VI Всероссийская (национальная) научная конференция: «Наука, технологии, общество: Экологический инжиниринг в интересах устойчивого развития территорий» (НТО-VI-2025)

17 (2025)

УДК 621
https://www.doi.org/10.47813/nto.6.2025.1004

EDN TADBDY

Расчет свободно – конвективного теплообмена в плоских солнечных воздухонагревателях

Е.С. Аббасов*, М.А. Умурзакова

Ферганский государственный технический университет, ул. Ферганская 86, Фергана, 150100, Узбекистан

*E-mail: erkinabbasov@yndex.ru

Аннотация. В статье обсуждается вопрос расчета конвективной теплоотдачи в канале плоского солнечного воздухонагревателя, при восхождении воздушного потока за счет термогравитационной конвекции в канале нагревателя. Для получения формулы расчета теплообмена авторы используют уравнения теплового баланса и теплопередачи составленного для условий свободного движения теплоносителя. Особенностью такого расчета является вычисление массового расхода воздушного теплоносителя, основанного на использовании понятия скорости потока, возникающего вследствие влияния объемной силы из-за разности плотностей воздуха.

Ключевые слова: солнечная радиация, плоский солнечный воздухонагреватель, термогравитационная конвекция, объемная сила, теплоотдача.

Calculation of free-convective heat transfer in flat solar air heaters

E.S. Abbasov*, M.A. Umurzakova

Fergana State Technical University, Fergana street 86, Fergana, 150100, Uzbekistan

*E-mail: erkinabbasov@yndex.ru

Abstract. The article discusses the issue of calculating convective heat transfer in the channel of a flat solar air heater, when the air flow rises due to thermogravitational convection in the heater channel. To obtain a formula for calculating heat transfer, the authors use the heat balance and heat transfer equations compiled for conditions of free movement of the coolant. A feature of this calculation is the calculation of the mass flow rate of the air coolant, based on the use of the concept of flow velocity, which arises due to the influence of volumetric force due to the difference in air densities.

Keywords: solar radiation, flat solar air heater, thermogravitational convection, volumetric force, heat transfer.

1. Введение

Республика Узбекистан находится в крайне благоприятном с точки зрения солнечного излучения месте земного шара, в котором преобладает особенно в летние месяцы прямая солнечная радиация. Согласно полученным измерениям интенсивность солнечной радиации в регионах республики может достигать 700 – 800 вт/м^{2}. Кроме того, республика обладает значительными запасами природного газа. Однако несмотря на такие природные возможности до сегодняшнего дня большое количество тепловой энергии, выработанной на тепловых электростанциях, расходуется на тепло потребляющие установки, такие как сушильные, отопительные системы, а также системы, связанные с переработкой фруктов и овощей.

В этой связи в последние несколько лет правительством республики Узбекистан уделяется большое внимание частичной замене в тех отраслях, где это целесообразно, тепловой энергии, полученной традиционным способом на альтернативную тепловую энергию полученной, в частности, путем преобразования солнечной энергии в специальных устройствах – коллекторах.

К таким отраслям можно отнести: сушильные системы, системы отопления (воздушные) и системы горячего водоснабжения.

Среди солнечных приемных устройств, собирающих энергию, можно выделить плоские солнечные воздухонагреватели, которые в последние годы приобретают значительную популярность благодаря их простоте, надежности и невысокой стоимости.

Солнечные воздухонагреватели могут быть с успехом использованы в сушильной установке, причем такие нагреватели могут функционировать и в условиях отсутствия принудительного движения воздуха, так как в этом случае воздушный теплоноситель легко движется вверх в каналах нагревателя, за счет подъёмных сил. Подробные исследования в области теплообмена в каналах таких нагревателей проводятся в основном в странах Ближнего востока, а также Африки [1-5].

В республиках Средней Азии изучение коллекторов как водяного, так и воздушного типа проводятся силами научно – исследовательских институтов и университетов. Анализируя ряд зарубежных источников таких исследований следует отметить, что по мнению авторов данной статьи в настоящее время мало уделено внимание расчетам свободно конвективного теплообмена в каналах воздухонагревателя, хотя дополнительные исследования такого вида теплообмена могли бы стать основой для проектирования и

массового изготовления этих устройств, которые уже сейчас используются в многочисленных фермерских хозяйствах.

2. Материалы и методы

Для решения указанной задачи воспользуемся известными в литературе [6-8] уравнениями.

