

УДК 662.997÷621.472

Р.Р. АВЕЗОВ, Э.Ю. РАХИМОВ, А.М. МИРЗАБАЕВ

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ СТЕНКИ ТЕПЛООТВОДЯЩЕГО КАНАЛА ЛУЧЕПОГЛОЩАЮЩИХ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПАНЕЛЕЙ ПЛОСКИХ СОЛНЕЧНЫХ ВОДОНАГРЕВАТЕЛЬНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ

Приведены результаты расчетных исследований по определению значения температуры внутренней поверхности стенок теплоотводящих каналов (ТОК) лучепоглощающих теплообменных панелей (ЛТПП), имеющих листотрубную и тонкую параллелепипедную форму плоских солнечных водонагревательных коллекторов (ПСВК). Методика исследований базируется на составлении системы балансовых уравнений для лучепоглощающей пластины (ЛПП) и ТОК ЛТПП рассматриваемых типов, и их решения относительно искомого параметра. Приведен практический пример расчета по определению значения температуры внутренней поверхности стенки ТОК листотрубной ЛТПП, в котором использованы результаты экспериментальных исследований по определению удельной теплопроизводительности ПСВК среднего качества в натуральных условиях, а также лабораторных и расчетных исследований по определению оптических и теплотехнических показателей листотрубной ЛТПП, изготовленной из меди.

В поверочных теплотехнических расчетах ЛТПП ПСВК, как и других рекуперативных теплообменных аппаратов [1, 2], одной из ключевых задач является определение значения конвективной теплоотдачи внутренней поверхности стенок их ТОК ($\alpha_{квн}$).

Существующие методы определения значения $\alpha_{квн}$ базируются на определении режима и характера течения теплоносителя внутри каналов различных форм и использовании общепризнанных критериальных уравнений, установленных путем обработки результатов соответствующих экспериментальных исследований на основе теории подобия [1-3]. Отметим, что для определения $\alpha_{квн}$ на внутренних поверхностях стенок каналов рекуперативных теплообменных аппаратов с помощью известных критериальных уравнений, при прочих равных условиях, требуются средние значения температур внутренних поверхностей их стенок ($\bar{t}_{вн}$).

В отличие от традиционных рекуперативных теплообменных аппаратов, в ПСВК значение $\bar{t}_{вн}$ формируется под воздействием многочисленных факторов, таких как теплотехнические показатели ограждающих элементов, оптические характеристики поверхности его светопрозрачного покрытия и ЛТПП, приход солнечного излучения (СИ), температура окружающей среды и т.п. Очевидно, что разновременность и неодинаковость внешних условий проведения экспериментальных исследований ПСВК по определению значения $\bar{t}_{вн}$ в натуральных условиях требует много времени, материальных и финансовых затрат. Вместе с тем, результаты этих исследований не всегда позволяют установить однозначную и достоверную взаимосвязь между значениями $\bar{t}_{вн}$ и перечисленными выше внешними факторами.

Поэтому более рациональным считается определение значения $\bar{t}_{вн}$ путем моделирования тепловых процессов, протекающих в ЛТПП ПСВК по заданным значениям оптических свойств и теплотехнических показателей их элементов[4].

В целях обеспечения общности получаемого решения поставленной задачи сначала рассмотрим листотрубную конструкцию ЛТПП ПСВК, в которой тепловой контакт между ЛПП и ТОК является идеальным (рис.1). Как показывают результаты исследований [5], расчетные выражения, выведенные для листотрубных ЛТПП ПСВК, применимы для большинства конструкций плоских проточных ЛТПП.

