

РАСЧЕТ САМОРЕГУЛИРУЮЩЕГОСЯ АКТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА ДЛЯ МНОГОСЛОЙНОГО СТРАТИФИКАЦИОННОГО БАКА-АККУМУЛЯТОРА ТЕПЛОТЫ СИСТЕМЫ СОЛНЕЧНОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Разработан метод расчёта равномерно перфорированного по высоте водораспределителя постоянного сечения для многослойного стратификационного бака-аккумулятора теплоты систем солнечного отопления и горячего водоснабжения.

Водяные баки-аккумуляторы теплоты систем солнечного теплоснабжения могут работать при значительной степени температурной стратификации, когда верхняя часть аккумуляторного бака горячее, чем нижняя [1]. Принцип послойной зарядки теплового бака-аккумулятора от солнечного коллектора, когда вода, нагретая в коллекторе, подается в соответствующий её температуре слой по высоте бака и исключается перемешивание слоев, широко используется в настоящее время при проектировании систем солнечного горячего водоснабжения и отопления [2, 3, 4]. При этом потенциальный выигрыш в доле покрытия солнечной энергии для солнечной установки с идеально стратифицированным баком и с малым удельным расходом воды через солнечный коллектор, в диапазоне от 0,002 до 0,007 кг/(м²·с), по сравнению с полностью перемешанным баком и большим удельным расходом воды через солнечный коллектор ~ 0,01÷0,02 кг/(м²·с), может достигать 1/3 [1]. Несмотря на то, что при больших удельных расходах обеспечиваются более высокие значения коэффициента отвода теплоты от коллектора F_R [1]. Повышение доли покрытия нагрузки в такой установке согласно некоторым экспериментальным данным [5] возможно с 0,48 до 0,66. На практике столь существенно выиграть пока получить не удалось вследствие сложности реализации хорошей температурной стратификации в аккумуляторных баках [1]. Поэтому усовершенствование конструкции стратификационных аккумуляторов теплоты и методов их расчёта, обеспечивающих устойчивую температурную стратификацию, является актуальной задачей.

В работе [6] приведён расчет саморегулирующегося активного элемента стратификационного аккумулятора теплоты для условий двухслойной стратификации, когда по всей высоте аккумуляторного бака разность температур (и плотностей) между поступающим в аккумулятор теплоносителем и аккумулирующей средой остаётся постоянной. В реальных режимах работы в течение дня в тепловой аккумулятор обычно поступает теплоноситель с различной температурой его нагрева в солнечных коллекторах, и в нём наблюдается многослойная температурная стратификация воды. Поэтому саморегулирующийся активный элемент аккумулятора должен быть рассчитан на многослойную температурную стратификацию воды. Ниже рассмотрены особенности расчета саморегулирующегося активного элемента для многослойного стратификационного аккумулятора теплоты.

Рассмотрим процесс раздачи воды водораспределителем постоянного сечения с равномерной перфорацией по длине при действии объемных сил (рис.1, а). Примем начало координат у заглушенного конца водораспределителя (рис.1, б) и направим ось абсцисс вертикально вниз, навстречу потока воды. Заменим перфорированные отверстия условной щелью постоянной ширины δ и проведем в водораспределителе два поперечных сечения на расстояниях x и $x+dx$ от заглушенного конца (рис.1,б).

Очевидно, уменьшение расхода воды внутри водораспределителя от сечения $x+dx$ к сечению x равно расходу воды, вытекающей через условную щель между этими сечениями.

Обозначив скорость в сечении x через W_x , а в сечении $x+dx$ через W_x+dW_x и нормальную скорость истечения из щели в сечении x через v_x можно записать:

$$FdW_x = v_x \delta dx. \quad (1)$$

Переходя к производной, получаем

$$W'_x = \frac{\delta}{F} v_x. \quad (2)$$

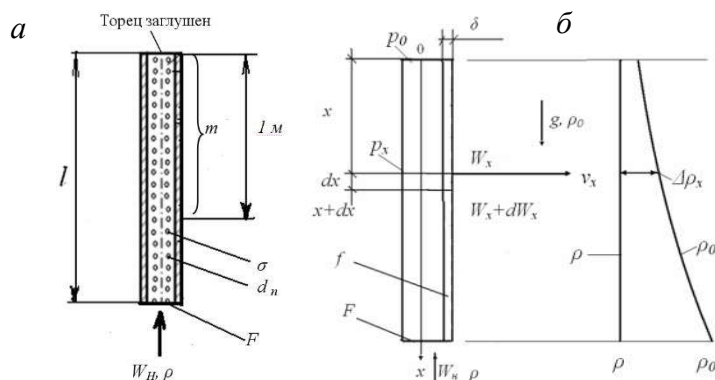


Рис.1. Схема водораспределителя постоянного сечения с равномерной перфорацией (а) и с условной щелью постоянной ширины (б).

