения серые тела, независимо от  $\varepsilon_T$  имеют одинаковую равновесную температуру. В то же время динамика их нагрева может отличаться. Расчетная модель задачи нагрева одномерной пластины и параметры задачи приведена на рис.2, где  $E_{\text{пад}}$ ,  $E_R$ ,  $E_Z$  – плотности потоков излучения падающего, окружающей среды (небо, здания, прозрачного ограждения образца) и Земли;  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  – скорости воздуха над и под пластиной;  $\lambda$ ,  $\rho$ ,  $C$  – соответственно теплопроводность, плотность и удельная теплоёмкость образца;  $h$  – толщина образца;  $L$  – характерный (условный) размер пластины в формулах для определения коэффициента конвективной теплоотдачи.

Особенность задачи заключается в том, что при определении  $\varepsilon_T$  на воздухе необходимо учитывать кроме излучения пластины и теплообмен конвекцией.

На рис.2а,б приведена динамика температур нагрева пластины при различных  $\varepsilon_T$  ( $h = 3\text{мм}$ ,  $\lambda = 384\text{Вт/м}\cdot\text{К}$ ,  $\rho = 8800\text{кг/м}^3$ ,  $C = 0,391\text{Дж/кг}\cdot\text{°C}$ ), в вакууме (а) и на воздухе (б). Из рис. 3а видно, что равновесная температура нагрева в отсутствие конвекции действительно одинакова, однако и в вакууме влияние  $\varepsilon_T$  на динамику нагрева существенно.

В воздухе, вследствие конвекции (см. рис.3б) эти эффекты смазываются, однако важно, что существенно различаются равновесные температуры. Анализ кривых показывает, что в принципе по разности равновесных температур или максимальных разностей на кривой динамики нагрева можно определять  $\varepsilon_T$  на воздухе.

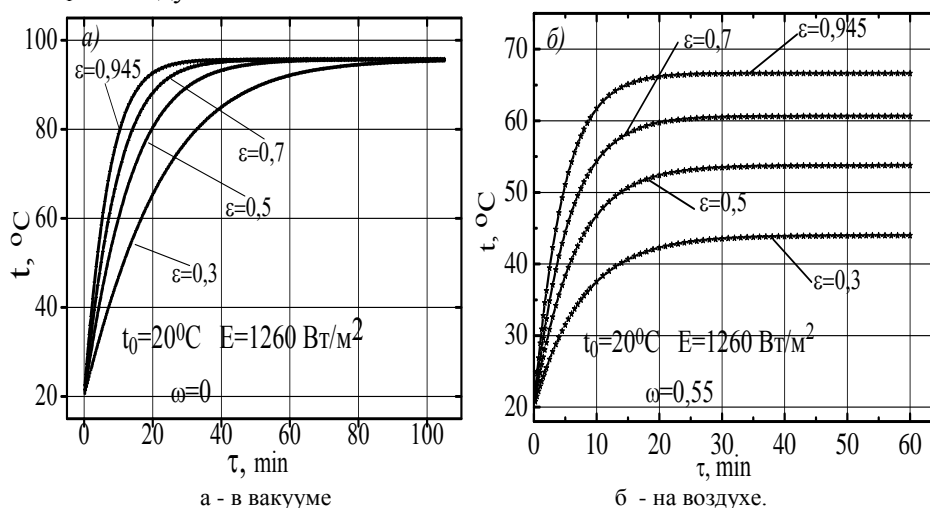


Рис.2. Динамика нагрева пластины во времени при различных  $\varepsilon_T$ .

Так, например, (см. рис. 2б.) разность температур между кривыми температур нагрева при  $\varepsilon_T = 0,945$  и с  $\varepsilon_T = 0,5$  составляет в максимуме в вакууме  $\Delta t = 32,57\text{°C}$  (а), а на воздухе  $\Delta t = 14,9\text{°C}$  (б), а разность равновесных температур на воздухе  $\Delta t = 12,88\text{°C}$  (б).

Этот метод, в общем, позволяет достаточно быстро определять излучательную способность любого непрозрачного покрытия. Основная погрешность метода обусловлена погрешностью определения конвективных теплопотерь, но если эксперимент проводится одновременно с двумя образцами, то погрешность метода будет составлять как и в методе определения  $\varepsilon_T$  по равновесным температурам (см. [2]) около 8%. Однако в отличие от [2] в этом методе практически после, непосредственно измеренным температурам, по номограмме, можно сразу говорить о величине  $\varepsilon_T$ .

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Клычев Ш.И. Моделирование приемно – концентрирующих устройств солнечных теплоэнергетических установок.: Дис. д.т.н.- Т.: ФТИ. 2004. - 268с. [2] Колтун М.М. Селективные оптические поверхности преобразователей солнечной энергии. – М.: Наука, 1979. - 215с.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ГОРИЗОНТАЛЬНО-ОСЕВОЙ ВЕТРОЭЛЕКТРОУСТАНОВКИ В ВЕТРОВЫХ УСЛОВИЯХ АРИДНОЙ ЗОНЫ

Р.А.Захидов, У.А.Таджиев, Е.И. Киселева

Ташкент, 100125, Узбекистан, ООО Научно-технический центр «АО Узбекэнерго», [ipea2010@mail.ru](mailto:ipea2010@mail.ru)

### Аннотация

Показана изменчивость выработки электроэнергии ВЭУ типа U-50 в различных регионах Узбекистана с учётом различий ветровых условий и орографии местности её возможной эксплуатации.

**Ключевые слова:** ветроэлектростанция, выработка электроэнергии, число часов использования, изменчивость

Масштабное использование таких видов возобновляемой энергии как солнечное излучение, ветровых потоков, гидроресурсов для выработки электроэнергии в Узбекистане требует учёта их пространственной и временной изменчивости наряду с характеристиками и показателями энергопреобразующих установок, технологий, обоснованного выбора технологической схемы конкретной к созданию электростанции, выбору её основного оборудования, оценок возможного ущерба от ненадёжности работы проектируемой электростанции и т.д.

Для территории Узбекистана существенной особенностью ветрового потока является то, что его интенсивность подвержена как закономерной, так и стохастической изменчивости [1,2]. В свою очередь это определяется природно-климатическими особенностями и ландшафтом территории и является основным фактором, влияющим на изменчивость энергетических и временных характеристик работы конкретных типов ветроэлектростанций, возможных к использованию.

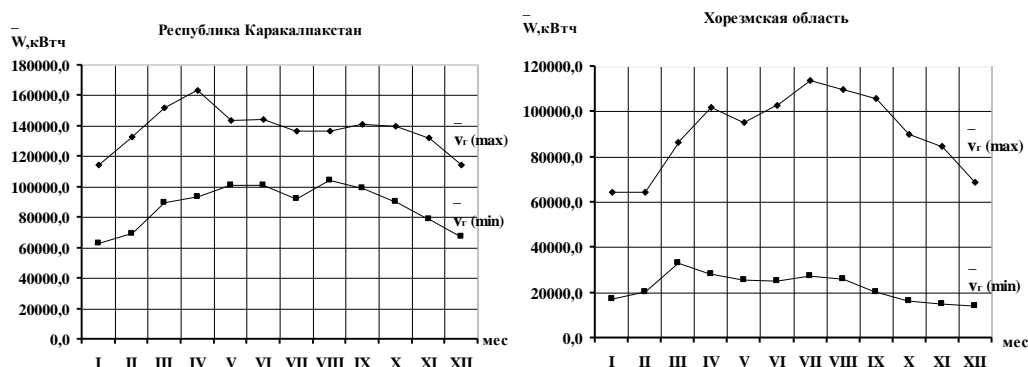
Технологический прогресс, достигнутый в мировой ветроэнергетике, обеспечил наличие на рынке ветроэнергетики ветроэлектростанций (ВЭУ) различных мощностей с отличиями в эффективности преобразования энергии ветровых потоков приповерхностного слоя атмосферы ВЭУ с мощностями до 10,0÷30,0 кВт, а также ВЭУ, обеспечивающих преобразование ветровых потоков приземных слоёв атмосферы (до 120м) ВЭУ с единичными мощностями до 6000 кВт [2]. Как известно, мощность, развиваемая ВЭУ зависит существенно от скоростей ветра в кубической зависимости, технической реализации конкретной ВЭУ, определяемой аэродинамикой и размерами лопастей ветротурбин, высоты расположения осей ветротурбин и т.д. [2]. Ввиду многообразия возможных вариантов к использованию ВЭУ, изменчивость энергетической и временной компоненты характеристик работы ВЭУ по территории Узбекистана, будет показано на примере численного моделирования работы [3] серийно изготавливаемой ВЭУ типа U-50 (UNISONCo., Ltd., Корея) со следующими техническими характеристиками:

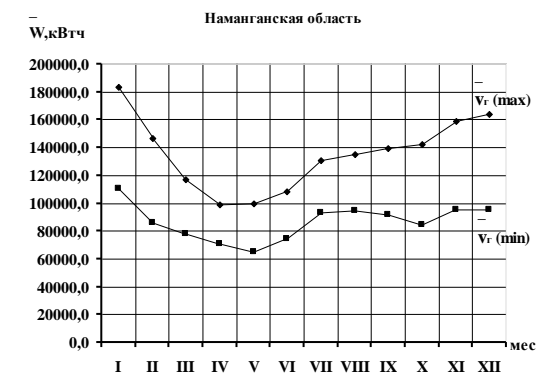
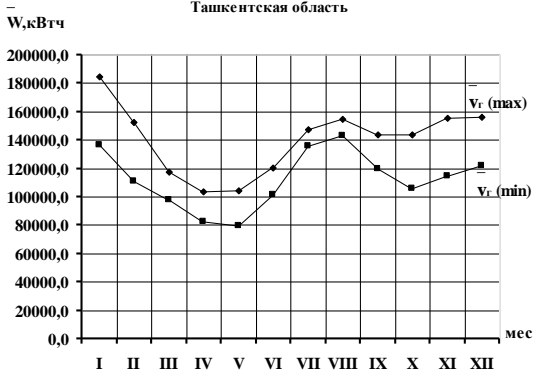
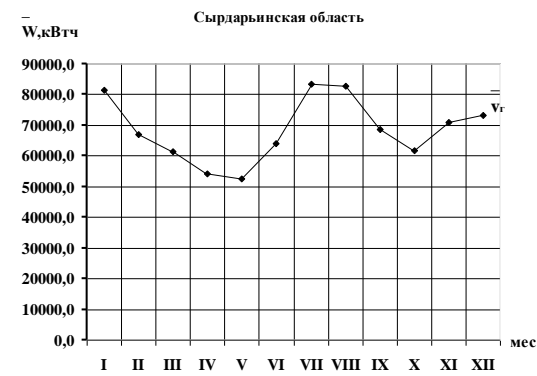
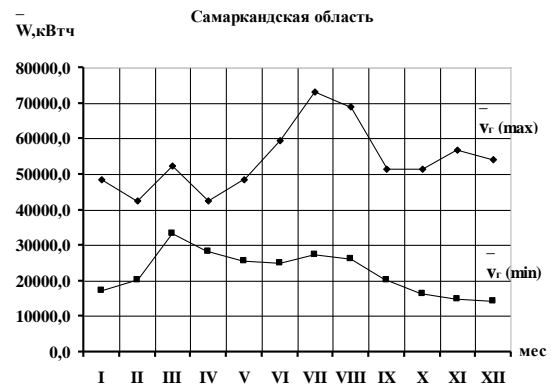
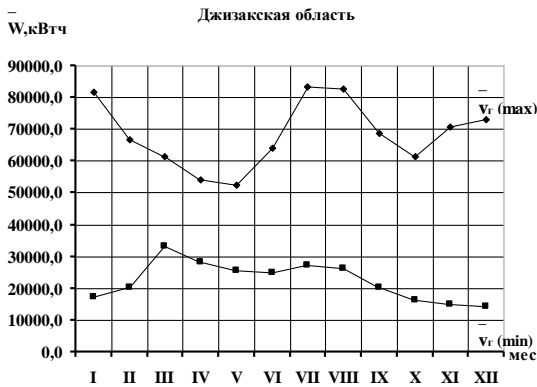
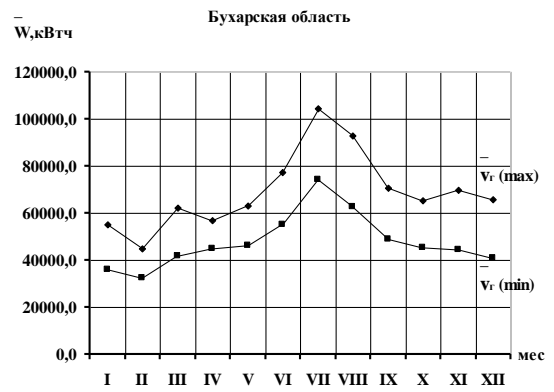
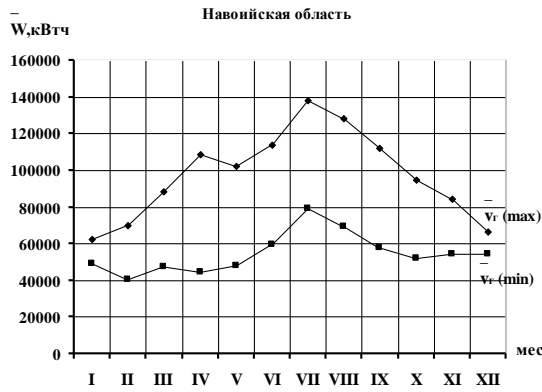
- установленная мощность ВЭУ ( $P_{уст}$ ) – 750кВт;
- высота расположения ветроколеса ( $h$ ) – 50м;
- диаметр ветроколеса ( $d$ ) – 50м;
- начальная рабочая скорость ветра ВЭУ ( $v_{нач}$ ) – 3 м/с;
- номинальная рабочая скорость ветра ВЭУ ( $v_{ном}$ ) – 12,5 м/с;
- конечная рабочая скорость ветра ВЭУ ( $v_{кон}$ ) – 25 м/с.

Для определения характеристик работы ВЭУ типа U-50 использовались данные [4] о повторяемости скоростей ветра на уровне  $h=50$ м для широтно-долготного диапазона, соответствующего территории Каракалпакстана и областей Узбекистана с интервалом в  $1^0$  по широте и долготе, а также график зависимости развиваемой мощности ВЭУ от скорости ветра ( $P(v)$ , кВт).

На рассматриваемых территориях, в соответствие с сеткоданными ( $1^0 \times 1^0$ ) [4], также как и в [1,2] выбирались территории, где среднегодовые значения скоростей ветра принимают максимальное ( $v_{e,max}$ , м/с) и минимальное ( $v_{e,min}$ , м/с) значения. При расчётах возможной месячной выработки электроэнергии ВЭУ U-50 бралось значение скорости ветра, соответствующее середине интервала повторяемости скоростей ветра, и соответствующей этой скорости величина  $P(v)$ . Также по данным о повторяемости скоростей ветра [4] производился расчёт возможного времени работы ВЭУ U-50.

Изменчивость расчётная годового хода электроэнергии ( $\bar{W}$ , тыс.кВтч), вырабатываемой ВЭУ типа U-50 по соответствующим территориям областей республики и Каракалпакстана показана на графиках, приведённых на рис. 1.





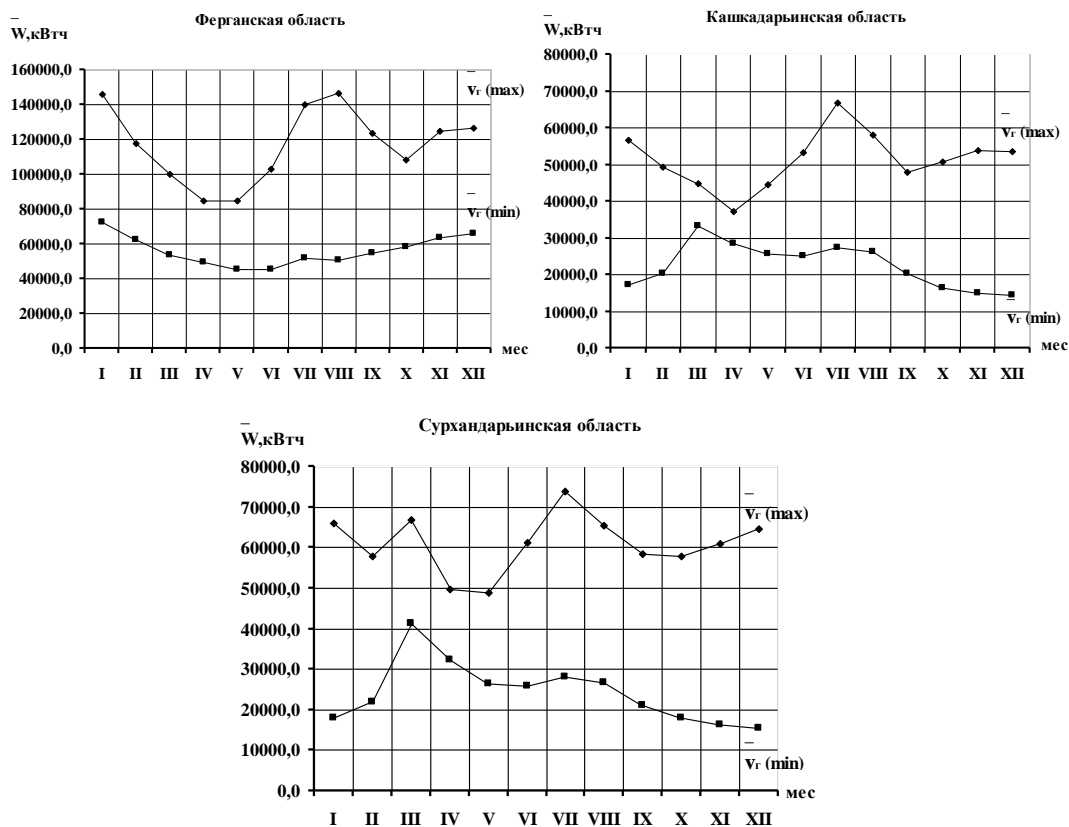


Рис. 1. Годовой ход изменения выработки электроэнергии ВЭУ типа U-50 для различных физико-географических территорий.

По характеру изменения графиков выработки электроэнергии ВЭУ U-50 можно выделить несколько групп регионов. Для территорий с  $v_{\max}$  ( м/с) к первой группе можно отнести территории Республики Каракалпакстан, Хорезмской, Навоийской, Бухарской, Самаркандской областей, для которых характерен спад выработки в зимний период и максимумом выработки ВЭУ в летние месяцы. Вторая группа - территории Ташкентской, Наманганской, Андижанской областей, на графиках выработки электроэнергии которых максимум приходится на зимний период года, а спад наблюдается в весенне-летний период. К третьей группе можно отнести территории Джизакской, Сырдарьинской, Ферганской областей, характерной особенностью графиков годового хода выработки электроэнергии ВЭУ которых является наличие двух максимумов выработки – в зимний период (январь месяц) и летний (июль-август месяцы). К четвёртой группе можно отнести территории Кашкадарьинской и Сурхандарьинской областей, особенностью графиков годового хода выработки электроэнергии ВЭУ является наличие максимума в июле месяце, а минимума выработки в апреле месяце, а также наблюдается спад в выработке электроэнергии ВЭУ в осенние месяцы и последующим ростом в зимний период.

Характерной особенностью графиков годового хода выработки электроэнергии ВЭУ типа U-50 территорий с  $v_{\min}$  ( м/с) для территорий Каракалпакстана, Навоийской, Бухарской, Джизакской, Самаркандской, Кашкадарьинской, Сурхандарьинской областей является рост выработки ВЭУ в тёплый период года с абсолютным максимумом в июле месяце и спад в холодный период года.

Для Ташкентской и Наманганской областей годовой ход изменчивости выработки ВЭУ идентичен для территорий с  $v_{\max}$  ( м/с), но вырабатываемая электроэнергия ВЭУ имеет более низкие значения. Для территорий Андижанской и Ферганской областей наибольшие значения в выработке электроэнергии ВЭУ прослеживаются в холодный период года, а в тёплый период выработка ВЭУ принимает меньшие значения.

Для характеристики численной изменчивости выработки электроэнергии ВЭУ типа U-50 по территории республики в таблице 1 приведены её максимальные и минимальные значения.



Таб. 1: Максимальные ( $\bar{W}_{max}$ , тыс.кВтч) и минимальные ( $\bar{W}_{min}$ , тыс.кВтч) значения выработки электроэнергии ВЭУ типа U-50 для различных территории республики Узбекистан

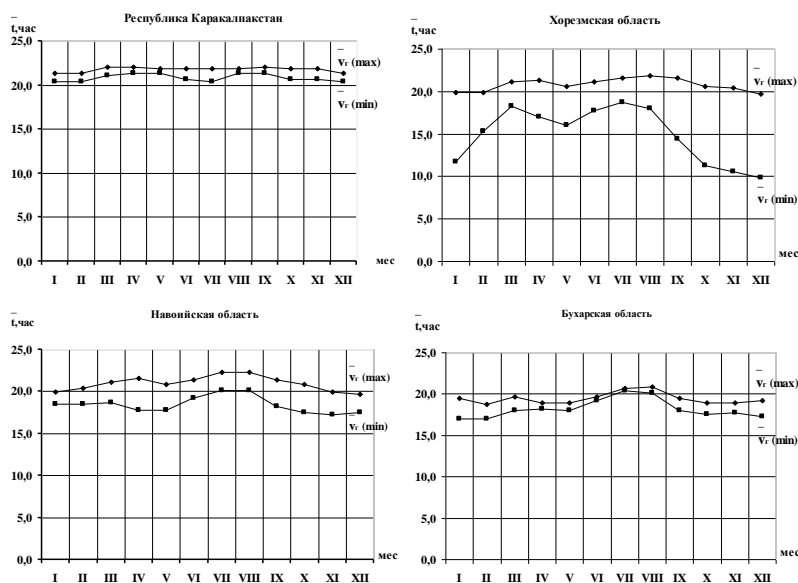
	Республика Каракалпакстан	Хорезмская область	Навоийская область	Бухарская область	Джизакская область	Самаркандская область	Сырдарьинская область	Ташкентская область	Наманганская область	Андижанская область	Ферганская область	Кашкарьинская область	Сурхандарьинская область
территории с $v_{\geq max}$ , м/с													
$\bar{W}_{max}$ , тыс.кВтч	163,8	113,8	137,9	104,3	83,5	73,2	83,5	184,5	183,3	159,1	146,8	66,8	73,9
$\bar{W}_{min}$ , тыс.кВтч	114,2	64,4	62,4	44,7	52,6	42,4	52,6	103,7	98,7	90,8	85,0	37,3	48,8
территории с $v_{\geq min}$ , м/с													
$\bar{W}_{max}$ , тыс.кВтч	104,5	33,2	79,1	74,2	33,2	33,2		136,2	110,3	72,1	72,1	33,2	41,3
$\bar{W}_{min}$ , тыс.кВтч	63,0	14,3	40,4	32,5	14,3	14,9		82,6	65,1	45,2	45,2	14,3	15,4

Важным показателем электростанции, в том числе на возобновляемых энергоресурсах является число часов её работы как в течение года, так и в суточном временных интервалах. В этой связи результаты численных исследований годового хода среднесуточного времени работы ( $t$ , час) ВЭУ типа U-50 на различных территориях с  $v_{\geq max}$  ( м/с) и  $v_{\geq min}$  ( м/с) для областей республики и Каракалпакстана показаны на графиках, приведённых на рис.2.

Анализ графического материала рис.2 позволяет отметить следующее. Для территорий с  $v_{\geq max}$  ( м/с) Республики Каракалпакстан, Хорезмской, Навоийской, Ташкентской, Наманганской, Ферганской областей среднее суточное время работы ВЭУ типа U-50 составляет  $t \geq 20$  часов. Максимальное значения  $t_{max}=23$  часа зафиксировано на территории Ташкентской области в июле-сентябре месяцах. Для территорий остальных областей характерной особенностью графиков годового хода среднего суточного времени работы является наличие максимальных значений в летний период ( июнь – август), которые изменяются от 19 часов до 21 часа; затем наблюдается понижение среднего суточного времени работы ВЭУ в осенне-зимний период (октябрь-январь месяцы) и  $t_{min}=16$  часов фиксируется на территории Джизакской, Сырдарьинской и Сурхандарьинской областей.

Для территорий Республики Каракалпакстан и Ташкентской области с  $v_{\geq min}$  ( м/с) среднее суточное время работы в течение всего года может принять значения  $t \geq 20$  часов.

На территории Наманганской области с марта по август месяцы  $t=19$  часов, а минимум приходится на декабрь месяц  $t_{min}=16$  часов. На территориях Ферганской и Андижанской областей рост среднего суточного времени работы ВЭУ происходит с февраля месяца ( $t=16$  час.) и наибольшее своё значение принимает в марте и апреле месяцах  $t=18$  час., затем происходит постепенный спад в величине  $t$  и минимум  $t_{min}=13$  часам соответствует декабрю, январю месяцам.



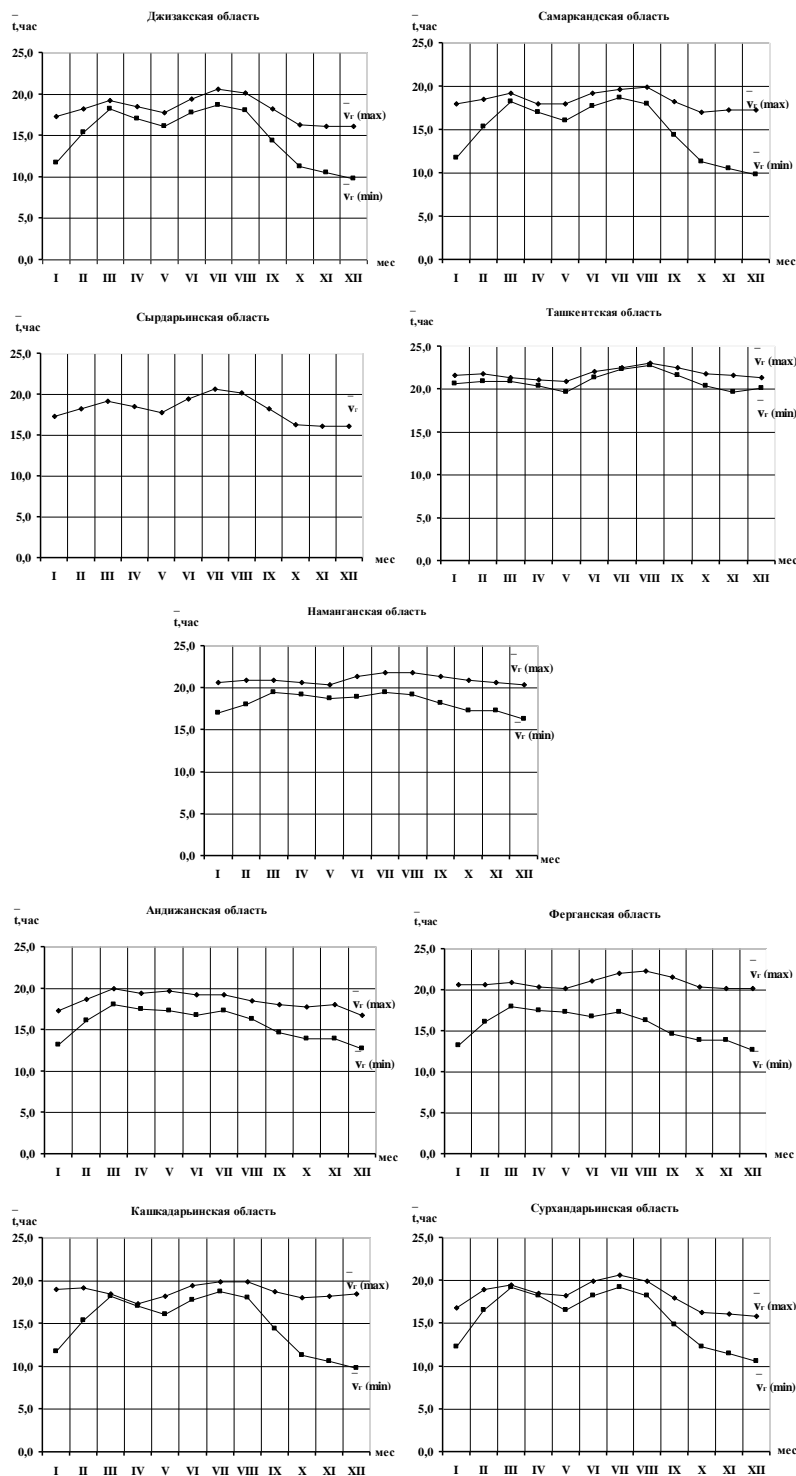


Рис. 2. Годовая изменчивость среднего суточного времени работы ВЭУ U-50 для различных физико-географических территорий.

На территории Навоийской и Бухарской областей  $t_{max} = 20$  часам приходится на июль и август месяцы,  $t_{min} = 17$  часам на ноябрь месяц для территории с  $v_{2, min}$  (м/с) для Навоийской области и на декабрь – февраль месяцы на территории Бухарской области. Для территорий с  $v_{2, min}$  (м/с) Хорезмской, Джизакской, Самаркандской, Кашкадарьинской, Сурхандарьинской областей на графиках годового хода средних суточных значений времени работы ВЭУ типа U-50 явно прослеживается рост  $t_{max}$  в летний период с  $t_{max} = 19$  часам в июле месяце и спадом  $t_{min}$  в осенне-зимний период с 12 часов в январе месяце до 10-11 часов в декабре месяце.

Изменчивости расчётных значений величин годовых сумм электроэнергии ( $W_z$ , тыс.кВтч), вырабатываемой ВЭУ типа U-50 и времени работы ( $t_{p.z.}$  час) по соответствующим территориям для областей республики и Каракалпакстана показаны на графиках, приведённых на рис.3.

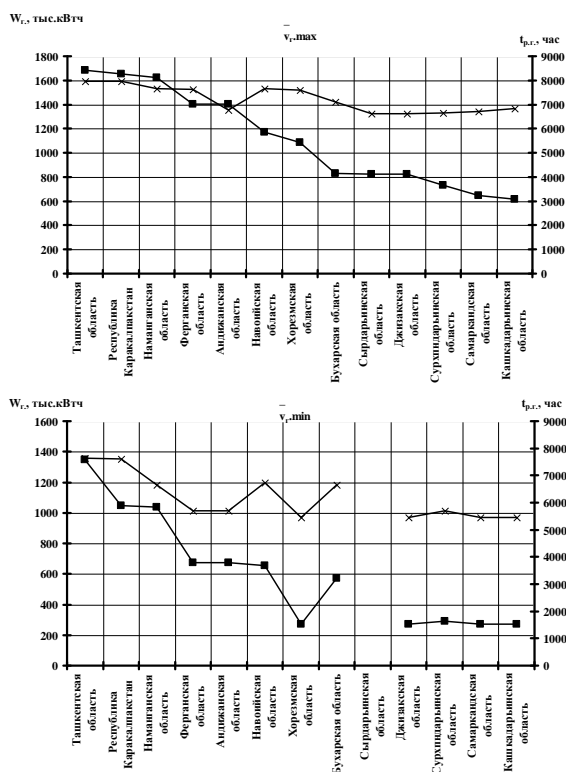


Рис. 3. Годовые суммы вырабатываемой электроэнергии и времени работы ВЭУ типа U-50 для различных физико-географических территорий Узбекистана.

Как следует из графического материала рис. 3, наибольшее количество электроэнергии ВЭУ вырабатывается в горно-предгорных районах и на территории Республики Каракалпакстан, от  $W_z = 1683$  тыс.кВтч в Ташкентской области до  $W_z = 1401$  тыс.кВтч в Андижанской области. Далее следует отметить меньший объём выработки электроэнергии ВЭУ от  $W_z = 1169$  тыс.кВтч в Навоийской области до  $W_z = 616$  тыс.кВтч в Кашкадарьинской области (территории с  $v_{1,max}$ , м/с). Изменчивость годовых сумм времени работы ВЭУ по территориям подвержена меньшей изменчивости. Её максимум приходится на территории Ташкентской области ( $t_{p.z.} = 7964$  час.) и Республики Каракалпакстан  $t_{p.z.} = 7950$  час., а минимум  $t_{p.z.} = 6629$  час. на территории Сырдарьинской и Бухарской областей (территории с  $v_{2,max}$ , м/с).

Ход изменчивости сумм годовой выработки электроэнергии и времени работы ВЭУ для территории с  $v_{2,min}$ , м/с несколько отличаются от вышерассмотренного. Максимум выработки электроэнергии ВЭУ приходится на территорию Ташкентской области (предгорный район) и составляет  $W_z = 1350$  тыс.кВтч, а наименьшая выработка электроэнергии ВЭУ фиксируется на территориях Хорезмской, Джизакской, Самаркандской и Кашкадарьинской областей (равнинные районы)  $W_z = 269$  тыс.кВтч. Более высокие значения времени работы ВЭУ отмечается для территории Ташкентской области  $t_{p.z.} = 7629$  час. и на территории Каракалпакстана  $t_{p.z.} = 7607$  час. Более низкие значения  $t_{p.z.}$  характерны для территорий Хорезмской, Джизакской, Самаркандской, Кашкадарьинской областей (территории с  $v_{2,min}$ , м/с) до значения  $t_{p.z.} = 5444$  час.

Для оценки эффективности работы ВЭУ в течение года на конкретной территории расчи-

тан коэффициент использования установленной мощности ВЭУ  $K_{и.у.м.} = \frac{W_z}{W_{уст}} \cdot 100\%$ , где

$W_z$  (кВтч) – расчётная фактическая годовая выработка электроэнергии ВЭУ;

$W_{уст.}$  (кВтч) – расчётная максимальная выработка электроэнергии ВЭУ при условии её работы с максимальной нагрузкой ( $P_{уст.}$ , кВт) в течение всего года (8760 часов).

Расчётные значения  $K_{н.у.м.}(\%)$  ВЭУ типа U-50 по территории Республики Узбекистан приведены в табл.2.

**Таб. 2: Коэффициент использования установленной мощности ( $K_{н.у.м.}, \%$ ) ВЭУ типа U-50.**

	Ташкентская область	Республика Каракалпакстан	Наманганская область	Ферганская область	Андижанская область	Навоийская область	Хорезмская область	Бухарская область	Сырдарьинская область	Джизакская область	Сурхандарьинская область	Самаркандская область	Кашкардарьинская область
территории с $v_{г,max}, м/с$	28	28	28	25	28	20	19	16	17	17	15	13	12
территории с $v_{г,min}, м/с$	24	18	21	16	16	13	7	11		7	7	7	7

Анализ данных таблицы 2, показывает, что  $K_{н.у.м.}$  также претерпевает изменчивость в зависимости от территориального расположения ВЭУ и изменяется от 28% для территорий с высокими показателями выработки электроэнергии ВЭУ U-50, а, следовательно, и с высокими показателями интенсивности ветрового потока до 7% ( равнинные территории), для которых характерная невысокая интенсивность ветрового потока.

Выполненные численные исследования позволяют отметить следующее.

Перспективность использования энергии ветровых потоков приземных слоёв атмосферы по территории Узбекистана с экологически безопасной выработкой электроэнергии в промышленно значимых объёмах с использованием ВЭУ повышенной мощности.

Выявлена территориальная, сезонная изменчивость выработки электроэнергии и времени работы ВЭУ типа U-50.

Территории с наличием горно-предгорных образований (Ташкентская, Наманганская, Андижанская, Ферганская области), а также часть территории Республики Каракалпакстан (плато Устюрт его Чинк, прилегающий к Аральскому морю), характеризуются возможностью выработки электроэнергии в значительно больших объёмах по сравнению с равнинными территориями.

Временные характеристики работы ВЭУ характеризуется как достаточно высокие по сравнению с «чисто» солнечными энергоустановками, для которых характерно число часов использования установленной мощности не более 2000 часов в году, 12 часов в летний период, 4÷6 часов в осенне-зимний-весенний период.

Установлена необходимость обоснованного выбора для различных территорий Узбекистана ВЭУ по объёму вырабатываемой электроэнергии и числу часов использования.

В связи с изменчивостью по сезонам года выработки электроэнергии и числа часов использования ВЭУ, целесообразно комбинированное использование ВЭУ с другими видами энергопреобразующих установок на базе возобновляемых энергоресурсов.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Таджиев У.А., Киселева Е.И., Таджиев М.У., Захидов Р.А. Особенности формирования ветровых потоков над территорией Узбекистана и возможности их использования для выработки электроэнергии. Часть I. Международный журнал «Гелиотехника» 2014г. № 3.-С.46-52. [2] Таджиев У.А., Киселева Е.И., Таджиев М.У., Захидов Р.А. Особенности формирования ветровых потоков над территорией Узбекистана и возможности их использования для выработки электроэнергии. Часть II. Международный журнал «Гелиотехника» 2014г. №1.- С.65-73. [3] Таджиев У.А., Орлова Н.И., Киселева Е.И., Захидов Р.А. Программа расчета энергетических и временных характеристик работы ветроэлектрических установок с учетом высоты размещения осей их ветротурбин (ВЭУ-В). Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ в Агентстве по интеллектуальной собственности РУз. № DGU 01867. от 07.05.2010г. [4] NASA Surface meteorology and Solar Energy - Location <http://eosweb.larc.nasa.gov>.

