Энергосбережение и энергоэффективность

УДК 697.921.452

DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-3-113-119

© А. В. Тимофеев, аспирант

© A. V. Timofeev, post-graduate student

© В. А. Яковлев, канд. техн. наук, доцент

© V. A. Yakovlev, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

(Санкт-Петербургский государственный

(Saint Petersburg State University

архитектурно-строительный университет,

of Architecture and Civil Engineering,

Санкт-Петербург, Россия)

St. Petersburg, Russia)

E-mail: timofeevav1@mail.ru, yakovlevspb@rambler.ru

E-mail: timofeevav1@mail.ru, yakovlevspb@rambler.ru

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ТЕПЛОУТИЛИЗАТОРА НА ТЕПЛОВЫХ ТРУБАХ НА ОСНОВАНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ CFD-МОДЕЛИРОВАНИЯ

THE DESIGN IMPROVEMENT OF THE HEAT EXCHANGER WITH HEAT PIPES BASED ON THE CFD MODELING RESULTS

Представлен сравнительный анализ теплоутилизатора на тепловых трубах двух конструкций для утилизации теплоты вентиляционных выбросов. Дана краткая характеристика утилизационных устройств, применяемых в системах вентиляции для утилизации теплоты уходящего воздуха. Дана характеристика применения теплоутилизатора с тепловыми трубами. Анализ работы утилизаторов был выполнен с помощью программного комплекса ANSYS Fluent. Результаты моделирования сопоставлены с результатами прямого физического эксперимента, выполненного на испытательном стенде в лаборатории.

Ключевые слова: утилизатор теплоты, тепловая труба, тепловой режим, конденсация, испарение, численное моделирование.

The article presents the results of a comparative analysis of a heat exchanger with heat pipes of two designs for heat recovery from ventilation emissions. A brief description of the utilization devices used in ventilation systems for heat recovery of outgoing air is provided. A characterization of the use of a heat exchanger with heat pipes in premises ventilation systems is given. The waste heat recovery analysis was carried out using the ANSYS Fluent software package. The simulation results have been compared with the results of a direct physical experiment performed on a laboratory test bench.

Keywords: heat exchanger, heat pipe, thermal condition, condensation, evaporation, numerical simulation.

Одним из важных направлений рационального использования энергоресурсов является утилизация низкопотенциальной теплоты удаляемого из помещений вентиляционного воздуха с использованием ее для подогрева наружного приточного воздуха. Подобный подход при проектировании приточных систем вентиляции позволяет сократить затраты теплоты на нагрев приточного воздуха и повысить их эффективность. С целью практической реализации данного подхода в проектах вентиляционных систем требуется устанавливать теплообменники, кон-

струкции которых позволят провести процесс утилизации теплоты с технически и экономически оправданной эффективностью [1, 4, 6, 10, 12].

К разновидностям теплоутилизаторов с промежуточным теплоносителем относятся утилизаторы с тепловыми трубами, которые, вследствие невысоких показателей тепловой эффективности, сравнительно редко находят свое применение в системах вентиляции.

Тепловые трубы представляют собой испарительно-конденсационный теплообменный аппарат, где циркуляция рабочего тела (про-

межуточного теплоносителя) производится под действием гравитационных сил и сил поверхностного натяжения жидкости.

Конструктивно тепловые трубы выполнены в виде герметично запаянных вытянутых в длину цилиндрических сосудов, внутренний объем которых частично заполнен рабочим телом. В качестве рабочего тела используются жидкие теплоносители, которые находятся в насыщенном состоянии и могут выполнять агрегатно-фазовый переход при рабочих температурах, наблюдаемых при эксплуатации в рекуперативном утилизаторе [3, 7, 9, 11, 14].

Разновидностью тепловых труб являются термосифоны. В термосифонах отсутствует пористый фитиль; конденсат возвращается в испаритель под действием сил гравитации, поэтому испаритель должен находиться ниже конденсатора.

