

УДК 621.565.944

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ТЕПЛООБМЕННИКА-РЕГЕНЕРАТОРА АВИАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА

А.В. Чичиндаев¹, М.Р. Выборов¹, И.В. Хромова²

¹Новосибирский государственный технический университет

²Новосибирский государственный университет водного транспорта

В настоящее время ведутся работы по испытаниям отечественных импортозамещенных пассажирских самолетов Суперджет-100, МС-21 и Ту-214. Одной из важных систем данных самолетов является система кондиционирования воздуха. Отличительной чертой системы является технология отделения влаги в линии высокого давления. Для этого применяется специальная подсистема – конденсаторный блок, состоящий из трех агрегатов: теплообменника-конденсатора, теплообменника-регенератора и влагоотделителя. Назначение теплообменника-регенератора – обеспечить работу конденсаторного блока за счет повышения эффективности работы его главного элемента – теплообменника-конденсатора и предотвращения его обмерзания. Иностранные компании предлагают классический способ проектирования теплообменника-регенератора. Данная статья посвящена исследованию работы перспективной инновационной модели для импортозамещения теплообменника-регенератора. На кафедре технической теплофизики НГТУ в результате многолетних работ предложен более эффективный способ проектирования теплообменника с позиции повышения его эффективности работы. В основе лежит глубокое изучение особенностей процесса теплопередачи в перекрестно-точном компактном пластинчато-ребристом теплообменнике. В частности, предложено вместо создания стандартной конструкции, используемой на иностранных самолетах, «управлять» температурой его теплопередающей поверхности для заданных эксплуатационных условий. В основе методики лежит идея изменения параметров оребрений с горячей и холодной стороны поверхности. Расчеты выполнялись с помощью специализированного авторского пакета программ кафедры технической теплофизики НГТУ. В работе изложены результаты исследования процессов теплопередачи одного из перспективных вариантов решения данной задачи.

Ключевые слова: система кондиционирования воздуха, теплообменник-регенератор, влажный воздух, конденсация, испарение, компактный пластинчато-ребристый теплообменник, шаг оребрений, температура теплопередающей поверхности.

DOI: 10.17212/1727-2769-2026-2-54-64

Введение

В современных авиационных системах кондиционирования воздуха (СКВ) для пассажирских самолетов используется достаточно экономичная схема типа «петля» [1, 2]. Отличительной ее особенностью является наличие специальной подсистемы – конденсаторного блока [2], установленного

в линии высокого давления СКВ и предназначенного для конденсации водяных паров из влажного воздуха с последующим их удалением. Конденсаторный блок состоит из трех основных элементов (рис. 1): теплообменника-конденсатора (слева) для конденсации водяных паров, влагоотделителя (снизу) для отделения воды из воздуха и теплообменника-регенератора (справа) для испарения неотделенной влаги.



Рис. 1 – Устройство конденсаторного блока

Fig. 1 – The device of the condenser unit

Назначение теплообменника-регенератора: 1) обеспечить доиспарение капельной влаги, которую не смог удалить влагоотделитель, чтобы предотвратить обмерзание; 2) снизить температуру воздуха за основным теплообменником узла предварительного охлаждения с $70...100\text{ }^{\circ}\text{C}$ до требуемых для теплообменника-конденсатора рабочих значений $30...40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в этом случае на его выходе будет температура $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, пригодная для максимального отделения влаги и предотвращения обмерзания влагоотделителя).

Термин «теплообменник-регенератор» в классическом понимании обозначает передачу теплоты от «отработанного – выбрасываемого» горячего воздуха СКВ (газа) «свежему – поступающему» холодному с целью экономии энергии. В авиационных СКВ современных пассажирских самолетов термин «регенератор» используется для описания отдельного направления. В первых СКВ типа «петля» [1, 2] такого теплообменника не было, а был один конденсатор (СКВ с однократной регенерацией). Это приводило к обмерзанию как конденсатора, так и турбохолодильной установки. Тогда и было предложено ввести в СКВ теплообменник-регенератор [3–5]. Он стал входным теплообменником в конденсаторный блок и имел температуру горячего воздуха $70...100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для его охлаждения в регенераторе использовали выходную температуру воздуха из конденсатора $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Оба теплообменника стоят в линии высокого давления СКВ, теплота передается из одной части конденсаторного блока в другую. По классификации авиационных СКВ это схема с двойной регенерацией. При этом практически исчезли проблемы с обмерзанием.

Инженеры фирм Boeing и Airbus [3–5] предложили при проектировании теплообменника-регенератора использовать стандартную методику расчета компактного пластинчато-ребристого теплообменника (КПРТ), у которого 50 % поверхности работает в эффективной области и 50 % – в неэффективной. В настоящей работе приведены результаты исследований по методике с переменным оребрением, предложенной на кафедре технической теплофизики НГТУ [1]. Наиболее детально данный прием и методика расчета изложены в работе [6]. Расчеты выполнялись с помощью специализированного авторского пакета программ кафедры технической теплофизики НГТУ [7, 8]. Ниже приведены результаты первичных исследований для одного из благоприятных сочетаний параметров оребрений.

