

DOI: 10.17516/1999-494X-0414

УДК 621.1.016.4.(075.8)

## Studies of the Thermal and Hydraulic Characteristics of the Heat Carrier of a Solar Air Heating Collector

Mirsoli O. Uzbekov\* and Bekzod B. Boynazarov

*Ferghana Polytechnic Institute  
Ferghana, Republic of Uzbekistan*

Received 13.01.2022, received in revised form 15.07.2022, accepted 04.08.2022

**Abstract.** To improve the thermal efficiency of solar air collectors and more efficient heat removal from the absorber, it is necessary to organize an optimal turbulent regime of the coolant. The optimal turbulent regime can be organized by using absorbers of various geometric shapes, as well as using various absorber materials. Considering that reducing the economic costs of manufacturing efficient absorbers for solar air heaters is an urgent task, it is proposed to use drain metal shavings as an absorber for solar air heaters, which are industrial waste that have lost their consumer properties, and contribute to reducing the cost of heaters and increasing their thermal efficiency. The design of the solar air-heating collector, allowing to increase the contact surface between the coolant and the absorber, with the metal shavings absorber is difficult from the point of view of the movement of the air flow, which, repeatedly washing the heated surfaces of various absorber designs, increases its final temperature. This article presents the results of numerical and experimental studies of the theoretical analysis of the characteristics of the air flow intended for operation as a coolant in a solar air-heating collector. The comparison of the calculated and experimental data is carried out.

**Keywords:** renewable energy sources, solar energy, solar air heating collectors, absorber, potential current velocity, temperature in the boundary layer, thickness of the boundary layer.

Citation: Uzbekov, M.O., Boynazarov, B. B. Studies of the thermal and hydraulic characteristics of the heat carrier of a solar air heating collector. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2022, 15(5), 534–540. DOI: 10.17516/1999-494X-0414

## Исследования теплогидравлических характеристик теплоносителя солнечного воздухонагревательного коллектора

М. О. Узбеков, Б. Б. Бойназаров  
*Ферганский политехнический институт  
Республика Узбекистан, Фергана*

**Аннотация.** Для повышения тепловой эффективности солнечных воздушных коллекторов и более действенного теплоотвода от абсорбера необходимо организовать оптимальный турбулентный режим теплоносителя. Оптимальный турбулентный режим может быть организован путем применения абсорберов различной геометрической формы, а также различных материалов абсорбера. Учитывая, что снижение экономических затрат на изготовление эффективных абсорберов солнечных воздухонагревателей является актуальной задачей, предлагается вариант использования сливных металлических стружек в качестве абсорбера солнечных воздухонагревательных коллекторов, которые являются производственными отходами, утратившими свои потребительские свойства, и способствуют снижению себестоимости нагревателей и увеличению их тепловой эффективности. Конструкция солнечного воздухонагревательного коллектора с абсорбером металлических стружек, позволяющая увеличить контактную поверхность между теплоносителем и абсорбером, сложная с точки зрения движения воздушного потока, который, многократно омывая нагретые поверхности различной конструкции абсорберов, повышает свою конечную температуру. В данной статье приведены результаты численных и экспериментальных исследований теоретического анализа характеристики воздушного потока, предназначенного для работы в качестве теплоносителя в солнечном воздухонагревательном коллекторе. Проведено сопоставление полученных расчетных и экспериментальных данных.

**Ключевые слова:** возобновляемые источники энергии, солнечная энергия, солнечные воздухонагревательные коллекторы, абсорбер, скорость потенциального течения, температура в пограничном слое, толщина пограничного слоя.