Нормальная скорость воды в щели

$$v_x = \mu \sqrt{\frac{2}{\rho}(p_x - p_0)} = \mu \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p_x}. \quad (3)$$

Составим применительно к сечениям $x+dx$ и x уравнение Бернулли:

$$\Delta \rho_x g x + \Delta \rho_x g dx + \Delta p_x + d\Delta p_x + \frac{\rho W_x^2}{2} + d\left(\frac{\rho W_x^2}{2}\right) = \Delta \rho_x g x + \Delta p_x + \frac{\rho W_x^2}{2} + \frac{\lambda}{d_3} \frac{\rho W_x^2}{2} dx.$$

Сократив в левой и правой частях уравнения одинаковые члены и переходя к производным, получаем

$$\Delta p'_x + \rho W'_x W_x - \frac{\lambda}{d} \frac{\rho W_x^2}{2} = -\Delta \rho_x g. \quad (4)$$

Выразим $\Delta p'_x$ через скорость W_x . Из уравнения (3) следует $\Delta p_x = \frac{\rho v_x^2}{2\mu^2}$.

Согласно выражению (2) $v_x = \frac{F}{\delta} W'_x$ и исходя из этого Δp_x равно:

$$\Delta p_x = \frac{\rho F^2}{2\mu^2 \delta^2} W_x'^2.$$

Взяв производную, получаем

$$\Delta p'_x = \frac{\rho F^2}{\mu^2 \delta^2} W'_x W_x''.$$

Подставляя в уравнение (4) величину $\Delta p'_x$ и умножая на $\mu^2 \delta^2 / \rho F^2$, получим:

$$W_x'' W'_x + \frac{\mu^2 \delta^2}{F^2} W'_x W_x - 0,5 \frac{\mu^2 \delta^2}{F^2} \frac{\lambda}{d} W_x^2 = -\frac{\mu^2 \delta^2}{F^2} \frac{\Delta \rho_x g}{\rho}. \quad (5)$$

Введем обозначения:

$$\bar{W}_x = W_x / W_H, \quad \bar{x} = x / l$$

Тогда

$$W_x = W_H \bar{W}_x; \quad x = l \bar{x};$$

$$W'_x = \frac{dW_x}{dx} = \frac{W_H}{l} \cdot \frac{d\bar{W}_x}{d\bar{x}} = \frac{W_H}{l} \bar{W}_x';$$

$$W_x'' = \frac{dW'_x}{dx} = \frac{W_H}{l^2} \cdot \frac{d\bar{W}_x'}{d\bar{x}} = \frac{W_H}{l^2} \bar{W}_x''$$

Подставляя найденные значения W_x, W'_x и W_x'' в (5) и сокращая на W_H^2 / l^3 получим следующее дифференциальное уравнение:

$$\overline{W}_x'' \overline{W}_x' + p \overline{W}_x' \overline{W}_x + q \overline{W}_x^2 = p Ri \quad (6)$$

где $p = \mu^2 \bar{f}^2$; $q = -0,5 \mu^2 \bar{f}^2 \lambda \bar{l}$; $Ri = \frac{-gl \Delta \rho_x}{W_H^2 \rho}$; $\bar{f} = \frac{f}{F} = \frac{\delta}{F}$; $\bar{l} = \frac{l}{d}$

Граничные условия при

$$\left. \begin{aligned} \bar{x} = 0 \quad \overline{W}_0 = 0 \\ \bar{x} = 1 \quad \overline{W}_H = 1 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

В дальнейшем величину $\mu \bar{f}$ будем называть параметром условной щели, а $\lambda \bar{l}$ - параметром канала водораспределителя. Безразмерный комплекс Ri является модифицированным числом Ричардсона, которое характеризует соотношение архимедовых сил и сил инерции в начале водораспределителя. В частности, $Ri=0,5$ означает равенство этих сил ($-gl\Delta\rho_x = 0,5\rho W_H^2$). Если архимедовы силы направлены вверх ($\Delta\rho>0$), то $Ri<0$, в противном случае, когда ($\Delta\rho<0$) – $Ri>0$.