Листотрубная ЛТПП состоит из $2n$ штук ЛПП (т.е. ребер) шириной каждой a_m и n штук ТОК круглой формы с внутренним ($d_{вн}$) и наружным ($d_{нар}$) диаметрами, соединенных общими (подающим и отводящим) гидравлическими каналами, обеспечивающими равномерное течение

воды по ТОК. Длины ЛПП ($\ell_{лп}$) и ТОК ($\ell_{тк}$) равны между собой, т.е. $\ell_{лп} = \ell_{тк}$. Локальная температура ЛПП в зоне теплового контакта с ТОК ($t_{тк}$) равна температуре наружной поверхности ТОК ($t_{w_{нар}}$), т.е. $t_{тк} = t_{w_{нар}}$. Площадь поверхности ЛПП ($F_{лп}$) без учета площади поверхности ее гидравлических каналов равна

$$F_{лп} = (2a_{лп} + d_{нар})\ell_{лп}n \quad (1)$$

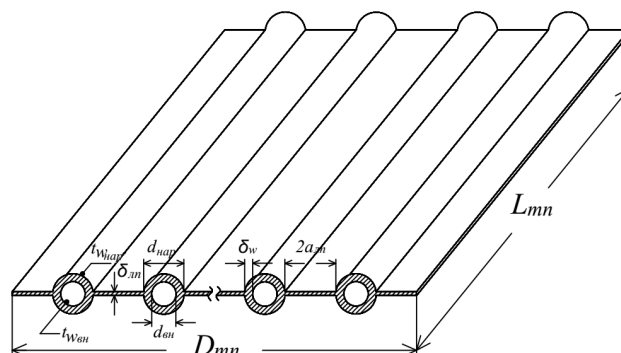


Рис. 1. Принципиальная схема листотрубной ЛПТП ПСВК с идеальным тепловым контактом между ЛПП и ТОК: $D_{лп}$ и $L_{лп}$ - ширина и длина ЛПТП; $a_{лп}$ и $\delta_{лп}$ - соответственно, ширина и толщина ЛПП (ребра); $d_{нар}$, $d_{вн}$ и δ_w - соответственно, наружный, внутренний диаметры и толщина стенки ТОК.

Согласно [4, 5] поверхностная плотность потока полезной энергии на наружной поверхности ТОК ЛПТП ПСВК ($q_{пол}$) определяется из отношения суммы поверхностных плотностей тепловых потоков, переданного от ЛПП к наружной поверхности ТОК путём теплопроводности, отнесённого к единице её длины ($q_{пол\ell_{лп}}$), и непосредственно поглощённого наружной поверхностью рассматриваемого ТОК суммарного СИ, также отнесённого к единице его длины ($q_{пол\ell_{тк}}$), к её ширине $(2a_{лп} + d_{нар})n$, т.е.,

$$q_{пол} = \frac{q_{пол\ell_{лп}} + q_{пол\ell_{тк}}}{(2a_{лп} + d_{нар})n} \quad (2)$$

где

$$q_{пол\ell_{лп}} = 2a_{лп}\eta_{лп} \left[q_{полгп}^{\Sigma} - K_{np-p-o} (\bar{t}_{w_{нар}} - t_o) \right] n, \quad (3)$$

$$q_{пол\ell_{тк}} = d_{нар} \left[q_{полгп}^{\Sigma} - K_{np-p-o} (\bar{t}_{w_{нар}} - t_o) \right] n, \quad (4)$$

$$\eta_{лп} = \frac{th\left(a_{лп} \sqrt{\frac{K_{np-p-o}}{\delta_{лп} \lambda_{лп}}}\right)}{a_{лп} \sqrt{\frac{K_{np-p-o}}{\delta_{лп} \lambda_{лп}}}}, \quad (5)$$

- тепловая эффективность ЛПП (т.е. ребра) листотрубной ЛПТП; $\lambda_{лп}$ - коэффициент теплопроводности материала изготовления ЛПП; K_{np-p-o} - приведённый к единице площади фронтальной поверхности корпуса ПСВК суммарный коэффициент тепловых потерь ЛПТП в окружающую среду; $\bar{t}_{w_{нар}}$ - температура наружной поверхности стенки ТОК; t_o - температура окружающей среды;

$$q_{полгп}^{\Sigma} = q_{полгп}^{np} + q_{полгп}^{оиф} \quad (6)$$

- поверхностная плотность потока суммарного (прямого - $q_{\text{пол}p}^{np}$ и диффузного - $q_{\text{пол}p}^{\text{диф}}$) СИ, поглощённого фронтальной поверхностью ЛПТП.