Цитирование: Узбеков, М. О. Исследования теплогидравлических характеристик теплоносителя солнечного воздухонагревательного коллектора / М. О. Узбеков, Б. Б. Бойназаров // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2022, 15(5). С. 534–540. DOI: 10.17516/1999-494X-0414

**Введение.** В солнечных воздухонагревательных коллекторах (СВК) многократное обтекание воздушным потоком с малой скоростью поверхностей различной конфигурации будет способствовать росту коэффициента теплоотдачи, несмотря на существование в основном ламинарного течения [1, 2, 3]. То есть при преобладающем ламинарном режиме течения в такой конструкции СВК осуществляется интенсификация теплообмена. Согласно утверждению автора [4], рациональным и наиболее выгодным методом интенсификации конвективного теплообмена следует считать такой метод, при котором то или иное практически высокое значение коэффициента теплообмена достигается при наименьших потерях напора газового потока. Рассмотрим важный вопрос для таких сложных конструкций СВК – определение тепловых и гидравлических характеристик воздушного потока при обтекании металлических стружек.

**Метод исследования.** Экспериментальные исследования в [5] табл. 1 показали, что поперечное обтекание воздухом металлической стружки происходит аналогично обтеканию воздухом цилиндра (рис. 1). Следовательно, для расчета тепловых и гидравлических харак-

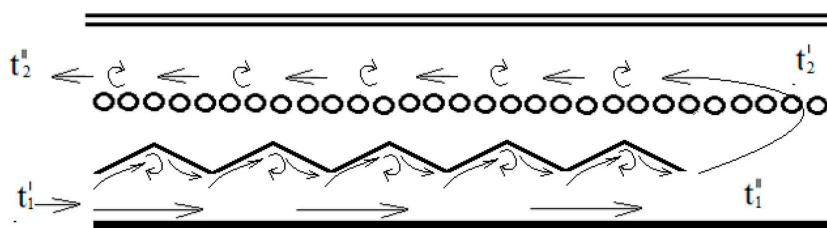


Рис. 1. Схема обтекания воздухом отдельных участков абсорбера СВК:  $t_1', t_2''$  – температура воздуха на входе и на выходе из коллектора;  $t_1'', t_2'$  – температура на выходе V-образного абсорбера и на входе металлического стружечного абсорбера; стрелками показано движение воздушного потока

Fig. 1. Scheme of air flow around individual sections of the IC absorber:  $t_1', t_2''$  – air temperature at the inlet and outlet of the collector;  $t_1'', t_2'$  – temperature at the outlet of the V-shaped absorber and at the inlet of the metal chip absorber; the arrows show the movement of the air flow

Таблица 1. Экспериментально полученные данные температуры нагрева при различных скоростях воздушного потока солнечного воздухонагревательного коллектора

Table 1. Experimentally obtained data on the heating temperature at different air flow rates of the solar air heating collector

№	G, кг/с	$t'$ , °C	$t''$ , °C	$t_2'$ , °C	$t_2''$ , °C
1	0,0025	33,8	41,9	52,5	60,8
2	0,0033	33,8	41,75	51,5	60,3
3	0,0061	32,8	40,3	49,6	57,8
4	0,009	33,1	40,3	48,4	57,1
5	0,015	32,8	39,3	46,1	54,3
6	0,0233	33,1	39,1	44,9	53,1
7	0,0284	33,1	38,2	43,5	50,1
8	0,0323	33,2	37,7	42,1	48,2
9	0,0387	33,1	36,9	40,8	45,7
10	0,0438	33,4	36,8	39,9	44,6
11	0,0497	33,3	36,3	39,2	43,4

теристик воздушного потока при обтекании металлических стружек воспользуемся методами пограничного слоя [6].

Используя данные табл. 1, определить теплофизические параметры воздушного потока можно по следующей методике:

$$\frac{t' + t''}{2} = t_{\text{пот}}, \quad (1)$$

где  $t_{\text{пот}}$  – температура воздушного потока, определялась как средняя температура воздуха на входе  $t'$  и на выходе  $t''$

Температуру в пограничном слое на стружке  $t_{\text{воз}}$  определяли по формуле:

$$\frac{t_{\text{пот}} + t_{\text{ст}}}{2} = t_{\text{воз}}, \quad (2)$$

где  $t_{ст}$  – температура стружки.