Уравнение (6) и условия (7) дают полную математическую формулировку рассматриваемой краевой задачи.

Допустим, что она решена, т.е. найдена относительная скорость воды внутри водораспределителя

$$\overline{W}_x = \varphi(p, q, Ri, \bar{x}). \quad (8)$$

В таком случае относительная средняя скорость истечения воды из щели составит

$$\bar{v}_x = \frac{v_x}{v_{cp}} = \frac{FW_x'}{\delta v_{cp}} = \frac{FW_H}{\delta v_{cp}} \overline{W}_x' = \overline{W}_x'. \quad (9)$$

Заметим, что при равномерной раздаче $\bar{v}_x=1$. В стратификационном аккумуляторе водораспределитель осуществляет неравномерную раздачу, что обуславливается действием архимедовых сил и характеризуется максимальной скоростью истечения в одном крайнем сечении, где разность $\Delta\rho_x \approx 0$, и минимальной - в противоположном сечении. Учитывая, что для исключения подсоса воды в водораспределитель $\bar{v}_x \geq 0$, условия на которые он должен быть рассчитан, следующие:

$$Ri = 0,5 \quad \bar{v}_x = 1; \quad (10)$$

$$Ri < 0,5 \quad \bar{v}_H = 0; \quad (11)$$

$$Ri > 0,5 \quad \bar{v}_0 = 0. \quad (12)$$

Определяющей величиной при расчете водораспределителя является параметр условной щели $\mu \bar{f}$. Согласно [7], условие (10) выполняется при $\mu \bar{f} < 1$. Параметр условий щели при котором выполняется условие (11) или (12) назовем критическим, обозначив его через $\mu \bar{f}^{kp}$.

Решив нелинейное дифференциальное уравнение (6) можно установить зависимость $\mu \bar{f}^{kp}$ от Ri . Однако для этого необходимо, чтобы было задано изменение разности плотностей $\Delta\rho_x$ по высоте аккумуляторного бака, которое входит в критерий Ричардсона Ri . Для двухслойной стратификации в аккумуляторном баке её можно принять постоянной по высоте аккумулятора. Аналитическое и численное решение задачи для данного случая приведены нами в [8-9].

При многослойной стратификации, когда разность плотностей $\Delta\rho_x$ по высоте аккумуляторного бака изменяется непрерывно (рис.1, б), аккумуляторный бак можно разделить на отдельные температурные слои с расчётной толщиной l_c и в пределах каждого слоя, применяя теорему о среднем, можно считать разность плотностей $\Delta\rho_x$ постоянной. В этом случае для расчёта равномерно перфорированного по длине водораспределителя постоянного сечения можно воспользоваться зависимостями, приведёнными в работе [6].

Следует заметить, что точность такого расчёта будет повышаться по мере увеличения количества температурных слоев и уменьшения их расчётной толщины l_c , а скорость истечения теплоносителя из перфорированных отверстий уменьшится, что способствует устойчивости температурной стратификации в аккумуляторе. При этом по мере прогрева аккумулятора водораспределитель будет работать не всей своей высотой l , а некоторой её частью (в идеальном случае, равной толщине температурного слоя l_c), так как высота истечения теплоносителя из него в зависимости от температуры

будет изменяться под действием архимедовых сил, соизмеримых внутри водораспределителя с силами инерции. Поэтому при расчете саморегулирующегося активного элемента для многослойного стратификационного аккумулятора в критерии Ричардсона вместо определяющего размера l следует использовать расчётную толщину температурного слоя l_c .

Пример расчёта. Рассчитать саморегулирующийся активный элемент стратификационного бака-аккумулятора теплоты системы солнечного теплоснабжения со следующими расчётными параметрами: общая площадь солнечных коллекторов $F=50 \text{ м}^2$; объём водяного бака-аккумулятора $V_{\text{ак}}=4 \text{ м}^3$ (стандартный ёмкостный подогреватель типа СТД 3078); высота водораспределителя $l=1,2 \text{ м}$; расход греющего теплоносителя в гелиоконтуре $G=720 \text{ кг/час}$ (из расчёта $0,004 \text{ л/(м}^2\text{с)}$); температура греющего теплоносителя $t_g=50^\circ\text{C}$ ($\rho_{50}=988,07 \text{ кг/м}^3$, $\nu_{50}=0,556 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$); температура воды в аккумуляторном баке $t_o=20^\circ\text{C}$ ($\rho_{20}=998,23 \text{ кг/м}^3$); коэффициент расхода перфорированного отверстия $\mu=0,62$; абсолютная шероховатость внутренней поверхности водораспределителя $k=0,5 \text{ мм}$.