В свою очередь,

$$q_{\text{пол}p}^{np} = (\alpha_p \tau_{cn})_{\text{эфф}}^{np} q_{\text{пад}c}^{np} \quad (7)$$

и

$$q_{\text{пол}p}^{\text{диф}} = (\alpha_p \tau_{cn})_{\text{эфф}}^{\text{диф}} q_{\text{пад}c}^{\text{диф}}, \quad (8)$$

где $(\alpha_p \tau_{cn})_{\text{эфф}}^{np}$ и $(\alpha_p \tau_{cn})_{\text{эфф}}^{\text{диф}}$ -соответственно, эффективная приведённая (к единице площади фронтальной поверхности ПСВК) поглощательная способность ЛПТП прямого и диффузного СИ; $q_{\text{пад}c}^{np}$ и $q_{\text{пад}c}^{\text{диф}}$ - соответственно, поверхностная плотность потока прямого и диффузного СИ, падающего на плоскость фронтальной поверхности корпуса ПСВК.

Подставляя значения $q_{\text{пол}p}^{np}$ и $q_{\text{пол}p}^{\text{диф}}$ из (3) и (4), соответственно, в отношение (2) и с учётом выражения (6), получим:

$$q_{\text{пол}} = \frac{(2a_{\text{лн}} \eta_{\text{лн}} + d_{\text{нар}})}{2a_{\text{лн}} + d_{\text{нар}}} \left[q_{\text{пол}p}^{\Sigma} - K_{\text{нр}p-o} (\bar{t}_{\text{внар}} - t_o) \right] \quad (9)$$

Поток полезной тепловой энергии, определяемый по (9), передаётся от наружной поверхности стенки ТОК к ее внутренней поверхности, т.е.

$$q_{\text{пол}} = \frac{\lambda_{\text{ст}}}{\delta_{\text{ст}}} \frac{P_{\text{вср}}}{2a_{\text{лн}} + d_{\text{нар}}} (\bar{t}_{\text{внар}} - t_{\text{ввн}}), \quad (10)$$

где

$$P_{\text{вср}} = \frac{2\pi\delta_w}{\ln \frac{d_{\text{нар}}}{d_{\text{вн}}}} \quad (11)$$

- периметр среднего поперечного сечения стенки единичного ТОК круглой формы.

Выражения (9) и (10) представляют собой систему балансовых уравнений (т.е. математической модели теплового баланса) листотрубной ЛПТП ПСВК.

Из совместного рассмотрения выражений (9) и (10) (с целью исключения из них неизвестного $\bar{t}_{\text{внар}}$) и с учётом выражения для определения значения поверхностной плотности полезного получаемого теплового потока из ПСВК, определяемого по формуле:

$$q_{\text{пол}} = (\dot{m}c_p)_f (t_{\text{фвых}} - t_{\text{фвх}}), \quad (12)$$

а также значения $P_{\text{вср}}$, определяемого из (11), получим

$$\bar{t}_{\text{ввн}} = t_o + \frac{q_{\text{пол}}^{\Sigma}}{K_{\text{нр}p-o}} - (\dot{m}c_p)_f (t_{\text{фвых}} - t_{\text{фвх}}) (2a_{\text{лн}} + d_{\text{нар}}) \left[\frac{1}{K_{\text{нр}p-o} (2a_{\text{лн}} \eta_{\text{лн}} + d_{\text{нар}})} + \frac{\ln \frac{d_{\text{нар}}}{d_{\text{вн}}}}{2\pi\lambda_w} \right], \quad (13)$$

где

$$\dot{m}_f = \frac{G_f}{F_{\text{фр}}} \quad (14)$$

- удельный (отнесённый к единице площади фронтальной поверхности корпуса ПСВК) массовый расход воды через ЛПТП; c_p -удельная теплоёмкость воды; $t_{\text{фвх}}$ и $t_{\text{фвых}}$ - соответственно, температура исходной (холодной) воды на входе в коллектор и горячей воды на выходе из него;

$$F_{\text{фр}} = \frac{F_{\text{мн}}}{K_{\text{зан}}} \quad (15)$$

- площадь фронтальной поверхности корпуса ПСВК; $K_{зан}$ - коэффициент заполнения коллектора.