Предположим, что скорость потенциального течения изменяется по теоретическому закону

$$U = 2u_0 \sin \varphi. \quad (3)$$

Учитывая, что обтекание стружки является градиентным, воспользуемся методом Кармана–Польгаузена, разработанным для гидродинамического пограничного слоя:

1. Определяем значение критерия Рейнольдса

$$Re_d = \frac{u_0 d}{\nu}. \quad (4)$$

Физические константы здесь и далее выбираются по температуре набегающего воздуха.

2. Сопоставляем полученное значение критерия Рейнольдса с критическим

$$Re_d < Re_{d_{кр}} = (2 \div 3) \cdot 10^5, \quad (5)$$

Следовательно, пограничный слой до точки отрыва и на угловом расстоянии  $\frac{\pi}{4}$  – ламинарный.

3. Определяем толщину потери импульса для углового расстояния  $\frac{\pi}{4}$  по формуле

$$\frac{(\delta^{**})^2}{\nu} = \frac{0,47}{U^6} \int_0^x U^5 dx = \frac{0,47}{(2u_0 \sin \varphi)^6} \int_0^x (2u_0 \sin \varphi)^5 dx, \quad (6)$$

но расстояние по дуге окружности  $x = R \cdot \varphi = R \frac{\pi}{4}$  ( $R$  – радиус металлической стружки), поэтому

$$\frac{(\delta^{**})^2}{\nu} = \frac{0,47(2U_0)^5}{(2u_0)^6(\sin \varphi)^6} \int_0^{\pi/4} \sin^5 \varphi d(R\varphi) = \frac{0,47R}{2u_0(\sin \varphi)^6} \int_0^{\pi/4} \sin^5 \varphi d\varphi. \quad (7)$$

Вычисляем интеграл

$$\begin{aligned} \int_0^{\pi/4} \sin^5 \varphi d\varphi &= \int_0^{\pi/4} \sin^4 \varphi d(\sin \varphi) = - \int_0^{\pi/4} \sin^4 \varphi d(\cos \varphi) = \\ &= \int_0^{\pi/4} (1 - \cos^2 \varphi)^2 d(\cos \varphi) = 2,81 \cdot 10^{-2}. \end{aligned}$$

Тогда

$$\frac{(\delta^{**})^2}{\nu} = \frac{0,47 \cdot R}{(2u_0 \sin \varphi)^6}. \quad (8)$$

Откуда

$$\frac{(\delta^{**})^2}{\nu} = \frac{0,47 \cdot R}{(2u_0 \sin \varphi)^6} \cdot \nu. \quad (9)$$

4. Определяем второй формпараметр по Карману–Польгаузену по формуле

$$\frac{(\delta^{**})^2}{\nu} \cdot \frac{dU}{dx} = \frac{(\delta^{**})^2}{\nu} \cdot \frac{d(2u_0 \sin \varphi)}{d(R\varphi)} = \frac{(\delta^{**})^2}{\nu} \cdot \frac{2u_0}{R} \cos \varphi. \quad (10)$$

5. Выбираем из [7] по второму формпараметру функции  $f_1(x)$ ,  $f_2(x)$  и первый формпараметр. После интерполирования имеем

$$\lambda = 1; f_1(\aleph) = 2,508; f_2(\aleph) = 0,252$$

6. Определяем толщину вытеснения по уравнению

$$\delta^* = \delta^{**}; f_1(\aleph) = \delta^{**} \cdot f_2(\aleph). \quad (11)$$

7. Определяем местное напряжение трения на поверхности по уравнению

$$\tau_o(X) = \frac{\mu U f_2(x)}{\delta^{**}} = \frac{\mu(2u_o \sin\varphi) f_2(x)}{\delta^{**}}. \quad (12)$$

8. Определяем толщину пограничного слоя по уравнению

$$H^* = \frac{\delta^*}{\delta} = \frac{3}{10} - \frac{\lambda}{120} = \frac{3}{10} - \frac{1}{120} = 0,2917 \quad (13)$$

$$\delta = \frac{\delta^*}{H^*}.$$

Все результаты расчетов обобщены в табл. 2.