Учитывая низкие температурные напоры между теплоносителями в системах вентиляции, теплоутилизаторы на тепловых трубах зачастую имеют сильные ограничения по применению. Однако, учитывая их высокую надежность, при условии усовершенствовании конструкции под определенные условия работы, в ряде случаев применение их в системах вентиляции может быть целесообразным и экономически оправданным.

При совершенствовании конструкции тепловых труб необходимо устранить основные недостатки теплообменников:

- необходимость при небольших температурных напорах между теплоносителями применять большие поверхности теплообмена;
- высокая металлоемкость;
- вследствие близкого размещения теплообменных пластин друг к другу отложения загрязнений на их внешней стороне оказывают сильное влияние на теплообменные процессы и аэродинамическое сопротивление проходных каналов.

При использовании в системах вентиляции низкопотенциальной теплоты в средах с малыми температурными напорами уменьшение площади поверхности теплообмена возможно исключительно за счет увеличения коэффициента теплопередачи. Для этого в теплоутилизаторах с тепловыми трубами выполняется установка пластин, выполненных из высокотеплопровод-

ных материалов и плотно натянутых на пучок тепловых труб [5]. Для плотного и надежного контакта пластин с термосифонами и обеспечения равноудаленного их размещения друг от друга пластины снабжены воротничками (рис. 1) [15].

Для исследований принята конструкция термосифона с вертикальным расположением трубок, что позволит обеспечить постоянный и надежный возврат конденсата в испаритель. При вертикальном расположении термосифонов эффективность их работы зависит от уровня наполнения рабочей жидкостью, характеристик и свойств рабочей жидкости и материала труб. В системах вентиляции и кондиционирования воздуха в качестве рабочей жидкости термосифонов следует использовать безопасные для здоровья человека вещества, а в качестве материала для изготовления тепловых труб — высокотеплопроводные медь и алюминий.

Для проведения эксперимента было выбрано два варианта теплоутилизатора: с 28 пластинами (общая площадь теплообменной поверхности 3,1 м²); с 54 пластинами (общая площадь теплообменной поверхности 6,0 м²).

Для определения основных параметров работы теплоутилизаторов обеих конструкций были

Рис. 1. Схема стыковки теплообменных пластин с термосифонными трубами в конструкции теплоутилизатора

проведены испытания в климатической камере. Для достижения наиболее высокой тепловой эффективности использовалась противоточная схема движения воздушных потоков, обеспечивающая наиболее высокие среднелогарифмические температурные напоры между теплообменными средами. При испытаниях поддерживались температуры вытяжного воздуха $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$, приточного воздуха $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$. В ходе испытаний замерялись температуры и расходы приточного и вытяжного воздуха, температура стенки термосифона, расположенного в центре теплоутилизатора. Экспериментальные точки, в которых проводились измерения, показаны на рис. 2, а экспериментальные данные сведены в табл. 1.

Анализ работы теплоутилизатора с тепловыми трубами проводился с использованием программного комплекса для математического моделирования *ANSYS Fluent*. В качестве исследуемого объекта была выбрана постановка задачи с периодически повторяющимся фрагментом теплоутилизатора. Моделирование проводилось

с использованием k - ϵ модели турбулентности модификации *Realizable* [8, 13].

После решения поставленной задачи были получены термограммы температурных полей для теплоутилизаторов обеих конструкций (рис. 3, табл. 2), по данным которых в табл. 2 были выписаны значения, соответствующие месторасположению на рис. 2 экспериментальных точек.

На основе полученных данных определены тепловые потоки в теплоутилизаторах обеих конструкций, необходимые для постановки задачи математического моделирования. Параметры воздуха приняты применительно к системам вентиляции по ГОСТ Р ЕН 308: температура наружного воздуха $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура вытяжного воздуха $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$. В результате численного анализа получены термограммы распределения температурных полей (рис. 4). Значения температур и расходов воздуха представлены в табл. 3.