## CFD SIMULATION BASED OPTIMUM DESIGN OF DRAG TYPED VAWT BY USING ORTHOGONAL TEST METHOD

M. Zheng<sup>1</sup>, L. Zhang<sup>1</sup>, H.P. Teng<sup>1</sup>, J. Hu<sup>1</sup>, M.L.Hu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Chemical Engineering, Northwest University, Xi'an 710069, China, mszheng2@yahoo.com

<sup>2</sup>School of Physics, Northwest University, Xi'an 710069, China

### Abstract

In the present paper, the orthogonal test method is employed to perform the optimal design of the drag typed VAWT with 4, 5 and 6 blades. The FLUENT software, sliding grid technology and PISO algorithm are used. By taking wind energy utilization rate as the goal function, the optimal designs of drag typed VAWT with 4, 5 and 6 blades are conducted by numerical simulation. It indicated that: the optimal wind energy utilization rate is  $C_p = 27.121\%$  for the 4-blade turbine at the blade width  $d = 0.83\text{m}$ , blade installation angle  $\theta = 29^\circ$ , and the windmill rotation rate  $\omega = 18\text{ r/min}$ ; the optimal  $C_p$  equals to  $28.407\%$  for the 5-blade turbine at  $d = 0.76\text{m}$ ,  $\theta = 20^\circ$ , and  $\omega = 17\text{ r/min}$ ; the optimal  $C_p$  is  $30.374\%$  for the 6-blade turbine at  $d = 0.68\text{m}$ ,  $\theta = 25^\circ$ ,  $\omega = 18\text{ r/min}$ .

**Key words:** orthogonal test, optimum design, drag type VAWT, energy utilization rate, CFD

### 1. Introduction

Energy consumption is a symbol of people's living, which grows with time gradually. It has been clarified that the existing energy resources will be gradually unable to meet people's growing demand for energy, and the energy issues will become an important factor restricting social development. The exploration and utilization of renewable energy has become the inevitable choice for the future sustainable development of society.

Wind energy is one of the inexhaustible renewable energy sources. The advantages of wind energy utilization are: (1) almost everywhere; (2) pollution free; (3) ubiquitous, with relatively lower costs for development and application.

The development of wind turbines has gone through a long process [1-3], it has been divided into two categories mainly, i.e., the vertical axis wind turbine (VAWT), and the horizontal axis wind turbines (HAWT). The VAWT has been rapidly developed due to its special advantages, such as its omnidirection.

In 2015, Jakub et al. studied the actual cost-effectiveness of three types of small wind turbines (SWTs) [4]. The involved SWTs cover the standard three-blade horizontal axis turbine, the Darrieus-type VAWT and the newly developed diffusion-enhanced turbine. The return on investment of the three wind turbines was evaluated based on the power curve and installation cost of the three wind turbines.

In 2016, Kosasih et al. investigated the effects of turbulence intensity on micro-wind turbine (MWT) and diffusion-enhanced miniature wind turbine (DAMWT) [5]. The relationship between the wind energy utilization rate and the tip speed ratio is studied for the turbulence intensity between 2% and 29%. The results showed that the maximum wind energy utilization of DAMWT is about 2 times higher than that of MWT.

Recently, the effect of blade number on performance of drag typed VAWT and the effect of blade installation angle on power efficiency of drag typed VAWT were studied by CFD study [6-8]. It indicated that the energy utilization is affected by the blade installation angle and the blade width significantly. However, the optimization of the drag typed VAWT has not been fully studied [6-8].

In this paper, the optimal design of four, five and six blades drag typed VAWTs is studied by means of orthogonal test method by taking the wind energy utilization as the goal function.

### 2. Simulation method and data processing

#### 2.1 Pre-treatment of the numerical simulation for wind turbine

##### 2.1.1 Establishment of geometric model

Fig. 1 shows the drag typed VAWT. The effect of the connecting rod and axis on entire flow field is ignored due to their smaller physical size in fact. A 2D model is employed in this study so as to reduce the computational complexity and get the main characteristics of the VAWT. Fig. 2 shows a typical 5-blade VAWT calculation model. The wind inlets from left border of the simulation area, and goes out on the right border of the area; the wind turbine rotates in the clockwise direction.

The geometrical parameters in the simulation are set as: wind turbine radius:  $R$  is 2 m, blade height is 1 m, and the blade of the wind turbine is in semi-circular shape.

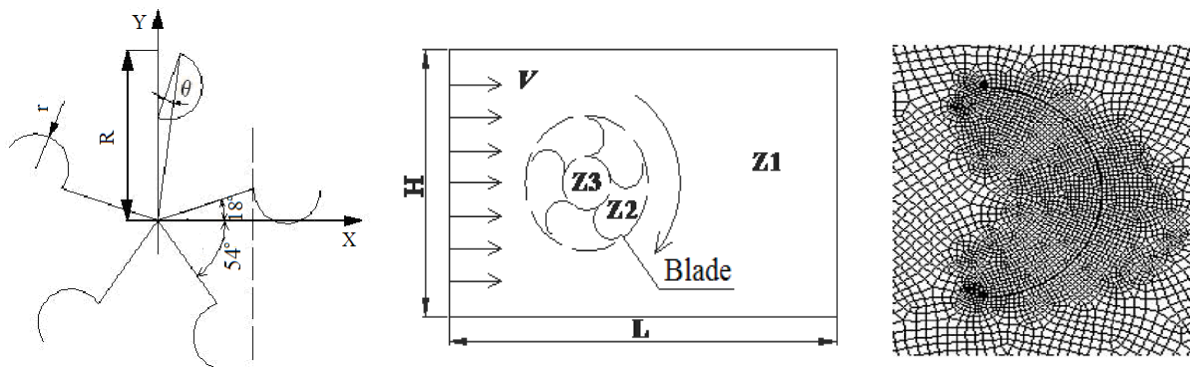


Fig. 1 Schematic diagram of 5-blade VAWT Fig. 2 5-blade VAWT calculation model Fig. 3 Grid layer around the blade

In accordance with the previous simulation [6-8], the flow field region is divided into a rotating region (i.e., a blade rotation region) and a stationary region according to the actual situation in Fig. 2. Three parts, says Z1, Z2 and Z3, are divided for the calculation area in the flow field. The wind turbine blade is located in Z2, which is a circular dynamic area with a diameter of 4.4 m; Z3 is a circular area with a diameter of 2 m, which is a static flow field inside; Z1 is the whole square calculation area excluding Z2 and Z3. According to the previous analysis and calculation, the rectangle size of 70m×140m is taken in the calculation, the distance of the rotation centre of the VAWT is 20m from the left border of the simulated area [6-8].

### 2.1.2 Grid division

The meshing is quadrilateral grid, and the grid is divided by the pave method in this 2-dimensional simulation. In order to save the amount of calculation and keep a higher the accuracy in the simulation, an appropriate grid density is needed. The number of nodes on each curve is shown in Table 1, and the meshing in each region is shown in Table 2. The previous study showed that the errors caused by the number of grids can be reduced in the grid nodes as in Table 1 in the region of 140 × 70 meters [6-8].

A grid independence model is employed to carry out the computation for a chosen configuration. The mesh chosen is structure quadrilateral cells; finer at the rotor and bigger as the distance from the rotor increases and the total number of grids can reach to about  $3 \times 10^5$  cells. Fig. 3 shows the details of the blade surface. The rotating zone and the stationary zone are separated by an interface which is two interfaces superposed [9].

Table 1: The number of nodes in simulation

side	number of nodes
short edge of the area	196
long edge of the area	392
big circle	420
small circle	210
each blade	80

Table 2: Grid division

area	number of Grids
Z3	3877
Z2	23316
Z1	236562
total	263755



### 2.1.3 Setting of boundary conditions

In this simulation, the specific boundary conditions are set as follows:

(1) Inlet boundary conditions: velocity-inlet is selected as the entrance boundary conditions, and the initial value at infinity is set as the inlet wind speed.

(2) Exit boundary conditions: free flow is selected for the outflow.

(3) Wall boundary condition: set the boundary condition of the blade surface as the solid wall, and symmetrical boundary is selected for the upper and lower boundary of the simulation domain.

(4) Internal surface boundary: the interface boundary is selected for the internal interface.

(5) Internal unit area: a dynamic movement area is defined, within which the blades are located.

In addition, the remaining boundary conditions are set to as the default initial values.

### 2.1.4 Solver settings

The FLUENT default option - Pressure Based Solver is used. In the form of pressure - velocity coupling, the PISO algorithm is used to solve the pressure and velocity. The interpolation format for each physical quantity is as follows: The pressure interpolation is PRESTO!, the difference format QUICK is selected for physical quantities such as turbulent kinetic energy, density, momentum, etc.

### 2.1.5 Selection of turbulence model

The SST  $k-\omega$  model is selected, which considers the influence of turbulence shear stress and the turbulent viscosity on the model, and it makes the model predict the separation flow more accurately.

### 2.1.6 Sliding mesh method

The sliding mesh method is employed to simulate the wind turbine.

### 2.1.7 Installation angle of blade $\theta$

Previous studies indicated that both the shape and the relative position of blade could affect the efficiency of VAWT obviously. Fig. 1 shows the geometric schematic of a 5-blade turbine as an example. According to symmetry of the 5-blade turbine, the 5 blades are distributed in plane of  $360^\circ$  homogeneously.

## 2.2 Post-processing steps for the numerical simulation

### 2.2.1 Power of wind turbine $P$

The aerodynamic energy of the wind turbine is,

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (1)$$

in which:  $\rho$  is the air density ( $\text{kg} / \text{m}^3$ ),  $v$  is the inlet wind speed ( $\text{m} / \text{s}$ ),  $S$  is the wind area.

As the torque coefficient  $C_m$  can be obtained by simulation, the torque of the wind turbine can be expressed as,

$$M = C \cdot C_m \quad (2)$$

in which:  $C$  is a coefficient, the value of  $C$  is 0.6125 [6-8].

The power of wind turbine can be written as,

$$P = 2\pi\omega M / 60 \quad (3)$$

in which:  $\omega$  is the rotation rate of the wind turbine in  $\text{r} / \text{min}$ .

### 2.2.2 Wind energy utilization $C_p$

The wind energy utilization  $C_p$  is the ratio of the energy obtained by the wind turbine to the air kinetic energy acting on the wind turbine, which reflects the ability of the wind turbine to convert the wind energy into mechanical energy. If the actual power obtained by the wind turbine is  $P$ , the wind energy utilization rate  $C_p$  is,

$$C_p = \frac{P}{P_0} = \frac{P}{0.5\rho S v^3}, \quad C_p = \frac{P}{P_0} = \frac{P}{0.5\rho h D v^3} \quad (4)$$

in which,  $h$  is height of wind turbine (m),  $D = 2R$  is the diameter of wind turbine (m).

### 2.2.3 Determination of the parameters range in the orthogonal test method

Take the inlet wind speed  $8 \text{ m} / \text{s}$  in our study, according to the preliminary calculation results, the ranges of three factors are as follows:

(1) For 4 blades turbine, the width of the blade  $d$  is in the range of 0.82m-0.85 m, the installation angle of blade  $\theta$  is  $26-29^\circ$ , the rotation rate of the wind turbine  $\omega$  is 16-19  $\text{r} / \text{min}$ ;

(2) For 5 blades turbine, the width of the blade  $d$  is in the range of 0.76-0.82 m, the installation angle of blade  $\theta$  is  $18-21^\circ$ , the rotation rate of the wind turbine  $\omega$  is 15-18  $\text{r} / \text{min}$ ;

(3) For 6 blades turbine, the width of the blade  $d$  is in the range of 0.66-0.69 m, the installation angle of blade  $\theta$  is 25-28°, the rotation rate of the wind turbine  $\omega$  is 16-18 r / min.

2.2.4 Design table of orthogonal test method

The wind turbine blade width  $d$ , the wind turbine blade installation angle  $\theta$ , and the wind turbine rotation rate  $\omega$  are used as three factors for this simulated orthogonal test method, and each factor is divided into 4 levels. According to the previously determined factors and the number of levels, the “Orthogonal Design Table” for the simulation design is  $L_{16}(4^3)$ .

3. Orthogonal design and results for VAWTs

3.1 Four blades VAWT

The orthogonal test simulation design for 4-blade VAWT is shown in Table 3. Using the formulas (3) and (4), the wind energy utilization rate under each condition is obtained and filled into Table 3 as well.

Table 3: Simulated results of 4-blade VAWT orthogonal test design and energy utilization

Test No	Blade width $d$ (m)	Installation angle $\theta$ (°)	Rotation rate $\omega$ (rpm)	Blank	Blank	Energy utilization rate $C_p$ (%)
1	0.82	26	16	1	1	26.32863
2	0.82	27	17	2	2	26.86038
3	0.82	28	18	3	3	27.03776
4	0.82	29	19	4	4	26.54900
5	0.83	26	17	3	4	26.95354
6	0.83	27	16	4	3	26.42815
7	0.83	28	19	1	2	26.78510
8	0.83	29	18	2	1	27.12091
9	0.84	26	18	4	2	27.08250
10	0.84	27	19	3	1	26.72735
11	0.84	28	16	2	4	26.44206
12	0.84	29	17	1	3	26.81668
13	0.85	26	19	2	3	26.62510
14	0.85	27	18	1	4	27.08205
15	0.85	28	17	4	1	27.09652
16	0.85	29	16	3	2	26.57728
K1	106.7758	106.9898	105.7761			
K2	107.2877	107.0979	107.7271			
K3	107.0686	107.3614	108.3232			
K4	107.3810	107.0639	106.6865			
k1	26.6939	26.7474	26.4440			
k2	26.8219	26.7745	26.9318			
k3	26.7672	26.8404	27.0808			
k4	26.8452	26.7660	26.6716			
Extremum deviation R	0.1513	0.0929	0.6368			

According to the results of the range analysis, if the wind energy utilization rate  $C_p$  is taken as the index, it can be obtained that the best wind energy utilization condition is  $d4\theta3\omega3$  from the scope of orthogonal test by the range analysis.

Furthermore, by taking  $d4\theta3\omega3$ , i.e.,  $d = 0.85\text{m}$ ,  $\theta = 28^\circ$  and  $\omega = 18\text{r / min}$  as simulation parameters, it obtains the actual simulation (optimization) wind energy utilization rate 27.113% for 4-blade VAWT at  $d4\theta3\omega3$ .

Comparing this value for  $d4\theta3\omega3$  with the simulated wind energy utilization rate in Table 3 for test No. 8 of  $C_p=27.121\%$ , the optimum 4-blade wind energy utilization is 27.121% at  $d = 0.83\text{ m}$ ,  $\theta = 29^\circ$  and  $\omega = 18\text{ r / min}$ .

### 3.2 Five blades VAWT

The orthogonal test simulation design for five-blade VAWT is shown in Table 4. Using the formulas (3) and (4), the wind energy utilization rate under each condition is obtained and filled into Table 4 as well.

Table 4: Simulated results of 5-blade VAWT orthogonal test design and energy utilization

Test No	Blade width $d$ (m)	Installation angle $\theta$ ( $^\circ$ )	Rotation rate $\omega$ (rpm)	Blank	Blank	Energy utilization rate $C_p$ (%)
1	0.76	18	15	1	1	27.27189
2	0.76	19	16	2	2	28.20302
3	0.76	20	17	3	3	28.40706
4	0.76	21	18	4	4	28.24016
5	0.78	18	16	3	4	27.82765
6	0.78	19	15	4	3	27.38928
7	0.78	20	18	1	2	28.07557
8	0.78	21	17	2	1	27.32462
9	0.8	18	17	4	2	27.28476
10	0.8	19	18	3	1	27.87707
11	0.8	20	15	2	4	27.62201
12	0.8	21	16	1	3	28.30198
13	0.82	18	18	2	3	26.80677
14	0.82	19	17	1	4	27.18948
15	0.82	20	16	4	1	27.81791
16	0.82	21	15	3	2	27.77974
K1	112.1221	109.1911	110.0629			
K2	110.6171	110.6588	112.1506			
K3	111.0858	111.9226	110.2059			
K4	109.5939	111.6465	110.9996			
k1	28.0305	27.2978	27.5157			
k2	27.6543	27.6647	28.0376			
k3	27.7715	27.9806	27.5515			
k4	27.3985	27.9116	27.7499			
Extremum deviation R	0.6321	0.6829	0.5219			

According to the results of the range analysis, if the wind energy utilization rate is taken as the index, the optimum wind energy utilization rate is  $d1\theta3\omega2$  in the orthogonal test range.

Furthermore, by taking  $d1\theta3\omega2$ , i.e.,  $d = 0.76\text{m}$ ,  $\theta = 20^\circ$  and  $\omega = 16\text{r / min}$  as simulation parameters, it obtains and the actual simulated wind energy utilization rate 28.211% at  $d1\theta3\omega2$ .

Compared wind energy utilization rate of 28.211% for  $d1\theta3\omega2$  with the simulated value 28.407% for test No. 3 in Table 4, the optimal value of 5-blade wind energy utilization for orthogonal test is 28.407% at  $d = 0.76$  m,  $\theta = 20^\circ$  and  $\omega = 17$  r / min.

### 3.3 Six blades VAWT

The orthogonal test simulation design of 6-blade VAWT is shown in Table 5. Using the formulas (3) and (4), the wind energy utilization rate under each condition is obtained and filled into Table 5 as well.

Table 5 Simulated results of 6-blade VAWT orthogonal test design and energy utilization

Test No	Blade width $d$ (m)	Installation angle $\theta$ ( $^\circ$ )	Rotation rate $\omega$ (rpm)	Blank	Blank	Energy utilization rate $C_p$ (%)
1	0.66	25	16	1	1	28.63447
2	0.66	26	17	2	2	29.60974
3	0.66	27	18	3	3	28.57125
4	0.66	28	19	4	4	28.98143
5	0.67	25	17	3	4	29.49782
6	0.67	26	16	4	3	28.61988
7	0.67	27	19	1	2	29.36390
8	0.67	28	18	2	1	30.33837
9	0.68	25	18	4	2	30.37399
10	0.68	26	19	3	1	29.23162
11	0.68	27	16	2	4	28.29293
12	0.68	28	17	1	3	29.08425
13	0.69	25	19	2	3	28.79520
14	0.69	26	18	1	4	30.30599
15	0.69	27	17	4	1	29.08793
16	0.69	28	16	3	2	27.40782
K1	115.7969	117.3015	112.9551			
K2	117.8200	117.7672	117.2797			
K3	116.9828	115.3160	119.5896			
K4	115.5969	115.8119	116.3722			
k1	28.9492	29.3254	28.2388			
k2	29.4550	29.4418	29.3199			
k3	29.2457	28.8290	29.8974			
k4	28.8992	28.9530	29.0930			
Extremum deviation R	0.5558	0.6128	1.6586			

According to the results of the range analysis, if the wind energy utilization rate is taken as the index, the optimum wind energy utilization rate is  $d2\theta2\omega3$  in the orthogonal test range.

Furthermore, by taking  $d2\theta2\omega3$ , i.e.,  $d = 0.67$  m,  $\theta = 26^\circ$  and  $\omega = 18$  r / min as simulation parameters, it obtains and the actual simulated wind energy utilization rate 30.219% at  $d2\theta2\omega3$ .

Compared wind energy utilization rate of 30.219% of  $d2\theta2\omega3$  with the simulated value 30.374% for test No. 9 in Table 5, the optimal value of 5-blade wind energy utilization for orthogonal test is 30.374% at  $d = 0.68$  m,  $\theta = 25^\circ$  and  $\omega = 18$  r / min.

#### 4. Conclusion

In this study, 3 factors with 4 levels are set, a total of 16 tests were carried out in the Orthogonal Test Method. Furthermore, through simulations of the orthogonal test design method and optimization, following conclusions are obtained,

1. The optimal value of wind energy utilization rate for 4-blade VAWT, 5-blade VAWT and 6-blade VAWT are, 27.121% at  $d = 0.83$  m,  $\theta = 29^\circ$  and  $\omega = 18$  r / min, 28.407% at  $d = 0.76$  m,  $\theta = 20^\circ$  and  $\omega = 17$  r / min, and 30.374% at  $d = 0.68$  m,  $\theta = 25^\circ$  and  $\omega = 18$  r / min, respectively;

2. The optimized blade width decreases with the increase of the number of blades for VAWT, the variations of the optimal rotation rate and installation angle are notnotable.

**Acknowledgments:** this work was supported by the projects “technological innovation program” 2011ZKC07-4 and “natural science foundation” s2010JC3655 of Shaanxi Province, China.

#### REFERENCES

- [1] Farahani E.M., Hosseinzadeh N., Ektesabi M., 2012. Comparison of fault-ride-through capability of dual and single-rotor wind turbines. *Renewable Energy*. 48, 473-481. [2] Kacprzak K., Liskiewicz G., Sobczak K., 2013. Numerical investigation of conventional and modified Savonius wind turbines. *Renewable Energy*. 60, 578-585. [3] Rosario N., Maria V., Janet F. B., et al., 2014. Unsteady flow simulation of a vertical axis augmented wind turbine: A two-dimensional study. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 125, 168-179. [4] Jakub B., Krzysztof D., Hamid R. K., et al., 2015. Modern small wind turbine design solutions comparison in terms of estimated cost to energy output ratio. *Renewable Energy*. 83, 1166-1173. [5] Kosasih B., Saleh Hudin H. 2016. Influence of inflow turbulence intensity on the performance of bare and diffuser-augmented micro wind turbine model. *Renewable Energy*. 87, 154-167. [6] Zheng M. S., Li Y. S., Tian Y. Y., et al., 2014. Effect of blade installation angle on power efficiency of resistance type VAWT by CFD study. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. 6. 1-7. [7] Zheng, M., Guo, L., Li, Y., et al., 2015. Power efficiency of 5-blade drag type vertical axis wind turbine. *J. Appl. Solar Energy*, 51, 225–231. [8] Zheng M., Li Y., Teng H., et al., 2016. Effect of blade number on performance of drag type vertical axis wind turbine. *Applied Solar Energy*. 52, 315–320. [9] Van den Braembussche R.A., 2008. Numerical optimization for advanced turbomachinery design, in *Thévenin D., Janiga G. (Eds), Optimization and computational fluid dynamics*. Springer, Heidelberg, pp147–188.

#### УСТАНОВКА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ИСКУССТВЕННО-НЕПРЕРЫВНОГО ВОЗДУШНОГО ПОТОКА

И.Н.Паскар<sup>1</sup>, К.Ю.Ушаков<sup>2</sup>, А.Д.Евтушенко<sup>3</sup>.

<sup>1</sup>Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, Институт Энергетики 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, e-mail: [paskar-ivan@mail.ru](mailto:paskar-ivan@mail.ru)

<sup>2</sup>Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, Институт Энергетики 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, e-mail: [as1sa2@mail.ru](mailto:as1sa2@mail.ru)

<sup>3</sup>Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, Институт Энергетики 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, e-mail: [tohan-96@mail.ru](mailto:tohan-96@mail.ru)

#### Аннотация

В статье приведено описание установки, способной теоретически создавать круглосточный непрерывный принудительный воздушный поток, а так же её концепт. Описан принцип работы установки и материалы, из которых она будет изготавливаться. Приведены аргументы по актуальности данной установки.

**Ключевые слова:** возобновляемая энергетика, ветрогенератор, альтернативная энергетика.

#### 1. Введение

На сегодняшний день доля производства электрической энергии генерирующими объектами, использующими для работы традиционные виды топлива, составляет около 60%. Однако они имеют два больших минуса:

- 1) Существуют в ограниченном количестве;
- 2) Добыча и использование наносит существенный вред экологии.

Согласно федеральному закону № 261 «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты российской федерации» создаются правовые, экономические и организационные основы стимулирования энергосбережения и повышения энергетической эффективности [1]. В связи с этим снижение потреб-

ления ископаемых ресурсов является приоритетным направлением для генерации электрической и тепловой энергии и замена их на возобновляемые источники энергии (ВИЭ).

Ветер – это один из возобновляемых источников энергии, потенциал которого превышает нынешние объемы потребления энергии. Анализируя розу ветров РФ, (рис.1) можно сделать вывод, что большими скоростями ветра обладают прибрежные районы, по сравнению с центральной Россией. Это объясняется практически не прекращающимся процессом конвекции воздуха в данных регионах.



Рис.1 Роза ветров на территории России

Особо острой является проблема использования энергии ветра в регионах центральной России. В связи с часто меняющейся скоростью воздушного потока использовать ветровые установки невыгодно и нецелесообразно. Это является одной из основных проблем, сдерживающих развитие ветрогенерации.

Эта проблема актуальна и для Кемеровской области (рис 2). На территории Кузбасса преобладают ветра со среднегодовой скоростью, не превышающей 4-5 м/с [2]. Данное значение носит обобщенный характер, около трети территории региона имеет скорость ветра не более 2-3 м/с, что делает применение обычных ветроустановок нецелесообразным. Также на территории области есть возможность внедрения солнечных панелей из-за достаточного уровня солнечной радиации для генерации электроэнергии. В свою очередь солнечная энергетика имеет ряд своих проблем, мешающих ее развитию. К ним можно отнести: высокая цена, низкий КПД, а так же несовпадение пиков потребления электроэнергии с пиком величины солнечной радиации. В связи с этим необходимо разработать новый подход в использовании ВИЭ [3].



Рис 2. Географическое положение Кемеровской области



Одним из вариантов решения заданной проблемы является совместное использование солнечной энергии с энергией ветра. Использование энергии солнца позволит создать искусственный постоянный поток ветра для стабильной работы ветроустановки (рис.3).

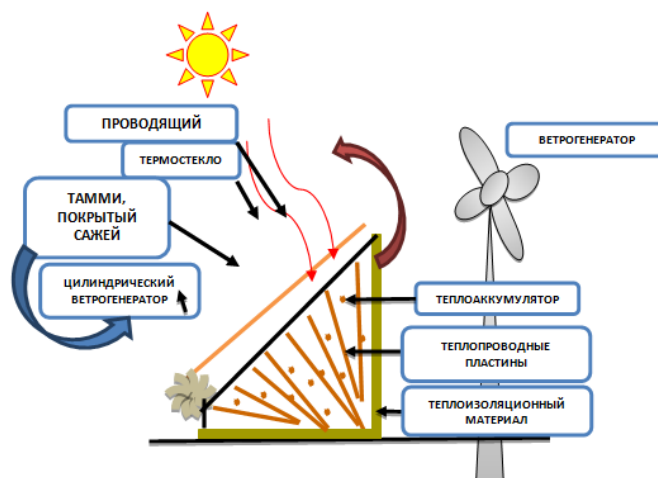


Рис 3. Концепт установки

## 2. Установка для создания искусственно-непрерывного воздушного потока

Для обеспечения стабильной работы к установке и ее компонентам предъявляются следующие требования:

Система должна обеспечивать скорость ветра не меньше 4 м/с.

Система должна работать в температурном диапазоне  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$

Теплоемкость накопителя (теплоаккумулятора) должна быть не ниже  $3000\text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$ .

Светопропускаемость экрана должна быть не ниже 85%.

Сетопропускаемость экрана в обратную сторону не более 5%

Аэродинамическое сопротивление воздуходувной системы должно быть не более  $0,001\text{ Н}\cdot\text{с}^2/\text{м}^6$

Мощность накопителей энергии, устанавливаемого на ветроферме, должна быть не менее 55% от совокупной мощности ветрофермы.

Установка состоит из термостекла, которое с одной стороны является светопроводящим материалом, а с другой имеет низкий коэффициент теплопроводности, что позволит пропускать солнечные лучи в зону работы устройства с полным их поглощением; пластины из теплоаккумулирующего материала, например, ТАММИ[4] (композиционный теплоаккумулирующий материал многоразового использования), поверхность которой покрыта сажой для увеличения теплопоглощающей способности; теплоаккумулятора из солей нитратов натрия и калия, позволяющих сохранять тепло до 12 часов, с теплопроводящими пластинами; ветротурбины; теплоизоляционного материала.

Принцип работы установки основан на явлении естественной конвекции - генерации постоянного потока воздуха. Путем создания определенной разницы температур в области работы установки и окружающей среды создаются условия для циркуляции воздуха через установку, тем самым получаем постоянный поток воздуха. Солнечные лучи, проходя через термостекло, нагревают теплопоглощающую пластину и воздух, находящийся между стеклом и пластиной, так же часть теплоты солнечных лучей уходит на теплоаккумулирующий материал, который позволяет создавать перепад температур в период недостаточной величины солнечной радиации. Вследствие увеличения температуры в рабочей зоне установки начинается циркуляция воздуха в ней путем поступления более холодного воздуха из окружающей среды. Сужение канала может позволить увеличить выходную скорость воздушного потока, а принцип эжекции - объем воздушной массы подаваемой на лопасти ветроустановки.

Так же был учтен тот факт, что естественные воздушные потоки имеют переменное направление, поэтому в конструкции предусмотрены боковые всасывающие каналы для всасывания поперечных воздушных потоков. На рис.4 показана схема, как будет происходить этот процесс.

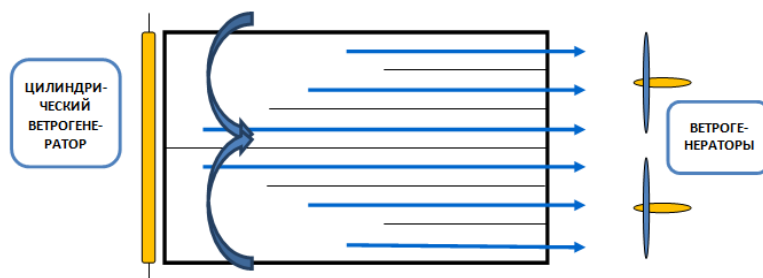


Рис 4. Установка, вид сверху

Были рассчитаны приблизительные габариты установки (рис.5), под которые были подобраны необходимый перепад давлений и температур, для генерации постоянного потока воздуха. Расчетные формулы и результаты расчета представлены ниже.

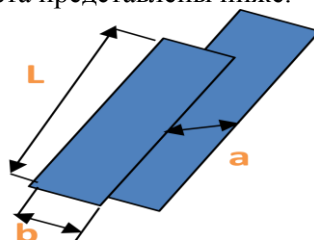


Рис 5. Габаритные размеры установки

Аэродинамическое сопротивление канала в установке представлено в формуле 1. Объем воздуха, проходящего через установку вычисляется в формулах 2,3.

$$R_k = \frac{\alpha \cdot P \cdot L}{S^3} \quad (1)$$

$$Q = a \cdot b \cdot v \quad (2)$$

$$h = h_e = R \cdot Q^2 \rightarrow \Delta\rho \cdot g \cdot H = R \cdot Q^2 \quad (3)$$

где  $\alpha$  – коэффициент шероховатости установки;  $P$  – периметр установки;  $L$  – высота установки;  $S$  – площадь внутреннего сечения установки;  $a, b$  – длина установки, ширина между пластинами;  $v$  – требуемая скорость движения воздуха.

Предварительный расчет установки представлен в табл.1.

Таб.1:Предварительный расчет установки

Коэффициент шероховатости	0,015
a, м	4
b, м	10
c, м	50
Скорость, м/с	10
Объем, м <sup>3</sup>	400
Сопротивление, Н*с <sup>2</sup> /м <sup>6</sup>	0,0003
Давление на входе, Па	740
Перепад давления, Па	0,107
Температура на входе, °С	20
Температура на выходе, °С	49,38
Перепад температур, °С	29,38

В мире известны примеры использования энергии солнца для нагревания воздушной массы и создания искусственного ветра. Например, в Испании, в 150 километрах от города Мадрид расположена аэродинамическая труба (рисунок 6) внутри которой 4 ветрогенератора при разности 200С выдают мощность 50 кВт (высота – 195 м, диаметр – 5 м, радиус коллектора – 122 м) [5]. Однако габариты и стоимость подобных установок не позволяют применять их повсеместно.

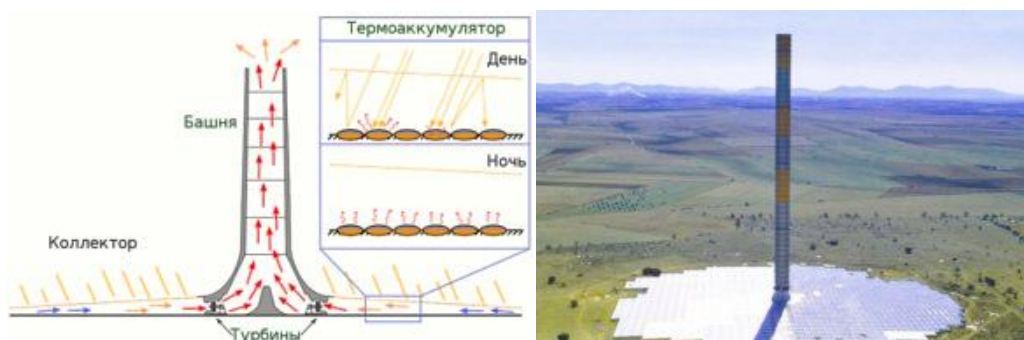


Рис. 6 Приблизительный аналог установки, использующейся в Испании

Низкий КПД генерирующих объектов, использующих возобновляемые источники энергии, не позволяют им выйти на достойный уровень внедрения в России и мире. Совместное использование разных видов ВИЭ в одной установке для получения электрической и тепловой энергии позволит повысить КПД их работы и обеспечит стабильность производства энергетических ресурсов. Приведенная установка будет иметь более низкую стоимость по сравнению с аналогами и позволит дать толчок для развития возобновляемой энергетики в районах, где ранее их применение считалось нерациональным.

## ССЫЛКИ

[1] Федеральный закон об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты российской федерации // consultant.ru. URL: <http://www.consultant.ru> [2] Паскарь, И.Н. Горяинова, С.В. Санаров, С.В. Евтушенко, А.Д. Перспективы развития ветроэнергетики в децентрализованных населённых пунктах северных областей Кузбасса. Сборник материалов II всероссийской научно-практической конференции «энергетика и энергосбережение: теория и практика. Кемерово [Электронный ресурс] / ФГБОУ ВО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева»; редкол.: О. В. Тайлаков (отв. ред.) [и др.]. – Кемерово, 2016. URL: <http://science.kuzstu.ru> [3] Паскарь, И.Н. Горяинова, С.В. Санаров, С.В. Евтушенко, А.Д. Использование солнечной энергии в посёлках Кузбасса. Сборник материалов II всероссийской научно-практической конференции «энергетика и энергосбережение: теория и практика. Кемерово [Электронный ресурс] / ФГБОУ ВО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева»; редкол.: О. В. Тайлаков (отв. ред.) [и др.]. Кемерово, 2016. URL: <http://science.kuzstu.ru> [4] Акционерной общество Авиаавтоматика имени В.В. Тарасова, Композиционный теплоаккумулирующий материал многозарядового использования ТАММИ // aviaavtomatika.ru. URL: <http://www.aviaavtomatika.ru> [5] Домолов, ремонт & строительство. Теплотяговая солнечная ветровая энергетическая башня // domolov.ru . URL: <http://www.domolov.ru> [6] Яна Хлюстова, Екатерина Шутова, Николай Подорванюк, Чем закончилась конференция по климату // gazeta.ru. 13.12.2015, 12:30. URL: <https://www.gazeta.ru> [7] Распоряжение Правительства РФ от 08.01.2009 N 1-р (ред. от 05.05.2016) «Об основных направлениях государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии на период до 2024 года» // consultant.ru. URL: <http://www.consultant.ru>

## РАСЧЁТ МОЩНОСТИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

А. Мустафакулов<sup>1</sup>, О. Олимов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Джизакский политехнический институт,  
город Джизак, 130100, Узбекистан, ул. Дружба народов-4,  
e-mail: [jizpi@edu.uz](mailto:jizpi@edu.uz)

<sup>2</sup>Джизакский политехнический институт,  
город Джизак, 130100, Узбекистан, ул. Дружба народов-4,  
e-mail: [jizpi@edu.uz](mailto:jizpi@edu.uz)

### Аннотация

В статье приводятся данные об использовании ветроэнергетических установок малой мощности. Приводится технико-экономический расчёт коэффициента полезного действия ветроэнергетической установки в зависимости от скорости ветра.