9. Построение безразмерного профиля скорости. Задаем ряд значения  $\eta$  и по формуле вычисляем значение  $\varphi(\eta)$

$$\varphi(\eta) = 1 + (1 - \eta)^3 \left( \frac{\lambda}{6} \eta - 1 - \eta \right) \quad (14)$$

Результаты расчетов представлены в табл. 3.

**Результаты и их обсуждение.** При значении безразмерного профиля расстояния  $\eta = 1$  безразмерный профиль скорости  $\varphi(\eta)$  также достигает единицы. Следовательно, профиль металлической стружки влияет на скорость воздушного потока вблизи поверхности. Расчеты соответствуют безотрывному течению потока около поверхности стружки.

На рис. 2 представлены результаты расчета толщины потерь импульса при обтекании стружечного турбулизатора в диапазоне чисел  $Re_d$  1000–6000, наблюдавшегося в опыте. Полученные

Таблица 2. Результаты расчетов теплофизических параметров воздушного потока

Table 2. Results of calculations of thermophysical parameters of the air flow

$u_o$ $10^{-4}$	$Re_d$	$\frac{(\delta^{**})^2}{\nu}$ $10^{-4}$	$\delta^{**}$ $10^{-4}$	$\aleph$ $10^{-4}$	$f_1(\aleph)$ $10^{-4}$	$\tau_o(X)$ $10^{20}$	$\delta$ $10^{-4}$
440	293	100	3,88	124,43	9,73	0,085	33,3
570	380	77	3,41	124,12	8,55	0,126	29,3
1070	710	41	2,49	124,06	6,24	0,323	21,4
1580	1580	28	2,05	124,89	5,14	0,58	17,6
2630	1750	16	1,59	124,88	3,98	1,22	13,6
4090	2722	10,8	1,27	124,92	3,19	2,3	10,9
4980	3320	10,6	1,26	124,95	3,16	3,38	10,8
5670	3780	7,8	1,08	124,91	2,71	3,76	9,3
6790	4520	6,5	0,988	124,81	2,48	4,8	8,5
7680	5120	5,75	0,929	124,88	2,33	5,77	8
8650	5770	5,11	0,875	125	2,19	6,9	7,5

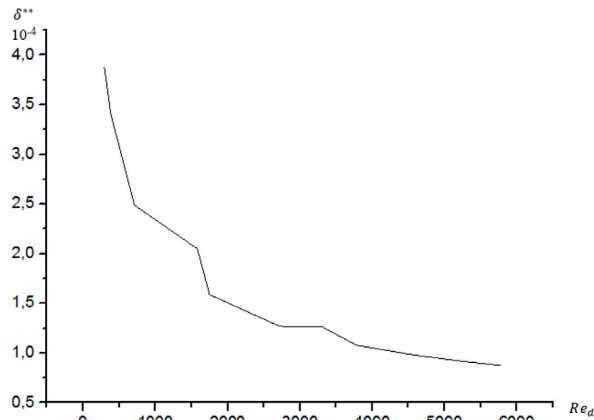


Рис. 2. Зависимость толщины импульса для стружечного турбулизатора от числа Рейнольдса  
 Fig. 2. Dependence of the pulse thickness for the chip turbulator on the Reynolds number

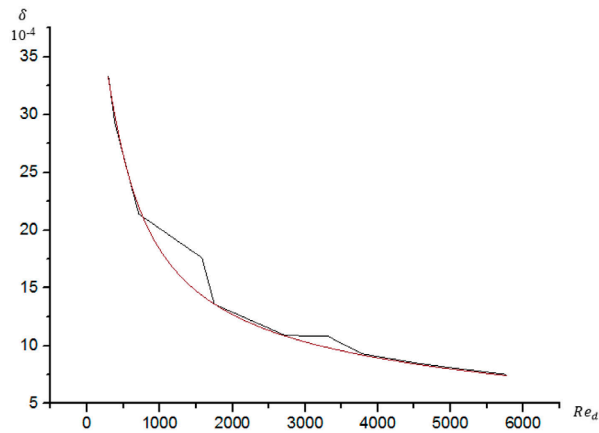


Рис. 3. Зависимость толщины гидродинамического пограничного слоя от числа Рейнольдса  
 Fig. 3. Dependence of the thickness of the hydrodynamic boundary layer on the Reynolds number