Полученные результаты численного анализа теплоутилизатора с тепловыми трубами позволили получить наиболее адекватную картину распределения установившихся во времени те-

Рис. 2. Схема расположения экспериментальных точек для измерения температуры при проведении исследования: 1 — термосифон, работа которого экспериментально проверялась; 2 — пластина; 3 — разделительная секция корпуса (межсекционная перегородка)

Таблица 1

Результаты измерений параметров теплоутилизатора

№ изме- рения	Средние значения температуры среды в экспериментальных точках, °С						Массовый расход приточного воздуха $G_{м1}$, кг/ч	Массовый расход вытяжного воздуха $G_{м2}$, кг/ч
	т. 1	т. 2	т. 3	т. 4	т. 5	т. 6		
28 теплообменных пластин								
1	62,6	48,3	55,9	27,1	74,7	45,6	454,2	447,0
2	64,5	58,6	63,1	50,1	72,6	57,0	421,9	306,0
54 теплообменные пластины								
1	64,8	61,3	42,0	26,5	68,6	49,4	451,2	388,0
2	66,4	65,9	55,7	52,0	68,8	64,1	419,4	604,0

Рис. 3. Температурные поля теплоутилизаторов: а — с 28 пластинами; б — с 54 пластинами

Рис. 4. Температурные поля теплоутилизаторов системы вентиляции: а — с 28 пластинами; б — с 54 пластинами

Таблица 2

Результаты моделирования теплоутилизатора

№ изме- рения	Средние значения температуры среды в экспериментальных точках, °С						Массовый расход приточного воздуха $G_{м1}$, кг/ч	Массовый расход вытяжного воздуха $G_{м2}$, кг/ч
	т. 1	т. 2	т. 3	т. 4	т. 5	т. 6		
28 теплообменных пластин								
1	65,2	46,6	54,5	27,1	74,7	41,7	454,2	328,0
2	62,9	59,1	63,1	50,1	72,6	57,0	421,9	306,0
54 теплообменные пластины								
1	66,7	63	36,7	26,5	68,6	49,5	451,2	325,0
2	67,7	66,7	55,5	52,0	68,8	61,3	419,4	293,0

Примечание. Экспериментальные точки показаны на рис. 2.

Таблица 3

Результаты расчета теплоутилизаторов для систем вентиляции

Средние значения температуры среды в экспериментальных точках, °С						Массовый расход приточного воздуха $G_{м1}$, кг/ч	Массовый расход вытяжного воздуха $G_{м2}$, кг/ч
т. 1	т. 2	т. 3	т. 4	т. 5	т. 6		
28 теплообменных пластин							
21,4	19,0	19,7	5,0	25,0	9,9	490,2	453,0
54 теплообменные пластины							
23,4	18,4	13,5	5,0	25,0	15,7	490,2	456,0

пловых и аэродинамических процессов в размещенном в системах приточно-вытяжной вентиляции теплоутилизаторе. По методике, рассмотренной в [2], тепловая эффективность утилизатора с тепловыми трубами определяется по зависимости

$$\varepsilon = \frac{W_2 (t_2'' - t_2')}{W_1 (t_1' - t_1'')},$$

где W_2 — водяной эквивалент нагреваемого воздуха, Вт/°С; W_1 — водяной эквивалент охлаждаемого воздуха, Вт/°С; t_2'' — температура нагреваемого воздуха на выходе, °С; t_2' — температура нагреваемого (холодного) воздуха на входе, °С; t_1' — температура удаляемого воздуха на входе, °С.

По результатам расчета тепловая эффективность теплоутилизатора с 28 пластинами — 26,5 %, с 54 пластинами — 57,5 %. Таким образом, повышение количества пластин до 54 штук увеличивает количество отводимой теплоты в 2,17 раза. Однако при этом происходит рост аэродинамического сопротивления с 38 до 55 Па. Дальнейшее добавление количества пластин, вследствие роста площади поверхности нагрева пропорционально их числу, приведет к увеличе-

нию эффективности, но при этом будет наблюдаться существенный рост аэродинамического сопротивления теплообменника.

Результаты моделирования работы теплоутилизаторов на тепловых трубах показывают перспективу их применения для утилизации теплоты вентиляционных выбросов.