**Ключевые слова:** ветроэнергетическая установка, коэффициент использования ветренной энергии, масса потока воздуха, лопасть, кинетическая энергия, КПД-коэффициент полезного действия

### 1. Введение

Ветер образуется при движении потока воздуха, от неравномерного нагревания при падении лучей солнца на поверхность земли, вод рек, морей, океанов. Механической энергией ветра пользовались ветряные мельницы, парусные суда, сооружения для подъема воды. Впервые такие сооружения применялись 2 тыс. лет назад в Китае, Японии в странах ближнего Востока, Египта [1-2]. В XIX веке, точнее в 1885 году в Дании широко применялись ветряные электростанции мощностью 10-20 кВт. В 1880-1930 годах в США зарегистрировано об использовании более 6 миллионов электростанций [1,2]. В 1931 году в Крыму сооружено ветроэлектростанция мощностью 100 кВт марки Д30. Он использовался в составе Севастопольэнерго до 1942 года. По расчетам 1956 года имеются данные об использовании более 9 тысяч ветро- электростанций на территории бывшего Союза. Ветер является неисчерпаемым источником электрической энергии, в которой не требуется перевозка запасов энергии, элементы сооружения относительно дешевле. Эти сооружения имеют недостатки: изменение скорости и направления ветра, относительно маленькая мощность, скачкообразное изменение количества электрической энергии [2]. Ветреная энергия широко использовалась в таких странах как Австралия, Новая Зеландия, Латинская Америка, Греция. Самым ветреным местом является район Твинт полуострова Ютландия Дании. В 1974 году там построен ветроэлектростанция мощностью 2000 кВт. Каждая его лопасть весила почти 3000 кг, в минуту совершала 40 оборотов и вырабатывала переменный электрический ток частотой 50 Гц. Эта электрическая станция не уступает тепло и атомным электростанциям по таким показателям как экономичность и устойчивость. Стоимость ветроэлектростанции дешевле тепло электростанции в 6 раз [1-2]. Потребность в солнечных и ветроэлектростанциях растет с каждым днем в связи с уменьшением и увеличением себестоимости горючих ресурсов.

### 2. Расчет мощности ветроэлектродвигателя

Для начала рассчитываем кинетическую энергию потока воздуха образованную ветром (Рис.1). Кинетическая энергия  $E_k$  потока воздуха проходящего через площадь лопастей ветродвигателя рассчитывается формулой

$$E_k = \frac{m \mathcal{G}^2}{2} \quad (1)$$

Где  $m$  - масса потока воздуха,  $\mathcal{G}$  - скорость потока воздуха. Мощность потока воздуха будет равняться энергии потока проходящего через площадь лопастей во времени.

$$N = \frac{A}{t} = \frac{E_k}{t} = \frac{\frac{m \mathcal{G}^2}{2}}{t} = \frac{m \mathcal{G}^2}{2t} \quad (2)$$

Тут масса потока воздуха протекающего через данную площадь в течении времени определяется

$$\frac{m}{t} = \frac{\rho V}{t} \quad (3)$$

Здесь  $\rho$  плотность воздуха;

$V$  – объем потока воздуха;

$t$  – время.

Объем потока воздуха  $V = S \cdot l$ ,  $S$  – площадь поперечного сечения потока воздуха,  $l$  – длина потока. Объем потока воздуха с течением времени определяется:

$$\frac{V}{t} = \frac{S \cdot l}{t} = S \cdot \mathcal{G} \quad (4)$$

Здесь  $S$  – площадь поперечного сечения потока воздуха:

$$S = \pi \cdot r^2 = \pi \left( \frac{D}{2} \right)^2 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (5)$$

$r$  – радиус, радиус окружности образованный вращением лопастей,  $D$  – диаметр окружности. Образуется

$$\frac{m}{t} = \frac{\rho \cdot V}{t} = \frac{\rho \cdot S \cdot l}{t} = \rho \cdot S \cdot g = \rho \frac{\pi \cdot D^2}{4} g$$

Исходя из этой формулы мощность рассчитывается следующим образом;

$$N = \frac{m g^2}{2t} = \frac{g^2}{2} \rho \frac{\pi \cdot D^2}{4} g = \frac{\pi \cdot D^2 \rho \cdot g^3}{8} = \frac{\pi \cdot \rho}{8} D^2 \cdot g^3 \quad (6)$$

Известно, что плотность воздуха  $\rho = 1,236 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ , исходя из этого  $\frac{\pi \cdot \rho}{8} = \frac{3,14 \cdot 1,236}{8} = 0,4851$

Измеряя мощность в киловаттах (  $1 \text{ кВт} = 1000 \text{ Вт}$  ), формула (6) приобретает следующий вид:

$$N = \frac{D^2 \cdot g^3}{1000} = \frac{D^2 \cdot g^3}{2060} \text{ кВт} \quad (7)$$

0,4851

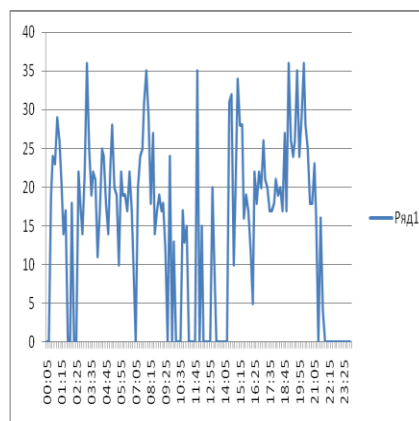
Если принять коэффициент использования ветренной энергии  $\eta = 0,43 - 0,47$ , тогда мощность приобретает вид

$$N = \frac{D^2 \cdot g^3}{2060} \eta \text{ кВт} \quad (8).$$

Если коэффициент использования ветренной энергии  $\eta = 0,43 - 0,47$ , то КПД ветроэлектродвигателя равен 43 – 47 %. В теоретических расчетах  $\eta = 0,593$ , практически этого показания не добиться. Коэффициент использования ветренной энергии включает в себя следующее данные:

- Типы ветроэлектродвигателей;
- Изменения скорости ветра;
- Изменения направления ветра;
- Потери в подшипниках;
- Аэродинамические потери;
- Потери образованные в обмотках статора за счет реактивной мощности;
- Потери образованные за счет сопротивления ЛЭП.

Расчитаем мощность ветроэлектродвигателя марки ВЭУ–3000, установленного в Джизакском политехническом институте (рис.2) [4]. Для этого воспользуемся паспортными данными ветроэлектродвигателя. В паспорте ветроэлектродвигателя указаны следующие данные:



1. Диаметр лопастей ветроэлектродвигателя  $D = 2,44 \text{ м}$ ;

2. Номинальная скорость ветра для нормальной работы ветроэлектродвигателя  $g_{ном} = 12 \frac{\text{М}}{\text{с}}$  (

$$g_{\min} = 3 \frac{\text{М}}{\text{с}}; \quad g_{\max} = 15 \frac{\text{М}}{\text{с}});$$

3. Коэффициент использования ветроэнергии  $\eta_{\text{сред}} = 0,45$  ( $\eta_{\text{практически}} = 0,43 - 0,47$  ;  $\eta_{\text{теоретически}} = 0,593$  ).

Вспользуемся формулой расчета мощности (8):

$$N = \frac{D^2 \cdot g^3}{2060} \eta = \frac{2,44^2 \cdot 12^3}{2060} 0,45_{\text{квт}} = \frac{5,9536 \cdot 1728}{2060} 0,45_{\text{квт}} = 2,247_{\text{квт}} \cdot$$

Расчитаем мощность которую можно получить при минимальных и максимальных показаниях ветра. При  $g_{\text{min}} = 3 \frac{M}{c}$  ,  $g_{\text{max}} = 15 \frac{M}{c}$  мощность определяется следующим образом:

$$N_{\text{min}} = \frac{D^2 \cdot g^3}{2060} \eta = \frac{2,44^2 \cdot 3^3}{2060} 0,45 = \frac{5,9536 \cdot 27}{2060} 0,45 = 0,035_{\text{квт}} = 35_{\text{вт}}$$

$$N_{\text{max}} = \frac{D^2 \cdot g^3}{2060} \eta = \frac{2,44^2 \cdot 15^3}{2060} 0,45_{\text{квт}} = \frac{5,9536 \cdot 3375}{2060} 0,45_{\text{квт}} = 4,389_{\text{квт}}.$$

Расчитаем среднее значение мощности:

$$N_{\text{урп}} = \frac{N_{\text{min}} + N_{\text{max}}}{2} = \frac{0,035 + 4,389}{2} = 2,21_{\text{квт}} \cdot \text{Практически расчитаем значение мощности}$$

при номинальной скорости ветра. В этом случае коэффициент использования ветра  $\eta = 0,593$  примем за:

$$N_{\text{теоретически}} = \frac{D^2 \cdot g^3}{2060} \eta = \frac{2,44^2 \cdot 12^3}{2060} 0,593_{\text{квт}} = \frac{5,9536 \cdot 1728}{2060} 0,593_{\text{квт}} = 2,961_{\text{квт}} \cdot$$

Расчитанные мощности ветроэлектродвигателя ВЭУ – 3000 совпадают с его паспортными данными ( N = 3000 вт = 3 квт).f, Гц

#### ЛИТЕРАТУРА

[1] Аллаев К.Р. Энергетика мира и Узбекистана. – Ташкент. Молия, 2007.с.340. [2] Клычев Ш.И., Мухаммадиев М.М., Аvezов Р.Р. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Ташкент. Изд. «Фан ва технология» - 2010.с.191. [3] Юнусов Т.Ю. О роли возобновляемых источников энергии в стратегии совершенствования энергетики Узбекистана //Ж . Проблемы энерго- и ресурсосбережения. 2011. № 3-4.с.75-81.

## HEAT TRANSFER OF SUBSOIL HEAT ACCUMULATOR OF HELIOBIOENERGETIC HEATING SYSTEM OF POULTRY-FARMS

**В.Е.Нажриддинов<sup>1</sup>, Е.Исмаилов<sup>2</sup>, Ф.А.Намазов<sup>3</sup>, У.Р.Ходжаева<sup>4</sup>**

1 - Karshi State University, Karshi, Uzbekistan, [behruztemirov@gmail.com](mailto:behruztemirov@gmail.com)

2 – Samarkand Agricultural Institute, Samarkand, Uzbekistan, [ismailovermamat@gmail.com](mailto:ismailovermamat@gmail.com)

3 - Samarkand Agricultural Institute, Samarkand, Uzbekistan, [furqat.namazov@gmail.com](mailto:furqat.namazov@gmail.com)

4 – Samarkand Agricultural Institute, Samarkand, Uzbekistan, [ibumida@gmail.com](mailto:ibumida@gmail.com)

In this work the attempt of mathematical modeling of process of heat transfer of the subsoil heat accumulator through layers of substratum surrounding the accumulator into the atmosphere of farms is made.

The purpose of work is determination of optimum, design and technological data of housing with gelio-and biogas heating for farms by means of carrying out of mathematical modeling taking into account temperature and humidity of air.

In the present work attempt to estimate a heat transfer through the subsoil accumulator is made by a pipe put in a substratum, it is necessary to consider change of calculation of a heat transfer and temperature of the water stream, proceeding with constant speed in a round pipe [3,6]. With that purpose we will consider the pipe laid in a substratum of subsoil accumulator of heat in diameter  $d = 2 r_0$ (fig. 1), bottom forming of which deviates from a day surface of soil on size  $\pm b_1$ . The sign "plus" means that pipes with hot water of subsoil accumulator are laid on low support, and "minus" –lowered in substratum layer. At  $b_1 = 0$  pipes of subsoil accumulator are laid in the middle of substratum layer. For calculation of heat-



exchange processes round the cylindrical accumulator and the heat transfer definition which surface in section has the form of a circle arc.

In this case the setting of co-ordinates of two points on diking a substratum (for example,  $M(x, 0)$  and  $N(x_0, y_0)$ ) completely defines all circle  $\Gamma_2 = \Gamma'_2 \cup \Gamma''_2$  and its diameter  $D_1 = 2R_1$ . Inside the subsoil accumulator the round pipeline made of a composite material is enclosed, through it the heat-carrier with temperature  $T_f$ , and temperature of external air and to it temperature of substratum  $T_s < T_f$  proceeds. The substratum is supposed to be isotropic with factor of heat conductivity  $\lambda$ . Border  $\Gamma_2$  breaks a substratum layer on two zones and for definition of heat transfer from the hot pipeline on a layer of air and substratum it is necessary to solve the interfaced problem in zones I and II.

Considering symmetry of a temperature field in a zone I we will consider Neumann's problem for excess temperature of substratum :  $\theta = T_a - T_s$

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} = 0, \quad -\lambda \left(\frac{\partial \theta}{\partial x}\right)_{r_1} = \varphi_T(p) \tag{1}$$

$$-\lambda \left(\frac{\partial \theta}{\partial x}\right)_{\Gamma'_2 \cup \Gamma'_3} = \varphi_H(p), \quad \theta(x, y) = \theta(x, -y), \tag{2}$$

where  $\theta(x, y)$  is the positive perturbation brought by the pipeline in substratum of zone I. For its definition we will display area I in the form of a rectangle (fig. 2) with the help of conformal formations of the second type.

$$\bar{\omega} = \ln \frac{z+\alpha}{z-\alpha} . \tag{3}$$

From (3) follows

$$x = \frac{a \sin \alpha}{ch \alpha - \cos \beta}; \quad y = \frac{a \sin \beta}{ch \alpha - \cos \beta}; \quad a = \sqrt{h_0^2 - R_0^2} = \sqrt{h_1^2 - R_1^2},$$

where  $\alpha$  and  $\beta$  are bipolar co-ordinates.

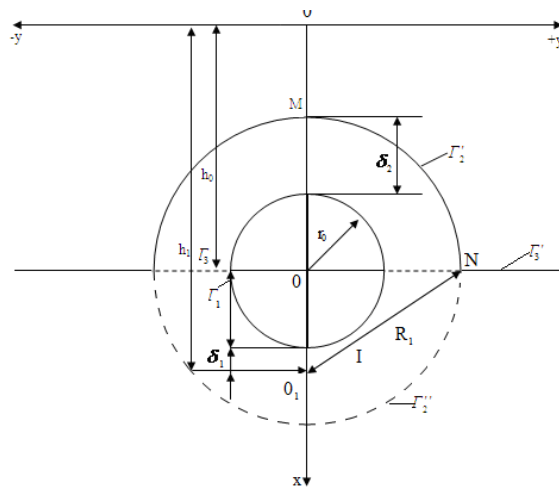


Fig. 1. Physical model and coordinate system.

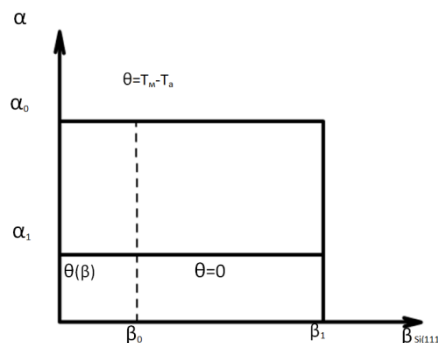


Fig. 2. I zone image at conformal mapping (3).

Problem (1) - (2) in bipolar co-ordinates:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \alpha^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial \beta^2} = 0; \lambda \left( \frac{\partial \theta}{\partial \alpha} \right)_{\alpha=\alpha_0} = q_T(\beta), \quad (4)$$

$$\lambda \left( \frac{\partial \theta}{\partial \alpha} \right)_{\alpha=\alpha_1} = q_H(\beta); \left( \frac{\partial \theta}{\partial \beta} \right)_{\beta=0} = \left( \frac{\partial \theta}{\partial \beta} \right)_{\beta=\pi} = 0, \quad (5)$$

where  $q_T(\beta) = H_{\alpha=\alpha_0} \varphi_T(p)$ ;  $q_H(\beta) = H_{\alpha=\alpha_1} \varphi_H(p)$ ;

$H = a(ch\alpha - \cos \beta)^{-1}$  is Lamè coefficient.

The decision of problem (4) - (5):

$$\theta = (\alpha, \beta) = A_0 + \frac{1}{2\lambda} K_0 \alpha + \frac{1}{\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{hshn(\alpha_0 - \alpha_1)} [chn(\alpha_1 - \alpha_0) K_{2n-1} - chn(\alpha_0 - \alpha) K_{2n}] \cos n\beta, \quad (6)$$

where  $K_0 = \frac{2}{\pi} \int_0^\pi q_T(\beta) d\beta = \frac{2}{\pi} \int_0^\pi q_H(\beta) d\beta$ ,

$$K_0 = \frac{2}{\pi} \int_0^\pi q_H(\beta) \cos n\beta d\beta; K_{2n-1} = \frac{2}{\pi} \int_0^\pi q_T(\beta) \cos n\beta d\beta.$$

As in quasi-stationary mode the heat transfer from any closed surface of subsoil accumulator to substratum layer

$$q = 2\lambda \int \left( \frac{\partial \theta}{\partial n} \right)_r dl = 2\lambda \int_0^\pi \left( \frac{\partial \theta}{\partial \alpha} \right)_r d\beta = 2 \int_0^\pi q(\beta) d\beta = \pi K_0.$$

Thus, for calculation of heat transfer it is enough to define  $K_0$ .

The relation (6) has the general character, and on its basis it is possible to solve problems about heat transfer to subsoil accumulator and a substratum layer under any conditions on  $\Gamma'_1$  and  $\Gamma'_2$ . We will assume that on border  $\Gamma'_1$  and  $\Gamma'_2$  conditions of the first type are set:

$$\theta_{\Gamma'_1} = T_f - T_a, \quad (7)$$

$$\theta_{\Gamma'_2} = 0. \quad (8)$$

From condition of equality of temperature (6) and (7) on  $\Gamma'_1$  it is found:

$$A_0 = T_f - T_a + \frac{\lambda_0}{2\lambda} K_0; K_{2n-1} = \frac{K_{2n}}{chn(\alpha_0 - \alpha_1)}$$

as

$$\theta(\alpha, \beta) = 0, \text{ if } \beta_0 \leq \beta \leq \pi;$$

$$\theta(\beta), \text{ if } 0 \leq \beta \leq \beta_0.$$

From (6) and (8) on  $\Gamma'_2$  we have

$$T_f - T_a - \frac{\alpha_0 - \alpha_1}{2\lambda} K_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\beta_0} \theta(\beta) d\beta,$$

from here

$$q = \frac{T_f - T_a - \frac{1}{\pi} \int_0^{\beta_0} \theta(\beta) d\beta}{\frac{\alpha_0 - \alpha_1}{2\pi\lambda}}. \quad (9)$$

For an estimation of integrated member  $\frac{1}{\pi} \int_0^{\beta_0} \theta(\beta) d\beta$  in (9) it is necessary to find the decision in the fields I and II and to carry out conjugation on  $\Gamma'_2, \Gamma''_2$ . It can be received in the form of Fourier integral, having displayed area II on a half-strip. However conjugation of decisions is connected with certain technical difficulties, and the final result is not expressed by simple analytical dependence. Therefore it is appropriate to replace (9) by simple approximation and to estimate its accuracy as it is important on design stage when the authentic data about  $\lambda$  of substratum layer is absent.

Neglecting positive conjugation  $\theta(\beta)$  on  $\Gamma''_2$  we will receive

$$q \leq \frac{T_f - T_a}{\frac{\alpha_0 - \alpha_1}{2\pi\lambda}}. \quad (10)$$

Let  $\theta_0$  be one of the top borders of set of values of function  $\theta(\beta)$  on  $\Gamma''_2$ . Then

$$\frac{1}{\pi} \int_0^{\beta_0} \theta(\beta) d\beta \leq \frac{\beta_0}{\pi} \theta_0,$$

$$q = \frac{T_f - T_a - \frac{\beta_0 \theta_0}{\pi}}{\frac{\alpha_0 - \alpha_1}{2\pi\lambda}}. \quad (11)$$

Unknown excess temperature  $\theta(\beta)$  on  $\Gamma_2''$  is approximated by linear function

$$\theta(\beta) \approx \tilde{\theta}(\beta) = \frac{\theta_0}{\beta_0} (\beta_0 - \beta). \quad (12)$$

Then on (9) and (10) - (12) for heat transfer calculation we will receive

$$q = \tilde{q} = \Delta, \quad (13)$$

$$\tilde{q} = \frac{T_f - T_a - \frac{\beta_0 \theta_0}{2\pi}}{\frac{\alpha_0 - \alpha_1}{2\pi\lambda}}, \quad \Delta \leq \frac{\beta_0 \lambda}{\alpha_0 - \alpha_1} \theta_0.$$

Quality of estimation in (13) essentially depends on value  $\theta_0$ .

Under defrosting influence of subsoil pipeline on strip  $\Gamma_3$  and  $\Gamma_3'$  (fig. 1) temperature distribution is established

$$f(y) < T_f - T_a. \quad (14)$$

At  $\delta_1 \geq 0$  temperature field in substratum layer  $\Gamma_3$  with excess temperature  $f(y)$ , we will write down in the form of function [4]

$$T(x, y) = \frac{y}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f(\xi) d\xi}{[\xi - (x - h_0 - r_0)]^2 + y^2}. \quad (15)$$

As  $\theta(\beta) = T(x, y)|_{\Gamma_2''}$ , from (15) and (14) we have the top border of values  $\theta(\beta)$

$$\theta_{max}(\beta) \leq \frac{\psi}{\pi} (T_f - T_a).$$

Thus,

$$\theta_0 = \frac{\psi}{\pi} (T_f - T_a),$$

$$\psi = 2 \arctg \frac{y_0}{x}; \quad x^* = h_1 + R_1 - h_0 - r_0.$$

Constants  $\alpha_0$ ,  $\alpha_1$  and  $\beta_0$ , components of the design equation (13), we find from relations:

$$\alpha_0 = \operatorname{arcch} \frac{h_0}{r_0}; \quad \alpha_1 = \operatorname{arcch} \frac{h_1}{R_1}; \quad \beta_0 = \arcsin \left( \frac{y_0}{x_0} \operatorname{sh} \alpha_1 \right)$$

$$n_0 = R_1^2 - r_0^2 - \frac{(R_1 - r_0 - \delta_2)^2}{2(R - r_0 - \delta_2)}; \quad h_1 = \frac{R_1^2 - r_0^2 + (R_1 - r_0 - \delta_2)^2}{2(R - r_0 - \delta_2)}$$

$$R_1 = \frac{h^2 + y_0^2}{2h}; \quad h = \pm \delta_1 + 2r_0 + \delta_2.$$

At  $h \rightarrow 0$  we have  $y_0 \rightarrow \infty$ ;  $R_1 \rightarrow \infty$ ;  $h_0 = \delta_2$ ;  $h_1/R_2 \rightarrow 1$ ;  $\alpha_1 \rightarrow 0$ ;  $\beta_0 \rightarrow 0$ ;  $u\Delta \rightarrow 0$ .

The equation (13) transforms into the known Forhgejmer decision [5]. It means that during laying of subsoil accumulator pipes and round it substratum layer influence of integrated member  $\frac{1}{\pi} \int_0^{\beta_0} \theta(\beta) d\beta$  in (9) raises. In connection with water temperature change of subsoil accumulator and temperature distribution on distance of substratum layer value of heat transfer coefficient (fig. 3) varies.

Size of the thermal stream proceeding through подпочвенный the accumulator a part of heat transfer a substratum layer which it is laid round heating the pipeline.

For a quantitative estimation of the given technique calculations are executed and comparisons to experimental data (fig. 3) are spent. The relative error of a heat transfer will make 4,25 % that is quite admissible in engineering calculations.

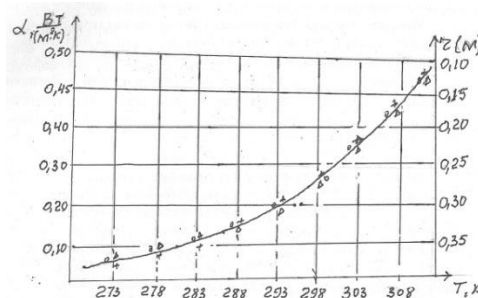


Fig. 3 Change of heat transfer coefficient around of subsoil heat accumulator in substratum layer (on distance  $x_1 y$ ) depending on temperature change.

$\Delta$  is change of heat transfer in substratum layer;

- is change of water temperature in pipes of subsoil accumulator;
- + - 0 change of temperature after distance of substratum layer from

The value of water speed in subsoil accumulator can be calculated on value of mass expense  $G$  at the given position of a pipe valve:

$$\bar{w} = 4/\rho\pi d^2 G, \quad (16)$$

Where  $G$  is mass expense (kg/sec).

Depending on  $Re_f$  criterion  $Nu_f = ad/\lambda_f$  will change variability  $Nu_f$  is connected with of  $a$  will vary also. In experience took temperature on a pipe surface подпочвенного the accumulator, put in a substratum, and also measured water temperatures on an input and an exit of an experimental pipe. On the basis of experimentally  $a$  it is defined from the formula

$$\alpha = \frac{q}{\pi d L (T_{in} - T_{out})}, \quad (17)$$

For heat calculation the equation

$$Q = cG(T_{out} - T_{in}) \quad (18)$$

was used, where  $c$  is water thermal capacity.

Thus, results of theoretical calculations and experimental data by heat transfer definition of layer of substratum of subsoil heat accumulator in quasistationary process with control volumes in locally-three-dimensional model 10 times more, than the transformations of function received by a method [4] at the expense of smaller in comparison with total number of control volumes of number of the points defining thermal characteristics of subsoil substratum heat exchanger.

## REFERENCE

- [1] A.V.Furman, R.P.Dechnik. Pipeline heat transfer in massif.- « Oil and gas news», 1977, №7, pp.83-88 [2] D.A.Daffi, U.A.Bekman. Thermal processes with solar energy use. By editing J.N.Malevsky. M.:Mir, 1977, pp. 420. [3] T. Shih. Numerical methods in problems of heat exchange. M.: Mir, 1988, pp. 524. [4] N.N.Lebedev, I.P.Skalskaja, J.S.Ufljand. The collection of problems on the mathematical physics. M: "Vysschayashkola", 1996, pp.420. [5] S.S.Kutateladze. Bases of the theory of heat exchange. M: Atomizdat, 1979, pp. 400 [6] B.E.Hajriddinov, T.A.Sadykov. Combined heliogreenhouses - dryers. T:Fan, 1992, pp. 182.

## КОММУНАЛЬНЫЕ И РАСТИТЕЛЬНЫЕ ОТХОДЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ БИОГАЗА

Ж.Ташпулатов, С.Куканова, Л.Зайнитдинова

Институт микробиологии АН РУз

Ташкент, 100128, Узбекистан, [kukanova\\_s@mail.ru](mailto:kukanova_s@mail.ru) (ул.А.Кадыри, 7<sup>б</sup>)

### Аннотация

*Изучена возможность образования биогаза из различных источников возобновляемого сырья - стоков Саларской станции очистки сточных вод с применением метаногенной ассоциации микроорганизмов, полученной из активного ила коллекторных систем Хорезмского вилоята. Рассмотрено применение в процессах метанового брожения отработанной биомассы высших водных растений и рисовой шелухи. Показано, что предварительная обработка субстрата, а также использование смешанного субстрата с применением адаптированной метаногенной ассоциации микроорганизмов положительно сказывается на процессе газообразования и повышает выход метана и объемов выходящего газа.*

**Ключевые слова:** биогаз, метаногенная ассоциация микроорганизмов, осадок сточных вод, биомасса, высшие водные растения, метан

### 1. Введение

Развитие вопросов получения биотоплива во многих странах мирового сообщества ставится в основу обеспечения национальной энергетической безопасности. Особенно это актуально в настоящий момент, когда нестабильность цен на природные энергоносители (газ, нефть), может обрушить мировую экономику. В связи с этим интерес к проблемам биотоплива возрастает во всем мире [1,2].

Альтернативной базой для производства биогаза и удобрений является растениеводство. С использованием растительных культур в биогазовых установках сельскохозяйственное производство получило совершенно новое направление, в настоящее время все большее количество сельхоз

площадей отдаются под энергетические растения, используемые в биогазовых установках [3]. В целом, энергетические растения имеют теоретический выход газа 300 л метана на кг органического сухого субстрата. В Европе половина из работающих биогазовых станций работают на кукурузном силосе [4]. В Австрии кукурузу для биогазовых установок выращивают даже в горах. И с каждым годом площадей под энергетические культуры становится все больше. Если у предприятия нет отходов, но есть большие земельные площади, растениеводство может стать весьма эффективным источником сырья.

В настоящее время на первый план выдвигаются работы по поиску и использованию биоэнергетических ресурсов второго поколения, т. е. не используемых на рынке продовольствия. Приоритетным становится использование различных отходов и их смесей. В частности, к таким ресурсам можно отнести различные целлюлозосодержащие отходы. Биоэтанол, биогаз и даже биодизель могут производиться из биомассы отходов сельского хозяйства и деревообрабатывающей промышленности.

В Узбекистане в этом плане имеется значительный ресурсный потенциал, который может быть использован при разработке производства биотоплива. Прежде всего, речь идет об отходах растениеводства и отходах пищевой и плодоовощной промышленности. Ежегодно накапливаются миллионы тонн растительной биомассы (гузапая, отходы хлопкоочистительной промышленности, рисовая и пшеничная солома, жом овощей и фруктов, опад листьев и т.д.), которые могли бы утилизироваться более эффективно. В Республике ежегодно вырабатывается в промышленных масштабах хлопок-сырец, зерновые культуры, в том числе рис. Естественно, накапливается около 7-8 млн. тонн стеблей хлопчатника, соломы и рисовой лузги. В настоящее время в Республике такое огромное количество целлюлозолигнинсодержащего сырья не перерабатывается, в лучшем случае используется в качестве топлива в отдельных хозяйствах.

Подбор новых источников и разработка новых технологий биотоплива отвечает современным потребностям и задачам, поставленным Правительством Узбекистана перед учеными о создании производства возобновляемых источников биотоплива с наименьшим использованием энергии, воды и орошаемых земельных площадей.

Одним из нетрадиционных источников биотоплива в этом плане могут стать отработанные стоки городских очистных соединений (осадки) вместе с биомассой высших водных растений очистных сооружений. Накопившаяся в очистных сооружениях биомасса макрофитов является хорошим биоэнергетическим ресурсом и, что очень важно, относится к топливным ресурсам второго поколения. Как известно, эйхорния вне тропических зон применяется в средних широтах России как очиститель вод и поглотитель загрязнений и ила (деструктора органических и неокисленных минеральных соединений) [5-7]. В процессе трансформации загрязнений на территории очистных сооружений накапливается значительное количество биомассы эйхорнии и пистиителоризовидной, которое не может быть утилизировано для сельскохозяйственных нужд.

Водно-болотные растения характеризуются ценными биотопливными свойствами и высокой продуктивностью. Так, пистия, выращенная на сточных водах, дает прирост биомассы свыше 1 кг/м<sup>2</sup> в сутки, что составляет 1800-2700 т сырой биомассы с 1га водной поверхности или 90-135 т абсолютно сухой массы с 1 га водной поверхности за сезон [8]. Накопившаяся в очистных сооружениях биомасса макрофитов является хорошим биоэнергетическим ресурсом и, что очень важно, относится к топливным ресурсам второго поколения. Биомассу пистии и эйхорнии богатую белками, углеводами, витаминами можно использовать в качестве основного продукта для производства биотоплива, в частности биогаза. Проведенная биоконверсия такой растительной биомассы позволит получать биогаз на локальных установках. Сущность данной технологии заключается в создании комплекса реализующего пионерную, не имеющую аналогов, технологию круглогодичной, не зависящей от климатической зоны, глубокой биологической переработки загрязнений сточных вод, ила и других отходов с самодостаточным для процесса автономной работы очистного сооружения производством электро- и тепловой энергии, которое обеспечивается биогазом-метаном, выработанным при взаимодействии биомассы ВВР со сточными водами и/или промышленными и бытовыми отходами [9]. Для такого рода отходов одним из наиболее эффективных методов переработки является газификация осадка сточных вод путем прямой биоконверсии, а также различных композитов с растительными остатками, в результате чего из недефицитного сырья образуются такие ценные продукты, как этиловый спирт, смесь органических кислот, углекислый газ, метан. Большую часть содержащейся в иле органики возможно сбрасывать в анаэробных

условиях биореактора с выделением значительного количества биогаза. Если использовать избыточный и активный ил, собираемый на городских очистных сооружениях, как сырье для биогазового завода, можно получить два альтернативных источника энергии (газ и электроэнергию). Сбраживание жидкого осадка позволяет сократить затраты за счет уменьшения жидкого осадка. На канализационных очистных сооружениях МГУП «Мосводоканал» используется процесс метанового сбраживания осадка, образующегося при очистке сточных вод. С 1998 г. проводится комплексная реконструкция метантенков, в результате которой выработка биогаза увеличилась в 1,7 раза – до 250 тыс. м<sup>3</sup>/сут [10,11]. Предварительная обработка осадков сточных вод может позволить увеличить распад беззольных элементов, обеспечить снижение количества сброженного осадка и повышение выхода биогаза до 15 % [12]. Безусловным положительным эффектом является и прекращение поступления ила на иловые площадки, сокращении затрат на транспортировку, обезвоживание и утилизацию осадка. Известно, что в процессе очистки сточных вод на очистных сооружениях образуется жидкий осадок, сбраживание которого позволяет сократить затраты.

Исходя из вышеизложенного нами был проведен цикл исследований по возможности применения различных растительных остатков и осадка сточных вод в биоэнергетике – для получения биогаза.

## 2. Материалы и методы

В качестве субстрата мы использовали стоки Саларской станции аэрации (СС) очистки сточных вод, отработанную биомассу высших водных растений (ВВР), рисовую шелуху (РШ). В работе применялась метаногенная ассоциация микроорганизмов, полученная из активного ила коллекторных систем Хорезмского вилоята. Исследования по получению биогаза проведены на природной ассоциации метаногенов и активной ассоциации, полученной в результате адаптации. Лабораторные опыты проводились на измельченном и неизмельченном субстрате. Для оценки работы ферментеров-анаэробов использовали такие показатели как изменение показателей рабочего давления, общий выход газа, а также производился анализ газовой фазы на содержание различных составляющих.

## 3. Результаты исследований

Проведенный сравнительный анализ выхода газа показал, что при применении адаптированной ассоциации метаногенов максимальный выход биогаза при работе на стоках Саларской станции начинается уже в первые сутки, тогда как при работе аборигенной микрофлоры активный выход биогаза наблюдается после 7 суток активного метаногенеза. Полученные результаты свидетельствуют, что для адаптации аборигенной ассоциации метаногенов требуется некоторое время. Применение активной ассоциации ускоряет процесс. Так, при использовании стоков с аборигенной ассоциацией микроорганизмов максимальные показатели давления отмечаются на 12 сутки и достигают 4 атм, в то время как при применении адаптированной ассоциации метаногенов максимум давления достигается уже на 3-4 сутки.

Таб. 1 Показатели концентрации метана в различных опытах с применением стоков СС

Наименование эксперимента	Сутки	CH <sub>4</sub> , %
1. Стоки СС + адаптированная ассоциация метаногенов	2	51,92
	6	50,29
	10	53,24
	16	56,73
2. Стоки СС + ВВР (эйхорния)	2	48,23
	6	55,21
	10	57,67
	16	56,28
3. Стоки СС + Рисовая шелуха	2	45,34
	8	56,81
	13	57,63
	17	54,11
	21	51,28
4. Стоки СС с природной ассоциацией	2	40,68
	8	52,35
	13	52,46
	17	52,48
	21	51,62



В лабораторных экспериментах нами проведены опыты по получению биогаза при сбраживании смеси стоков и различных растительных отходов, таких, как отработанная биомасса высших водных растений и рисовая шелуха. Высушенная биомасса высших водных растений измельчалась до порошкообразного состояния, с целью облегчения воздействия микроорганизмов на субстрат. Измельчение повышает доступность субстрата для микроорганизмов и соответственно биоконверсию субстрата, увеличивает скорость процесса метаногенеза и соответственно объем выхода метана. В результате проведенных исследований выявлено, что при сбраживании смеси жидкого осадка стоков с измельченными высшими водными растениями достигается увеличение выхода биогаза. Уже в первые сутки давление в рабочем анаэроостате поднимается до 3,5 атмосфер. Активный выход биогаза продолжается в течении 7-10 суток, после чего активность незначительно снижается. Однако процесс образования газа продолжается до окончания опыта. Как показали проведенные исследования, добавление рисовой шелухи также стимулирует процесс метаногенеза, дает положительный эффект в образование газа. Однако эффективность выхода газа гораздо ниже, чем в случае применения высших водных растений (табл. 1).

В данном случае давление в анаэроостате достигает 2,5 атмосфер на 2 сутки и лишь на 7 сутки достигает своего максимума в 3 атмосферы, после чего идет на спад, отмечается также увеличение  $\text{CO}_2$  в составе биогазовой смеси. Пересчет получаемого объема газа на выходе установил, что максимальные показатели получены в экспериментах с применением адаптированной культуры и высших водных растений (рис. 1).