Таблица 3

Table 3

$\eta$	0	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	0,9	1
$\varphi(\eta)$	0	0,2105	0,4026	0,5712	0,823	0,9572	0,9982	1

результаты соответствующим образом характеризуют пограничный слой на металлической стружке: данный диапазон чисел Рейнольдса соответствует скоростям 1,5–9 м/с. Из графика зависимости толщины турбулентного пограничного слоя от чисел  $Re_d$  видно (рис. 3), что с ростом числа Рейнольдса и скорости потока толщина пограничного слоя уменьшается, что соответствует гидродинамической теории пограничного слоя.

**Вывод:** Обтекание воздушного потока металлической стружки совпадает с обтеканием цилиндрической формы, здесь применимы методы, разработанные в теории пограничного слоя.

### Список литературы / References

[1] Аvezов Р.Р., Орлов А. Ю. *Солнечные системы отопления и горячего водоснабжения*. – Ташкент: Фан, 1988. 288. [Avezov R. R., Orlov A. Yu. *Solar heating and hot water supply systems*. – Tashkent: Fan, 1988. 288. (in Russian)]

[2] Узбекиков М. О. Вопросы разработки солнечных коллекторов с высоким коэффициентом полезного действия М. О. Узбекиков, Б. Б. Бойназаров. Журн. Сиб. федер. ун-та. *Техника и технологии*, 2021, 14(8). 942–949. DOI: 10.17516/1999-494X-0364 [Uzbekov M. O. Issues of development of solar collectors with a high efficiency coefficient. M. O. Uzbekov, B. B. Boynazarov. Journal. Sib. feder. un-ta. *Engineering and technology*, 2021, 14(8). 942–949. DOI: 10.17516/1999-494X-0364 (in Russian)]

[3] Uzbekov M. O. Possibilities of increasing the efficiency of the heat receiver of ics from metal shavings. *Computational nanotechnology*, 2019, 2, 138-140. DOI:10.33693/2313-223X-2019-6-2-138-1400

[4] Готовский М. А. Некоторые особенности теплоотдачи и сопротивления потока высоковязкой жидкости в трубах с искусственной шероховатостью при переходных режимах течения. *Труды Пятой Российской национальной конференции по теплообмену*. 6. М.: Издательский дом МЭИ, 2010. [Gotovsky M. A. Some features of heat transfer and flow resistance of a highly viscous liquid in pipes with artificial roughness under transient flow conditions. *Proceedings of the Fifth Russian National Conference on Heat Exchange*. 6. Moscow: Publishing House of MEI, 2010. (in Russian)]

[5] Узбекиков М. О. Тепловая эффективность солнечного воздушнонагревательного коллектора с металлическим стружечным абсорбером. М. О. Узбекиков, А. Г. Тухтасинов. Журн. Сиб. федер. ун-та. *Техника и технологии*, 2020. 13(6). 712–720. DOI: 10.17516/1999-494X-0260 [Uzbekov M. O. Thermal efficiency of a solar air-heating collector with a metal chip absorber. M. O. Uzbekov, A. G. Tukhtasinov. Journal. Sib. feder. un-ta. *Engineering and technology*, 2020. 13(6). 712–720. DOI: 10.17516/1999-494X-0260 (in Russian)]

[6] Чуханов З. Ф. Эффективность конвективного теплообмена при различных гидродинамических режимах. *Доклады академии наук СССР*. LIII. 9, 1946. [Chukhanov Z. F. Efficiency of convective heat exchange under various hydrodynamic regimes. *Reports of the Academy of Sciences of the USSR*. LIII. 9, 1946. (in Russian)]

[7] Шлихтинг Г. *Теория пограничного слоя*. ИИЛ. 1969. [Schlichting G. *Theory of the boundary layer*. ИЛ. 1969. (in Russian)]