Библиографический список

1. Левченко В. Е. О повышении надежности разграничительной стенки рекуперативного теплообменника при использовании в его конструкции тепловых труб // Тепловые трубы: теплообмен, гидродинамика, технология: сб. Ч. 2. Обнинск: ФЭИ, 1980. С. 155–162.
2. Васильев Л. Л. Теплообменники на тепловых трубах / под ред. В. И. Солоухина. Минск: Наука и техника, 1981. 143 с.
3. Дан П. Д., Рей Д. А. Тепловые трубы / пер. Ю. А. Зейгарника. М.: Энергия, 1979. 272 с.
4. Зеленцов Д. В., Лукс А. Л. Отопление помещений на основе использования отопительных приборов на тепловых трубах // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительные технологии: сб. ст. Самара: СГАСУ, 2015. С. 315–317.

5. Калинин Э. К., Дрейцер Г. А., Ярхо С. А. Интенсификация теплообмена в каналах / под ред. В. К. Кошкина. М.: Машиностроение, 1972. 220 с.
6. Лаптев А. Г., Николаев Н. А., Башаров М. М. Методы интенсификации и моделирования тепломассообменных процессов. М.: Теплотехник, 2011. 288 с.
7. Смирнов Г. Ф. Основы расчета эффективности систем с низкотемпературными тепловыми трубами // Инженерно-физический журнал. 1975. Т. 28, № 2. С. 198–207.
8. Романова Е. В., Колиух А. Н., Лебедев Е. А. Применение пакета ANSYS при исследовании гидравлического сопротивления оребренного рекуператора // Вестник Тамбовского гос. техн. ун-та. 2017. Т. 23, № 3. С. 430–427.
9. Сасин В. Я., Шелгинский А. Я. Основы инженерных методов расчета тепловых труб // Труды МЭИ. 1974. Вып. 198. С. 89–98.
10. Фролов В. П., Шелгинский А. Я. Тепловые трубы в системах теплоснабжения // Энергосбережение. 2004. № 6. С. 58–61.
11. Хомутов М. П. Стенд для испытания каталитического теплообменника на тепловых трубах // Вестник КрасГАУ. 2007. № 3. С. 153–155.
12. Шелгинский А. Я. Тепловые трубы в системах теплоснабжения и утилизации ВЭР. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. 60 с.
13. Mohammad Reza Safaei, Mostafa Safdari Shadloo, Mohammad Shahab Goodarzi, Abdellah Hadjadj, Hamid Reza Goshayeshi, Masoud Afrand, S. N. Kazi. A survey on experimental and numerical studies of convection heat transfer of nanofluids inside closed conduits // Advances in Mechanical Engineering. 2016. Vol. 8. Issue 10. Pp. 1–14. URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1687814016673569#> (дата обращения: 05.05.2020).
14. Bakhshan Y., Motadayen Aval S., Kamel F., Hajhossini A. Using of Multiwall Carbon Nanotube Based Nanofluid in the Heat Pipe to Get Better Thermal Performance // Advances in Mechanical Engineering. 2016. Vol. 6. Pp. 1–7. URL: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1155/2014/407218> (дата обращения: 05.05.2020).
15. Пат. 2557825, Российская Федерация, МПК F28F 1/00. Способы соединения трубы с пластинами теплообменника и пластина теплообменника (варианты) / П. М. Зелиско, В. И. Грейлих, В. О. Решетников. № 2014125900/06, заявл. 26.06.2014, опубл. 27.07.2015.
- the reliability of the boundary wall of a regenerative heat exchanger when using heat pipes in its design]. *Sb. rabot «Teplovyye truby: teploobmen, gidrodinamika, tekhnologiya»* [In: Collection of works “Heat pipes: heat exchange, hydrodynamics, technology”]. Pt. 2. Obninsk, FEI Publ., 1980, pp. 155–162.
2. Vasil'ev L. L. *Teploobmenniki na teplovykh trubakh* [Heat exchangers on heat pipes]. Ed. by Soloukhin V. I. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1981, 143 p.
3. Dan P. D., Rey D. A. *Teplovyye truby* [Heat pipes]. Transl. by Yu. A. Zeygarnik. Moscow, Energiya Publ., 1979, 272 p.
4. Zelentsov D. V., Luks A. L. *Otoplenie pomeshcheniy na osnove ispol'zovaniya otopitel'nykh priborov na teplovykh trubakh* [Heating of premises based on the use of heating devices on heat pipes]. *Sb. st. «Traditsii i innovatsii v stroitel'stve i arkhitekture. Stroitel'nye tekhnologii»* [In: Collection of articles “Traditions and innovations in construction and architecture. Construction technologies”]. Samara, SGASU Publ., 2015, pp. 315–317.
5. Kalinin E. K., Dreytser G. A., Yarkho S. A. *Intensifikatsiya teploobmena v kanalakh* [Intensification of heat transfer in channels]. Ed. by Koshkin V. K. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972, 220 p.
6. Laptev A. G., Nikolaev N. A., Basharov M. M. *Metody intensifikatsii i modelirovaniya teplomassoobmennyykh protsessov* [Methods of intensification and modeling of heat and mass transfer processes]. Moscow, Teplotekhnika Publ., 2011, 288 p.
7. Smirnov G. F. *Osnovy rascheta effektivnosti sistem s nizko-temperaturnymi teplovymi trubami* [Fundamentals of calculating the efficiency of systems with low-temperature heat pipes]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal – Engineering and Physical Journal*, 1975, vol. 28, no. 2, pp. 198–207.
8. Romanova E. V., Koliukh A. N., Lebedev E. A. *Primenenie paketa ANSYS pri issledovanii gidravlicheskogo soprotivleniya orebrennogo rekuuperatora* [Application of the ANSYS package in the study of the hydraulic resistance of a finned heat exchanger]. *Vestnik Tambovskogo gos. tekhn. un-ta – Bulletin of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 3, pp. 430–427.
9. Sasin V. Ya., Shelginskiy A. Ya. *Osnovy inzhenernykh metodov rascheta teplovykh trub* [Fundamentals of engineering methods for calculating heat pipes]. *Trudy MEI – Proceedings of the Moscow Power Engineering Institute*, 1974, vol. 198, pp. 89–98.
10. Frolov V. P., Shelginskiy A. Ya. *Teplovyye truby v sistemakh teplosnabzheniya* [Heat pipes in heat supply systems]. *Energoberezhenie – Energy Saving*, 2004, no. 6, pp. 58–61.
11. Khomutov M. P. *Stend dlya ispytaniya kataliticheskogo teploobmennika na teplovykh trubakh* [Stand for testing a catalytic heat exchanger on heat pipes].