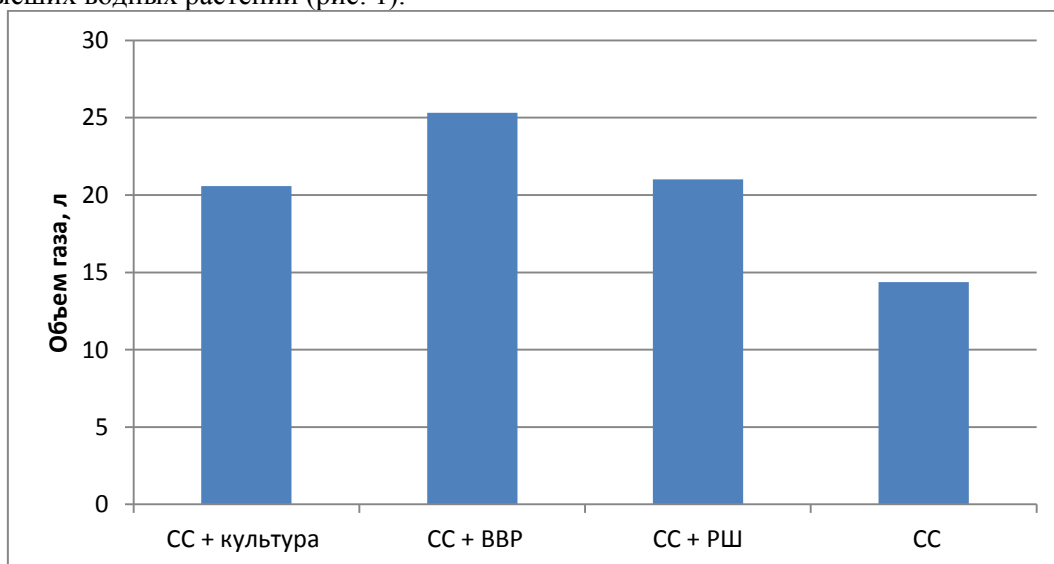


Рис. 1. Выход биогаза при использовании различных субстратов

Хроматографический анализ биогазовых смесей подтвердил, что наиболее эффективно образование метана в биогазовых смесях идет в экспериментах с применением адаптированной ассоциации микроорганизмов и высших водных растений (табл. 1). Следует отметить, что применение биогазовых технологий обеспечивает помимо получения биогаза также производство чистого и высокоэффективного органического удобрения, которое характеризуется отсутствием патогенной микрофлоры. Проведенный нами микробиологический анализ шлама, полученного в результате метанового брожения, показал снижение общего количества патогенных микроорганизмов родов *Enterobacteriaceae* и стафилококков.

#### 4. Обсуждение результатов

Проведенные исследования установили, что городские коммунальные стоки являются хорошим субстратом для получения биогаза, а смешивание стоков с растительными остатками оказывает стимулирующее влияние на выход метана и объемы выходящего биогаза. Исходя из полученных данных можно заключить, что биогаз можно успешно получать из смеси растительного сырья и осадка сточных вод городских коммунальных служб. По сути это экологически чистое топливо, сходное по своим характеристикам с природным газом. Анализ полученных результатов и мировой опыт показывает, что анаэробное сбраживание осадка сточных вод и их смесей с растительным материалом в метантенках в XXI веке не имеет сравнимых альтернатив для крупных и средних канализационных очистных сооружений [13, 14]. Проведенная био-

конверсия такой растительной биомассы позволит получать биогаз на локальных установках, что представляет, безусловно, большой интерес для Узбекистана.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Панцхава Е.С., Кошкин Н.Л., Пожарнов В.А. Биомасса — реальный источник коммерческих топлив и энергии. 4.1. Мировой опыт // Теплоэнергетика. 2001, №2. С. 21-25. [2] Соуфер С., Заборски О., Биомасса как источник энергии, Москва. 1985. С.561. [3] Bruns E., Ohlhorst D., Wenzel B., Köppel J. Erneuerbare Energien in Deutschland – eine Biographie des Innovationsgeschehens. (Renewable energies in Germany – a biography of innovation.) Universitätsverlag der TU Berlin. 2009. P. 554. [4] Kaltschmitt M., Hartmann H., Hofbauer H. Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren. 2. Auflage. (Energy from biomass: fundamentals, methods and procedures. 2nd edition). Berlin. 2009. p. 1063. [5] Ветров В. Эйхорния, экономика и экология. Кишинев. 2003. С. 525-532. [6] Тарушкина Ю.А. Высшие водные растения для очищения сточных вод // Экология и промышленность России. 2006. №5. С.36-39. [7] Мавлянова М.И. Экологические аспекты использования бактерий и макрофитов // Вестник КазНУ. сер. №2(48) 2011. С. 151-153. [8] Кутлиев Дж., Мавлянова М.И., Уринова А.А., Шарифов М. Биотехнология очистки сточных вод // Казахстан. Вестник КазНУ, серия экологическая. №1/2 (40). 2014. с. 352-355. [9] Ташпулатов Ж.Ж., Куканова С.И., Зайнитдинова Л.И., Бахтиерова М.С., Арипов Т.Ф. Отработанная биомасса высших водных растений как источник получения биотоплива // Казахстан. Вестник КазНУ. сер. №2(48). 2011. С. 180-182. [10] Данилович Д.А. Энергосбережение и альтернативная энергетика на очистных сооружениях канализации // Водоснабжение и санитарная техника. Москва. 2011. № 1. С.9–20. [11] Ванюшина А. Я., Данилович Д. А. Анаэробное сбраживание – ключевая технология обработки осадков городских сточных вод // Водоснабжение и санитарная техника. Москва. 2013. №10-11. С. 50-57. [12] Николаев Ю.А., Кевбрина М.В., Дорофеев А.Г., Ванюшина А.Я., Агарёв А.М. Высокоэффективная технология метанового сбраживания осадка сточных вод с рециклом биомассы // Водоснабжение и санитарная техника. Москва. 2012. №10. С.61–67. [13] Храменков С.В. Комплексные решения с использованием биотехнологий для освоения энергетического потенциала возобновляемых ресурсов в водном секторе мегаполиса // VII Московский международный конгресс «Биотехнология: состояние и перспективы развития». 2011. С. 427-428. [14] Зайнитдинова Л.И., Куканова С.И., Ташпулатов Ж.Ж., Арипов Т.Ф. Эффективная технология переработки сточных вод и отработанной биомассы растений // Microbiology and virology. №3(6). Алматы. 2014. С. 31-40.

## ИНЖЕНЕРНЫЙ РАСЧЕТ РЕКУПЕРАТОРА БИОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ОРГАНИЧЕСКОЙ БИОМАССЫ

М. Б. Миязатов<sup>1</sup>, Б. Э. Хайридинов<sup>2</sup>, А. С. Рысбаев<sup>3</sup>, С. Т. Хамроев<sup>2</sup>

ООО, Муборак нефт-газ<sup>1</sup>

Каршинский государственный университет<sup>2</sup>

Ташкентский государственный технический университет<sup>3</sup>

Современная технология производства органических продуктов связана с проблемой утилизации отходов органической биомассы. Современная биотехнология предусматривает любые превращения субстрата (органической биомассы) в кормовой продукт и обратно [1,2]. Целесообразность осуществления таких процессов определяют главным образом санитарно-эпидемиологические и в меньшей мере технические факторы.

В последние годы разрабатываются и внедряются в хозяйствах биореакторы нового поколения. Ускорение процесса биохимических превращений достигается в них за счет интенсивного отвода газообразных продуктов при пониженном давлении и возвратно-поступательного перемешивания, а также рекуперации тепловых отходов биогазовых установок для обработки органической биомассы [3]. Но их испытания показали, что производительность биогазовых установок находится в функциональной зависимости от температуры процесса. Чтобы получить необходимую для процесса сбраживания температуру и поддерживать ее на постоянном уровне следует прежде всего подогревать до нужной температуры подаваемую в камеру органическую биомассу.

В биогазовых установках с "классической" схемой энергоснабжения затраты товарного биогаза на собственные нужды доходят до 80-90%, а иногда даже до 100%. При этом на подогрев вновь загруженной массы расходуется 80-90% энергии от общих затрат. Существующие теплообменники, применяемые в биогазовых установках, предусмотренные для отбора тепловых отходов, смогут снизить эти затраты только при увеличении их габаритных размеров, но

при этом соответственно увеличивается затрата на их изготовление и эксплуатацию. Поэтому для уменьшения энергетических затрат в биогазовых установках необходимо интенсифицировать процесс рекуперации теплоты и разработать конструкцию рекуператора повышенной производительности. Эти недостатки биогазовых установок обусловили научно - практическую целесообразность проведения исследований, основным содержанием которых явилось обоснование технологических параметров рекуператора тепловых отходов биогазовых установок для обработки органической биомассы.

Для достижения этой цели были изучены современные технологии и технические средства обеспечения рекуперации теплоты переработанной органической биомассы в биогазовых установках и предложена новая конструкция рекуператора [4]. На основании полученных теоретических и экспериментальных зависимостей была разработана методика инженерного расчета рекуператора. Цифровой расчет линии рекуперации теплоты органической биомассы в биогазовых установках с производительностью 90 м<sup>3</sup> органической биомассы в сутки приведен в таблице 1. Дробность загрузки рекуператора биогазовой установки можно рассчитать по формуле:

$$D = \frac{Q_{3e} * 100\%}{Q_{сб}} \quad (1)$$

Или как, соотношение массы сухого ограниченного вещества ( $M_{(сух)}$ ) в загружаемом сырье ( $Q_{3e}$ ), к объему сырья в дродильной камере:

$$D_{сух} = \frac{M_{сух}}{Q_{см}} \quad (2)$$

Рабочий объем рекуператора, позволяющий обеспечить рекуперацию теплоты соответственно производительности биогазовой установки по органической биомассе определяется формулой

$$V = \frac{2 \cdot \Pi_H}{D} \quad (3)$$

Таблица. 1

Исходные данные для инженерного расчета

Исходный показатель	Единица измерения	Условные обозначения	Натуральные значения
Температура сбраживания	°С	2	55
Минимальная температура органиче-	°С	t <sub>н</sub>	10
Период сбраживания	сут.	сбр.	3
Средняя теплоемкость органической биомассы при 40°С	кДж/кг.К	С	4,029
Плотность органической биомассы при влажности 95 %	кг / м <sup>3</sup>	Р	960
Содержание метана в биогазе	%	СН <sub>4</sub>	70
Нижняя теплота сгорания биогаза при 70 % - ном содержании СН <sub>4</sub>	мДж/м <sup>3</sup>	Q	24
Производительность биогазовой установки с рекуператором органической биомассы	м <sup>3</sup> /сут	Π <sub>н</sub>	90
Суммарное время загрузки и выгрузки рекуператора	мин	τ	12

Определяем потребную для теплового процесса поверхность теплообмена

$$F = f \cdot V_{p.p.} = 6,5 \cdot 6,5 \approx 43 м^2 \quad (4)$$

При этом разовая загрузки свежей порции органической биомассы равна

$$G = \frac{\Pi_H \cdot p}{D} = \frac{90 \cdot 960}{28} = 3085 \text{ кг} \quad (5)$$

Наши исследования показывают, что степень разложения сухого органического веществ снижается с повышением дозы загрузки.

Суточная производительность рекуператора по теплоте определяется формулой

$$\Pi_{P.T.} = C \cdot p \cdot \Pi_H \Delta t, \quad (6)$$

Тогда

$$\Pi_{P.T.} = 4,029 \cdot 960 \cdot 90 \cdot 29 = 10095 \text{ мДж/сут.}$$

Производительность установки по биогазу (с 70 % - ным содержанием  $\text{CH}_4$ )

$$\Pi_{P.T.б} = \frac{\Pi_{P.T.}}{Q^1} \quad (7)$$

Отсюда имеем

$$\Pi_{P.T.б} = \frac{10095}{24} = 420,6 \text{ м}^3/\text{сут}$$

Перемешивание биомассы в броидильной камере должно иметь ограниченную скорость до 0,5 м/с, так как большая скорость движения субстрата с микробиологической точки зрения невыгодна. Кроме этого, она хоть и приводит к повышению интенсивности теплообмена, но одновременно увеличивает и затраты энергии на перемешивание. Убедиться в этом легко, проанализировав динамику теплопередачи и гидравлических сопротивлений при турбулентном движении жидкости в трубном теплообменнике;

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot P_z^{0,43}; \quad (8)$$

$$\Delta P = L_{mp} \cdot 1/d + \sum L_{mp} \cdot \rho \cdot w^2 / 2 \quad (9)$$

Где:  $Nu$  - критерий Нуссельта;  $Re$ -критерий Рейнольда;  $P_z$ - критерий Прандтля;

$\Delta P$  - гидравлическое сопротивление теплообменного аппарата;  $w$  - скорость рабочей среды;  $\rho$  - плотность среды;  $L$ -длина канала;  $d$ -диаметр канала;  $L_{mp}$ -коэффициент трения;  $\sum l_{тр}$ - сумма коэффициентов массовых сопротивлений.

Из (3) и (4) находим:

$$\alpha = A_1 \cdot \omega^{0,8}; \quad \Delta P = A_2 \cdot \omega^{1,75} \quad (10)$$

Где  $A_1$  и  $A_2$  - коэффициенты пропорциональности.

Из полученных соотношений видно, что увеличение скорости потока в два раза обеспечивает рост теплоотдачи в 1,75 раза, а рост гидравлического сопротивления в этом случае происходит в 3,4 раза. Проведенные нами исследования показали, что рассмотренное выше энергопотребление можно компенсировать за счёт рекуперации тепла, выходящей отработанной биомассы и солнечной энергии. Это обуславливается климатическими условиями Республики Узбекистана. Расчеты показывают, что биогазовая установка которая построена в подсобной хозяйстве ООО «Мубарек нефть - газ» с рекуперацией теплоты дает положительные эффекты, и поэтому нами предложена следующая схема теплового обеспечения сбраживания биоотходов (рис-1).

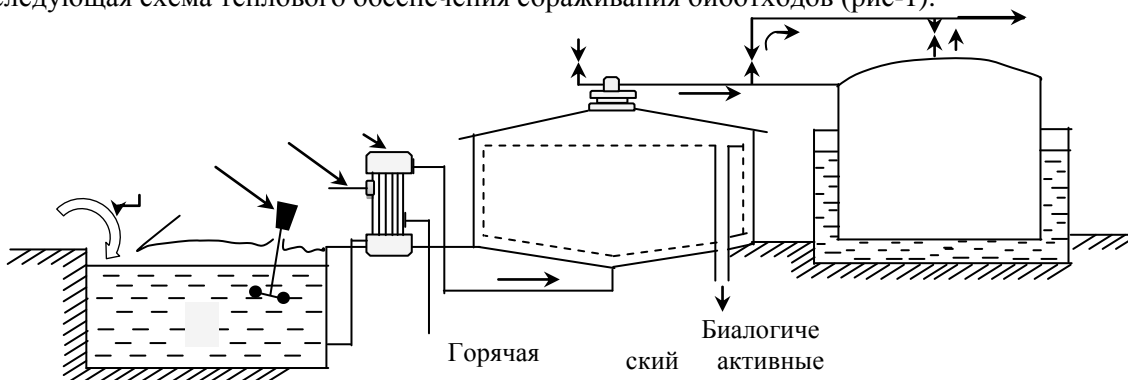


Рис.1. Обобщенная схема биогазовой установки. 1 -Ёмкость с жидкими отходами (детантор), 2-биомасса, смеситель (барбаратор), 4-холодная вода, 5-гелио теплообменник, 6-метантенк, 7-газгомер

Проведенный анализ затрат энергии на систему обеспечения процесса метанового сбраживания, позволяет сделать вывод о том что, большое внимание при поиске путей снижения энергоёмкости метанового сбраживания, следует уделять системе рекуперации теплоты сброженной биомассы и перемешиванию биомассы, а также, использовать солнечную энергию. С помощью таких БГУ можно получить до 100% товарного газа для использования в хозяйственных нуждах. В настоящее время в Республике Узбекистан на сельско - хозяйственные работы потребляется около 9% энергии, от общей вырабатываемой электроэнергии. За счет биологического газа можно эту потребность обеспечить до 100%, а избыток можно использовать для хозяйственных нужд.

Кроме вышесказанного, 1 кг обработанной, методом метанового сбраживания биомассы, по удобрильной способности, равен 8-10 кг. внесенных на землю сработанной биомассы.

Таким образом, разработанный авторами эффективный метод расчета системы утилизации сбросной теплоты биогазовой установки позволяет выбрать оптимальный технологический режим работы рекуператора и рассчитать его основные параметры на стадии проектирования.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Панцхава Е.С., Березин И.В. Технологическая биоэнергетика. - Биотехнология, 1986, № 2 (8). [2] Беляев С.С. Метанообразующие бактерии и их роль в биоэнергетическом цикле углерода: Дисс. ... докт. техн. наук. - Пущено, 1985. - 500 с. [3] Калужный С.В., Пузанков А.Г. Варфаламеев С.Д. Биогаз: проблемы и решения. Биотехнология - М., 1988. - № 21. - С.1 – 189. [4] Коравлёв А.А., Кожевникова А.Н. Технологические линии утилизации отходов животноводства в биогаз и удобрения. М., Знание. 1990. с.49.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ПОДОГРЕВА И ТЕПЛООВОГО БАЛАНСА В БИОРЕАКТОРЕ БИОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ

З.У.Саипов, И.Х.Абдуганиев, Д.З.Олимханова

ООО «Научно-технический центр АО «Узбекэнерго»

Ташкент, 700125, Узбекистан, [power@energy.uzsci.net](mailto:power@energy.uzsci.net) (Академгородок, ул. Дурмон йули, 29)

### Аннотация

*Для достижения максимальной эффективности образования биогаза анаэробная переработка нуждается в определенных температурных условиях, предпочтительно близких для достижения оптимума процесса. В Узбекистане система подогрева и изоляция реактора необходимы для достижения нужной температуры процесса и предотвращения потерь энергии.*

*Используя методы математического моделирования, можно определить параметры теплообменников для передачи теплоты с целью поддержания заданного температурного режима в реакторе и установить требуемое количество теплоты для эксплуатации установки в оптимальном режиме. С помощью математического моделирования процессов в биореакторе показано, как определить время, в течение которого происходит брожение субстрата при различных режимах работы с получением товарного биогаза, и по нему оценивать, как характер теплового баланса в реакторе, так и выбрать оптимальный режим получения товарного биогаза.*

**Ключевые слова:** биогаз, биогазовая установка, тепловая энергия

В последние годы значительно возросла заинтересованность к процессам производства биогаза – это проявляется не только в возрастающем количестве планирующихся и строящихся биогазовых установок, но и в заинтересованности все большего числа фермеров, коммунальных хозяйств, предприятий, политиков и частных хозяйств, которые внимательно наблюдают за развитием этого сектора. Энергетическая отрасль уже также не относится с такой осторожностью к децентрализации производства благодаря строительству биогазовых установок. Технология производства биогаза предоставляет шанс дешевой утилизации органических отходов в биогазовых установках с пользой для сельского хозяйства. Особенно актуально это для быстроразвивающейся птицеводческой отрасли, общее поголовье которой в Узбекистане достигло 50 миллионов птицы.

Для достижения максимальной эффективности образования биогаза анаэробная переработка нуждается в определенных температурных условиях, предпочтительно близких для достижения оптимума процесса. В Узбекистане система подогрева и изоляция реактора необходимы для до-

стижения нужной температуры процесса и предотвращения потерь энергии. Расход энергии в расчете на нагрев 1 кг субстрата для биореактора можно определить по следующей формуле

$$\mathcal{E}_{\text{пот.к}} = \frac{100 \cdot K \cdot (t_p - t_0)}{\rho_b \cdot W_n} \cdot t_p \cdot \frac{S_k}{V_k} \cdot \frac{\tau_k}{\tau} \cdot \tau \quad (1)$$

где  $K$  - коэффициент теплопередачи стены метантенка;  $t_p$  - среднее значение температуры субстрата внутри метантенка за весь рассматриваемый промежуток времени в расчетной зоне;  $t_0$  - среднее значение температуры окружающего воздуха за тот же промежуток времени;  $\rho_b$  - базисная плотность субстрата;  $W_n$  - влажность субстрата;  $S_k/V_k$  - отношение площади внутренней поверхности биореактора к объему загрузки субстрата в него;  $\tau_k$  - продолжительность оборота процесса биореактора;  $\tau$  - рассматриваемый промежуток времени, в течение которого происходят потери тепла.

Передача теплоты через стенку, а также потери теплопередачи между секциями метантенка, могут быть записаны следующими выражениями:

$$\mathcal{E}_{\text{ном.ст}} = \frac{100 \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot (t_{ж1} - t_{ж2})}{\rho_b \cdot W_n} \cdot t_p \cdot \varphi \cdot \tau \quad (2)$$

где  $t_{c1}, t_{c2}$  - температуры внутренней и наружной поверхностей стенки,  $t_{ж1} - t_{ж3}$  - температура сред,  $\alpha_1 \cdot \alpha_2$  - коэффициенты теплоотдачи,  $\varphi$  - плотность теплового потока.

Потери  $\mathcal{E}_{\text{пот.ц}}$  - передача теплоты, учитываются между всеми секциями метантенка, которые описываются уравнением.

$$\mathcal{E}_{\text{пот.ц}} = \frac{100 \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot (t_{ж1} - t_{ж2}) \cdot (t_{ж1} - t_{ж3})}{\rho_b \cdot W_n} \cdot \frac{S_{кд}}{V_{кд}} \cdot \tau \cdot t_p \cdot \varphi \quad (3)$$

Для подогрева реактора до мезофильной температуры с помощью электричества в среднем необходимо 330 Вт на 1 м<sup>3</sup> объема реактора.

Наиболее распространенной системой подогрева сырья является внешняя система подогрева с водонагревательным котлом, работающим на биогазе, электричестве или твердом топливе. В качестве нагревательных элементов применяют теплообменники в виде змеевиков, секций радиаторов, параллельно сваренных труб, где теплоносителем служит горячая вода с температурой около 60С. Более высокая температура повышает риск налипания взвешенных частиц на поверхности теплообменника. Теплообменники рекомендуется располагать в зоне действия перемешивающего устройства, что помогает избежать осаждения твердых частиц на их поверхности.

Анаэробная обработка содержимого биореактора осуществляется путем биохимического разложения органических материалов в отсутствие кислорода. Разложение органики происходит в четыре стадии и на каждой из них работает определенный вид бактерий. Первая группа отвечает за растворение и гидролиз органики. Вторая - действует на растворенные продукты, превращая их в более простые органические продукты. Третья - продолжает разрушение с образованием уксусной, масляной, пропионовой, валериановой и других кислот. И, наконец, четвертая группа состоит собственно из метаногенных бактерий, которые образуют метан, углекислый газ, водород и др. Скорость и эффективность указанных микробиологических процессов зависит от многих факторов; температуры 30-35 или 52-57 оС, кислотности (РН 6,6-7,6), скорости подачи питания, степени перемешивания и др. Поэтому большие биореакторы оборудуются системами обогрева, перемешивания, контроля РН, рекуперации тепла сброженного продукта, а сам реактор покрывается слоем теплоизоляции.

Для поддержания теплового режима реактора затрачивается от 20 до 50 % вырабатываемого биогаза в зависимости от температуры окружающей среды.

Необходимо отметить, что различные виды метаногенерирующих бактерий "работают" при различной температуре.

Анализ удельных затрат энергии на процесс анаэробного сбраживания в биогазовых реакторах показывает (рис. 2), что основная часть энергии (более 75%) расходуется на подогрев субстрата до температуры выбранного режима сбраживания и на компенсацию тепловых потерь через ограждающие конструкции реактора. Для малогабаритного биогазового реактора, предназначенного к обеспечению потребностей в топливе на бытовые нужды локальных потребителей (потре-



ности в переводе на биогаз составляют 3...5 м<sup>3</sup>/сутки), можно обойтись механической загрузкой, перемешиванием и выгрузкой сбраживаемого субстрата и основную трудность представляет создание необходимого теплового режима внутри камеры анаэробного сбраживания (метантенка). В большинстве работ по исследованию биогазовых систем для этой цели рассматриваются способы подогрева сбраживаемого субстрата с использованием электрической энергии от централизованных электросетей.

Учитывая условия функционирования крестьянских хозяйств (количество животных в хозяйстве, небольшие потребности в энергии на бытовые нужды и отсутствие централизованного электроснабжения) в целях энергообеспечения их быта нами сформулирована концепция создания малогабаритных автономных биоэнергетических установок (АБЭУ).

Предлагаемая концепция АБЭУ предусматривает обеспечение энергетического баланса:

$$E_{бэу} = E_{т.кх} + E_{т.мт} + E_{эл.кх} + E_{эл.мт}, \quad (4)$$

где  $E_{бэу}$  – суммарное количество энергии вырабатываемой АБЭУ, Дж;  $E_{т.кх}$  – потребности в тепловой энергии на бытовые нужды крестьянского хозяйства, Дж;  $E_{т.мт}$  – потребности в тепловой энергии биогазового реактора АБЭУ, Дж;  $E_{эл.кх}$ ,  $E_{эл.мт}$  – потребности в электрической энергии, соответственно, на бытовые нужды крестьянского хозяйства и самого биогазового реактора, Дж.

На современных биогазовых установках используют подогреваемые реакторы, так как для осуществления процесса метаногенеза необходимо постоянно расходовать энергию. Эффективное производство биогаза возможно только в том случае, когда суммарная энергия газа будет значительно выше расходов энергии на его производство.

Условие получения товарного биогаза может быть представлено математически с учетом теплового баланса биореактора:

$$V_{т} = V_{г} * Q_{сн} / k, \quad м^3 \quad (5)$$

где:  $V_{т}$  - количество товарного биогаза, м<sup>3</sup>;  $V_{г}$  - общее количество полученного биогаза м<sup>3</sup>,  $Q_{сн}$  - расход энергии на собственные нужды установки, кДж;  $k$  - теплотворная способность биогаза, кДж/ м<sup>3</sup>.

По мере получения биогаза его количество при  $\tau = \tau_{min}$  достигает величины, достаточной для полной компенсации расходов тепла на нагрев навоза и всех тепло- и энергопотерь ( $V_{г} * k = Q_{сн}$ ).

Аналогично, решение задачи получения товарного биогаза  $V_{г} = f(\tau)$  и расхода энергии на процесс его получения -  $Q_{сн} = f(\tau)$ , с последующим определением оптимального времени (топт) сбраживания субстрата в биореакторе. Зависимость  $V_{г} = f(\tau)$  может быть определена экспериментально для субстрата, вид и состав которого зависят от конкретных условий каждой животноводческой фермы.

Математическая обработка таких экспериментальных данных показывает, что зависимости  $dV_{г}/d\tau = f(\tau)$  соответствует эмпирическое уравнение:

$$dV_{г}/d\tau = \tau * V_{н} / (a\tau^2 + b\tau + c) = м^3/сут. \quad (6)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – эмпирические коэффициенты, значения которых определяются по опытным данным;  $\tau$  – продолжительность брожения (в сутках);  $V_{н}$  – объем сбраживаемого субстрата, м<sup>3</sup>.

Математическая модель теплового баланса в биореакторе позволяет рассчитать расход энергии на собственные нужды реактора:  $Q_{сн} = f(\tau)$ , которые определяется по зависимости

$$Q_{сн} = Q_{н} + Q_{пт}, \quad кДж \quad (7)$$

где  $Q_{сн}$  – расход энергии на предварительный нагрев субстрата до температуры брожения;  $Q_{пт}$  – суточный расход энергии на компенсацию всех теплопотерь, кДж/сут.

Теплопотери,  $Q_p$ , включают в себя энергопотери на привод перемешивающих устройств  $Q_m$ , потери энергии с удаляемой сброженной биомассой  $Q_{BM}$ , потери энергии в окружающую среду  $Q_k$ , потери энергии с удаляемым биогазом  $Q_{BG}$

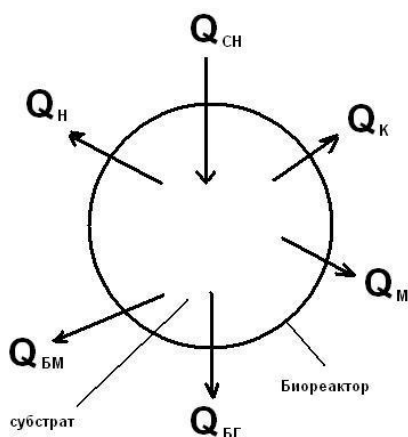


Рис.1. Расчетная схема теплового баланса биореактора. Теплопотери через окружающие поверхности биореактора в сутки,

$$Q_k = kF(T_B - T_H)8,64.10^4, \text{ кДж/сут} \quad (8)$$

$k$  – коэффициент теплопередачи, кВт/м<sup>2</sup>.К;  $F$  – площадь ограничивающих поверхностей биореактора, м<sup>2</sup>;  $T_B$  – температура наружного воздуха, К;  $T_H$  – температура субстрата, подающегося в биореактор, К.

Теплопотери с уходящим биогазом определяются по уравнению:

$$Q_{BG} = V_g C_g (T_g - T_B), \text{ кДж/сут} \quad (9)$$

где  $V_g$  – суточный объем выделившегося биогаза, м<sup>3</sup>/сут;  $C_g$  – объемная теплоемкость биологического газа, кДж/м<sup>3</sup>;  $T_g$  – температура биологического газа на выходе из биореактора, К;  $T_B$  – температура окружающего воздуха, К.

Теплопотери с удаляемой сброженной биомассой:

$$Q_{BM} = V_H C_H (T_2 - T_B), \text{ кДж/сут} \quad (10)$$

где  $V_H$  – объем субстрата, удаляемого из биореактора в сутки, м<sup>3</sup>;

$C_H$  – объемная теплоемкость субстрата, кДж/м<sup>3</sup>.К;  $T_2$  – температура субстрата на выходе из метантенка,  $T_B$  – температура окружающего воздуха, К.

Затраты энергии на привод перемешивающих устройств и вспомогательного оборудования определяются расчетным путем, учитывая потребную мощность насоса или перемешивающих устройств, производительность насоса, КПД перемешивающего устройства и коэффициент работы перемешивающего устройства (например 1/8 часть (3 часа) в сутки).

Решение этих уравнений дает возможность оценивать как характер теплового баланса процесса брожения субстрата, так и оптимального режима получения товарного биогаза.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Мухамедов Р.С., Тохтахунов К.А., Захидов Р.А. Биогазовые установки и охрана окружающей среды. Судостроительная промышленность, Сер. Пром. Энерг. Охрана окружающей среды. Энергоснабж. Судов, 1990, №14, с.67. [2] Захарченко А.Н., Сатьянов С.В. Обоснование параметров работы биореактора / Труды ФГОУ ВПО РГАЗУ. 2010 [3] З.У.Саипов, Р.А.Захидов. Использование биогаза в когенерационной установке. Международная Конференция в "Фундаментальных и Прикладных Проблемах Физики". Физико-Технический Институт НПО «Физика-Солнце» АН РУз. Ташкент. 2013

## ТЕРМОСЕНСОРКОНТРОЛЯ УТЕЧЕК ВОДОРОДА НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА МАРГАНЦА ПАЛЛАДИРОВАННОГО В СУПЕРИЗОЛЯЦИИ КРИОГЕННОГО ВОДОРОДНОГО РЕЗЕРВУАРА И ТРУБОПРОВОДОВ

А. Гусев

Научно-технический центр «ТАТА»

Саров, 607183, Россия, (Россия, Нижегородская область, Саров, ул. Московская, дом 29, офис 306)

E-mail: [gusev@hydrogen.ru](mailto:gusev@hydrogen.ru)

### Аннотация

*Развитие водородной экономики, связанное с необходимостью накопления, хранения и транспортировки больших количеств криогенного водорода (КВ) для нужд экологически чистых транспортных средств и производств, нуждается в обеспечении безопасности [1-5].*

*В процессе хранения КВ в криогенных резервуарах (КР) с суперизоляцией, имеющих трубопроводы обвязки КР и магистральные трубопроводы возникает задача осуществления контроля утечек (КУ) в вакуумных полостях (ВП) с суперизоляцией [6-8]. Задача усложняется тем фактом, что КУ необходимо вести в вакуумной среде и при низких температурах. В таких условиях известные сенсоры утечек (СУ) не работоспособны. Для решения актуальной задачи автором был предложен СУ на основе диоксида марганца палладированного (ДМП), имеющий защитную проницаемую огнепреграждающую оболочку [9-15]. ДМП обеспечивает экзотермическую реакцию окисления водорода с выделением тепла при крайне низких температурах. Максимальный запас кислорода из всех известных оксидов имеет система  $MnO_2$ . Промомирование гранул  $MnO_2$  нанокластерами Pd обеспечивает протекание реакции с минимальной энергией активации в зоне низких температур в вакууме [16-17]. Выделяющаяся вода вымораживается на криогенных поверхностях. Фиксация температуры обеспечивается термопарой.*

**Ключевые слова:** водородная экономика, суперизоляция, криогенный резервуар, криогенный трубопровод, диоксид марганца палладированный, экзотермическая реакция, нанокластеры палладия, энергия активации, сенсор утечки водорода.

### 1. Введение

При разработке конструкций датчиков утечки водорода особое внимание было обращено: на выбор оптимального оксида и промотирующего катализатора, на методы приготовления сенсорных материалов, включая формирование оптимальной пористой структуры, введение металлических и органических связующих, а также компонентов, обладающих мембранными свойствами для удаления продукта реакции – воды.

Результаты исследования предполагается использовать для повышения степени безопасности на атомных электростанциях, водородных магистральных трубопроводах и резервуарах, на взрывоопасных и вредных производствах, на крупных криогенных комплексах, на автомобильном и авиационном транспорте, использующем водород в качестве горючего. Разработку также предполагается применять при контроле технологических процессов в криовакуумных теплоизоляционных полостях. Для протяженных водородных хранилищ, включающих криогенные резервуары, криогенные трубопроводы обвязки, а также магистральных криогенных трубопроводов, и, как правило, многочисленных контролируемых замкнутых объемов необходимы дешевые, безопасные, простые и надежные датчики. Известные сенсоры водорода чаще всего представляют собой достаточно сложные электронно-механические или оптико-электронные системы. В связи с высокой стоимостью таких сенсоров применение их не всегда экономически оправдано.

Актуальной проблемой является разработка селективных газовых сенсоров, в частности, сенсоров водорода, в связи с его широким применением в криогенной и водородной технике.

Нами были проведены научно-исследовательские работы по созданию малогабаритного и дешевого лабораторного макета детектора водорода непрерывного действия на основе оксидов переходных металлов, содержащих каталитические добавки переходных металлов и сплавов. Такие детекторы способны контролировать как аварийные утечки водорода, так и объемную концентрацию водорода в различных газовых смесях в более широком диапазоне давлений и температур по сравнению с известными аналогами. Кроме того, некоторые из этих материалов могут поглощать значительные количества водорода, в особенности, в случае возникновения аварийных ситуаций.

Для решения поставленной задачи были предложены твердотельные датчики, в которых используются эффекты взаимодействия твердого тела с газовой средой. На поверхности твердого

тела могут протекать явления хемосорбции и более глубокого химического взаимодействия (восстановление, окисление и др.). Эти процессы сопровождаются существенными тепловыми эффектами на основе чего были созданы сенсоры нового типа.

Для повышения чувствительности сенсоров необходимо было оптимизировать условия протекания поверхностных процессов путем введения каталитических добавок с различной концентрацией катализатора. Датчики, в которых используются каталитические процессы окисления водорода на поверхности, представляют собой новый перспективный, но еще мало разработанный вид селективных сенсоров.

Обеспечение селективности в случае каталитических сенсоров было достигнуто следующими методами:

- 1) использованием катализаторов, нанесенных на оксид металла,
- 2) применением каталитических "фильтров",
- 3) использованием высокоселективных поверхностных добавок, играющих роль катализаторов топохимических процессов.

Технологическая база, предусматривающая производство особо чистых образцовых газовых смесей, большой опыт работы с водородными смесями и водородом, а также наличие технологического оборудования и специалистов позволила на высоком уровне разработать и создать лабораторный макет датчика водорода.

Для проведения этих и других важных исследований были изготовлены испытательные установки. В качестве источников водорода использовались лабораторные аккумуляторы на основе гидридов интерметаллических соединений.