Приводим практический пример расчета по определению значения $\bar{t}_{вн}$ для ПСВК среднего качества с площадью фронтальной поверхности корпуса ($F_{фр}$) $1,9375 \text{ м}^2$ ($1,25 \times 1,55$) и со светопрозрачным покрытием (СП) из оконного стекла толщиной (δ_c) $0,004 \text{ м}$ и коэффициентом ослабления СИ (β_c) 35 м^{-1} . ЛПТП листотрубного типа, изготовленной из меди, имеет площадь фронтальной поверхности (F_{mn}) $1,8$ ($1,2 \times 1,5$) м^2 . Число ТОК ЛПТП (n) 10 шт., наружный ($d_{нар}$) и ($d_{вн}$) внутренний диаметры ТОК $0,011 \text{ м}$ и $0,01 \text{ м}$, соответственно. Толщина стенки ТОК $\delta_w = 0,5 \text{ мм}$. Число ЛПП ЛПТП ($2n$) 20 шт., ширина ($a_{лп}$) и толщина ($\delta_{лп}$) ЛПП $0,054 \text{ м}$ и $0,25 \text{ мм}$, соответственно. Поверхность ЛПТП покрыта черной эмалью ПФ 115. Коэффициент заполнения коллектора $K_{зан} = 0,929$. Коллектор ориентирован на юг и установлен под углом 30° к плоскости горизонта.

Экспериментальные исследования по определению удельной теплопроизводительности ($q_{пол}$) коллектора в натуральных условиях проведены в околополуденные часы 18 августа 2014 г. Согласно результатам измерений $q_{надс}^{np} = 835 \text{ Вт/м}^2$; $q_{надс}^{дуф} = 95 \text{ Вт/м}^2$; $t_o = 33,4 \text{ }^\circ\text{C}$. Скорость ветра (v) $2,8 \text{ м/с}$. При $G_f = 21,3 \text{ л/час}$, значение \dot{m}_f составляет $3,054 \cdot 10^{-3} \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$. При $t_{fex} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_{fвых} = 60,8 \text{ }^\circ\text{C}$, и $c_{pf} = 4186,8 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{}^\circ\text{C)}$ значение $q_{пол}$, определенное по (12), составляет $502,51 \text{ Вт/м}^2$.

Согласно результатам лабораторных измерений и соответствующих расчетов, при $K_{зан} = 0,929$ и коэффициенте пропускания СИ слоя пыли и грязи на наружной поверхности СП ($\tau_{нз}$) $0,94$ значения $(\alpha_p \tau_{сн})_{эфф}^{np} = 0,705$ и $(\alpha_p \tau_{сн})_{эфф}^{дуф} = 0,613$. Значения $q_{нозлр}^{np}$ и $q_{нозлр}^{дуф}$, определенные по (7) и (9), составляет $588,68 \text{ Вт/м}^2$ и $58,23 \text{ Вт/м}^2$, соответственно, а $q_{нозлр}^{\Sigma}$ - по формуле (6), $646,91 \text{ Вт/м}^2$.

Значение средней рабочей температуры поверхности (\bar{t}_p), определенное по [6]

$$\bar{t}_p = 22,9358 \left\{ \left[(5,8426 - 0,0101t_o)^2 + 0,0872(5,8426t_o + 0,0117t_o^2 + q_{нозлр}^{\Sigma} - q_{пол}) \right]^{0,5} - 5,8426 + 0,0101t_o \right\}, \text{ }^\circ\text{C}, \quad (16)$$

при $t_o = 33,4 \text{ }^\circ\text{C}$; $q_{нозлр}^{\Sigma} = 646,91 \text{ Вт/м}^2$ и $q_{пол} = 502,51 \text{ Вт/м}^2$ составляет $52,95 \text{ }^\circ\text{C}$.

Соответствующее значение K_{np-p-o} , определенное по [7]

$$K_{np-p-o} = 5,8426 + 0,0218\bar{t}_p + 0,0177t_o, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{}^\circ\text{C)}, \quad (17)$$

составляет $7,388 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{}^\circ\text{C)}$.

Значение $\eta_{лп}$, определенное по (5), при $K_{np-p-o} = 7,388 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{}^\circ\text{C)}$; $\lambda_{лп} = 390 \text{ Вт/(м} \cdot \text{}^\circ\text{C)}$ и $\delta_{лп} = 0,25 \text{ мм}$ составляет $0,932$.