Расчёт выполнен для двухслойной и десятислойной стратификации в аккумуляторном баке в два этапа: предварительный и окончательный с использованием методики [6]. Результаты расчёта приведены в табл.1. В качестве активного элемента при двухслойной стратификации принимаем водораспределитель из стальной оцинкованной трубы $\varnothing 32 \text{ мм}$ и длиной $1,2 \text{ м}$, имеющий 84 перфорированных отверстия $\varnothing 4 \text{ мм}$, расположенных в 21 ряд по 4 отверстия в ряду с шагом 55 мм , а при десятислойной стратификации - водораспределитель из стальной оцинкованной трубы $\varnothing 100 \text{ мм}$ и длиной $1,2 \text{ м}$, имеющий 340 перфорированных отверстия $\varnothing 4 \text{ мм}$, расположенных в 85 рядов по 4 отверстия в ряду с шагом 14 мм .

Таблица 1

Пример расчёта								
Предварительный расчёт								
Обозначение величины	Ri_{kp}	$v_{\text{max}}, \text{ м/с}$	$v_{\text{cp}}, \text{ м/с}$	$f_p, \text{ м}^2$	$(\mu \bar{f}_p^{kp})_p$	$F_p, \text{ м}^2$	$D_p, \text{ м}$	$D_{\phi}, \text{ м}$
Способ определения [6]	из условия (3)	формула (10)	формула (11)	формула (12)	условие (8)	формула (13)	формула (14)	из условия (15)
Двухслойная стратификация	1	0,348	0,222	$9,12 \cdot 10^{-4}$	0,8	$7,07 \cdot 10^{-4}$	0,030	0,032
Десятислойная стратификация	1	0,110	0,070	$2,89 \cdot 10^{-3}$	0,8	$2,24 \cdot 10^{-3}$	0,053	0,065
Предварительный расчёт								
Обозначение величины	$F_{\phi}, \text{ м}^2$	$W_n, \text{ м/с}$	Re	λ	$\lambda \bar{l}$	Ri_k	случай	$\mu \bar{f}_p^{kp}$
Способ определения [6]	формула (16)	формула (17)	формула (18)	формула (19)	формула (20)	формула (21)	из условия (22)-(24)	по рис.2.
Двухслойная стратификация	$8,04 \cdot 10^{-4}$	0,252	14504	0,042	1,575	-1,91	3	0,81
Десятислойная стратификация	$3,32 \cdot 10^{-3}$	0,061	7131	0,040	0,074	-3,25	1	0,8
Окончательный расчёт								
Обозначение величины	$f_{\phi}, \text{ м}^2$	$v_{\text{cp}}, \text{ м/с}$	$v_{\text{max}}, \text{ м/с}$	Ri_{ϕ}	$Ri_{\phi} > Ri_{kp}$	$\Delta p^{kp}, \text{ Па}$	m , шт	Примечание
Способ определения [6]	формула (27)	формула (28)	формула (29)	формула (30)	из условия (31)	формула (32)	формула (34)	
Двухслойная стратификация	$1,05 \cdot 10^{-3}$	0,193	0,303	1,32	$1,32 > 1$	31,4	84	$d_n = 4 \text{ мм}$ 21 ряд по 4 отвер.
Десятислойная стратификация	$4,28 \cdot 10^{-3}$	0,047	0,074	2,21	$2,21 > 1$	1,84	340	$d_n = 4 \text{ мм}$ 85 рядов по 4 отвер.

Сравнительный анализ результатов расчёта саморегулирующегося активного элемента стратификационного бака-аккумулятора теплоты из условий двухслойной и десятислойной стратификации показывает (табл.1), что средняя v_{cp} и максимальная v_{max} скорости истечения воды при десятислойной стратификации уменьшаются в 4,1 раза, фактическое значение модифицированного числа Ричардсона Ri_{ϕ} увеличивается в 1,7 раза, потери давления в активном элементе Δp^{kp} уменьшаются в 17 раз, количество перфорированных отверстий увеличивается в 4 раза.