Были выполнены следующие научно-исследовательские работы:

1. Разработка и исследование новых сенсорных материалов: оксиды переходных металлов, содержащие каталитические добавки переходных металлов и сплавов.
2. Разработка принципиальной схемы измерительной установки
3. Разработка и анализ измерительной базы и требований к ней.
4. Разработка лабораторного макета сенсора. Создание и исследование моделей.
5. Создание и исследование сенсоров утечки водорода непрерывного действия в различных газовых смесях в широком диапазоне давлений и температур.
6. Разработка методик оценки водородного сенсора.
7. Компьютерное моделирование сенсора утечки водорода в среде эксплуатации.
8. Создание базы данных, включающей зависимость тепловых параметров сенсорных материалов от концентрации водорода.

На диаграмме (рис.1) представлена та параметрическая область применения объектов водородной энергетики (на рисунке 1 - область 1), которая должна контролироваться датчиками.

При этом в рамках работы ставилась задача создать датчики, которые бы надежно контролировали концентрацию и утечку водорода в области, показанной на рисунке цифрой 3.

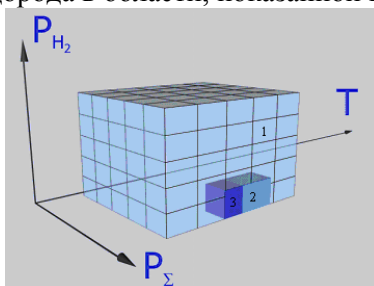


Рисунок 1. Диаграмма с областями функционирования разрабатываемых термохимических сенсоров, где: 1- область, в которой необходимо проводить контроль современной водородной энергетики, 2-область, надежно контролируемая существующими датчиками водорода, 3-область, для контроля которой разработаны датчики (А.Л. Гусев).

## 2. Исследование перспектив создания вакуумного термохимического низкотемпературного сегмента датчика на основе оксидов металлов

Остаточные вакуумные среды, как правило, представляют собой гелиево-водородные смеси. Для осуществления каталитической экзотермической реакции водорода с потреблением кислорода из окружающей среды последнего уже недостаточно (в то время как этот принцип успешно используется в известных термохимических датчиках, функционирующих при нормальном давлении). Поэтому для надежного функционирования в условиях разряжения необходимы оксиды ме-

таллов, имеющие высокое удельное содержание кислорода, а также обеспечивающие протекание реакции с низкой энергией активации и при максимальной константе скорости реакции.

Принцип работы экзотермического сенсора состоит в измерении тепла, выделяемого при взаимодействии используемого материала с водородом анализируемой среды, которое пропорционально концентрации водорода. Для реализации такого сенсора представляется перспективным использовать оксиды переходных металлов.

Во всех случаях увеличение дисперсности поглощающих водород твердых материалов должно привести к ускорению процесса поглощения водорода и изменению физических свойств материала, что в свою очередь должно привести к увеличению чувствительности детекторов на основе этих материалов. Важно, чтобы высокодисперсные материалы не кристаллизовались или не образовывали агрегаты, затрудняющие их взаимодействие с водородом.

Одним из объектов изучения мог бы быть химический поглотитель водорода на основе диоксида марганца палладированного (ДМП) [11,16,17].

В результате взаимодействия водорода с диоксидом марганца появляется вода, которая конденсируется на холодных частях криогенного оборудования. Необходимо удалять не только водород, но и связывать воду.

Одним из возможных путей увеличения дисперсности поглощающих водород твердых материалов является получение материала в высокодисперсном состоянии и распределение его в другом пористом материале с достаточной проницаемостью для водорода.

### 3. Исследование сенсорных веществ

В ходе выполнения этого этапа изучались вопросы улучшения рабочих характеристик сенсорных веществ и разработки методик исследования сенсорных веществ.

Проанализированы библиографические источники, посвященные изучению поверхности сенсорных материалов методами электронно-эмиссионной спектроскопии: рентгеновской фотоэлектронной спектроскопией, оже-спектроскопией и спектроскопией потерь энергии электронов.

За время выполнения проекта было выполнено:

- исследовано влияние специальных предварительных обработок поверхности диоксида марганца и тетраоксида кобальта ( $\gamma$ -облучение, активация поверхности низкотемпературной плазмой, отжиг в вакууме, нагрев в кислороде, модифицирование оксидом кобальта  $\text{Co}_3\text{O}_4$  и т.д.) на ее водородсорбирующие и другие физико-химические свойства [11];

Методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопией показано, что  $\gamma$ -облучение создает дополнительное заполнение анионных вакансий поверхности и снижает поверхностный энергетический барьер. Это приводит к увеличению скорости низкотемпературного восстановления тетраоксида кобальта и диоксида марганца водородом и снижает энергию активации процесса. Влияние  $\gamma$ -облучения на скорость взаимодействия водорода с тетраоксидом кобальта и диоксидом марганца может быть обусловлено образованием новых адсорбционных центров и форм адсорбированного кислорода, взаимодействующего с водородом [11].

- изучены поверхности сенсорных материалов методами электронно-эмиссионной спектроскопии: рентгеновской фотоэлектронной спектроскопией, оже-спектроскопией и спектроскопией потерь энергии электронов; проводилась аттестация всех изучаемых образцов с помощью химического и рентгенофазового анализа, ИК и КР спектроскопии.

- проводился контроль фазовых превращений в  $\text{MnO}_2$  методом Мессбауэровской спектроскопии в процессе замены небольшого количества атомов марганца атомами железа на стадии приготовления диоксида марганца;

При исследованиях фазовых превращений в грануле диоксида марганца палладированного в восстановительном процессе обнаружено, что:

- скорость перемещения границы фазовых превращений из глубины гранулы к периферийным слоям очень мала и приводит к неритмичной работе сенсорного вещества;

- физическое воздействие на гранулу сенсорного вещества ( $\gamma$ -облучение, обработка пучками ускоренных частиц и др.) приводит к увеличению подвижности кислорода к поверхности гранулы из глубинных слоев;

- в ходе восстановительной реакции на поверхности диоксида марганца наблюдается переход  $\text{MnO}_2$  в  $\text{MnO}$  [11].

- изучались причины дезактивации (снижение активности) материала и выработка рекомендаций по оптимальным режимам эксплуатации;

К причинам дезактивации относятся:

- чрезмерное окисление палладиевых кластеров в результате неправильного режима хранения материала;
- “эффект отдыха”, связанный с очень низким коэффициентом диффузии кислорода из глубинных слоев сенсорного материала к реакционной поверхности [11].

Было рекомендовано:

- хранить сенсорный материал в герметичной таре под давлением инертного газа;
- при изготовлении сенсорного материала преимущественно использовать механохимический метод нанесения катализатора, при котором обеспечивается более высокая стойкость палладиевых кластеров к окислению по сравнению с методом пропитки.
- изучены свойства сенсорных материалов при различных условиях эксплуатации (давление, температура, концентрация).



Рисунок 2. Сенсорное вещество для лабораторных тестовых исследований для термохимического датчика утечки водорода на основе диоксида марганца палладируемого с повышенными добавками PdCl<sub>2</sub> (с концентрациями от 1 – 10% палладия)- для тестирования результатов компьютерного моделирования в среде ANSYS

#### 4. Предложенные конструкции термохимических сенсоров утечки

На рисунках 3-11 представлены тестовые модели термосенсоров водорода, разработанные для различных применений в криогенных объектах.

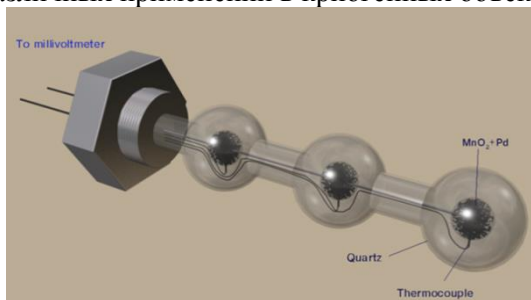


Рисунок 3. Термохимический датчик утечки с термопарой на основе трех сенсорных элементов типа «Горошина», размещенных в водородопроницаемой кварцевой мембране



Рисунок 4. Изготовленные кварцевые мембраны для термохимического датчик утечки с термопарой типа «Горошина»

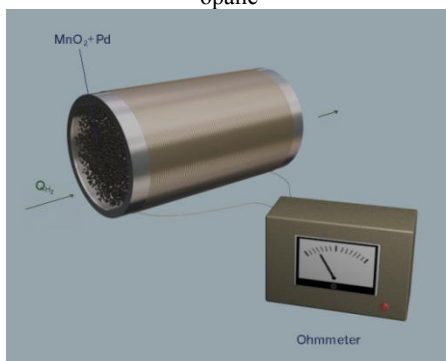


Рисунок 5. Термохимический датчик утечки с терморезистивным чувствительным элементом

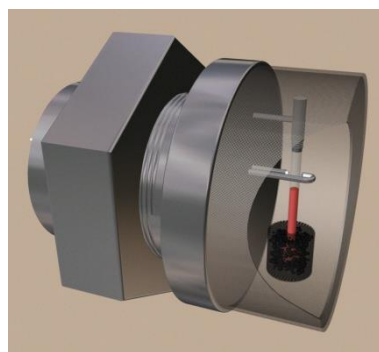


Рисунок 6. Термохимический датчик утечки с чувствительным элементом на основе оптоволоконна, прерывателя светового потока и термочувствительного вещества-размыкателя светового потока



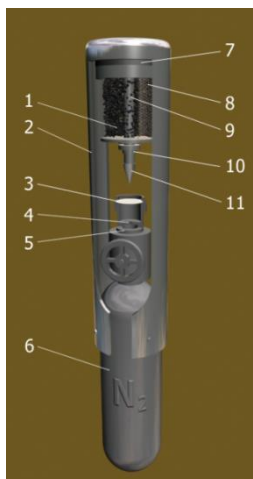


Рисунок 7. Система предупреждения пожара с термохимическим датчиком утечки водорода, где: 1 – термохимический датчик, 2 – кронштейн, 3 – герметичная заглушка баллона, 4 – дроссель, 5 – клапан, 6 – баллон с инертным газом, 7 – прокладка, 8 – перфорированные стенки термохимического датчика, 9 – сенсорное вещество, взаимодействующее с водородом с выделением тепла, 10 – силовой элемент с термомеханической памятью формы, 11 – нож, регулируемый по высоте



Рисунок 8. Термохимический датчик утечки водорода с тефлоновой мембраной и термопарой



Рисунок 9. Термохимический датчик утечки водорода с терморезисторным чувствительным элементом (сверхтонкая медная нить, навитая на тонкостенную алюминиевую трубку)



Рисунок 10. Термохимический датчик утечки водорода с водородом и водонепроницаемым тефлоновым корпусом и с термопарой

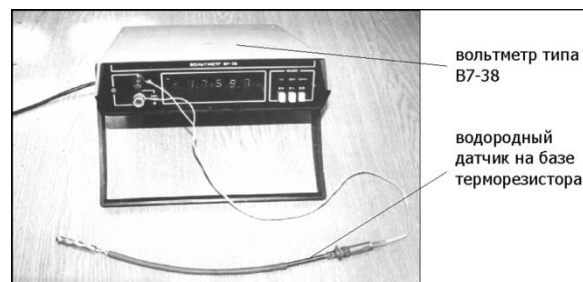


Рисунок 11. Термохимический датчик утечки водорода с терморезисторным чувствительным элементом (сверхтонкая медная нить, навитая на тонкостенную алюминиевую трубку)

На рисунках 12-13 представлены способы размещения термохимических сенсоров утечки водорода в криогенных объектах: криогенных баках, криогенных резервуарах, криогенных трубопроводах обвязки резервуаров, магистральных криогенных трубопроводах.

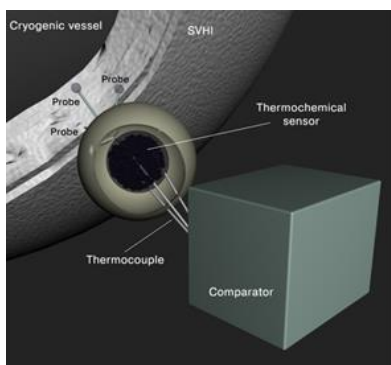


Рисунок 12. Термохимический датчик утечки с термопарой за пределом вакуумной полости с пробозабором компарторного типа

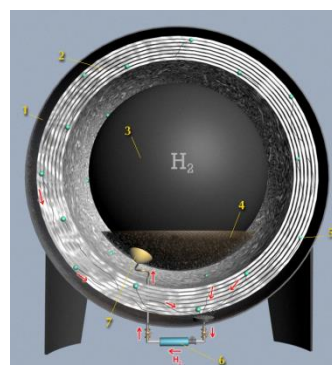


Рисунок 13. Термохимические датчики утечки водорода, размещенные в слоях суперизоляции криогенного резервуара

#### 4.1. Стенд для испытаний датчиков

На рисунках 14-16 представлен разработанный при выполнении работы стенд «Эдельвейс-001».



Рисунок 14. Стенд для испытаний датчиков в установке «Эдельвейс-001» [18,19]

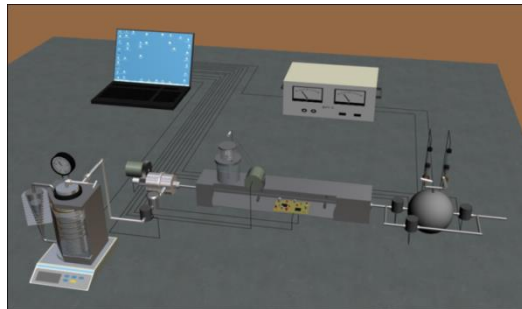


Рисунок 15. Автоматическая система генерации прецизионного микропотока особо чистого водорода [18,19]

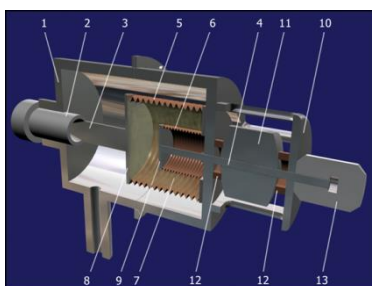


Рисунок 16. Прецизионный натекатель водорода [20,21]

#### 4.2. Термохимический датчик термпарный с металлической мембраной из пористой нержавеющей стали

Для проведения экспериментов в детекторном отсеке измерительной установки «Эдельвейс-001» нами был разработан термохимический термпарный датчик с металлической мембраной из пористой нержавеющей стали с кронштейном, (Рисунок 17).



Рисунок 17. Термохимический термпарный датчик с металлической мембраной «Горошина-1580-001» и с кронштейном «Сириус-1580-001»

#### 5. Компьютерное моделирование в среде ANSYS

Внешний диаметр датчика 10мм, толщина кварцевой оболочки 0.3мм, начальная температура в камере  $-70^{\circ}\text{C}$ .

Результаты проведенных расчетов показаны на рисунках 18-21.

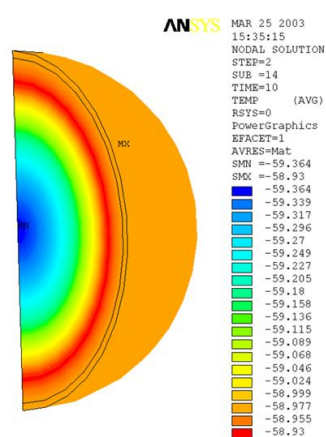
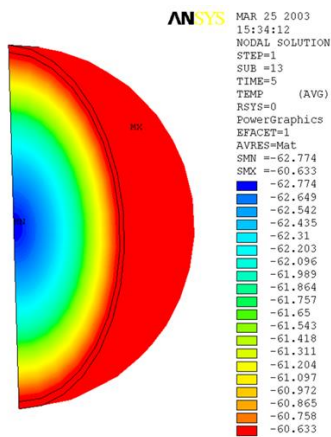
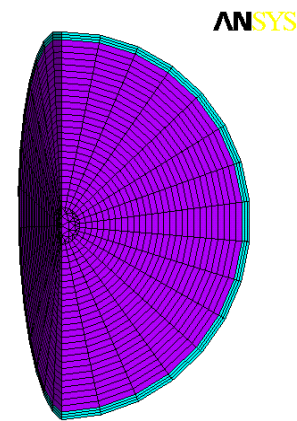
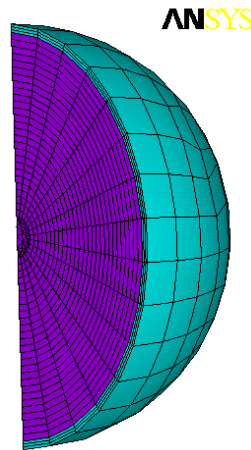


Рис.18. Распределение температуры через 5секунд.

Рис.19. Распределение температуры через 10секунд

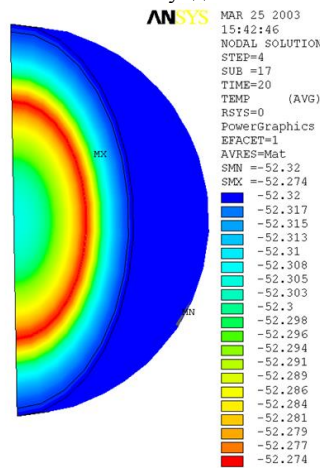
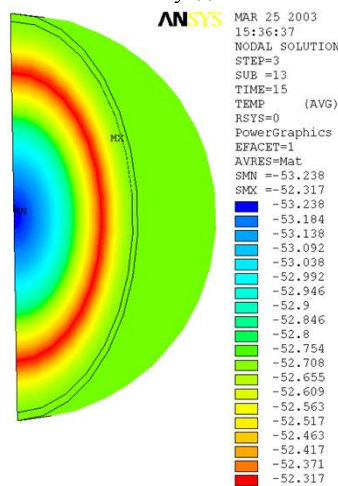


Рис.20. Распределение температуры через 15секунд

Рис.21. Распределение температуры через 20секунд

## 5. Благодарности

Работа была выполнена в рамках проекта Международного Научно Технического Центра №1580 «Водородные сенсоры». Особую благодарность выражаю кураторам проекта доктору Т.Н. Везируглу (Университет Майами, США), доктору М.Д. Хэмптону (Университет Орlando, США), оценившим и поддержавшим эту работу. Большую благодарность выражаю к.т.н. В.И. Куприянову, к.т.н. В.П. Кряковкину, украинским ученым д.х.н. Л.В. Ляшенко, д.х.н. В.М. Белоусову, д.х.н. И.В. Бачериковой, к.х.н. Э.В. Рожковой признавшим мою идею и подержавшим возможность со-

здания термохимического датчика на основе ДМП, выполнившим изготовление первоначального тестового материала ДМП для определения экзотермического эффекта термосенсора.

#### 6. Заключение

1. Были разработаны и исследованы новые сенсорные материалы на основе оксидов переходных металлов, содержащих каталитические добавки.
2. Была разработана принципиальная схема измерительной установки
3. Была создана база данных, включающая зависимость тепловых параметров сенсорных материалов от концентрации водорода.
4. Разработана измерительная база и требований к ней.
5. Разработан лабораторный макет сенсора.
6. Создан и исследован сенсор утечки водорода непрерывного действия в различных газовых смесях в широком диапазоне давлений и температур.
7. Разработаны методики оценки водородного сенсора.
8. Выполнено компьютерное моделирование сенсора утечки водорода в среде эксплуатации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- [1] Гольцов В.А., Везироглу Т.Н., Гольцова Л.Ф., Гусев А.Л. Современное состояние водородной экономики и водородного транспорта: экономика, техника, инфраструктура//Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2003. № S1. С. 21-22.[2] Гусев А.Л. и другие. Столетний меморандум от 13 ноября 2006 года главам большой восьмерки//Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2007. № 3. С. 11. [3] Гусев А.Л. Основные экологические проблемы нижегородской области и пути перехода к водородной экономике// Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2006. № 1. С. 13-24. [4] Gusev A.L. Development and making of a hybrid nitrogen-hydrogen vehicle//Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2008. № 4. С. 105-110.[5] Гусев А.Л. Летающий водородный автомобиль. история, настоящее, будущее (идеи, концепции, реализация)//Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2007. № 6. С. 177-179. [6] Гусев А.Л., Наумчик И.В., Пеньков М.М. Повышение безопасности водородных систем на основе оптимального размещения детекторов водорода в теплоизоляционных полостях емкостей и трубопроводов//Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2008. № 7. С. 20-24. [7] Пеньков М.М., Наумчик И.В., Ведерников М.В., Грибакин В.А., Гусев А.Л. Способ измерения содержания водорода в криогенной вакуумной теплоизоляции. Патент на изобретение RUS 2362991 03.03.2008 [8] Гусев А.Л., Наумчик И.В., Пеньков М.М. Выбор условий применения металлооксидных детекторов водорода в системах контроля газовой среды криогенных водородных комплексов//Известия Санкт-Петербургского государственного университета низкотемпературных и пищевых технологий. 2009. № 1. С. 65-69.[9] A.L. Gusev. Project Proposal #1580 "Hydrogen Detectors".// International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology, Issue1, pp.222-226, 2000.[10] Патент РФ №2113871. Способ предупреждения пожара в замкнутых емкостях и трубопроводах и криогенный трубопровод. Гусев А.Л., Белоусов В.М., Куприянов В.И., Кудрявцев И.И., Кряковкин В.П., Ляшенко Л.В., Бочарикова И.В., Рожкова Э.В., Высоцкий А.Ф., Шванке Д.В. – Заявл. 4.01.96., №96100184/12, опубл. в БИ №18, МКИ А62С2/00,3/00. [11] A.L. Gusev, V.M. Belousov, I.V. Bachericova, E.V. Rozhkova. Hydrogen Sensor for Cryogenic vacuum objects. Abstracts book of NATO International Conference Katsiveli, Yalta, Ukraine September 02-08, 1999, p.370.[12] A.L. Gusev, E.V. Kudel'kina, P.A. Chaban, A.V. Ivkin, T.N. Veziroglu, M.D. Hampton. Hydrogen sensors for hydrogen transport. The Proceedings for the 30th ISTC Japan Workshop on Advanced Catalysis Technologies in Russia, April 12-19, 2004, Visits to Companies in Japan, Sponsor: Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT), Japan-Russia Business Cooperation Committee; International Science and Technology Center (ISTC). Tokyo, 2004, pp. 232-233. [13] А.Л. Гусев. Низкотемпературные сенсоры и поглотители водорода.// Альтернативная энергетика и экология, Спецвыпуск, 2003, 110 - 114, стр., 172 с. [14] А.Л. Гусев, Е.В. Куделькина, П.А. Чабан, А.В. Ивкин. Сенсоры водорода. Сборник тезисов отраслевого семинара «Пассивные системы и водородная безопасность АЭС». Обнинск, 28-29 апреля 2004 года, стр. 15, 2004. [15] А.Л. Гусев, Е.В. Куделькина, П.А. Чабан, А.В. Ивкин, М.Д. Хэмптон, Т.Н. Везироглу. Сенсоры водорода для водородного транспорта. Сборник тезисов Conference EuroSun 2004 and 14th International Forum Sun (14. Internationales Sonnenforum of DGSe. V.) – June 20-23, 2004 (Freiburg, Germany) and Intersolar 2004, June 24-26, 2004 (Freiburg, Germany). Германия. [16] A.L. Gusev, E.V. Kudel'kina, P.A. Chaban, A.V. Ivkin, T.N. Veziroglu, M.D. Hampton. The outlook for using palladium and 4th period metal oxides in hydrogen energy and transport. The Proceedings for the 30th ISTC Japan Workshop on Advanced Catalysis Technologies in Russia, April 12-19, 2004, Visits to Companies in Japan, Sponsor: Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT), Japan-Russia Business Cooperation Committee; International Science and Technology Center (ISTC), Tokyo, 2004, pp.226 - 229. [17] А.Л. Гусев, Е.В. Куделькина, П.А. Чабан, А.В. Ивкин, М.Д. Хэмптон, Т.Н. Везироглу. Перспективы применения палладия и оксидов



металлов 4 периода в водородной энергетике и в водородном транспорте. Сборник тезисов Conference EuroSun 2004 and 14th International ForumSun (14.Internationales Sonnenforum of DGS e. V.) – June 20-23, 2004 (Freiburg, Germany) and Intersolar 2004, June 24-26, 2004 (Freiburg, Germany). Германия.[18] A.L. Gusev, E.V. Kudel'kina, P.A. Chaban, A.V. Ivkin, T.N. Veziroglu, M.D. Hampton. "Edel'weis-001" standardized unit for testing hydrogen transport sensors. The Proceedings for the 30th ISTC Japan Workshop on Advanced Catalysis Technologies in Russia, April 12-19, 2004, Visits to Companies in Japan, Sponsor: Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT), Japan-Russia Business Cooperation Committee; International Science and Technology Center (ISTC). Tokyo, 2004, Pp. 234-235.[19] А.Л. Гусев, Е.В. Куделькина, П.А. Чабан, А.В. Ивкин, М.Д. Хэмптон, Т.Н. Везироглу. Унифицированный стенд «Эдельвейс-001» для испытаний датчиков водородного транспорта. Сборник тезисов Conference EuroSun 2004 and 14<sup>th</sup> International Forum Sun (14.Internationales Sonnenforum of DGSe.V.) – June 20-23, 2004 (Freiburg, Germany) and Intersolar 2004, June 24-26, 2004 (Freiburg, Germany). Германия. [20] А.Л. Гусев. Прецизионные регулируемые вакуумные натекатели микропотоков газов и паров для контроля герметичности энергетических объектов (краткий обзор). //Альтернативная энергетика и экология, №1, 2002, стр. 30 - 48. [21] Гусев А.Л., Немышев В.Н. Регулируемый источник потока газа. Патентнаполезнуюмодель RUS 112414 08.10.2010

## РАЗРАБОТКА МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА МОЩНОСТЬЮ 30 Вт

<sup>1</sup> С.А.Раджапов, <sup>1</sup> М.У.Джанклич, <sup>1</sup> Б.С.Раджапов, <sup>1</sup> Е.К.Тошмуродов, <sup>2</sup> А.С.Хасанов

<sup>1</sup> Физико-технический институт НПО «Физика-Солнце» АН РУз  
Узбекистан, 10008, Ташкент, ул. Бодомзор йули, 2Б, [rsafti@mail.ru](mailto:rsafti@mail.ru)  
<sup>2</sup> Навоийский государственный горный институт.  
г.Навои, Узбекистан

Настоящее время рациональное использование топливно-энергетических затраты (ресурсов) на промышленных предприятиях является одним из важных способов повышения эффективности их работы.

Одним из перспективных направлений утилизации тепловой энергии является создание установок на основе термоэлемента термоэлектрический генератор различного мощности.

В работе приведены результаты исследований характеристики двух типов многофункциональный термоэлектрический генератор (МТЭГ). Рис.1. а), б).

МТЭГ предназначена для прямого преобразования тепловой энергии (дровяной печи, энергии пара, газовой и дизельной топлив, выделяемого различным работающим оборудованием, а также тепла солнечной энергии) в электрическую энергию и обеспечивает непрерывную круглосуточную работу без постоянного наблюдения за его работой. МТЭГ предназначен для обеспечения непрерывного электропитания системы автоматики, аварийного освещения, зарядки аккумуляторов (различных устройств), а также питания системы охранной и пожарной сигнализации, телевизора, компьютера, аудиотехники и проч. [1-2].

### Основные технические характеристики МТЭГ

- генерируемое напряжение 12 В;
- выходная мощность (10-30)Вт;
- режим работы – стационарный;
- температура установочной поверхности не более 130 °С;
- габаритные размеры, ориентировочно- 300x200x150мм;

Таким образом, нами разработан и изготовлен многофункциональный термоэлектрический генератор мощностью 10, 20, и 30 Вт. Работа выполнена в рамках хоз. договора № 01/03 «Разработка многоканального регистрирующего термометра и создание системы автономного освещения печного отделения» с Навоийским государственным горным институтом и Навоийским горно-металлургическим комбинатом.

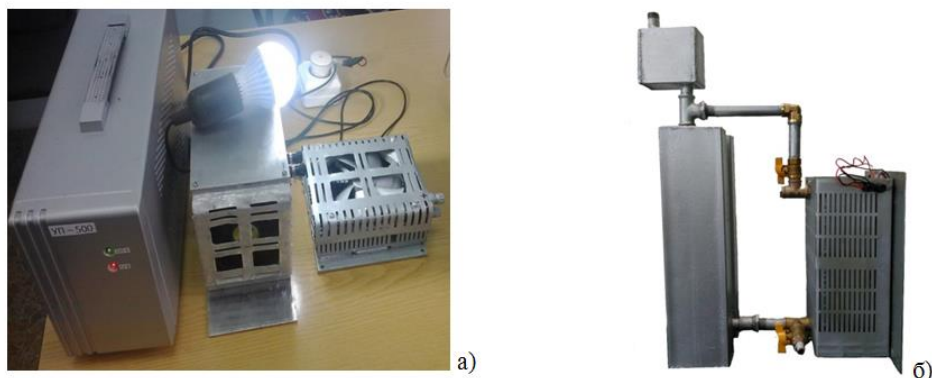


Рис.1. МТЭГ а) -с воздушным охлаждением, б)- с жидком охлаждением

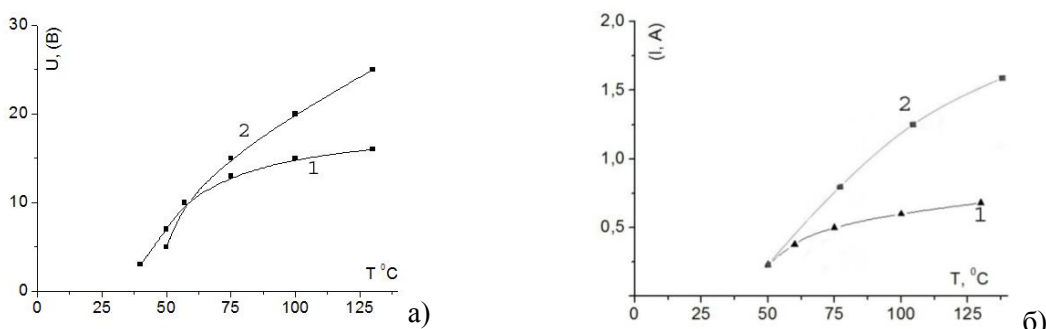


Рис.2. Температурная зависимость напряжения -а и тока -б МТЭГ с воздушным охлаждением-1, и с жидком охлаждением-2.

#### ЛИТЕРАТУРА:

[1] Джанклич М.У., Пиндюрин Ю.С., Раджапов С.А., Раджапов Б.С., Тошмуродов Ё.К., Хасанов А.С. // Многофункциональный термоэлектрический генератор // Материалы конференции НПО «Физика-Солнце» АН РУЗ им. С.А. Азимова институт Материаловедения «Возобновляемые источники энергии: технологии и установки» 28-29 июня Ташкент 2016. Стр. 32. [2] «Многофункциональный термоэлектрический генератор» IX Республиканской ярмарки инновационных идей, технологий и проектов стр. 50.

## POTENTIAL POSSIBILITIES OF NATURAL HYDROCHLORIC WATER AND ITS CONTRIBUTION TO THE WORLD ELECTRICITY

S.M.Ochilov

Physical Technical Institute of Uzbek Academy of Sciences,  
Bodomzor Yuli 2-b+ (99871) 235-40-32, Tashkent, 100084, Republic of Uzbekistan  
e-mail: [suxrob1960@mail.ru](mailto:suxrob1960@mail.ru)

#### Summary

In article possibilities application of natural hydrochloric water without a damage on ecology as a potential active electrolyte for chemical cells are stated and to lift in the future its status to the direct current station, different maintainability and profitability.

**Keywords:** salty water, an electrolyte, ecology, batteries, consumers, direct current station

With the advent of new energetically saving up technologies and the low-power robotized home appliances created on their basis and vehicles (drones, scooters, skateboards and other) extend also a scope of chemical sources of a current – accumulators and galvanic («dry») the elements feeding with their energy. If business is so, in the near future, individual economy and a population part can fill the needs only by means of a direct current, in full or in part separating from the state power network, having saved superfluous energy on advantage of the industrial enterprises. By the way, this problem is filled partially by means of renewed energy sources. Generally speaking, the era of wide use of a direct current and its consumers knocks at the door.



Not all a secret that among chemical energy sources both long-livers are considered as the most popular lead-acid and alkaline accumulators, low-power lithe-ionic secondary generators, and also "dry" (secondary) devices. Their scopes are very manifold and indisputable. But, despite these advantages, there are certain difficulties as in release, and process of their operation, and their cost price grows from year to year. After the full discharge these radiants as a household waste, throws out in a dump in billions pieces (or hundreds in tons) every year worldwide. The same fate expects the next batches released in astronomical unities by various firms-manufacturers.

The electrolytes used in these devices far unsafe chemical preparations (for example, hydrochloric acid, chloride ammonium, chloride zinc and other) also influence ecology direct and indirect sense. But the nature has generously presented us (instead of indemnification of our mismanagement and wastefulness) with other major energy arsenal – a natural electrolyte. It is so-called sea water, with total amount of 1370 million in  $\text{km}^3$ , it is concentrated in the seas and oceans / 1 /. In this list it is possible to add still lake waters, springs with salty water, sewage of ecologically living in misery regions that does it still powerful / 2 /. As it is known, sodium chloride at dissolution in water decays on the charged ions of sodium and chlorine (their maintenance in sea water along with ions of potassium, calcium, magnesium, sulphate etc. makes 10.76 and 19.35 г/л, accordingly). As a result of the regenerative reaction to a positive electrode and negative there is an electric current. E.M.F. depends, as always, on a stuff of electrodes and composition of electrolyte. And a limiting current strength – from the form of electrodes and speed of an electrochemical alteration / 1 /. In classical definition electrolytes are mentioned only as resorts spending a current. It is historical injustice. Really, electrolytes are an integral part of any secondary generator or a device and actively participate in current formation. Without their participation the active devices (metal or окись metal) is a dead load. And its share in current formation makes approximately 30-35 % from a blanket share (for example, in system zinc – ammonium chloride – manganese dioxide its theoretical share makes 18,42 %) / 3/.

Sea water in spite of the fact that it is rich with various ions is a feeble electrolyte, than acids and alkalis. But these properties do by its safer and offer to it other advantages as they destroy metal "sparing" and in the made devices inappreciable slope a voltage and service life is observed considerably incremented. *But the most important thing in these devices – they do not demand gymnastics, and recurrence is provided at the expense of recurring (or nonsingle) pouring by an electrolyte.*

The potential of devices (or batteries) on salty waters is very great. In system metal - salty water – oxide they have shown the best potential possibilities. Such batteries created two types filled with water of Ajdarkulja, were maintained within 2005-20017th years as an energy source for a food of low-power radio receivers KIPO of type KB-308B (a current of consumption 30 mA; voltages 3 V) and feeds of the fixture from 12 светоизлучающих diodes (a current of consumption 240 mA), and also the cellular telephone secondary generator (a photo 1 and 2) / 4/. The second type of the battery is agglomerated exclusively from a household waste where as an electrolyte salty water (a photo 3).



The element with dimension 55 x 55 x 123 can develop capacity of 7 Watt and at tenfold increase - it is possible to construct station of consistently connected ten elements with capacity of 70 Watt, perhaps, not small energy for maintenance of an individual economy.

An advantage of work of such stations consists in the following:

1. Availability of raw materials. Active materials used in element practice can serve as the basic knot and do not demand special technologies by their preparation (for example, an active material in the form of metal sheet).

2. Simplicity of installation. Differs the simplicity and does not demand the special techniques, special experts and major expenses, will not occupy a lot of time (2-3 days, a maximum week). The station does not depend on establishment terrain, as photoelectric installations and wind-driven generators.

3. Comfortableness and mobility. Such stations can be created in stationary and portable variants.

4. Simplicity of service.

5. The raised maintainability. After the service expiry of the term it is easy to exchange electrodes new and to flood an electrolyte that provides recurrence of power supply.

6. Pinch of a utilization factor of the active substances. The failed metallic electrodes are exposed to clearing, a meltdown and rolling in a leaf. Thus, the utilization factor of the active materials by degrees raises from a cycle in a cycle that leads to use of raw materials without waste.

7. Profitability. In case of need to stop its activities it is very simple – to merge an electrolyte and to maintain to the following need or a season, to store as much as necessary. Thereby in such stations the self-discharge is led to a minimum.

Thus, batteries with electrolyte from hydrochloric water (for lack of it is possible to replace with kitchen salt the diluted water) can compete to low-power acid and alkaline accumulators. And the offered station can be used as an independent radiant of power supply along with recommenced energy sources (photoelectric installations and wind-driven generators) as in combined, and a separate view. Besides, to use it in sea coastal resort bands (in beacons,) it is the most favorable to illumination of entertaining institutions and slot machines, vehicles in the economic plan without ecology damage. On the other hand occurrences of such stations considerably influence economy of oil and gas.