Следует отметить, что согласно указанным источникам, посвященных теплообмену расчет свободно – конвективного теплообмена в каналах устройств может быть основан на следующих представлениях.

Наиболее распространенным случаем свободного движения является термогравитационная конвекция в неравномерно нагретом воздухе, когда легкие частицы всплывают вверх.

Скорость свободного движения зависит от разности температур нагретых и холодных частиц воздуха на входе в коллектор и на его выходе. Эту скорость называют характерной скоростью u_0 и наиболее известное выражение для такой скорости получается, если предположить, что объёмная сила, действующая на единицу массы $g(\rho_{вх} - \rho_{вых})$ на расстоянии l производит работу $g(\rho_{вх} - \rho_{вых})l$. Эта работа пропорциональна кинетической энергии движущегося потока $\rho_{ср}{u_0}^2/2$. Где $\rho_{ср} = (\rho_{вх} + \rho_{вых})/2$.

Однако в литературе предполагается что $\frac{g(\rho_{вх} - \rho_{вых})l}{\rho_{ср}{u_0}^2} = 1$, откуда

$$u_0 = [\, g(\rho_{вх} - \rho_{вых})l/\rho_{ср}]^{1/2} \qquad (1)$$

Такое определение скорости u_0 соответствует ламинарному свободно – конвективному движению, когда вязкие, инерционные и объемные силы – величины одного порядка. Здесь уместно считать, что на вертикальной стенке формируется пограничный слой, который постепенно теряет устойчивость и может переходить в турбулентный. На рисунке 1 показан профиль температуры и скорости в режиме свободной конвекции жидкой среды вдоль вертикальной нагретой стенки.

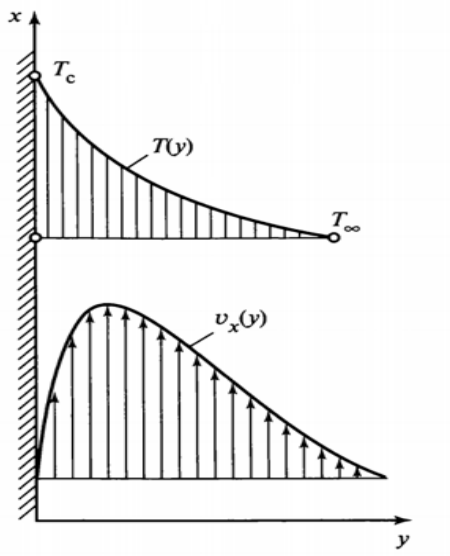

Рисунок 1. Распределение температур и скорости жидкой среды на вертикальной нагретой стенке.

Скорость на стенке равна нулю, затем она быстро увеличивается, достигает максимума, после чего постепенно уменьшается до нуля на большом расстоянии от стенки. Область изменения температуры жидкости от температуры стенки T_c до температуры вдали от стенки $T\infty$ называется тепловым пограничным слоем. При свободной конвекции тепловой и динамический пограничные слои взаимозависимы и их следует рассматривать совместно.

Учитывая, что основным показателем теплообмена является коэффициент теплоотдачи от поверхности к омывающей среде, получим формулу для его расчета, в условиях нагрева воздуха в воздушном солнечном воздухонагревателе.

Основными уравнениями расчета являются уравнение теплового баланса (уравнение 2) и уравнение теплоотдачи (уравнение 3).

$$Q = G \cdot c_p \cdot (t'' - t') \quad (2)$$

$$Q = \propto \cdot F \cdot \Delta t_{\text{лог}} \quad (3)$$

Особенностью в данном расчете является определение расхода воздуха в коллекторе за счет свободной конвекции (уравнение 4).

$$G = [\, g(\rho_{\text{вх}} - \rho_{\text{вых}}) l / \rho_{\text{ср}}]^{1/2} \cdot h \cdot a \quad (4)$$

В итоге формула расчета выглядит так (уравнение 5):

$$\propto = [\, g(\rho_{\text{вх}} - \rho_{\text{вых}}) l / \rho_{\text{ср}}]^{\frac{1}{2}} \cdot h \cdot a \cdot c_p \cdot (t'' - t') \,/ (a \cdot L \cdot \Delta t_{\text{лог}}), \quad (5)$$

где $\Delta t_{\text{лог}}$ – логарифмический температурный напор.