Значение $\bar{t}_{вн}$, определенное по (13), при указанных выше значениях, входящих в него параметров, составляет $48,33 \text{ }^\circ\text{C}$.

Значение коэффициента тепловой эффективности ЛПТП (η_{mn}), определенное по [8], будет:

$$\eta_{mn} = \frac{(\dot{m}c_p)_f}{K_{np-p-o}} \cdot \ln \frac{\frac{q_{нозлр}^{\Sigma}}{K_{np-p-o}} + t_o - t_{fex}}{\frac{q_{нозлр}^{\Sigma}}{K_{np-p-o}} + t_o - t_{fвых}}}, \quad (18)$$

и составляет $0,87$, а значение усредненного по длине ТОК среднемассовой температуры воды (\bar{t}_{fe}), определенное по [8]

$$\bar{t}_{f_e} = t_o + \frac{q_{nozlp}^\Sigma}{K_{np\ p-o}} - (t_{f_{вых}} - t_{f_{вх}}) \cdot \left(\ln \frac{\frac{q_{nozlp}^\Sigma}{K_{np\ p-o}} + t_o - t_{f_{вх}}}{\frac{q_{nozlp}^\Sigma}{K_{np\ p-o}} + t_o - t_{f_{вых}}} \right)^{-1}, \quad (19)$$

составляет 42,79 °C.

Значение $q_{пол}$ определенное по [8]

$$q_{пол} = \eta_{mn} \left[q_{nozlp}^\Sigma - K_{np\ p-o} (\bar{t}_{f_e} - t_o) \right], \text{ Вм/м}^2, \quad (20)$$

при значениях $\eta_{mn}=0,87$; $q_{nozlp}^\Sigma=646,91 \text{ Вм/м}^2$; $K_{np\ p-o}=7,388 \text{ Вм/(м}^2 \cdot \text{°C)}$; $\bar{t}_{f_e}=42,79 \text{ °C}$ и $t_o=33,4 \text{ °C}$ составляет 502,46 Вм/м².

Очень близкое совпадение значений $q_{пол}$, определенных по (12) – 502,51 Вм/м² и по (20) – 502,46 Вм/м², подтверждает высокую достоверность предложенной методики расчета значения $\bar{t}_{w_{вн}}$ в листотрубных ЛПТП ПСВК.

Аналогичным образом может быть установлено выражение для определения значения $\bar{t}_{w_{вн}}$ в ПСВК с проточной ЛПТП, имеющей форму тонкого параллелепипеда (рис.2), для которой $a_{mn}=0$; $\eta_{лн}=1$; $p_{w_{ср}} \cong D_{mn}$ и $\bar{t}_{w_{нар}} = \bar{t}_p$ (где D_{mn} ширина рассматриваемой панели):

$$\bar{t}_{w_{вн}} = t_o + \frac{q_{nozlp}^\Sigma}{K_{np\ p-o}} - (\dot{m}c_p)_f (t_{f_{вых}} - t_{f_{вх}}) \left[\frac{1}{K_{np\ p-o}} + \frac{\delta_w}{\lambda_w} \right]. \quad (21)$$

Отметим, что выражение (21), как частный случай выражения (13), может быть получено путем реализации математической модели коллектора рассматриваемого типа, балансовые уравнения которой имеют вид (12),

$$q_{пол} = q_{nozlp}^\Sigma - K_{np\ p-o} (\bar{t}_p - t_o) \quad (22)$$

и

$$q_{пол} = \frac{\lambda_w}{\delta_w} (\bar{t}_p - \bar{t}_{w_{вн}}). \quad (23)$$

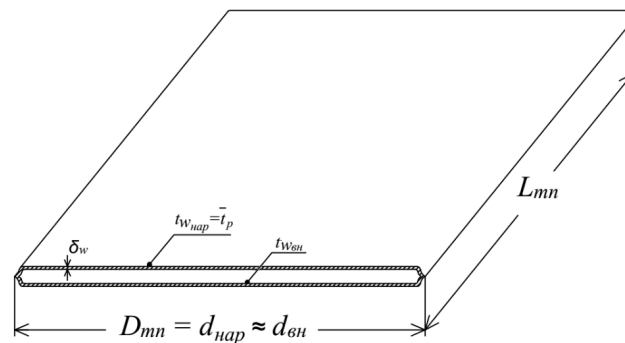


Рис. 2. Принципиальная схема ЛПТП, имеющей форму тонкого параллелепипеда, ПСВК: D_{mn} и L_{mn} – ширина и длина ЛПТП; δ_w – толщина стенки; \bar{t}_p – средняя рабочая температура поверхности ТОК.