## REFERENCES

- [1] The polytechnical dictionary. M: Publishing house «Soviet encyclopedia», 1977, p.103. [2] S.M.Ochilov. Natural hydrochloric water – the active electrolyte for chemical cells. Fundamental and applied questions of physics. Materials of the international conference devoted to the 70 anniversary of Physico-technical institute. Tashkent, 2013, p.324-326. [3] V.G.Sochevanov. Galvanic cells. M: The state energy publishing house, 1951, p. 60. [4] S.M.Ochilov. New type of energy sources – batteries with hydrochloric water. «Technologies of the XXI-st century». Tashkent, 2016, p. 4-5.

## НОВЫЕ АСПЕКТЫ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСТВА: ЭЛЕКТРОННЫЕ СКУТТЕРУДИТЫ

Б.Л.Оксенгендлер<sup>\*,+</sup>, Б.М.Абдурахманов<sup>\*</sup>, Х.Б.Ашуров<sup>\*</sup>,  
М.М.Адиллов<sup>\*</sup>, Ш.К.Кучканов<sup>\*</sup>, С.Е.Максимов<sup>\*,+</sup>, В.Н.Никифоров<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Институт ионно-плазменных и лазерных технологий им. У.А.Арифова АН РУз, ул. Дурмонйули, 33, Академгородок, 100125 Ташкент, Узбекистан;

e-mail: [oksengendlerbl@yandex.ru](mailto:oksengendlerbl@yandex.ru)

<sup>+</sup> Институт химии и физики полимеров АН РУз, ул.А.Кадири, 7б, 100128, Ташкент, Узбекистан;

<sup>\*\*</sup>Физический факультет МГУ, Воробьевы горы, Москва, Россия;

### Аннотация

В работе излагаются новые представления о термоэлектрических свойствах гетерогенных полупроводников типа гранулированных сред, состоящих из микрокристалликов, разделённых оксидными прослойками, легированными специальными примесями. Показано, что в случае резонансного туннелирования через локальные состояния сложных дефектов в этих прослойках возможно существенное улучшение термоэлектрических характеристик (ZT). Особо выделен случай двухуровневых электронных состояний таких дефектов, которые при определённых условиях могут демонстрировать поведение типа автокаталитических реакций. Это открывает путь к регулярному проявлению синергетических эффектов в термоэлектричестве.

**Ключевые слова:** термоэлектричество, гранулированные полупроводники, двухуровневые дефекты в межкристаллических прослойках, резонансное туннелирование, синергетические эффекты.

Развитие современной альтернативной энергетики существенно стимулировало интерес к проблемам преобразования тепловой энергии, включая длинноволновую компоненту солнечного

излучения. В последние годы особенно большое внимание в проблеме термоэлектричества стали уделять как композиционным, так и наноструктурированным материалам, демонстрирующим достаточно большую величину числа Иоффе  $ZT$  [1,2]. Иногда эти два аспекта (композиционность и наноструктурированность) удаётся совместить в едином материале; именно таковы гранулированные полупроводники типа микрокристаллитов Si, разделённых окисной плёнкой  $\text{SiO}_x$  [3]. Для такого материала  $ZT = \frac{\sigma_{eff} \alpha_{eff}^2}{\chi_{eff}} T$ , где эффективные электропроводность  $\sigma_{eff}$ , коэффициент Зеебека  $\alpha_{eff}$

и теплопроводность  $\chi_{eff}$  удаётся получить на основе теории эффективной среды Ландауэра (см. [3]). Отметим, что существенного изменения в нужную сторону  $\sigma_{eff}$ ,  $\alpha_{eff}$  и  $\chi_{eff}$  можно ожидать, если модифицировать определённым образом прослойки  $\text{SiO}_x$ , так чтобы они содержали вакансионные комплексы определённого типа в достаточной концентрации, причём легированные специальными примесями. Требования к таким вакансионно-примесным комплексам следующие: 1) комплексы должны вносить в электронный спектр локальные уровни  $E_N$ , удовлетворяющие условию  $E_c^{Si} \leq E_N < E_c^{SiO_2}$  (Рис.1); 2) соотношение параметров двухгорбого потенциального рельефа электронов в прослойке  $\text{SiO}_x$  должно быть таково, чтобы интерференция на них электронных волн де Бройля создавала на них резонансные уровни  $E_N$  (Рис.2); 3) локальные свойства – сжимаемость и плотность указанных комплексов в прослойках  $\text{SiO}_x$  должны максимально отличаться от кристаллического Si ( $|\Delta\gamma/\gamma| \rightarrow 1$  и  $|\Delta\delta/\delta| \rightarrow 1$ ).

Понятно, что в таком материале одновременно реализуются условия для уникально высокой вероятности туннелирования сквозь прослойки  $\text{SiO}_x$ , (ибо речь идёт не о «гамовском», а о «резонансном» туннелировании, для которого коэффициент прохождения прослойки может быть весьма близок к единице [3]), что ведёт к радикально большому возрастанию  $\sigma_{eff}$ ; с другой стороны, достигается максимально большое сечение рассеяния длинноволновых фононов на комплексах вакансий со связанными примесями – классические свойства скуттерудитных материалов [4]. Очевидно, что максимально низкая теплопроводность осуществляется именно для вакансионных пустот, поскольку здесь сечение рассеяния фононов

$$\Gamma(\lambda) \sim \left[ v^2/\lambda^4 \left[ \left( \Delta\gamma/\gamma \right)^2 + \frac{1}{3} \left( \Delta\delta/\delta \right)^2 \right] \right] \rightarrow \frac{4}{3} \left( v^2/\lambda^4 \right), \quad (1)$$

где  $\lambda$  – длина волны фонона,  $v$  – объём вакансионного комплекса [5]. Внося мягкую локальную колебательную моду путём помещения примеси внутрь комплекса, можно слегка уменьшить  $\Gamma(\lambda)$ , но зато можно и нужным образом подобрать и глубину уровня  $E_N$ .

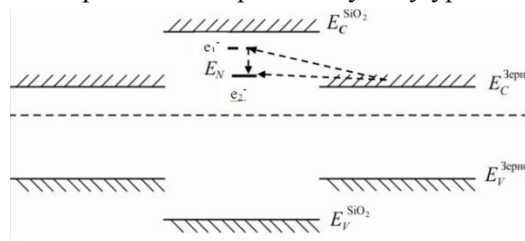


Рис.1. Зонная схема области Si, содержащей межзёренную прослойку  $\text{SiO}_x$  с резонансным дефектным уровнем  $E_N$ . ( $e_1^-$  - захват электрона на локальный уровень,  $e_2^-$  - захват второго электрона с образованием пары с отрицательной энергией Хаббарда).

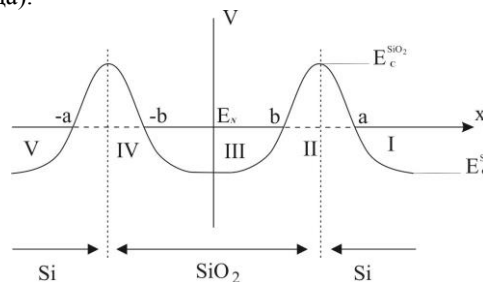


Рис.2. Потенциальный рельеф электрона в области плёнки  $\text{SiO}_x$ , содержащей примесь – вакансионный комплекс с резонансным уровнем  $E_N$ .

Отметим важную особенность таких интересных дефектов, как «примесь в полости + локализованный электрон». Близкие (но не тождественные) дефектные состояния изучались в твёрдом  $^4\text{He}$  [6,7], где было обнаружено сильное увеличение транспортного сечения рассеяния фононов на этих дефектах (Рис.3):

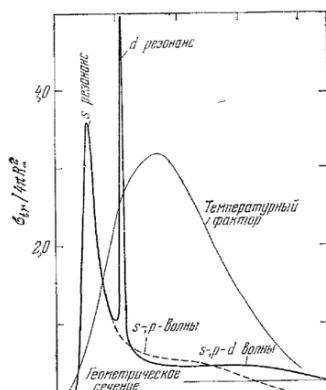


Рис.3. Сечение рассеяния фононов на анионе в  $^4\text{He}$  [6].

$$\sigma_{tr}^{ph} \approx \theta \Gamma(\lambda); \theta \gg 1 \quad (2)$$

Что касается коэффициента Зеебека для прослойки  $\text{SiO}_x$ , то оказывается, что  $\alpha_{\text{SiO}(x)} = \beta_{\text{SiO}(x)} / \sigma_{\text{SiO}(x)}$ , а величины и числителя, и знаменателя последней дроби при резонансном туннелировании одинаково (!) зависят от малого параметра для двугорбого потенциала (Рис.2), так что  $\alpha_{\text{SiO}(x)}$  оказывается лишь функцией (довольно сложной) от  $E_N$  (см. [3]). Подбирая тип примесей в полостях  $\text{SiO}_x$ , концентрацию полостей в  $\text{SiO}_x$  и размер кристаллитов, можно оптимизировать число Июффе  $ZT$ .

Вместе с тем, крайне любопытно отметить ещё одну особенность обсуждаемого материала. До сих пор обсуждалась ситуация, когда в прослойке реализуется на дефектном состоянии только один уровень (Рис.1, штриховая линия). Однако изучаемый дефект относится к так называемым «мягким» типам дефектов (с малой силовой константой); более того, окружающая среда ( $\text{SiO}_x$ ) – сильнополяризуемая система. Эти два обстоятельства прогнозируют тот факт, что данный дефект является U-отрицательным дефектом, у которого после захвата второго электрона на уже занятый уровень (штрих, Рис.1), 2-х-электронное состояние опускается ниже одноэлектронного [8]. Условие этого таково:  $e^2/a + U_{rec} < 0$  ( $U_{rec} < 0$ ). Теперь, после создания U-отрицательного состояния можно ожидать туннелирования уже этой пары и последующего участия в так называемой «парной проводимости» [9]. Важно отметить, что теперь наступает принципиально новая ситуация. Действительно, если разница энергий двух локальных уровней на дефекте много больше  $kT$  (т.е.  $\Delta E_N \gg kT$ ), то электронная реакция



необратима. Кроме того, её следует рассматривать как автокаталитическую. Если же к этим двум условиям добавить сильную неравновесность открытой системы, то мы неизбежно приходим к выводу: данная система – синергетическая со всеми характерными свойствами [10]. Один из таких эффектов – возможность спонтанного образования пространственных структур, в том числе и полярных (Рис.4; см. [10,11]). Такая ситуация характеризуется потерей зеркальной симметрии (относительно плоскости, проходящей через центр образца и перпендикулярно его оси), а, значит, для её образования не обязательно должны существовать несимметричные причины.

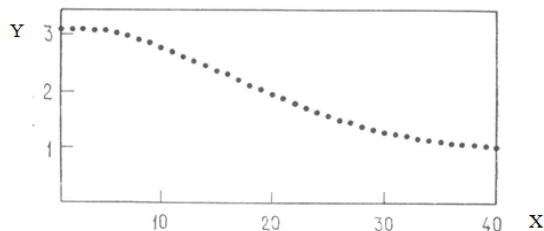


Рис.4. Спонтанное возникновение полярных пространственных структур [11]: X – пространственная координата, Y – концентрация электронов.

Следует отметить также, что для ответа на вопрос о том, может ли обсуждаемый механизм стать причиной тепловольтаического эффекта [12, 13], по-видимому, необходимо проведение дальнейших экспериментальных исследований.

Реализация такого материала, понятно, требует непростого сочетания обычной термодинамической технологии с дозированным радиационным воздействием ( $\gamma$ -лучи, ионы), причём имеющиеся на настоящий момент экспериментальные результаты весьма обнадеживают [3].

В заключение отметим, что обсуждаемый вариант термодинамического материала сочетает свойства скуттерудитов и свойства хорошо проводящих электронных материалов, что делает логичным их обозначение как «наноструктурированные электронные скуттерудиты».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Tritt T.M. Encyclopedia of Material Science and Technology. ISBN: 0-08-043152-6. P.1-11. [2] Дмитриев А.В., Звягин И.П. [Современные тенденции развития физики термоэлектрических материалов](#). //УФН. 2010. Т.180. №8. С.821-838. [3] Абдурахманов Б.М., Адиллов М.М., Ашууров М.Х., Ашууров Х.Б., Кучканов Ш.К., Максимов С.Е., Оксенгендлер Б.Л. Термоэлектрические характеристики гранулированных полупроводников с резонансным туннелированием носителей заряда для преобразования тепловой составляющей солнечного излучения. //Гелиотехника (Solar Engineering). 2015. №4. С.22–27. [4] Sales B.S., Mandrus D., Williams R.K. Filled Skutterudite Antimonides: A New Class of Thermoelectric Materials. //Science. 1996. V.272. P.1325. [5] Rayleigh L. Theory of Sounds. V.2. Dover Publ., New York, 1945. [6] Beym G., Barrera R., Pethich C. Mobility of the Electron Bubble in Superfluid Helium //Phys.Rev.Lett. 1969. 22. P.20-26. [7] Moroshkin P., Hofer A., Weis A. Atomic and molecular defects in solid  $^4\text{He}$ . //Phys.Rep. 2008. 469(1). P.1-57. [8] Аморфные полупроводники. под ред. Бродски М. Москва: «Мир». 1982. 419 с. [9] Юнусов М.С., Абдурахманова С.Н., Оксенгендлер Б.Л. и др. Пороговые радиационно-стимулированные эффекты в полупроводниках. Ташкент: «Фан». 1989. [10] Николис Дж., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. Москва: «Мир». 1979. [11] Баблюянец А. Молекулы, динамика, жизнь. Москва: «Мир». 1990. 374 с. [12] Абдурахманов Б.М., Адиллов М.М., Ашууров М.Х., Ашууров Х.Б., Оксенгендлер Б.Л. Тепловольтаические свойства микрозернистого кремния. //Гелиотехника (Solar Engineering). 2011. №2. С.61-65. [13] Саидов А.С., Лейдерман А.Ю., Маншууров Ш.Т. Природа тепловольтаических токов и напряжений, наблюдаемых при исследовании поликристаллического кремния, полученного пятикратной переплавкой технического кремния на солнечной печи. //Гелиотехника (Solar Engineering). 2011. №2. С.7-9.

## О ПРИРОДЕ «ХЛОРНОГО ПАРАДОКСА» В ОРГАНИКО-НЕОРГАНИЧЕСКИХ ПЕРОВСКИТАХ

Б.Л.Оксенгендлер, Н.Р.Ашууров, М.И.Ахмедов,  
Б.Аскарлов, С.Е.Максимов, И.Н.Нурғалиев, С.Ш.Рашидова

Институт химии и физики полимеров АН РУз,  
100128, г.Ташкент, ул. А.Кадыри 7б,  
e-mail: [oksengendlerbl@yandex.ru](mailto:oksengendlerbl@yandex.ru)

### Аннотация

*В работе рассмотрен так называемый хлорный парадокс, представляющий собой совокупность связанных необычных эффектов в смешанных перовскитах  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$ , труднообъяснимый с позиций обычной физики полупроводников. Теоретический анализ показывает, что, по-видимому, интерпретация этого парадокса может быть дана с использованием необратимых реакций замещения в твёрдой фазе междуузельными атомами I узловых атомов Cl с последующей диффузией атомов Cl к стокам.*

**Ключевые слова:** солнечные ячейки, перовскит, хлорный парадокс.

Создание солнечных ячеек на основе перовскитов является в настоящее время одним из наиболее интенсивно развивающихся направлений альтернативной энергетики [1,2]. Вместе с тем, несмотря на достигнутые высокие показатели эффективности преобразования энергии в перовскитных ячейках, многие весьма важные вопросы физики происходящих в них процессов всё ещё остаются неразрешёнными. Характерным примером является обнаружение целого комплекса эффектов [3], получившего название «хлорного парадокса»: при переходе от монокристалла  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  к неупорядоченному твёрдому телу  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$ , вопреки многим представлениям физики неупорядоченных сред, происходит резкое улучшение ряда свойств кристаллов.



В самом общем виде всю совокупность необычных свойств можно разбить на 4 типа эффектов:

- 1) Радикальные изменения в области морфологии при участии в процессах хлора.
- 2) Существенное улучшение электронных свойств смешанных кристаллов по отношению к бесхлорному материалу.
- 3) Не вполне ясная информация о расположении атомов хлора в кристалле вплоть до вопроса о его наличии внутри объёма образца.
- 4) Положительное влияние на выходные электронно-физические характеристики прибора при участии хлора в технологических операциях.

Опишем кратко совокупность наблюдаемых экспериментальных эффектов. Так, диффузионная длина свободного пробега носителей заряда составляет у смешанного перовскита 1 мкм, тогда как у йодистого перовскита она порядка 100 нм. Большая разница ионных радиусов I и Cl делает, по-видимому, невозможным «центрально-узловое» внедрение атомов Cl в кристаллическую решётку перовскита, т.е. образование твёрдого раствора. С этой точки зрения трудно дать объяснение улучшению оптоэлектронных характеристик смешанного перовскита. В связи с этим, в литературе лишь констатируется факт того, что присутствие атомов хлора, по-видимому, способствует развитию хорошей морфологии (высокие кристалличность и степень покрытия субстрата без присутствия пор). Более того, ввиду отсутствия следовых количеств атомов хлора в перовскитной плёнке ставится вопрос о неправомерности использования формулы  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$  [4]. Считается [5], что присутствие атомов хлора в прекурсор определяет оптимальную динамику процесса кристаллизации перовскита с образованием кристаллитов с размерами более 500 нм, что приводит к значительному уменьшению дефектов на интерфейсах, ответственных за рекомбинационные процессы. Тем не менее, авторы [5] считают, что незначительные количества (<1%) атомов хлора остаются на границах раздела кристаллитов либо на поверхности оксида металла (фотоанод). Использование наиболее чувствительных методов анализа следовых количеств различных атомов [4] позволило сделать однозначный вывод об отсутствии атомов хлора в решётке, а обнаружение их в незначительных количествах другими авторами, по-видимому, связано с непрореагировавшим прекурсором  $\text{PbCl}_2$ , либо их присутствием на границе раздела кристаллитов или поверхности оксида металла. Интересное заключение сделано в [6] по проблеме влияния природы органического катиона на оптоэлектронные характеристики перовскитов. Ранее теми же авторами была продемонстрирована возможность получения хорошей морфологии перовскитной плёнки с образованием кристаллитов больших размеров, используя избыток органического прекурсора ( $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ ), далее при сравнении прекурсоров на основе свинца (йодистого, хлористого, ацетата) обнаружилось, что ацетат свинца даёт такие же результаты, как и хлорид свинца. Данный факт, по мнению авторов, связан с высокой летучестью соединения метиламмония с ацетатом, что в итоге ускоряет нуклеацию и рост кристаллов перовскита, т.е. роль атомов хлора из-за отсутствия их в элементарной ячейке маловероятна.

Указанные факты свидетельствуют о достаточной сложности данной проблемы, в то же время выявление роли атомов хлора в усилении оптоэлектронных характеристик представляется особенно важным в понимании путей повышений конверсионных показателей солнечных ячеек на основе перовскитов.

Упомянутые выше изменения электронных характеристик при переходе от  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  к  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$  имеют весьма нетривиальный характер (Табл.1). Так, оказалось, что подвижность (коэффициент диффузии) электронов и дырок значительно возрастает и, вместе с тем, резко увеличивается время жизни носителей заряда (Табл.1). Попытки теоретически объяснить обнаруженные особенности в рамках непротиворечивых моделей (см. [1]) окончились неудачей.

Таблица 1. Значения констант диффузии D и диффузионных длин  $L_D$  в перовскитах [3].

Перовскит	Носители	D (см <sup>2</sup> с <sup>-1</sup> )	$L_D$ (нм)
$\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$	Электроны	$0,042 \pm 0,016$	$1069 \pm 204$
	Дырки	$0,054 \pm 0,022$	$1213 \pm 243$
$\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$	Электроны	$0,017 \pm 0,011$	$129 \pm 41$
	Дырки	$0,011 \pm 0,007$	$105 \pm 32$

Необходимо в рамках единых представлений природу аномалий, указанных в Таблице, на основе различий свойств двух типов перовскитов.



Будем исходить из следующих очевидных позиций: а) аномально большая низкочастотная поляризуемость  $\epsilon_0$  обоих типов перовскита, вызванная наличием диполя  $(\text{CH}_3\text{-NH}_3)^+$ ; б) различие ионных радиусов  $\Gamma$  и  $\text{Cl}$  (2,16 Å и 1,81 Å соответственно [7]; в) ионно-ковалентный характер связей в этих перовскитах; г) существенно различная поляризуемость ионов  $\Gamma$  и  $\text{Cl}$  ( $7,10 \cdot 10^{-24} \text{ см}^3$  и  $3,66 \cdot 10^{-24} \text{ см}^3$ ).

Совокупность этих свойств приводит к следующим следствиям.

## 2. Электронные зонные состояния в $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ и $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$ .

Большая величина параметра электрон-фононной связи  $\alpha = \left( \frac{e^2}{\tilde{\epsilon}} \right) \sqrt{\frac{m^*}{2\hbar^2 \Omega}}$ , где  $\frac{1}{\epsilon} = \frac{1}{\epsilon_\infty} - \frac{1}{\epsilon_0}$ ,  $\Omega$  – характерная частота колебания ионов, вносящих основной эффект в поляризацию кристалла, ведёт, во-первых, к опусканию дна зоны проводимости  $E_c(\vec{k}) = \left( \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*} \right) \left( 1 - \frac{\alpha}{6} \right) - \alpha \hbar \Omega$ ; во-вторых, к увеличению эффективной массы носителей заряда  $m^* \rightarrow \frac{m^*}{\left( 1 - \frac{\alpha}{6} \right)}$ ; в третьих, к зависимости длины свободного пробега  $l$  носителей, а, значит, и их подвижности, от величины диэлектрической проницаемости  $l \sim \frac{\epsilon_0}{m_{\text{eff}}^\chi}$ , где  $\chi = \frac{1}{2} \div \frac{3}{2}$  в зависимости от температуры образцов при рассеянии на оптических фонах в полярном полупроводнике.

Существенное различие в характеристиках данных носителей заряда при переходе от  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  к  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$  прежде всего связано с изменением величины диэлектрической проницаемости  $\epsilon_0$ . Действительно, поскольку

$$\epsilon_0 = 1 + 4\pi \left[ \frac{\sum N_j \alpha_j}{\left( 1 - \frac{4\pi}{3} \sum N_j \alpha_j \right)} \right] \quad [8], \text{ где } N_j \text{ – концентрация}$$

атомов (ионов) типа  $j$ , то замещение хлором регулярного йода в пропорции  $x:(3-x)$  (в изучаемом случае число долей %  $x$  – см. [1,2]), уменьшает  $\epsilon_0$ , что изменяет величину щели и ведёт к возрастанию подвижности носителей  $D$  (см. Табл.1).

## 3. Дефектные состояния в $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ и $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$ и время жизни носителей.

При условиях экспериментов [2] время жизни носителей заряда должно определяться рекомбинацией на глубоких центрах. Методами квантовой химии (DFT) строго установлено, что такими центрами могут быть междоузельные атомы йода  $I_i$ , образующиеся в результате условий осаждения плёнки материала. Почему же введение атомов  $\text{Cl}$  в решётку уменьшает сечение рекомбинации на состояниях  $I_i$ ? Фактически, считается [8], что все носители, рекомбинирующие через дефектные центры, сначала должны захватываться на более или менее дальнюю орбиту (с сечением  $\sigma_i$ ), а затем уже происходят внутрицентровые процессы (вероятность  $\gamma$ ). В соответствии с этим, общее сечение рекомбинации  $\sigma_p = \sigma_i \gamma$ . По всей вероятности, внутрицентровая часть протекающего процесса рекомбинации не зависит от присутствия  $\text{Cl}$ , тогда как сечение захвата  $\sigma_i = \pi R_{\text{att}}^2$

чувствительно к наличию в решётке  $\text{Cl}$ . Действительно, отрицательная дилатация (уменьшение объёма)  $\Omega_0^{\text{Cl}}$  реализуется после замены (в результате технологии) атома йода хлором. Это вызывает деформацию, которая для концентрации атомов  $\text{Cl}_S \tilde{n} \sim x$  имеет вид

$$\langle \epsilon_{ii}^{\text{Cl}} \rangle = \frac{1}{3} (1 + \nu) (1 - \nu) \left( \frac{4G}{k} \right) \Omega_0^{\text{Cl}} \tilde{n} < 0 \quad [9]. \text{ Поскольку деформация на расстоянии } R \text{ от междоузельного } I_i$$

имеет вид  $\langle \epsilon_{ii}^I \rangle = \Omega_0^I \frac{1}{3} (1 + \nu) (1 - \nu) \left( \frac{4G}{k} \right) \frac{1}{R^3}$  [9], а деформационный потенциал в перовските есть  $E_{\text{def}}$ , то

условие захвата носителя центром  $I_i$  в присутствии  $\text{Cl}_S$  будет  $\frac{3}{2} k_B T < E_{\text{def}} \left[ \left| \langle \epsilon_{ii}^I \rangle \right| - \left| \langle \epsilon_{ii}^{\text{Cl}} \rangle \right| \right]$ . Отсюда сразу

видно, что  $R_{\text{att}}^2 \sim \left[ \left( \frac{3}{2} k_B T / E_{\text{def}} \right) + \left| \langle \epsilon_{ii}^{\text{Cl}} \rangle \right| \right]^{-2/3}$ , т.е. сечение захвата, а значит и вероятность рекомбинации носителей заряда в образцах без  $\text{Cl}$  ( $\langle \epsilon_{ii}^{\text{Cl}} \rangle = 0$ ) существенно больше, чем в образцах с  $\text{Cl}$  ( $\langle \epsilon_{ii}^{\text{Cl}} \rangle$

не равно 0). Это находится в согласии с экспериментом (Табл.1). В случае же малых концентраций  $x$  узельного  $\text{Cl}$  возникает ряд особенностей: имеется большая вероятность рождения  $I_i$  в областях вне радиуса действия отрицательной дилатацией от узлового  $\text{Cl}$ . В этом случае возможен процесс

«подсасывания» атомов  $I_i$  к узловому  $Cl_s$ , в результате чего опять резко уменьшается радиус захвата носителя заряда на  $I_i$ . Очевидно, что описываемый процесс может быть реализован лишь когда температура выше температуры диффузии междоузельного йода. Это и будет *experimentum crucis* описываемого (второго) режима.

#### 4. Вибронная модель реакции замещения между атомами $Cl$ и $I$ в кристалле перовскита.

Предыдущие рассуждения в значительной степени опираются на физико-химические процессы, происходящие в локальной области перовскита непосредственно с участием атомов  $Cl$  и  $I$ , по существу, при их контакте, что наводит на мысль описать совокупность происходящих явлений в рамках некой квазихимической реакции весьма специфического типа. Проанализируем эту реакцию более подробно. После окончания стадии подхода  $I_i$  к узловому  $Cl_s$  образуется гантельный дефект  $\{Cl_s I_i\}$ . Дальнейшая эволюция гантельного дефекта такого типа была детально изучена ранее в радиационной физике полупроводников, а именно, в виде реакции замещения («вытеснения») в кремнии [10]:



Детали такой реакции, ставшей базовой для всей низкотемпературной радиационной физики, исследована в [10] в рамках псевдоэффекта Яна-Теллера; в современных терминах можно говорить о вибронной модели. Кратко, суть этой реакции состоит в том, что весьма близкие по своей химической природе, но не тождественные компоненты гантели ( $\{Al_s Si_i\}$  в [10] и  $\{Cl_s I_i\}$  в нашем случае смешанного перовскита соответственно) можно описать на основе двух колебательных степеней свободы  $Q_g$  и  $Q_u$ , таких, что изменение  $Q_g$  фиксирует сжатие или растяжение гантели, тогда как  $Q_u$  – перемещение её центра инерции. Всю динамику системы удаётся изучить при расчёте потенциального рельефа  $E(Q_g, Q_u)$ , причём  $Q_g$  и  $Q_u$  «перемешиваются» через вибронное взаимодействие, превращая задачу в нелинейную. Оказалось [10], что при сжатии гантели барьер реакции  $Cl_s + I_i \rightarrow I_s + Cl_i$  понижается, и при некотором  $Q_g^*$  вообще ликвидируется (Рис.1), так что  $Q_u$  меняется скачком, а это означает сам элементарный акт реакции замещения, идущей почти всегда *атермически*. Константы последовательных процессов диффузионного дрейфа  $Cl_s$  и  $I_i$  и вытеснения  $K_d$  и  $K_{out}$  дают для эффективной константы реакции выражение:

$$K_{eff} = K_d * K_{out} / (K_d + K_{out}).$$

Ясно, что при  $K_d \gg K_{out}$  имеем  $K_{eff} \approx K_d$ , т.е. реакция ограничена диффузией, тогда как при  $K_{eff} \ll K_d$  реакция ограничена вытеснением. Эти соображения указывают на то, как следует обрабатывать эксперименты по температурной зависимости реакции вытеснения.

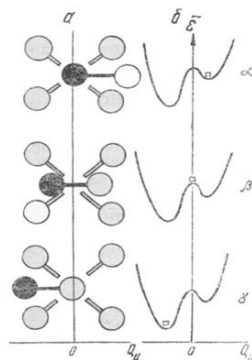


Рис.1. Геометрия (а) и энергетика (б) гантельных конфигураций из гетероатомов

Комплекс экспериментальных данных (см выше) указывает, что общая  $K_{eff}$  очень высока, что даёт наблюдаемый макроэффект. Понижение температуры позволит выявить физику реакции замещения. Важным представляется тот факт, что после замещения атом  $Cl_i$  очень быстро идёт на сток, другие же – остаются в узлах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Н.Р.Ашуров, Б.Л.Оксенгендлер, С.Ш.Рашидова, А.А.Захидов. Состояние и перспективы солнечных ячеек на основе перовскитов. //Гелиотехника. 2016. Т.52, №1. С.7-18. [2] N.-G.Park. Crystal growth engineering for high efficiency perovskite solar cells //Cryst.Eng.Comm. 2016. V.8. P.5977–5985. [3] S.D.Stranks, G.E.Eperon et al. Electron-hole diffusion lengths exceeding 1 micrometer in an organometal trihalide perovskite absorber. //Science. 2013. V.342. P.341-344. [4] M.I.Dar, N.Arora, P.Gao, Sh.Ahmad, M.Graetzel,

M,Kh.Nazeeruddin. Investigation regarding the role of chloride in organic-inorganic halide perovskites obtained from chloride-containing precursors. //Nano Letters. 2014. V.14. P.6991-6998. [5] G.Grancini, S.Marras, et al. The impact of the Crystallization Processes on the structural and optical properties of hybrid perovskite films for photovoltaics. //Phys.Chem. Letters. 2014. V.9. P.3836-3842. [6] W.Zhang, M.Saliba et al. Ultrasoother organic-inorganic perovskite thin-film formation and crystallization for efficient planar heterojunction solar cells. //Nature Comm. 2015. DOI: 10.1038/ncomms7142 [7] Ч.Киттель. Введение в физику твердого тела. М.: «Наука», 1978. [8] Б.Ридли. Квантовые процессы в полупроводниках. М.: «Мир», 1986. [9] А.М.Косевич. Физическая механика реальных кристаллов. Киев: «Наукова думка», 1981. [10] Элементарные атомные процессы и электронная структура дефектов в полупроводниках. Под ред. М.С.Юнусова, А.Ш.Махмудова, Б.Л.Оксенгендлера, Б.Аскарлова и др. «Фан». Ташкент. 1986. 174 с.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ КАК «ЗЕЛЕНАЯ» ЭНЕРГЕТИКА.

### ЧАСТЬ 1. ИСТОЧНИКИ И ОБЪЕМ ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ. ЭКОНОМИКА И ЭКОЛОГИЯ

Г. Абдурахманов, Г. С. Вахидова, С. А. Маматкулова

Научно-технический центр АО «Узбекэнерго»  
Ташкент 100125, Узбекистан, ул. Дурмонйули, 29  
e-mail: [vgulbahor@mail.ru](mailto:vgulbahor@mail.ru)

#### Аннотация

Оценен объем вторичных энергоресурсов в Узбекистане по источникам их образования, рассмотрены экономические и экологические следствия их использования. Во второй части (Научно-технические аспекты) рассмотрены достоинства и недостатки используемых и перспективных способов преобразования вторичных энергоресурсов в электричество, а также проблемы, которые нужно решить.

**Ключевые слова:** энерго- и ресурсосбережение, вторичные энергоресурсы, промышленность

#### 1. Введение

Могущество современной технократической цивилизации определяется объемом используемой энергии различных видов. Наиболее универсальной и удобной для производственных и бытовых целей является электрическая энергия. Поэтому одним из важных показателей степени развития современного общества является потребление электрической энергии на душу населения, и для непрерывного экономического развития любого государства требуется рост ее производства (2011 год, кВт·ч/год: Исландия - 52376, США - 13394, Германия - 7215, Россия - 6431, Узбекистан - 1648; <http://svspsb.net/danmark/potreblenie-elektroenergii-stran.php>).

В Узбекистане поставлена задача – удвоить производство электроэнергии к 2030 году. Однако современное производство электроэнергии сопровождается одновременным превращением в тепло 50-70 % энергии первичных энергоносителей (природный газ, нефть, уголь). В производственных процессах также до 80 % энергии (в том числе и электрической) превращается в тепло. Все это тепло, в конечном итоге рассеиваемое в окружающей среде, образует вторичные энергоресурсы (ВЭР), которые не только съедают большую часть энергии первичных энергоносителей, но и наносят вред окружающей среде (тепловое загрязнение). Поэтому преобразование энергии ВЭР в электрическую позволяет одновременно экономить первичные энергоносители (природный газ, нефть, уголь) и улучшить экологическую обстановку, т. е. является «зеленой» энергетикой в полном смысле.

#### 2. Объем вторичных энергоресурсов Узбекистана

Объем ВЭР Узбекистана оценим на примерах тепловых электростанций, стекольных, цементных и кирпичных заводов, автомобилотранспорта. Сюда же можно отнести попутный нефтяной газ, сжигаемый в количестве примерно 1,5 млрд. м<sup>3</sup> в год на месте нефтедобычи (<https://www.gazeta.uz/ru/2015/04/22/gas>).

Выработка электроэнергии на электростанциях Узбекистана в 2014 году составила около 56 млрд. кВт·ч ([http://news.uzreport.uz/news\\_4\\_r\\_138465.html](http://news.uzreport.uz/news_4_r_138465.html)). Электрический коэффициент полезного действия (кпд) около 30 % (мы здесь не рассматриваем модернизацию электростанций добавлением газотурбинных установок), так что дополнительно образуется 0,7·56/0,3=130 млрд. кВт·ч ВЭР в год, которые большей частью идут на отопление и горячее водоснабжение. Отсюда

возникают проблемы со снижением эффективности электростанций после завершения отопительного сезона.

В настоящее время в Узбекистане действуют **8 цементных, 4 стекольных, более 728 кирпичных заводов** (<http://tashkent.uz/index.php?view=article&id=4879&clean&print>). Энергетические показатели цементных и стекольных заводов приведены в табл. 1 и 2. Энергетические показатели кирпичных заводов не удалось найти, поэтому расчет произведен по общему количеству произведенного кирпича (табл. 3) и по нормам расхода энергии (Нормативы энергопотребления; ГОСТ Р 54194-2010).

На **цементных заводах** ВЭР (бросовое тепло) образуются при обжиге и охлаждении клинкера (рис. 1). Кпд печей обжига клинкера 70 % с учетом рекуперации (подогрева обожженным клинкером воздуха, подаваемого в печь). Температура воздуха после охлаждения клинкера около 570-570 К, общее количество ВЭР цементных заводов  $0,33 \cdot 22,28 = 7,35$  млрд. кВт·ч (табл. 1).

Кпд **стекловаренных печей** (рис. 2) с учетом рекуперации составляет 18-26 %, температура на выходе рекуператора стекловаренной печи около 870 К, что в среднем дает  $0,78 \cdot 8,59 = 6,7$  млрд. кВт·ч ВЭР в год (табл. 2).

На **кирпичных заводах** Узбекистана в 2012 году произведено 2,03 млрд. шт. жженого кирпича (<http://tashkent.uz/index.php?view=article&id=4879&clean&print>) с расходом тепловой энергии 7 МДж/шт = 1,94 кВт·ч/шт, при этом расходуется 1,16 млрд. кВт·ч электроэнергии. Кпд печей обжига кирпича около 40 %, температура газов на выходе печи 770-870 К, и годовой объем ВЭР составляет 7,2 млрд. кВт·ч.