References

1. Levchenko V. E. *O povyshenii nadezhnosti razgranichitel'noy stenki rekuuperativnogo teploobmennika pri ispol'zovanii v ego konstruktсии teplovykh trub* [On improving

Vestnik KrasGAU – Bulletin of KrasGAU, 2007, no. 3, pp. 153–155.

12. Mohammad Reza Safaei, et al. A survey on experimental and numerical studies of convection heat transfer of nanofluids inside closed conduits. *Advances in Mechanical Engineering*, 2016, vol.8, iss. 10, pp. 1–14. Available at: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1687814016673569#> (accessed: 05.05.2020).

13. Bakhshan Y., Motadayen Aval S., Kamel F., Hajhossini A. Using of Multiwall Carbon Nanotube Based Nanofluid in the Heat Pipe to Get Better Thermal Performance. *Advances in Mechanical Engineering*, 2016,

vol. 6, pp. 1–7. Available at: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1155/2014/407218> (accessed: 05.05.2020).

14. Zelisko P. M., Greylikh V. I., Reshetnikov V. O. *Sposoby soedineniya truby s plastinami teploobmennika i plastina teploobmennika (varianty)* [Methods of connecting the pipe to the heat exchanger plates and the heat exchanger plate (options)]. Patent RF, no. 2557825, 2015.

15. Shelginskiy A. Ya. *Teplovye truby v sistemakh teplosnabzheniya i utilizatsii VER* [Heat pipes in heat supply and utilization systems of VER]. Moscow, MEI Publ., 2006, 60 p.