В расчетах рекомендуется применять формулу плотности воздуха (уравнения 6 и 7):

$$\rho = (3,4839 \cdot 100)/(t + 273) \quad (6)$$

$$\Delta t_{\text{лог}} = (\Delta t_{max} - \Delta t_{min})/\ln((\Delta t_{max}/\Delta t_{min}) \quad (7)$$

Здесь $\Delta t_{max} = t_{\text{ст}} - t'$, $\Delta t_{min} = t_{\text{ст}} - t''$, $t_{\text{ст}}$ – температура стенки воздухонагревателя.

3. Результаты и обсуждение

На рисунке 2 показан экспериментальный образец солнечного коллектора, на котором в летний период 2025 года проводились измерения температур воздуха и стенки нагревателя с помощью тепловизора и датчика температур (рисунок 3). В таблице 1 показаны результаты измерений температур и результаты вычислений коэффициента теплоотдачи по формуле (5).

Рисунок 2. Общий вид солнечного воздухонагревателя.

Рисунок 3. Тепловизор и датчик температур.

Таблица 1. Результаты измерений температур и вычислений коэффициента теплоотдачи.

Часы	t'	t''	t_w	$\propto$
9:00	25,3	75,4	86,9	37,6
10:00	30,1	85,5	99,9	36,3
11:00	33,4	88,8	104,7	35,3
12:00	30,3	91,8	109,6	40,5
13:00	32,1	95,8	108,1	40,2
14:00	32	93,7	111,6	38,8

Как показывают эксперименты и выполненные расчеты коэффициенты теплоотдачи могут колебаться в зависимости не только от солнечного поступления в воздушный коллектор, но и от степени прогрева наружного воздуха t'. эксперименты также показывают высокую степень нагрева воздуха на выходе из нагревателя практически до трех раз по сравнению с температурой поступающего воздуха.

4. Заключение

В результате проведенного исследования показано, что плоский солнечный воздухонагреватель имеет возможность обеспечивать горячим воздухом сушильные установки в летнее время в условиях республики даже в пассивном режиме работы, т.е. в отсутствии вентилятора. Кроме того исследования показали, что простая конструкция солнечного воздухонагревателя в условиях ферганского региона при небольших финансовых вложениях сможет обеспечивать не только в летнее время, но и в осенние дни малые фермерские хозяйства энергией, расходуемой на отопление жилых построек. В статье предложен способ расчета основного показателя конвективного теплообмена – теплоотдачи, которых необходим при проектировании таких устройств. Полученная формула расчета конвективного теплообмена справедлива только при термогравитационной конвекции.

Список литературы

1. Fan, W. A multi – objective design optimization strategy for hy brid photovoltaic thermal collector (PVT) – solar air heater (SAH) systems with fins / W. Fan, G. Kokogiannakis, Z. Ma. // Sol Energy. – 2018. – 163. P. 315-328.

2. Kong, D. Experimental study of solar photovoltaic / thermal (PV/T) air collector drying performance / D. Kong D, Y. Wang, M. Li, V. Keovisar, M. Huang, Q. Yu // Sol Energy. – 2020. – 208. –P. 978-989.
3. Chizlene Boussouar. Studi of the Thermal Perfomance of solar air Collectors with and without Perforated Baffles / Chizlene Boussouar, Brahim Rostane, Khaled aliane, Dineshkumar Ravi, Michal Jan Geca, Arkadiusz Gola // Energies. – 2024. – 17(3812). – P. 3-20.
4. Sajjad Tariq A. Shafi. Improvig Solar Air Heater Perfomance by Using New Novelty Perforated V-Shaped Barriers / Sajjad Tariq A. Shafi, Mohammed K. Al – Saadi, Ameer Abed Jaddoa // TERRA JOULE JOURNAL. – 2025. – 1. – P. 27-36.
5. Zhang, J. Systematic review of solar air collector technologies: Performance evalution, structure design and application analisis. / J. Zhang, T. Zhu // Sustainable Energy Tecnologies fnd Assesments. – 2022. 54. – 102885. – P. 2-15
6. Солодов, А.П. Тепломассообмен в энергетических установках. Инженерные методы расчета: электронный курс. / А.П. Солодов. – М.: Издательство МЭИ, 2015.
7. Кейс, В.М. Компактные теплообменники / В.М. Кейс. – М.: Энергия, 1967.
8. Аббасов, Е.С. Вопросы расчета температуры абсорбера и нагрева воздуха в солнечных воздушных коллекторах / Е.С. Аббасов, М.А. Умурзакова // Общество и инновации. – 2024. – 5(2). – С. 176-182.