Таблица 1. Расход энергии и объем вторичных энергоресурсов цементных заводов Узбекистана

№	Предприятие	Годовой объем продукции, млн. тн	Расход эл. энергии, млн. кВт·ч	Расход тепла, млрд. кВт·ч	Объем ВЭР, млрд. кВт·ч
1	АО "Кизилкумцемент"	3,08	369,6	6,7	2,2
2	АО "Ахангаранцемент"	1,986	238,3	3,5	1,16
3	АО "Кувасайцемент"	1,11	133,2	2,4	0,79
4	АО "Бекабадцемент"	0,82	98,4	1,8	0,59
5	Джизакский завод	0,75	90	1,6	0,53
6	Ферганский завод	0,15	18	0,33	0,11
7	Андижанские заводы (2)	0,12+ 0,02	16,8	0,3	0,1
8	АО Каракалпакцемент	0,4	48	0,87	0,29
9	АО Джаркурганцемент	2,2	264	4,78	1,58
	<b>Всего</b>	<b>10,26</b>	<b>1231,2</b>	<b>22,28</b>	<b>7,35</b>

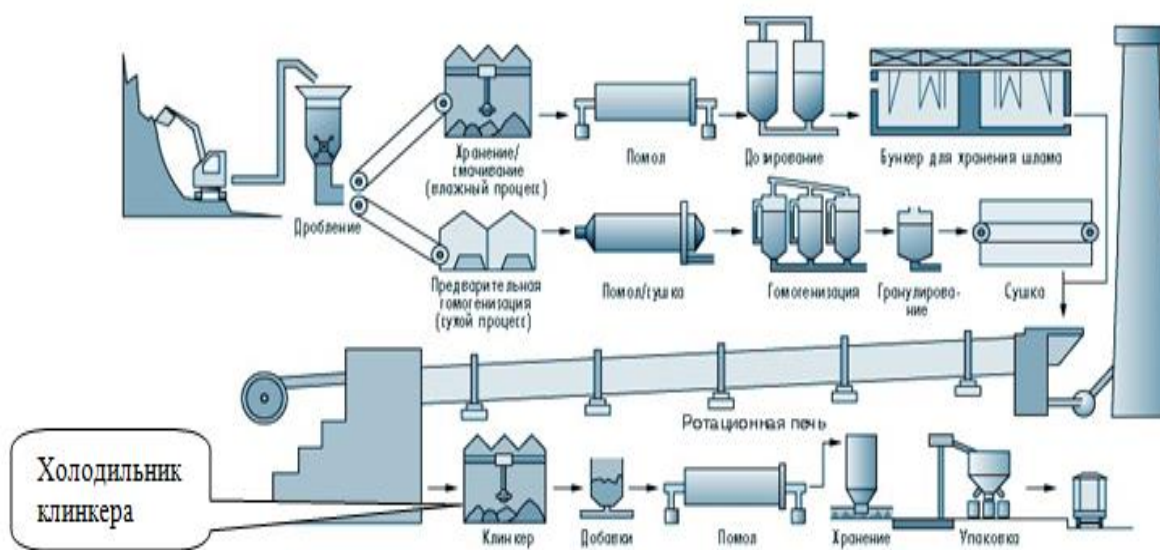


Рис. 1. Схема цементного производства и место образования бросового тепла

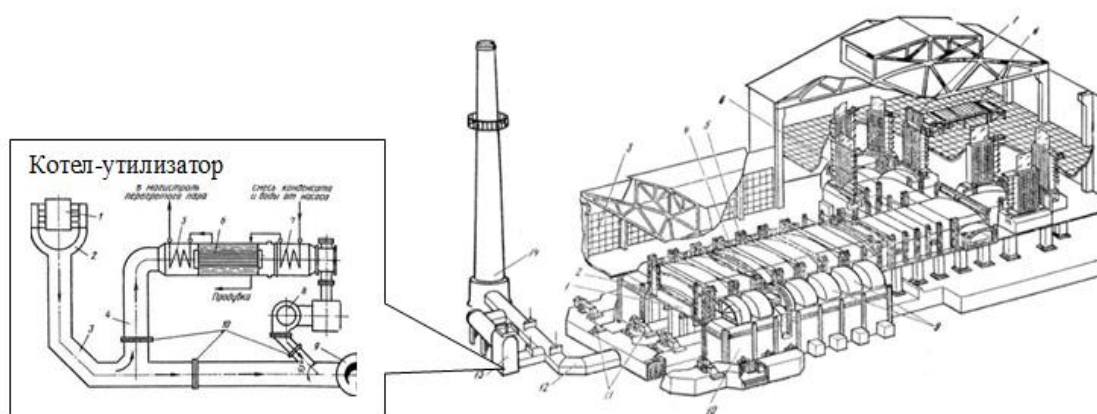


Рис. 2. Ванная стекловаренная печь и место утилизации бросового тепла: 1 — бассейн, 2— загрузочный карман, 3 — здание цеха, 4 — главный свод, 5 — колонны обвязки печи, 6—машина вертикального вытягивания, 7 — отломщик рамного типа, 8 — роликовый конвейер, 9 — горелки, 10— регенераторы, 11 —воздушный шибер, 12 — боров для отвода отходящих газов, 13 — котел-утилизатор, 14 — дымовая труба.

Итого по цементным, стекловаренным и кирпичным заводам имеем  $7,35 + 7,39 + 7,2 = 21,84$  млрд. кВт·ч ВЭР. Преобразование 20 % этой бросовой энергии дает 4,37 млрд. кВт·ч электричества, что более чем в 2 раза превышает потребности этих предприятий в электрической энергии:  $1,23 + 0,35 + 0,29 = 1,87$  млрд. кВт·ч.

Здесь и далее КПД преобразователя принят равным 20 %, причина такого выбора будет пояснена во второй части настоящей работы.

Таблица 2. Расход энергии и объем вторичных энергоресурсов стекольных заводов Узбекистана

№	Предприятие	Годовой объем, тысяч тн	Расход электроэнергии, млн. кВт·ч	Расход тепла, млрд. кВт·ч	Объем ВЭР, млрд. кВт·ч
1	АО АСЛ ОЙНА (Ташкент)	70	31.5	60 720	0,56
2	АО Газалкент ойна	270	126	300 3600	2,81
3	АО Кварц	345	157	370 4440	3,46
4	Навои (проект)	70	31,5	60 720	0,56
	<b>Всего</b>	<b>755</b>	<b>346</b>	<b>790 9,44</b>	<b>7,39</b>

В приведенных выше расчетах и таблицах приняты следующие удельные характеристики потребления энергии (Дзюзер, 2009; ГОСТ Р 54194-2010; Нормативы энергопотребления 2012):

Таблица 3. Удельные характеристики потребления энергии

Производство	Тепло, кВт·ч	Электроэнергия, кВт·ч
Лицевой кирпич, на 1 шт.	2,5-3	0,5-1
Цемент, на 1 кг	1,8-2,4	0,15
Стекло, на 1 кг	2,2-2,5	0,4-0,5

Высшая теплотворная способность природного газа  $35\ 000 - 43\ 000\ \text{кДж/м}^3 = 8-12\ \text{кВт}\cdot\text{ч/м}^3$ .

**Попутный нефтяной газ** при КПД преобразователя 20 % может дать  $1,5 \cdot 8 \cdot 0,2 = 2,4$  млрд. кВт·ч электроэнергии.

В Узбекистане в 2013 году имелось около 1,65 млн. автомобилей (грузовых и легковых, <http://www.bibi.uz/avtonovosti/866>), и среднегодовое потребление моторного топлива было 5 млн. т (<http://atmosfera.uznature.uz/userfiles/files/0003.pdf>). Теплота сгорания моторного топлива  $44\ \text{МДж/кг} = 12\ \text{кВт}\cdot\text{ч/кг}$ . Примерно 40 % тепла от сгорания топлива выбрасывается в окружающую среду с выхлопными газами с температурой 820-970 К, еще 30 % - через систему охлаждения. В то же время от 2 до 10 % мощности мотора (в зависимости от класса автомобиля) расходуется на вращение электрогенератора, обеспечивающего работу электрооборудования автомобиля. Преобразование 5 % тепла выхлопных газов в электричество (обычно в автомобилях больше не требуется) позволит избавиться от обычного электрогенератора и сэкономить до 5 % моторного топлива, т. е. 210 тысяч тонн или  $210 \cdot 10^6 \cdot 12 = 2,5$  млрд. кВт·ч энергии.



Таблица 4. Объемы ВЭР и возможных объемов электроэнергии по группам источников

№	Источник вторичных энергоресурсов	Годовой объем продукции	Расход тепла, млрд. кВт·ч	КПД, %	Расход эл. энергии, млрд. кВт·ч	Объем ВЭР, млрд. кВт·ч	Выработка ЭЭ из ВЭР, млрд. кВт·ч
1	Тепловые электростанции	56 млрд. кВт·ч	187	30	8,4	131	26,2
2	Цементные заводы	10,3 млн. т	22,28	60-70	1,23	7,35	1,47
3	Стекольные заводы	755 тыс. т	8,59	22	0,35	7,39	1,48
4	Кирпичные заводы (>728 на 01.01.2010)	2,026 млрд шт.	12	40	4,64	7,2	1,44
5	Автотранспорт	1650 тыс. шт.(2013)	5 млн. т топлива*	30		24	1,2-4,8
6	Металлургические заводы	Данных нет, но объем ВЭР можно примерно				22	4,4
7	Химические предприятия	Оценить в 22 млрд. кВт·ч (как у цементных, стекольных и кирпичных заводов вместе)					
8	Попутный нефтяной газ	1,5 млрд. м <sup>3</sup>				12	2,4
	<b>Всего</b>		<b>273,19</b>		<b>14,88</b>	<b>210,94</b>	<b>40,4</b>

ВЭР металлургических, химических и нефтехимических предприятий можно также оценить примерно в 20-24 млрд. кВт·ч тепла или 4-4,8 млрд. кВт·ч электроэнергии. Здесь оценки, подобные приведенным выше, затруднительны из-за сложных переходов тепловой энергии по различным технологическим операциям.

Таким образом, общий объем электроэнергии, которую можно получить от ВЭР Узбекистана, может быть оценен в 40-41 млрд. кВт·ч при КПД преобразования 20 % (табл. 4).

### 3. Экономические аспекты

Выработка дополнительно 40-41 млрд. кВт·ч электроэнергии без затрат первичных энергоносителей и экономия более 200 тысяч тонн моторного топлива (см. выше) дают в год прямой экономический эффект 40-41 млрд. кВт·ч · 200 сум/кВт·ч = 8-8,2 триллиона сум (электричество) и  $200 \cdot 10^6 \cdot 1,4 \cdot 2000$  сум/л = 560 млрд. сум (моторное топливо). Суммарный экономический эффект в год **8,6-8,8 триллионов сум** или **7,5-8 млн. т условного топлива** (у.т., дает около 8 кВт·ч/кг тепла). Здесь учтено, что расход топлива на электростанциях Узбекистана в 2011 году составлял 379 г у.т. на 1 кВт·ч выработанной электроэнергии (<http://energo-cis.ru/wyswyg/file/Uzbekistan.pdf>).

Отметим также, что производство на месте необходимой электроэнергии предприятиями цементной, стекольной, металлургической и химической промышленности, кирпичными заводами устраняет потери на линиях электропередачи и трансформаторных подстанциях, что дает дополнительный экономический эффект около 5 % от стоимости потребляемой ими электроэнергии (табл. 4), т. е.  $6,22$  млрд. кВт·ч ·  $0,05 \cdot 200$  сум/кВт·ч = 62,2 млрд. сум.

### 4. Экологические аспекты

Экологические аспекты следуют из того, что 1) почти на 20 % сокращается количество тепла, выбрасываемого в окружающую среду предприятиями и автотехникой; 2) сокращается расход смазочных материалов и перерабатываемых отходов производства электроэнергии; 3) сокращается на 20 % расход первичных (ископаемых) энергоносителей для производства электроэнергии. Все это благоприятно влияет на состояние окружающей среды, на условия жизни и здоровье людей.

### 5. Проблемы использования вторичных энергоресурсов

Для ВЭР характерны низкая плотность потока энергии и низкая температура носителей (горячий воздух и дымовые газы), что приводит к низкому КПД, большим габаритам и материалоемкости оборудования, работающего на известных и хорошо отработанных принципах преобразования тепловой энергии в электрическую (фазовые превращения жидкость-пар-жидкость). При использовании котлов-утилизаторов или абсорбционных чиллеров потребуется строительство дорогих теплотрасс или хладопроводов от источника ВЭР до потребителя. Низкий КПД преобразования ВЭР в электричество у этих устройств делает их экономически недостаточно эффективными даже при учете того, что используемое тепло бесплатное. Физические и технические проблемы, которые необходимо решить для эффективного использования ВЭР, будут рассмотрены во второй части настоящей работы (Научно-технические аспекты).



## 6. Выводы

1. Из ВЭР тепловых электростанций, промышленных предприятий в Узбекистане можно получать ежегодно электроэнергию до 40 млрд. кВт·ч при КПД 20% (в 2015 г. все электростанции АО Узбекэнерго выработали 56 млрд. кВт·ч электроэнергии).

2. Использование ВЭР сокращает потребление первичных энергоносителей (природный газ, нефть и уголь) на 7,5-8 млн. т у.т. в год.

3. Использование ВЭР сокращает тепловое загрязнение окружающей среды.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] ГОСТ Р 54194-2010 Ресурсосбережение. Производство цемента. Наилучшие доступные технологии повышения энергоэффективности. [2] Дзюзер В. Я., 2009. Теплофизические основы разработки энергоэффективных стекловаренных печей. Автореф. дисс. доктора тех. наук. Екатеринбург. [3] Маметова М., 2010. Курилиш саноатининг инвестицион истикболлари. <http://tashkent.uz> [4] Нормативы энергопотребления 2012. Утверждены постановлением Правительства Республики Казахстан от 24 октября 2012 года № 1346. [5] Сафаев М. М. и др. (2014) Автомобильный транспорт и окружающая среда // <http://atmosfera.uznature.uz>

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ КАК «ЗЕЛЕНАЯ» ЭНЕРГЕТИКА.

### ЧАСТЬ 2. НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

Г. Абдурахманов, Г. С. Вахидова, С. А. Маматкулова

Научно-технический центр АО «Узбекэнерго»

Ташкент 100125, Узбекистан, ул. Дурмон йули, 29 [vgulbahor@mail.ru](mailto:vgulbahor@mail.ru)

#### Аннотация

*Рассмотрены используемые и перспективные способы и устройства для преобразования вторичных энергоресурсов в электроэнергию. Показано, что традиционные способы и устройства, работающие на фазовых переходах жидкость-пар-жидкость, недостаточно эффективны в условиях низкой плотности потока тепловой энергии и низкой температуры носителей вторичных энергоресурсов, особенно с учетом необходимости регулярного технического ухода и ремонта. Обосновано, что наиболее подходящими для этих целей являются термоэлектрические преобразователи, широкое применение которых, однако, требует создания новых функциональных материалов. Объем вторичных энергоресурсов в Узбекистане по источникам их образования оценен в первой части настоящей работы (Источники и объем вторичных энергоресурсов. Экономика и экология).*

**Ключевые слова:** энерго- и ресурсосбережение, вторичные энергоресурсы, способы преобразования энергии, термоэлектричество

#### 1. Введение

В первой части настоящей работы был рассмотрен объем вторичных энергоресурсов (ВЭР) тепловых электростанций, промышленных предприятий и автотранспорта Узбекистана с указанием конкретных источников и характеристик, и показано, что от ВЭР можно получать электроэнергию до 40-41 млрд. кВт·ч в год. Эти ресурсы представляют собой чаще всего потоки дымовых газов (воздуха) с низкой плотностью энергии и невысокой температурой, что создает трудности в их экономически оправданном использовании, в том числе в преобразовании в электричество. Здесь будут рассмотрены существующие и перспективные способы такого преобразования и проблемы, которые надо решать для претворения в жизнь этих способов.

#### 2. Используемые способы преобразования вторичных энергоресурсов

В настоящее время имеются три основные группы устройств преобразования ВЭР в удобную для использования форму:

1) паровой котел-утилизатор, преобразующий тепло дымовых газов в тепловую энергию горячей воды, которую удобнее транспортировать к потребителю для отопления и горячего водоснабжения;

2) абсорбционные охладители (чиллеры) (Утилизация теплоты, 2016), преобразующие тепло дымовых газов в холод для охлаждения помещений и продуктов;

3) установки на основе органического цикла Ренкина (ОЦР) (Применение ОЦР-технологии, 2016), где в системе паровой котел – паровая турбина - электрогенератор рабочим телом является

органическая жидкость с низкой температурой кипения (вместо воды), что позволяет при низкой температуре пара создавать высокое давление, необходимое для работы турбины. Преобразуют тепло дымовых газов в электричество и в тепловую энергию горячей воды.

Перечисленное оборудование производится десятками фирм по всему миру (<http://aqua-therm.ru>; <http://chiller.ru> Утилизация теплоты, 2016), однако общее число реально используемых мощных (более 1 МВт) не превышает нескольких тысяч с суммарной мощностью несколько десятков ГВт, тогда как мощность источников ВЭР только по Узбекистану составляет 9-10 ГВт.

#### **Что мешает использованию этих способов преобразования вторичных энергоресурсов?**

Общей основой для всех трех типов утилизаторов ВЭР является фазовый переход жидкость-пар-жидкость, но каждый тип привносит свои особенности. Паровой котел-утилизатор вырабатывает только горячую воду, в автотранспорте не применим, а в стационарных условиях возникает проблема сезонности (после отопительного сезона потребность в горячей воде резко падает). Вдобавок основные потребители горячей воды обычно расположены на некотором расстоянии от источников ВЭР, и требуется строить к ним дорогостоящие теплотрассы. Требуются также специальные водоподготовительные системы для предотвращения образования накипи.

Абсорбционные холодильники вырабатывают только холод и горячую воду, но не требуют технического ухода. К сожалению, почти всегда источники бросового тепла и потребители холода расположены далеко друг от друга, и тут также требуется строительство дорогих холодопроводов. На стороне горячей воды также требуется водоподготовительная система.

Электрический КПД установок ОЦР не превышает 21 % (Оборудование Turboden, 2016), предъявляются жесткие требования к герметичности всей системы, цена высокая, сохраняется проблема использования горячей воды (из системы охлаждения установки) после сезона отопления, что удорожает эксплуатацию. Требование герметичности ограничивает габариты и соответственно максимальную мощность установок. В настоящее время мощность единичных установок всех этих типов не превышает 15 МВт, что также создает сложности при утилизации тепла мощных систем (см. ч. 1 настоящей работы).

Для снижения сезонных колебаний в утилизации ВЭР используют тригенерационные системы, вырабатывающие одновременно электричество, тепло и холод (Тригенерация, 2016), сочетающие абсорбционный холодильник с когенерационной установкой.

В качестве иллюстрации приведем параметры установки ОЦР (Оборудование Turboden, 2016) Turboden 100 HR (HeatRecovery – восстановление, возврат тепла): теплоноситель – масло,  $T_{\Gamma} = 563 \text{ K}$ ,  $T_{\text{X}} = 388 \text{ K}$ , потребляемая тепловая мощность 32 МВт, электрическая мощность 6,8 МВт, КПД 21 %.

Согласно формуле Карно

$$\eta_{\text{E}} = \frac{T_{\text{A}} - T_{\text{O}}}{T_{\text{A}}} \quad (1)$$

КПД идеальной тепловой машины (к которой относятся все перечисленные устройства) дает  $\eta_{\text{K}} = 61,7 \%$  при температуре горячего теплоносителя  $T_{\Gamma} = 973 \text{ K}$  и холодного теплоносителя  $T_{\text{X}} = 373 \text{ K}$ , а для  $T_{\text{X}} = 473 \text{ K}$  будет  $\eta_{\text{K}} = 51,4 \%$ . При этом не учитываются внутренние потери энергии (сопротивление потоку массы, энергии, электрического заряда) в самих преобразователях, которые в итоге приводят к рассеянию части энергии системы в окружающей среде в виде бросового тепла. Учет этих потерь приводит к снижению эффективного КПД  $\eta_{\text{эф}}$  относительно  $\eta_{\text{K}}$ :

$$\eta_{\text{эф}} = \eta_{\text{E}} \cdot \eta_{\text{R}} \quad (2)$$

где  $\eta_{\text{R}}$  – доля полезной мощности  $P$  в общей мощности  $P_{\text{max}}$ , развиваемой установкой. Происхождение  $\eta_{\text{R}}$  можно показать на примере источника электрической энергии с внутренним сопротивлением  $r$  и ЭДС  $E$  (рис. 1), к которому подключена нагрузка с сопротивлением  $R$ . В режиме максимальной мощности ( $R = r$ ) по закону Ома для замкнутой цепи имеем  $\eta_{\text{R}} = P/P_{\text{max}} = R/(R + r) = 0,5$ , т. е. в нагрузку поступает только половина мощности  $P_{\text{max}}$ , вырабатываемой установкой (рис. 2), и реальные значения КПД  $\eta_{\text{эф}}$  в вышеприведенных условиях будут не более 30,8 % и 25,7 % соответственно. Такое представление применимо ко всем устройствам преобразования энергии, поскольку во всех в них есть упомянутые потоки, и поэтому можно сказать, что ОЦР-установки Turboden имеют КПД, близкий к предельному.

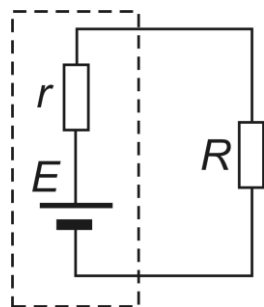


Рис. 2. Зависимость кпд  $\eta$  и мощности  $P$ , отдаваемой источником в нагрузку, от сопротивления  $R$  последней

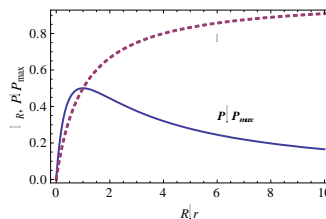


Рис. 1. Источник электрической энергии с ЭДС  $E$  и внутренним сопротивлением  $r$ , подключенный к нагрузке с сопротивлением  $R$

**Что в перспективе?** Исходя из перечисленных недостатков паровых котлов-утилизаторов, абсорбционных чиллеров и установок ОЦР, во всем мире считается, что для получения электроэнергии от ВЭР, а также как тепловые насосы (холодильники и нагреватели) наиболее подходящими являются термоэлектрические преобразователи (ТЭП), в частности, термоэлектрические генераторы (ТЭГ) (Goldsmid, 2010; IsmailandAhmed, 2009; Kardaszetal., 2016; Rowe, 2006; Rowe, 1995). В случае автотракторной техники ТЭГ является единственным способом получения электроэнергии от выхлопных газов.

В ТЭП нет ограничений по мощности, нет подвижных частей, что почти исключает техническое обслуживание и ремонт (не считая периодической очистки теплообменных поверхностей от различных загрязнений), срок службы доходит до 25-30 лет, они бесшумны, не имеют вредных выбросов (кроме тех, что содержится в самих дымовых газах).

Еще в 60-х годах прошлого века Йорданишвили (1968) сообщил, что на лабораторных образцах многокаскадных ТЭГ был достигнут кпд около 13,5 %, а Caillat (1998) продемонстрировал элемент ТЭГ с кпд около 20 %, что почти не отличается от кпд ОЦР-установок (см. выше). Такую же оценку приводит Rowe (2006) как общепринятую нижнюю границу для ТЭГ, обеспечивающую их широкое применение. Поэтому последняя цифра (электрический кпд 20%) принята в настоящей работе как нижняя граница для коммерческого использования ТЭГ.

**Надежность** ТЭГ подтверждается тем, что они с 1962 года используются в космических аппаратах различного назначения, в частности, являются единственными источниками электропитания аппаратуры для исследования дальних планет солнечной системы (за Марсом), когда полет, например, Voyager-1 продолжается с 1977 года, и солнечного излучения недостаточно для работы фотоэлектрических генераторов (Bennett, 2006). ТЭГ также используются в автономных источниках электропитания для систем защиты, автоматики, контроля и сигнализации магистральных газопроводов (Саратовгазавтоматика, 2016), отдаленных и труднодоступных объектов (Терехов, 2014). Например, в настоящее время компанией AlphabetEnergyInc. (Калифорния, США) производятся ТЭГ мощностью 25 кВт для утилизации тепла выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания (ThermoelectricGeneratorE1, 2014). В России разработана необслуживаемая термоэлектрическая ядерная электростанция «Елена» электрической мощностью 100 кВт и теплофикационной мощностью 3 МВт с гарантированным сроком безотказной службы 25 лет (Бекман, 2005).

**Что мешает использованию ТЭГ?** Несмотря на перечисленные преимущества, ТЭГ в настоящее время не применяется в большой энергетике из-за высокой цены (более \$ 9000/кВт) при недостаточном кпд (менее 6 % в однокаскадных ТЭГ, производимых из коммерчески доступных материалов). Целесообразность широкого использования различных преобразователей энергии определяется совокупностью приведенной цены (цена единицы генерируемой мощности), кпд  $\eta_{эл}$  и эксплуатационных расходов, включая стоимость используемых первичных энергоносителей (уголь, нефть, природный газ). В этом отношении ВЭР (частично и возобновляемые источники энергии) имеют важную особенность – первичная энергия для преобразования в них бесплатная и даже вредная для окружающей среды и соответственно для людей. Исходя из этого, Abdurakhmanov (2010) и Yee (2013) показали, что применительно к ВЭР в качестве определяющих должны рассматриваться приведенная цена и текущие расходы эксплуатации преобразователей энергии, а кпд  $\eta_{эл}$  является второстепенным показателем. Тем не менее, в большинстве случаев источники электроэнергии, использующие энергию возобновляемых источников и ВЭР, по привычке сравни-

ваются по КПД, что не совсем правильно, хотя, конечно, последнее влияет на цену – чем выше КПД  $\eta_{эл}$ , тем больше вырабатываемая электрическая мощность и тем ниже приведенная цена при прочих равных условиях. Здесь мы специально выделяем электрический КПД  $\eta_{эл}$ , поскольку рассматриваем только способы получения электроэнергии.

КПД ТЭГ определяется в основном свойствами используемого термоэлектрического материала (ТЭМ):

$$\eta_{гг} = \frac{T_{\bar{A}} - T_{\bar{O}}}{T_{\bar{A}}} \frac{\sqrt{ZT + 1} - 1}{\sqrt{ZT + 1} + T_{\bar{O}} / T_{\bar{A}}}, \quad (3)$$

где первый множитель – формула Карно (1). Здесь  $T_{Г}$  и  $T_{Х}$  обозначают температуру горячей и холодной сторон ТЭГ,  $ZT = S^2 \sigma T / \kappa$  – безразмерная термоэлектрическая добротность,  $S = \Delta U / \Delta T$  – коэффициент Зеебека (коэффициент термоэдс),  $\sigma$  и  $\kappa$  – электропроводность и теплопроводность ТЭМ соответственно, причем является суммой фононной (решеточной)  $\kappa_{ф}$  и электронной  $\kappa_{э}$ , составляющих,  $T = (T_{Г} + T_{Х}) / 2$  – средняя рабочая температура ТЭГ.  $\Delta U$  – термоэдс, генерируемая ТЭГ,  $\Delta T = T_{Г} - T_{Х}$ . Отсюда при  $T_{Г} = 973$  К,  $T_{Х} = 373$  К и  $ZT = 3,5$  (см. ниже) имеем  $\eta_{эл} = 0,31$ . Это значит, что такие материалы при подходящей цене вполне способны конкурировать с используемыми в настоящее время электромеханическими устройствами генерации электроэнергии. По физическому принципу ТЭГ являются универсальными – могут работать от перепада температуры  $\Delta T$ , создаваемого любым источником тепла, в том числе от солнечного излучения, от геотермальных источников, от перепада температур на поверхности и в глубине водоемов, между водой в речках и атмосферным воздухом, от выхлопных газов автотракторных двигателей и т. д. С учетом этих перспектив использования ТЭГ, во всем мире ведется интенсивный поиск новых ТЭМ. ТЭМ должны удовлетворять ряду требований, частью противоречивых: 1) производиться из доступного, распространенного и дешевого сырья; 2) быть безвредными для окружающей среды и людей по составу и по технологии; 3) быть устойчивыми к окислению, что упрощает защиту готовых ТЭГ; 4) технология переработки сырья и изготовления ТЭГ должна быть по возможности простой (без вакуума или инертной атмосферы); 5) иметь высокие значения  $T_{Г}$ ,  $S$ ,  $\sigma$  и низкую  $\kappa$ , чтобы обеспечить  $ZT > 2$  или  $\eta_{эл} > 20\%$ ; 5) работать в широком диапазоне температур (большая разность  $T_{Г} - T_{Х}$ ).

Для каждого ТЭМ существует свой оптимальный диапазон рабочих температур (рис. 3), что позволяет путем каскадирования ТЭГ по тепловому потоку получать достаточно высокий  $\eta_{эл}$  (в настоящее время до 20 %, Caillat (1997)).

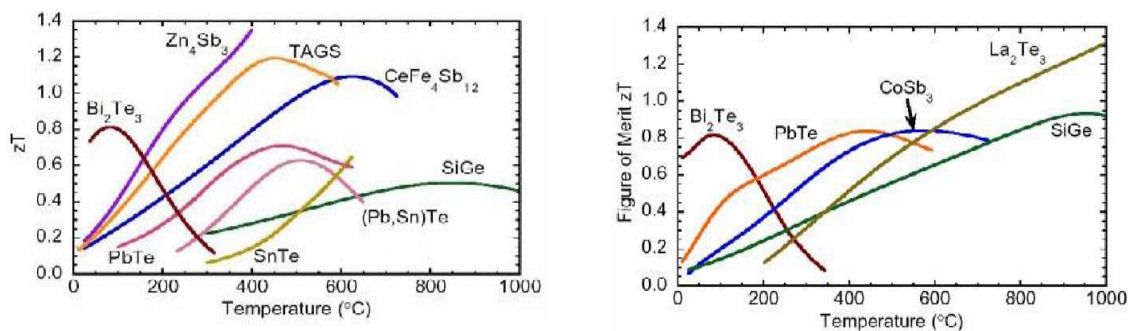


Рис. 4. Температурная зависимость безразмерной термоэлектрической добротности  $ZT$  некоторых объемных термоэлектрических материалов:  $p$ -типа проводимости (а) и  $n$ -типа проводимости (б).

До настоящего времени в качестве ТЭМ исследованы различные материалы (халькогениды висмута, сурьмы, свинца и цинка; твердый раствор кремний-германий, интерметаллические соединения, оксидные соединения, скуттериды, клатраты) и структуры (перовскиты, слоистые, сверхрешетки, квантовые точки, одномерные). Наибольшее значение  $ZT = 3,5$  достигнуто в структуре с квантовыми точками из  $PbSeTe/PbTe$  (рис. 5). В последнее время сообщалось, что в объемных образцах  $Cu_2S_{0,52}Te_{0,48}$  достигнута  $ZT = 2$  при 770 К, а в  $SnSe$   $ZT = 2,1$  при 1000 К.



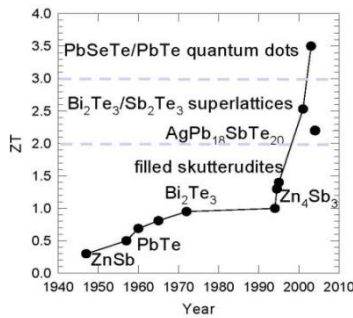


Рис. 5. Развитие термоэлектрической добротности  $ZT$

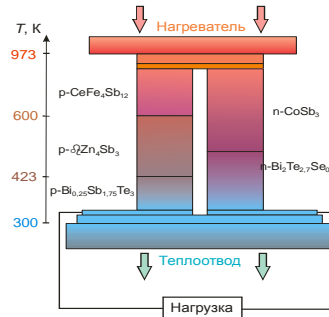


Рис. 6. Многоступенчатая структура с рекордным кпд  $\eta_{эл} = 20\%$ , Caillat(1998)

Здесь отметим, что многокаскадные ТЭГ, на которых достигнуто рекордное значение  $\eta_{эл} = 20\%$  (см. выше), изготовлены из соединений сурьмы, селена и теллура – редких и дорогих веществ, ядовитых и со сложной технологией (рис. 6). Поэтому такие структуры будут еще дороже, чем распространенные в настоящее время ТЭГ на основе  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ,  $\text{PbTe}$  и твердые растворы  $\text{Si-Ge}$ . Сюда добавляются еще геополитические риски, связанные с тем, что месторождения этих элементов распределены крайне неравномерно, и экспорт сырья в любой момент может быть жестко ограничен государствами, на территории которых эти месторождения расположены.

В приведенной выше формуле для  $\eta_{эл}$  не все пара-метры могут быть изменены произвольно: для  $\kappa$  существует фундаментальный нижний предел около  $0,1-0,15 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\text{К}^{-1}$ , достигаемый в стеклообразных (аморфных) материалах. Для  $\sigma$  верхний предел определяется законом Видемана-Франца  $\sigma/\kappa_3 = LT$  – с ростом  $\sigma$  растет и электронная теплопроводность  $\kappa_3$ , и наступает момент, когда  $\kappa_3 \geq \kappa_\phi$  (фононная теплопроводность,  $\kappa = \kappa_3 + \kappa_\phi$ ), и далее  $ZT$  перестает расти. Основная часть выполненных за последние 20 лет исследований была направлена на повышение  $ZT$  через снижение  $\kappa_\phi$  (скуттеридиты, клатраты, сверхрешетки, а также другие структуры с неоднородностями наномасштаба, усиливающими рассеяние фононов). При этом основной идеей была формула «электронный кристалл, фононное стекло», предложенная Slack (1995). Таким путем были достигнуты  $ZT > 3$  (рис. 5). В то же время из формулы для  $\eta_{эл}$  видно, что влияние  $S$  на  $ZT$  и соответственно на  $\eta_{эл}$  может быть существеннее, чем влияние  $\sigma$  и  $\kappa$  ( $ZT \sim S^2$ ,  $ZT \sim \sigma$  и  $ZT \sim \kappa^{-1}$  соответственно). Хотя на опыте во многих материалах обнаружены высокие значения  $S \geq 1 \text{ мВ/К}$  (Bentienetal., 2007; AbdurakhmanovandAbdurakhmanova, 2005) и даже  $10 \text{ В/К}$  (Mamedovetal., 2006), до сих пор нет последовательной физической теории, связывающей величину  $S$  с составом и структурой материалов, в частности, с энергетической зонной картиной (кроме идеи А. Ф. Иоффе о преимуществах узкозонных полупроводников), а также объясняющей аномалии  $S(T)$ , включая изменение знака (рис. 7). Поэтому поиск новых материалов с высокими значениями  $S$  ведется сугубо эмпирическим путем.

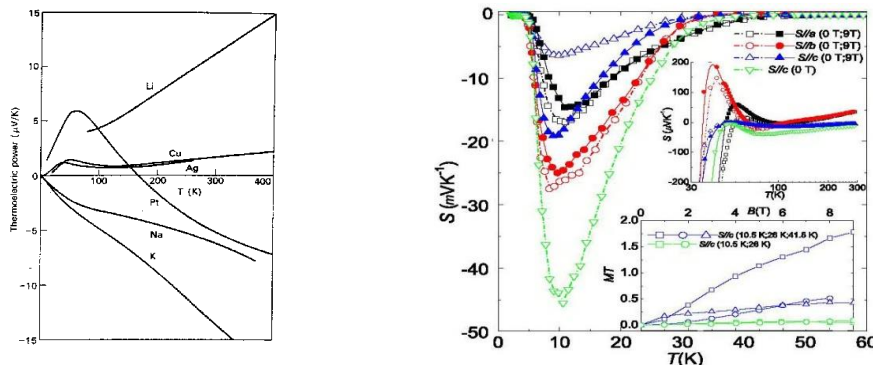


Рис. 7. Температурная зависимость коэффициента термоэдс  $S$  металлов (Christianetal. (1958))и соединения  $\text{FeSb}_2$  (Bentienetal. (2007))

**Что предлагается?** Самыми распространенными элементами в земной коре, согласноНикольскому (1966), являются кислород и кремний (26-27 % и 46-49 % по весу соответственно), а кремнезем составляет до 75 % ее массы (Химическая энциклопедия, 1995). При этом силикаты отличаются большим разнообразием состава и свойств (Либау, 1988). Силикаты входят в состав многих живых организмов, в том числе и людей, так что являются безвредными для них. Важно

также, что технология силикатов, в отличие от полупроводников (Si, Ge, Bi, Te, Sb), не требует вакуума или инертной атмосферы. Поэтому создание достаточно эффективных ( $ZT > 2$ ) термоэлектрических материалов на основе силикатов представляет большой интерес, с одной стороны, для использования ВЭР, а с другой стороны – по экономическим и экологическим причинам. Третий момент заключается в выполнении задач локализации производства и сокращения импорта, исключении геополитических рисков.