Таким образом, увеличение количества расчётных температурных слоёв при проектировании саморегулирующегося активного элемента стратификационного бака-аккумулятора, позволяет улучшить его гидродинамические характеристики, обеспечивающие повышение устойчивости температурного расслоения воды внутри аккумулятора.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Даффи Дж., Бекман У. Основы солнечной теплоэнергетики. Пер. с англ. – Долгопрудный: Издательство Дом «Интеллект». 2013. 888 с. [2] Книга о «Солнце». Руководство по проектированию систем солнечного теплоснабжения. Издание 06/2010. www.viessmann.ua. [3] Документация по проектированию: гелиотехника Logasol для горячего водоснабжения и поддержки отопления. Издание 03/2013. www.buderus.ru. [4] Рашидов Ю.К. Оценка эффективности систем солнечного горячего водоснабжения с плоскими солнечными коллекторами при послойном нагреве теплового аккумулятора // Фундаментальные и прикладные вопросы физики. Сборник тезисов докладов международной конференции, Ташкент. 5-6 ноября 2015. С.429-433. [5] Carvalho M.J., Collares-Pereira M., Cunha F.M., Vitorino C. An Experimental Comparison of Operating Strategies for Solar Water Systems// Solar Energy. 1988. V.41. P. 33. [6] Рашидов Ю.К., Вохидов А.У. // Гелиотехника. 2016. №2. С.19-22. [7] Талиев В.Н. Аэродинамика вентиляции: Учеб. пособие для вузов.- М.: Стройиздат, 1979. 295 с. [8] Рашидов Ю.К. // Гелиотехника. 1983. №2. С.62-67. [9] Рашидов Ю.К. // Гелиотехника. 1983. №5. С.55-58. [10] Рашидов Ю.К. // Гелиотехника. 1987. №6. С.61-65.

Ташкентский архитектурно-строительный институт
yu_rashidov@inbox.uz

Дата поступления
 16.12.2015 г.

УДК 662.447÷536.24

Н.Р. АВЕЗОВА^{1,2}, А.У. ВОХИДОВ^{1,2}, Д.У. АБДУХАМИДОВ¹, Э.Ю. РАХИМОВ¹

ВЛИЯНИЕ ЧАСТИЧНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СВЕТОПРОЗРАЧНЫХ ПОКРЫТИЯХ КОРПУСА ПЛОСКИХ СОЛНЕЧНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ НА ТЕПЛОВЫЕ ПОТЕРИ ИХ ЛУЧЕПОГЛОЩАЮЩЕЙ ТЕПЛООБМЕННОЙ ПАНЕЛИ В ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Приведены результаты расчетных исследований по определению влияния частичного поглощения и преобразования в тепло солнечного излучения (СИ), проходящего через светопрозрачные покрытия (СП) корпуса плоских солнечных коллекторов (ПСК) для нагрева жидкого теплоносителя (ЖТН), на основе которых установлено выражение для определения значения эффективного приведенного коэффициента тепловых потерь лучепоглощающей теплообменной панели (ЛТПП) рассматриваемого коллектора в окружающей среде.

В эффективном приведенном (к единице площади фронтальной поверхности корпуса) коэффициенте суммарных (конвективных и лучистых) тепловых потерь ЛТПП ПСК - $K_{np-p-o}^{\text{эфф}}$, определяемом из выражения

$$K_{np-p-o}^{\text{эфф}} = aK_{c-p-o}^{\text{эфф}} + vK_{\text{дн}p-o} + cK_{\text{б}p-o}, \quad (1)$$

в отличие от приведенного коэффициента тепловых потерь ЛТПП (K_{np-p-o}), учитывается снижение тепловых потерь ЛТПП вследствие частичного поглощения и преобразования в тепло проходящего через СП корпуса ПСК суммарного прямого и диффузного СИ.

Значение K_{np-p-o} определяется из выражения [1,2]:

$$K_{np-p-o} = aK_{c-p-o} + vK_{\text{дн}p-o} + cK_{\text{б}p-o}, \quad (2)$$

$$a = \frac{F_c}{F_{\text{фр}}}; v = \frac{F_{\text{дн}}}{F_{\text{фр}}}; c = \frac{(\delta_{\text{вн}p-c_1} + \delta_c)L_{\text{сп}}}{F_{\text{фр}}}, \quad (3)$$

где $F_{\text{фр}}$ – площадь фронтальной поверхности корпуса; F_c и $F_{\text{дн}}$ – соответственно, площади фронтальных поверхностей СП и донной теплоизоляции корпуса; $\delta_{\text{вн}p-c_1}$ и δ_c – соответственно, толщины замк-