Как показывают результаты расчетных исследований, значения $\frac{d_{нар}}{2\pi\lambda_w}$ в (13) и $\frac{\delta_w}{\lambda_w}$ в (21) для ЛПТП, изготовленных из металла, существенно (более, чем в 3000 раза) меньше, чем

$\frac{1}{(2a_{\text{лп}}\eta_{\text{лп}} + d_{\text{нар}})K_{\text{нрр-о}}}$ в (13) и $\frac{1}{K_{\text{нрр-о}}}$ (21). В связи с этим, выражения (13) и (21) могут быть представлены в виде:

$$\bar{t}_{\text{вн}} = t_o + \frac{q_{\text{нозлз}}^{\Sigma}}{K_{\text{нрр-о}}} - (\dot{m}c_p)_f (t_{f_{\text{вых}}} - t_{f_{\text{вх}}}) \frac{2a_{\text{лп}} + d_{\text{нар}}}{K_{\text{нрр-о}}(2a_{\text{лп}}\eta_{\text{лп}} + d_{\text{нар}})} \quad (24)$$

и

$$\bar{t}_{\text{вн}} = t_o + \frac{q_{\text{нозлр}}^{\Sigma} - (\dot{m}c_p)_f (t_{f_{\text{вых}}} - t_{f_{\text{вх}}})}{K_{\text{нрр-о}}} \quad (25)$$

Относительная погрешность расчетов при этом составляет менее 0,05%.

Из анализа выражений (24) и (25) следует, что при $\dot{m}_f = 0$ (т.е. при $q_{\text{пол}} = 0$) значение $\bar{t}_{\text{вн}}$ равно значению равновесной температуры поверхности ЛПТП ПСВК, определяемому по [6]

$$\bar{t}_{\text{рр}} = t_o + \frac{q_{\text{назлр}}^{\Sigma}}{K_{\text{нрр-о}}}, \quad (26)$$

что подтверждает их достоверность.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Михеев М.А. Основы теплопередачи. – М. – Л.: Госэнергоиздат. 1956.- 392 с. [2] Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. -М.: «Энергия». 1975.- 488 с. [3] Осипова В.А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена. -М.: «Энергия». 1969. - 392 с. [4] Duffie J.A., Beckman W.A. Solar engineering of Thermal Processes. Fourth Edition. -Hoboven New Jersey: John Wiley Sons. Inc., -2013.- 910 p. [5] Аvezов Р.Р., Орлов А.Ю. Солнечные системы отопления и горячего водоснабжения. – Ташкент. 1988. – 288 с. [6] Avezova N.R., Avezov R.R. Applied Solar Energy. 2015. V. 51. № 2. pp. 85-87. [7] Avezova N.R., Avezov R.R. Applied Solar Energy. 2015. V. 51. № 1. pp. 10-14. [8] Avezova N.R. Applied Solar Energy. 2015. V. 51. № 3. pp. 172-176.

Международный институт солнечной энергии
avezov@uzsci.net

Дата поступления:
15.02.2017

Ю.К. РАШИДОВ

РАСЧЕТ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АКТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА САМОДРЕНИРУЕМОГО ГЕЛИОКОНТУРА ОТОПИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Проведены экспериментальные исследования гидродинамических характеристик активного элемента самодренируемого гелиоконтурного 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 гелиоконтурного отопительной системы.

В работах [1-3] для защиты солнечных коллекторов от замерзания в зимний период приведено описание, принцип работы, энергетическая эффективность и расчёт самодренируемого гелиоконтурного водяной отопительной системы с активным элементом в виде сужающего устройства - трубы Вентури.