Одним из интересных разновидностей силикатов является силикатное стекло, легированное оксидами переходных металлов (ЛСС), созданное Angus and Gainsbury (1968). Легирование повышает электропроводность  $\sigma$  ЛСС с  $10^{-16}$  до  $10^3$  См/м при низкой теплопроводности (0,5-1 Вт/м·К). В последующих исследованиях было установлено влияние состава и структуры стекла, типа лигатуры и условий легирования на  $\sigma(T)$ . Большое внимание исследователи уделяли выяснению механизма электропроводности ЛСС из-за уникальных особенностей  $\sigma(T)$  (наличие максимума, отклонение от закона Мотта, металлическое поведение). При этом было обнаружено (Abdurakhmanov and Abdurakhmanova, 2005), что при определенных условиях коэффициент термоэдс  $S$  в ЛСС в несколько раз выше (до 1,7 мВ/К), чем у ТЭМ на основе  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ,  $\text{PbTe}$  и твердого раствора Si-Ge (до 500 мкВ/К). Эти результаты позволяют говорить о том, что на основании силикатов можно создать дешевые, безопасные ТЭМ с достаточно высоким КПД ( $ZT \geq 2$ ), из местного сырья и по простой технологии. Однако систематического исследования термоэлектрических свойств ЛСС не было, что не позволяет пока оценить возможности ЛСС для утилизации ВЭР.

#### Выводы

1. Используемые способы и устройства утилизации ВЭР (паровой котел-утилизатор, абсорбционный холодильник, установки ОЦР) не обеспечивают достаточную экономическую эффективность, дорогие и сложные в эксплуатации (требуются водоподготовка, тепло- и хладотрассы, регулярный ремонт), недостаточно мощные; 2. Термоэлектрические генераторы простые в эксплуатации, универсальные, но в настоящее время не находят широкого применения также из-за высокой цены и недостаточной эффективности, что обусловлено применяемыми функциональными материалами; 3. Разработка термоэлектрических материалов на основе легированных силикатов из местного сырья может обеспечить КПД ТЭГ около 20 %, одновременно содействуя локализации производства, импортозамещению, улучшению экологии; 4. Необходимо расширение исследования термоэлектрических свойств легированных силикатов для решения вопроса получения электроэнергии из ВЭР.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Abdurakhmanov G. and Abdurakhmanova N. G., 2005. High Temperature Anomalies in Resistivity and Thermoelectric Power of Thick Film Resistors. *Phys. Stat. Sol.(a)* 202, 1799–1802. [2] Abdurakhmanov G. et al., 2010. On the criteria of efficiency of power supply to individual households using thermo- and photovoltaic converters. *Applied Solar Energy* 46, No. 3, 169-171. [3] Angus H. C. and Gainsbury P. E., 1968. Glaze resistors with ruthenium dioxide. *Electronic components* 6, #1, 84 - 88. [4] Bennett G. L., et al., 2006. Mission of Daring: The General-Purpose Heat Source Radioisotope Thermoelectric Generator. AIAA 2006-4096, 4th International Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit (IECEC), 26–29 June 2006, San Diego, California. [5] Caillat T., Fleurial J.-P. and Borshchevsky A., 1998. Development of high efficiency thermoelectric generators using advanced thermoelectric materials. *AIP Conference Proceedings* 420, 1647 (2016); doi: <http://dx.doi.org>[6] Goldsmid H. J., 2010. *Introduction to Thermoelectricity*. Springer, Heidelberg, Dordrecht, London, New York. DOI: 10.1007/978-3-642-00716-3 [7] Mamedov N. et al., 2006. Super thermoelectric power of one-dimensional  $\text{TlInSe}_2$ . *Thin Solid Films* 499, (2006) 275 – 278. [8] Rowe D. M., 2006. General Principles and Basic Considerations. In: *Thermoelectric Handbook: Macro to Nano*. Ed. D. M. Rowe. CRC Press, Boca Raton. [9] Slack G. A., 1995. New Materials and Performance Limits for Thermoelectric Coolers. In: *CRC Handbook of Thermoelectrics*. In: Rowe D. M. (editor), *CRC Handbook of Thermoelectrics*. CRC Press, Boca Raton, 407-440. [10] Thermoelectric Generator E1, 2014. <https://www.alphabetenergy.com> [11] Turboden, 2016. Утилизация бросового тепла с помощью органического цикла Ренкина. [www.turboden.it](http://www.turboden.it). [12] Yee S. K., LeBlanc S., Goodson K. E. and Dames C., 2013. \$ per W metrics for thermoelectric power generation: beyond ZT. *Energy Environ. Sci.* 6, 2561-2571. DOI: 10.1039/c3ee41504j. [13] Либау Ф., 1988. Структурная химия силикатов. М., Мир, 18. [14] Никольский Б. П. (ред.), 1966. Справочник химика, в 6 т. с доп., т. 1, 22. [15] Оборудование Turboden, Italy, 2016. <http://maenerg.ru> [16] <http://aqua-therm.ru> [17] Саратовгазавтоматика, 2016. <http://sargazav.ru> Паровые и водогрейные котлы-утилизаторы. Обзор рынка, 2015. <http://aqua-therm.ru> [18] Терехов Ф., 2014. <https://geektimes.ru> [19] Тригенерация, 2016. <http://abxm-thermax.ru> [20] Утилизация теплоты, 2016. <http://abxm-thermax.ru> [21] Химическая энциклопедия, 1995. В 5 т. М., Большая российская энциклопедия, т. 4, 321.



## CLIMATE CHANGE, ACCESS TO RENEWABLE ENERGY AND GREEN MICROFINANCE

D. Tadjibayeva<sup>1</sup>, U. Burkhanov<sup>2</sup>

*The research focuses to study climate changes in Central Asian and the ways of adaptation. It focuses on potential use of renewable energy for mitigation impacts of climate change and green microfinance instruments to support rural areas. Together with other findings on the topic the paper also presents some preliminary results of the field study conducted by the authors within MikroKlima international project in Osh region (Kyrgyzstan) from October 17th to October 24th, 2016.*

**Key words:** climate change, Central Asia, renewable energy, green microfinance, agriculture

### 1. Introduction

The research reveals that Central Asia(CA) is one of most vulnerable regions in the world and facing complex environmental challenges, in particular in the areas of access to water and energy, food security and, healthcare. Taking into account a regional perspective these challenges and political stability cannot be addressed independently (Bernauer, 2012).

The topic of climate change and access to renewable energy in CA has recently become an active area of research. Relevant international activities include OECD's environment working paper series "The Env-Linkages Economic baseline projections to 2050"(2011), the Zoï Environment Network project "The State of the Environment in Central Asia" (2015), the World Bank's "Adaptation to Climate Change in Europe and Central Asia Agriculture " project (2009), Climate Investment Funds (the World Bank group) "Private Sector Investment in Climate Adaptation in Developing Countries: Landscape, Lessons Learned and Future Opportunities" project (2016), London School of Economics' consultancy project for the Overseas Development Institute on "Poverty and climate change: assessing impacts in developing countries and the initiatives of the international community"(2002) and etc.

Among other international activities BMBF-funded MikroKlima project (2016-2017) with the main implementer MicroEnergy International GmnH (Germany) and the partners from CA: the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, the National University of Uzbekistan and Tashkent Financial institute along with other foreign partners conducting feasibility study of climate change in CA region with possibility of using green microfinance instruments to improve access to energy and adaptation measures<sup>3</sup>.

### 2. Impact of climate change in CA

The study of the risks exposed by climate change impacts in CA can be summarized as increase of: deficit of water resources and deterioration of water quality; probability of dangerous and extreme climate events, such as droughts, extreme high or low temperatures; risk of occurrence of human disease and stress associated with climate change; danger for the existing ecosystems and a threat to biodiversity and etc. And it is the result to the negative impacts of climate change in major economic sectors such as agriculture and energy.

The issues of climate change and energy is interconnected. The world economies are investing (from 2003 until 2030) \$16 trillion in energy infrastructure, with annual carbon dioxide emissions estimated to rise by 60 percent (OECD/IEA, 2003).

The study reveals CO<sub>2</sub> emissions substantially reduced in some CA countries (Tajikistan, Kazakhstan and Kyrgyzstan) after the period of the collapse of Soviet Union with the decline of industry production. Further, improvements in energy intensities and decline in energy related activities in general also contributed to decrease the level of greenhouse gas emissions.

In contrary, the other two Central Asian countries, Turkmenistan and Uzbekistan, despite experiencing similar economic contraction for the same period, the level of CO<sub>2</sub> emissions have increased. Partially this could be explained by their energy use patterns and energy market structures. Also, energy intensities have increased significantly for these countries.

<sup>1</sup>Associate Professor at the department of Macroeconomics, National University of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan, [dtadjibayeva@gmail.com](mailto:dtadjibayeva@gmail.com)

<sup>2</sup>Associate Professor at the department of Finance, Tashkent Financial institute Tashkent, Uzbekistan, [uburkhan@gmail.com](mailto:uburkhan@gmail.com) (A. Temur street-60A, Tashkent)

<sup>3</sup>For detailed information, see: <http://www.microenergy-international.com>

The number of studies suggests that liberalization of energy sectors improves energy intensities. It can be argued that, with the liberalization, Turkmenistan and Uzbekistan can find possibilities to improve energy intensity effects and in return to reduce CO<sub>2</sub> emission levels. These two countries recently increased investing in improvements on energy efficiency measures and renewable energy sector (UNDP, 2014).

The environmental changes add to the problems in the CA and increase the vulnerability of people living in rural areas. Especially, recent increase in frequency of droughts is resulting serious damage to the livelihoods offarmers in semiarid and arid regions. For instance, droughts in 2000–2001 and 2007–2008 have caused significant socio-economic issues. Moreover, the poorest population living in mountainous regions of CA is hitting the hardest because of increased frequency of heavier rainfalls in winter and subsequent floods.

Rural populations are already severely suffering from the increasing sequence of extreme events, which will predicted even to increase in future. The study by Intergovernmental Panel on Climate Change predictions (IPCC, 2007b), the region may face declined precipitation during spring, summer and autumn and slightly increased rainfall during the winter. This study (IPCC's 4 assessment report), also predicting the increase of temperature by 3.7 °C on average by the end of this century. The followed extreme weather expected to occur during summer, which is the most important season in the vegetation period. The increased temperatures may cause higher probability of drought during the vegetation period which may lead declining harvest in agriculture (IPCC, 2007).

Agriculture plays an important role in CA countries' economies (Tab. 1) with employment in agriculture sector is over 25% in all CA countries. For example, in Tajikistan, two thirds of the population depends on agriculture for their livelihood, whereas in Kyrgyzstan more than half of working population employed in agriculture sectors.

The results of existing studies show the negative effects of weather shocks on the livelihoods of small-scale farmers who are currently operating at a very narrow margin of profits. Moreover, lack access to financial resources and advanced technologies in the region increases vulnerability of them.

There have been very few research investigating the economic impact of these biophysical changes at microeconomic levels while taking into account adaptive capacity of agricultural sector and mitigation measures from local governments, Thus, the filed study conducted by MikroKlima project aims at filling this gap in the region through assessing the economic consequences of climate change at the farm level in CA. Additional contributions for this study are the use of the data based on other farm surveys, field trials and inclusion of the risk coping decisions of representative farms.

The existing studies at national or sub-national levels of the economic impacts of climate change on agricultural production in CA are limited<sup>4</sup>.

Tab.1: Importance of agriculture in Central Asia (employment and GDP)<sup>5</sup>

Countries	Employment in agriculture	Agriculture as % of GDP	Major Exports (agriculture)
Kazakhstan	<10%	<10%	Grains
Kyrgyzstan	55%	35%	Cotton, Horticulture
Tajikistan	n/a	25%	Cotton
Turkmenistan	n/a	30%	Cotton
Uzbekistan	40 <sup>6</sup> %	20%	Cotton, grain

### 3. Field study profile

#### 3.1. Profile of the respondents.

Sample consists of 97 respondents living in the range of 30-40km radius of Osh region (Kyrgyzstan), from which 51% female and 49% male. All respondents are engaged in agriculture activities and

<sup>4</sup>One of the first few assessments was done by Savoskul et al. (2004) for the Syr Darya river basin.

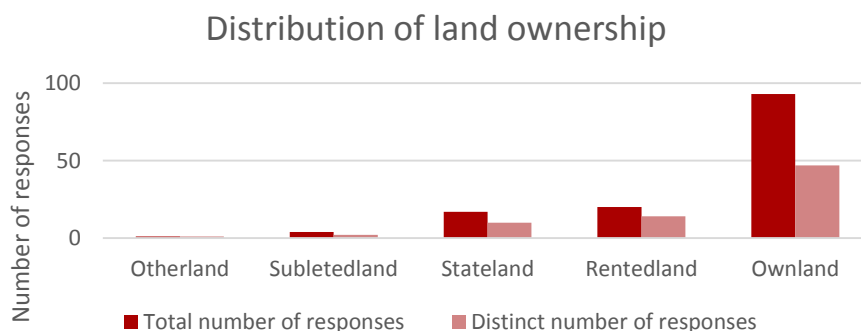
<sup>5</sup>Granit, J. et al (2010).

<sup>6</sup>According to data from Statistic Committee of Uzbekistan this indicator in 2016 was 27%.

have microfinance loan. The most popular ownership is consisting from self-owned and some rented land among the farmers and area of land very small (between 0-5 ha), which is constrain them to access to microfinance instruments (Tab.2).

MikroKlima suggests that potential solution for the “smallness” could be service cooperatives which improve access to suppliers and markets for their members as well as achieve market power through size. Moreover, suggested type of cooperatives could make a more reliable partner for Microfinance institutions and reduce financial risks, increase access for renewable energy and agriculture technology.

Tab. 2: Respondents land ownership



### 3.2. Agricultural profile

The most common agro-products among the respondents are corn, grass, cotton and vegetables. The sensitivity of corn and cotton to weather changes are well-known (according to Phillips et al (1996) increase of temperature in US for 2 C would reduce corn productivity for 3%). However, the impacts of weather extremes will be different across in CA, the followed increased aridity negatively impact to cotton production, especially in Uzbekistan (International Trade Center, 2011). Based on the empirical evidences from recent years, which shows the early low temperature prevented cotton field from ripening the project suggests urgent adaptation measures against weather extremes in the region.

## 4. Research findings

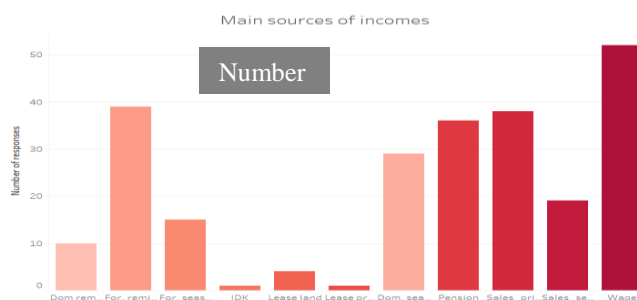
### 4.1. Sources of household income

The survey resulted that the main sources of household income of respondents are: wages, remittances from abroad, and sales of agriculture products (Tab.3). The findings show that even small farmers do not totally depend on agriculture income, and it's about 20% of family income. The results of survey are consistent with previous studies (FOA, 2001-2005; 2003-2007, Lerman, Z. and Sedik, D., 2009, p.14).

The diversified income base decreases dependence from single agriculture income will positively impact the adaptation from climate change in the region. Also, the results revealed that only 4 respondents solely depend from agriculture income.

Another findings were that pensions are considered as common financial source which shows respondents (or their family members) are/or over retirement age.

Tab.3: Sources of income of respondents



The important conclusion can be drawn from the field study is that the dependence of the respondents on seasonality of the produce. The sales of “other plants” column mostly involve seasonal sales of vegetables (tomatoes, potatoes, beats). There are number of empirical evidences the negative consequences of increasing extreme weather events which can heavily distort the harvesting of the produce. For in-

stance, the last year (2016) early freezing has precluded timely harvest of beats and ripening of tomatoes. Such weather events led to considerable loss of the farmers' income, as they only have a seasonal chance to obtain income.

The MikroKlima suggests energy efficiency measures such as green houses, storage facilities (based on solar energy), more effective fertilizers and more resistant seeds could be potential solution of this problem combined with other.

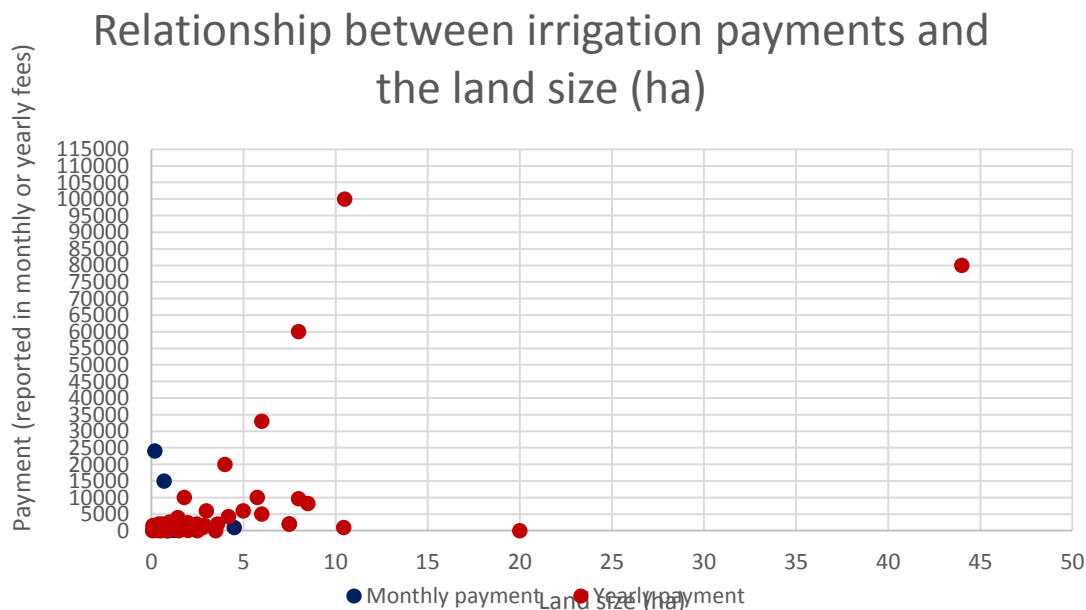
#### 4.2. Access to water

The other survey question was regarding water use and energy access among the respondents. The results show that almost all respondents pay either a monthly pay (17 respondents) or a yearly fee (72 respondents) for irrigation. The monthly price is 2500 SOM (=37\$), while the average yearly price is 5840 SOM (=87\$). However, only 2 among respondents do not pay for irrigation and 7 do not irrigate their land due to lack of water. The results show no real relationship between the payment and the land size (Tab.4). Some households suggested yearly payment of small fixed amount of money for access to local kanals several times for a week, which puts the quality and reliance on such type of irrigation under question.

MikroKlima suggests microfinance can fill in the finance gap for the lower-income population for efficient irrigation solutions and consultancy for using green water technologies.

Promotion of efficient water use among population and training of efficient agriculture water management could be facilitated by Microfinance institutions with the in-house capacities. The technical assistance to the farmers would be critical and highly effective both to adaptation to the climate change and promotion of green products.

Tab.4: Price for water and respondents land size



#### 4.3. Potential for Renewable energy

The results reveal that the respondents have high number of animals should have enough manure for biogas digesters and should be targeted for awareness of rising campaigns. Also, findings show farmers negligent familiarity with biogas technologies. Moreover, the vulnerability of animal husbandry to weather extremes lies in the susceptibility of animals to diseases with increasing temperatures and lack of drinking water with intensifying aridity. Furthermore, livestock can be as well as contributor to environmental problems due to poor waste management.

It has been revealed that the most of the farmers use animal waste more often to fertilize their lands rather than agricultural waste. Biomass (animal and agri-waste) for cooking is also among the most frequent uses in remote areas under survey. Thus the situation raises concerns on health issues of the households. Agricultural waste not used for fertilizing is either just burnt with no use or thrown away which in turn contribute to environmental problems. As survey results show sales of fertilizers are quite low among the respondents.

Field study reveals waste availability for biogas production; however, the understanding of people about the benefits of biogas production is not there yet. The other question is access to finance small biogas equipment which can be solved by microfinance instruments. However, the survey results noted that use of bio-waste for cooking purposes stands as a competitor to biogas.

### 5. Summary

Research results demonstrate:

- Human effect on greenhouse emissions remains stable in CA countries;
- The observed reduction of overall CO<sub>2</sub> emissions in CA was a direct consequence of the crisis after gaining their independence from the Soviet Union;

- Energy intensities are key elements of energy-saving and carbon-reduction plans.

While other CA countries recently improved their energy intensities, Uzbekistan yet has to do more to reduce energy inefficiencies;

- There is lack of studies on economic impact of climate change in CA on sub-regional level;
- Low awareness about green solutions;
- The agricultural sector remains most vulnerable sector and adaptive measures with the support of Microfinance could play an important role for stability of household income in rural areas of CA;

• The findings of survey can be extrapolated in Fergana valley (northern east of Uzbekistan, northern west of Tajikistan and south of Kyrgyzstan). However, the results geographically constrained and caution should be taken to use them on other regions of CA.

### REFERENCES

- [1] Bernauer T. Climate change and international water conflict in Central Asia. *Journal of Peace Research* 49(1) 227–239. 2012. DOI:10.1177/0022343311425843 [jpr.sagepub.com](http://jpr.sagepub.com) [2] Cotton production in Uzbekistan. [https://en.wikipedia.org/wiki/Cotton\\_production\\_in\\_Uzbekistan](https://en.wikipedia.org/wiki/Cotton_production_in_Uzbekistan) [3] Donald L. Phillips, Jeffrey J. Lee, Rusty F. Dodson, Sensitivity of the US corn belt to climate change and elevated CO<sub>2</sub>: I. Corn and soybean yields, *Agricultural Systems*, Volume 52, Issue 4, 1996, Pp 481-502. [4] FAO Corporate Document Repository. “CHAPTER 7. CHOOSING AN IRRIGATION METHOD”. [www.fao.org/docrep/s8684E/s8684e08.htm#7.1](http://www.fao.org/docrep/s8684E/s8684e08.htm#7.1) surface, sprinkler or drip irrigation [5] Granit, J. et al. *Regional Water Intelligence Report Central Asia. Baseline Report*. 2010. Stockholm, p.22 [6] IPCC. *Climate Change 2007: Synthesis Report*. 2007. [www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/publications\\_ipcc\\_fourth\\_assessment\\_report\\_synthesis\\_report](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_synthesis_report). [7] International Trade Centre. *Cotton and Climate Change: Impacts and Options to Mitigate and Adapt*. Geneva: ITC, 2011. xii, 32 p. [8] Lerman, Z. and Sedik, D., *Agrarian Reform in Kyrgyzstan: Achievements and the Unfinished Agenda*. FAO Regional Office for Europe and Central Asia. Policy Studies on Rural Transition No. 2009-1. [9] OECD/IEA. *World Energy Investment outlook*. 2003. <http://www.worldenergyoutlook.org/media/weowebiste/2008-1994/weo2003.pdf> [10] Savoskul O. and Smakhtin V. *Glacier systems and seasonal snow cover in six major river basins: hydrological role under changing climate*. IWMI Research paper #150. P.22 [11] UNDP. Original material is in Russian: *Sozdaniye inochnih usloviy dlya VIE v Sirdarinskoy oblasti*. 2014. [http://www.undp.org/content/dam/uzbekistan/docs/Publications/environmentandenergy/Creation\\_of\\_Market\\_for\\_RES\\_in\\_Syrdarya\\_Province/un\\_uzb\\_Creation\\_of\\_Market\\_for\\_RES\\_in\\_Syrdarya\\_Province.pdf](http://www.undp.org/content/dam/uzbekistan/docs/Publications/environmentandenergy/Creation_of_Market_for_RES_in_Syrdarya_Province/un_uzb_Creation_of_Market_for_RES_in_Syrdarya_Province.pdf)

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Р.Р. Аvezов, Н.Р. Аvezова, Э.Ю. Рахимов. Учёт ориентации отапливаемых помещений в рас- чете инсоляционных пассивных систем отопления	5
А.Г. Страхов, А.В. Чемезов. Оценка эффективности применения гелиоустановок для отопле- ния и горячего водоснабжения в Узбекистане	11
М. Короли, Р.А. Захидов, А. Анарбаев. Эффективность систем управления тепловыми режи- мами в отопительном контуре здания от топливно-солнечных систем	13
Н.Р. Аvezова, Р.Р. Аvezов, М. Куралов, А. Вохидов, Д. Абдухамидов. Испытательный стенд для тестирования плоских солнечных водонагревательных коллекторов в натуральных квазистаци- онарных условиях	17
S. Meyers, B. Schmitt, K. Vajen. Industrial process heat generation by solar thermal and photovol- taics: a comparative economic assessment	19
Ж.С.Ахатов, А.С.Халимов, Э.Т.Жураев, Д.У.Туропова. Влияние динамической вентиляции на тепловой баланс солнечной теплицы с аккумулированием тепла	24
F. Sh. Kasimov. Calculation thermal efficiency coefficient solar water-heating collectors of the re- ceiver with ground absorption of solar radiation	31
Д.У.Туропова, Э.Т.Жураев, Т.Д.Жўраев. Гелиоиссикхонада куёш энергиясидан фойдаланиш самарадорлиги	33
А. Вардияшвили, Р.А. Захидов, Г. Узаков, М. Муродов. Применение теплового насоса для теплоснабжения одноэтажного солнечногосельского дома с гелиотеплицей	35
А.У.Вохидов, Ф.Ш.Касимов, Э.Ю. Рахимов, М.А. Куралов, А.Э.Хаитмухамедов, А.Ю. Усмо- нов, Б.Б.Болиев, Б.А. Мухамедов, Р.Х.Файзиев. Результаты испытаний двухконтурной солнеч- ной водонагревательной установки в холодный период года	39
Р.А. Захидов, А. Анарбаев, Ш. Файзиев. Применение абсорбционных установок в солнечном охлаждении зданий	42
Р.Х.Рахимов, С.Ф.Эргашев, Ю.Мамасодиков, У.Ригматов. Автоматизированное солнечное устройство для порционной подготовки горячей воды	47
А.Э.Хаитмухамедов, А.Ю.Усманов, Б.Б.Болиев. Системы теплового аккумулирования, ис- пользуемых в солнечно-тепловых электростанциях	50
Ю. Рашидов. Расчет гидродинамических характеристик активного элемента самодренируе- мого гелиоконтра отопительной системы	53
Ю. Рашидов, Н. Аvezова. Энергосберегающие технологии на основе интеллектуального управления теплообменными процессами в низкотемпературных системах отопления	58
H. Kiliç, B. Gümüş, M. Yilmaz, K. Akkiliç, M. E. Asker. A time-dependent Gaussian model for prediction of global solar parameters case study: southeastern of Turkey	64
C. Haydaroglu, B. Gümüş, H. Kiliç. Investigation and comparison of Solar power plant simulation programs	69
Э.Ю. Рахимов, Ш.Э. Саъдуллаева, М.Б.Шерматова. Анализ солнечного потенциала Респу- блики Узбекистан	73
А. Анарбаев, Л. Алимова, К. Мажидов. Оценка перспектив использования возобновляемых источников энергии в экономике Узбекистана	76
М.М.Султонова, А.И.Шарипов. Эффективность использования альтернативных источников энергии в экономике РТ	80
Slaven Garaj. Graphene membranes and nanofluidics	86
U. Mirsaidov. Nanoscale construction site: exploring formation of nanomaterials in liquids	88
Ж.С.Ахатов, С.К.Теляев, В.Н.Авдиевич, А.А.Искандаров, С.З.Мирзаев. Управление процес- сом теплообмена выбором оптимальных концентраций и материала наночастиц	90
H. Yong, H. Xia, Sh. Nurmatov, Jin Jian, Kai Wei. Some properties of dowtherm thermal oil nanofluid	94
H. Yong, H. Xia, Sh. Nurmatov, Jin Jian, Kai Wei. Multi component nanofluid preparation and their some characteristics	97
Р.Х. Ашуров, Т.К. Турдалиев, И.Х.Ашуров, В.М. Ротштейн. Управление кристалличностью и размером наночастиц кремния для применения в высокоэффективных солнечных преобразова- телях	101
Б.М. Абдурахманов, М.Х. Ашуров, Х.Б. Ашуров, М.Ш.Курбанов. Технический кремний, как основа создания в республике Узбекистан новых технологий и производств черной и цвет- ной металлургии, электронной техники и солнечной энергетики	104
K.B.Egamberdiev, O.Trunilina, A.Iskandarov, S.K.Telyaev, S.Z.Mirzaev. Dynamic light scattering	



measurements of 2,6-lutidine – water system with salt added near the demixing point .....	109
С.Х. Сулейманов, В.Г. Дыскин, М.У. Джанклич, Н.А. Кулагина, О.А. Дудко, А. Лулагин. Влияние технологических режимов синтеза на солнечной печи на фазовый состав композиционных материалов систем TiO <sub>2</sub> – CuO и TiO <sub>2</sub> – NiO и оптические свойства покрытий на их основе .....	112
С.В.Киселева, О.С.Попель, А.Б.Тарасенко. Оценка эффективности создания сетевых фотоэлектрических станций в некоторых районах средней Азии и Закавказья .....	116
М.Н.Турсунов, В.Г.Дыскин, Х.Сабилов, Э.Т.Абдуллаев, И.М.Комолов. Исследование влияния атмосферного воздействия на параметры фотоэлектрических батарей .....	122
М.Н.Турсунов, Х.Сабилов, Б.М.Турдиев. Повышение эффективности фото тепловых батарей с воздушным охлаждением .....	124
М.Н.Турсунов, Б.М.Турдиев, И.М.Комолов. Исследование влияния температуры воды на параметры фото тепловой батареи .....	128
Р.Р. Кабулов, Н.А.Матчанов, Б.Р.Умаров, М.А.Маликов. Особенности нагрузочных вольт-амперных характеристик поликристаллического кремниевого солнечного элемента при различных уровнях освещенности солнечным светом .....	131
Р.А.Муминов, О.Ф.Тукфатуллин, И.М.Комолов. Портативная фотоэлектрическая система для питания маломощных потребителей электрической энергии .....	134
Ю.М.Мамасодиков, К.Р.Эргашев, З.Ю.Мамасодикова. Куёш автоном системалари учун энергия тежамкор инвертор .....	140
И. Асфандияров. Управление потоком излучения деформируемой оптикой .....	142
И. Асфандияров, Ш.Эгамбердиев, Р.Салямов, Х. Султанов, Б. Хафизов, К. Эргашев. Солнечная фотоэлектростанция обсерватории Майданак .....	146
Ю.Е.Николаенко, А.В.Баранюк, Т.Ю.Николаенко. Экспериментальное исследование характеристик светодиодной люстры с тепловыми трубами с возможностью питания ее от возобновляемых источников энергии .....	149
Х.К. Ташматов, И.А Юлдошев, Bernd Wurl, Э.Б. Саитов, Н.Р.Умирова. Солнечные фотоэлектрические станции – путь к бесперебойному обеспечению электрической энергией .....	154
Guanghua Zheng, Gang Xiao, Mingjiang Ni. Performance evaluation of a solar photon-enhanced thermionic hybrid system combined with a stirling engine .....	158
Д.С.Стребков, А.Е.Иродионов, Н.С.Филиппченкова. Разработка алгоритма управления жалюзиным гелиостатом неследящего солнечного концентратора .....	162
Р.Ю. Акбаров, М.С. Пайзуллаханов. Особенности создания различных энергетических режимов в фокальной зоне большой солнечной печи .....	167
Р.Ю.Акбаров. Метод определения продолжительности солнечного сияния на основе метеоданных и модельных расчетов солнечной радиации .....	170
М. Атаханов, Б. Солиева, Э.Т. Жўраев, Х.Х. Саидов. Катта куёш печи гелиостатларини автоматик бошқариш тизимининг конструктив алгоритми .....	175
Ш.И.Клычев, Л.Ражапов, Р.Х.Рахимов, А.Фазилов, Ю.Б.Собиров. Теоретический расчет создания п образной формы оптического пятна на фокальной плоскости БСП с гелиостатами одной полки .....	178
М. Маматкосимов, А. Кучкаров, А. Абдурахманов. Распределение энергетической плотности лучистого потока от солнца в фокальной плоскости ЗКС технологического и энергетического назначения .....	183
С. Орлов, Ш.И. Клычев. Алгоритм компенсации погрешностей осей вращения гелиостатов при программном слежении за Солнцем .....	186
С.А.Бахрамов, А.А.Симонов, К.Е. Васильковский, Ш.Д.Пайзиев, О.К.Махамаджонов. Гомогенизатор для матрицы солнечных элементов, работающих на концентрированном солнечном излучении .....	190
Н.С.Филиппченкова, А.В.Харченко. Разработка автоматической системы регистрации основных параметров солнечной концентраторной установки .....	192
Н. Ташбаев, Б. Махмудов . Расчет высокотемпературных солнечных установок для подогрева мазута на теплоисточниках .....	196
Sh. Payziyev, Kh. Makhmudov, Yasser A. Abdel-Hadi. Ti: Sapphire as a frequency converter for solar pumped Nd:YAG lasers .....	200
С.А.Бахрамов, Ш.И.Клычев, Ф.Ф. Шайимов. Оптимальные соотношения между параметрами узлов солнечных лазеров на параболических концентраторах .....	203
И.Атабаев, Ш.Ирматова, С.Мухсимов, Ш.Файзиев. Исследование минералполимерных композитов на основе местных сырьевых компонентов и веществ .....	207
М.Пайзуллаханов, Ж. Шерматов. Керамический материал высокой износостойкости для ис-	209

пользования в производстве медицинского инвентаря .....	
М.Пайзуллаханов, Ж. Шерматов. Феррит висмута, синтезированный в потоке концентрированного солнечного излучения .....	211
М. Х. Руми, Ш.К. Ирматова, Ш.Р.Нурматов, Э.П.Мансурова, М.А.Зуфаров, Н.А. Кулагина. Исследование свойств защитных покрытий на основе Паркентской красной глины .....	214
Ф.Ф. Тураев, У.Ф. Тураева. Исследование излучательной способности материалов по динамике нагрева и охлаждений .....	216
Р.А. Захидов, У.А.Таджиев, Е.И. Киселева. Исследование эффективности работы горизонтально-осевой ветроэлектростановки в ветровых условиях аридной зоны .....	218
M. Zheng, L. Zhang, H.P. Teng, J. Hu, M.L. Hu. CFD simulation based optimum design of drag typed VAWT by using orthogonal test method .....	226
И.Н.Паскарь, К.Ю.Ушаков, А.Д.Евтушенко. Установка для создания искусственно-непрерывного воздушного потока .....	232
А. Мустафакулов, О. Олимов. Расчёт мощности ветроэнергетических установок .....	236
В.Е.Наjriddinov, Е.Иsmailov, F.A.Namazov, U.R.Khodjaeva. Heat transfer of subsoil heat accumulator of heliobioenergetic heating system of poultry-farms .....	239
Ж.Ташпулатов, С.Куканова, Л.Зайнитдинова. Коммунальные и растительные отходы в производстве биогаза .....	243
М. Б.Миязатов, Б.Э.Хайриддинов, А.С. Рысбаев, С.Т.Хамроев. Инженерный расчет рекуператора биогазовой установки для переработки органической биомассы .....	247
З.У.Саипов, И.Х.Абдуганиев, Д.З.Олимханова. Математическая модель системы подогрева и теплового баланса в биореакторе биогазовой установки .....	250
А. Гусев. Термосенсорконтроля утечек водорода на основе диоксида марганца палладированного в суперизоляции криогенного водородного резервуара и трубопроводов .....	254
С.А.Раджапов, М.У.Джанклич, Б.С.Раджапов, Е.К.Тошмуродов, А.С.Хасанов. Разработка многофункционального термоэлектрического генератора мощностью 30 Вт .....	262
S.M.Ochilov. Potential possibilities of natural hydrochloric water and its contribution to the world electricity .....	263
Б.Л.Оксенгендлер, Б.М.Абдурахманов, Х.Б.Ашуров, М.М.Адиллов, Ш.К.Кучканов, С.Е.Максимов, В.Н.Никифоров. Новые аспекты термоэлектричества: электронные скуттерудиты .....	265
Б.Л.Оксенгендлер, Н.Р.Ашуров, М.И.Ахмедов, Б.Аскарлов, С.Е.Максимов, И.Н.Нурғалиев, С.Ш.Рашидова. О природе «Хлорного Парадокса» в органико-неорганических перовскитах .....	268
Г. Абдурахманов, Г. С. Вахидова, С. А. Маматкулова. Использование вторичных энергоресурсов как «зеленая» энергетика. Часть 1. Источники и объем вторичных энергоресурсов. Экономика и экология .....	272
Г. Абдурахманов, Г. С. Вахидова, С. А. Маматкулова. Использование вторичных энергоресурсов как «зеленая» энергетика. Часть 2. Научно-технические аспекты .....	276
D. Tadjibayeva, U. Burkhanov. Climate change, access to renewable energy and green microfinance .....	282