Исследование теплообменника-регенератора с переменным оребрением

Общая идея изменения оребрений состояла в снижении и выравнивании температуры теплопередающей поверхности. Это позволяет добиться более эффективного охлаждения горячего воздуха и нагрева холодного. В работе выполнен анализ и выбор оптимального теплообменника из трех исследований: изменение шага горячего оребрения, изменение шага холодного оребрения, а также шага обоих оребрений одновременно. Исходные данные для каждого варианта, такие как параметры теплоносителей (табл. 1) и геометрия оребрений (табл. 2), были идентичны.

Таблица 1 / Table 1

Параметры теплоносителей
Coolant parameters

Оребрение	Расход, кг/с	Температура, °С	Давление, кПа	Влагосодержание, г/кг
Горячее	0,5	70,0	400,0	0,0
Холодное	0,5	5,0	100,0	0,0

Таблица 2 / Table 2

Геометрия оребрений
Fin geometry

Оребрение	Высота, мм	Эквивалентный диаметр оребрения, мм	Шаг оребрения, мм	Толщина ребра, мм	Коэффициент оребрения поверхности
Горячее	4,00	1,56	2,0	0,15	0,69
Холодное	4,00	1,56	2,0	0,15	0,69

Серия 1. Исследование параметров теплообменника при изменении шага горячего оребрения

В данной серии расчетов рассматривается вариант теплообменника-регенератора с изменением шага горячего оребрения (табл. 3). Первый вариант соответствует случаю стандартной компоновки КПРТ с постоян-

ными оребрениями по длине горячего и холодного тракта и является базовым для сравнения. Варианты 2–4 отличаются от базового за счет увеличения шага между ребрами горячего оребрения. В частности, цифры в табл. 3 показывают, во сколько раз увеличивается шаг между ребрами: в базовом варианте он равен 2 мм, если стоит цифра «4», то шаг равен уже 8 мм. Это позволяет за счет изменения процесса теплопередачи уменьшить температуру поверхности.

Таблица 3 / Table 3

Варианты теплообменников (серия 1)
Heat exchanger options (series 1)

Номер варианта	Теплоноситель	Шаг 1	Шаг 2	Шаг 3	Шаг 4
1, 2, 3, 4	Холодный	1	1	1	1
1	Горячий	1	1	1	1
2	Горячий	4	2	1	1
3	Горячий	6	3	1,5	1
4	Горячий	8	4	2	1

Распределение температуры горячего теплоносителя показано на рис. 2.

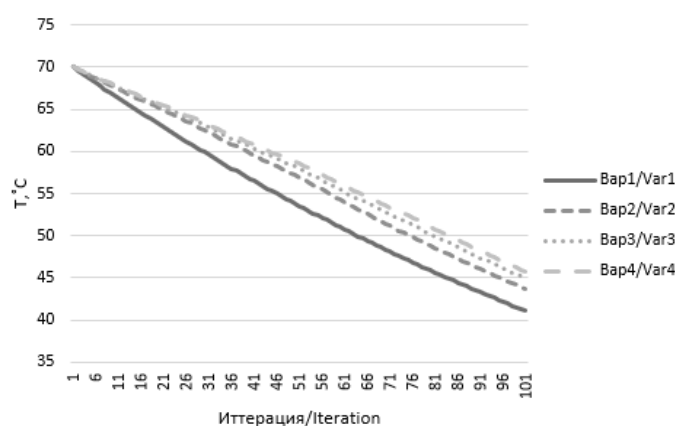


Рис. 2 – График перепада температуры горячего теплоносителя (серия 1)

Fig. 2 – Graph of the temperature drop of a hot coolant (series 1)

Распределение температуры холодного теплоносителя и теплопередающей поверхности показано на рис. 3 и 4 соответственно.

В результате проведенного расчета получены следующие результаты:

1) изменение шага горячего оребрения снизило эффективность процесса теплопередачи: температура горячего теплоносителя увеличилась до 4 °С в сравнении с базовой, холодного – уменьшилась до 5 °С;

2) сравнение температуры теплопередающей поверхности показало линейное снижение температуры по всей длине поверхности в пределах до 5...7 °С.

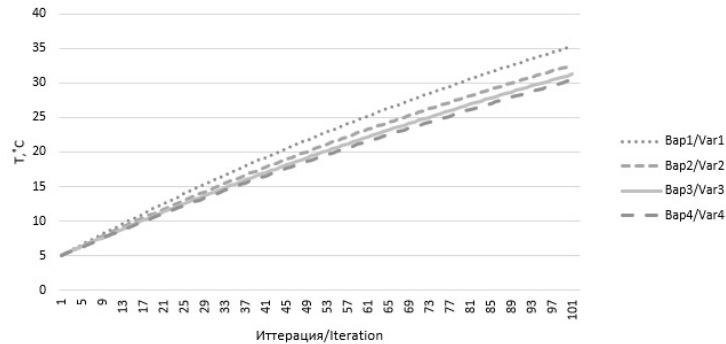


Рис. 3 – График перепада температуры холодного теплоносителя (серия 1)

Fig. 3 – Graph of the temperature drop of a cold coolant (series 1)

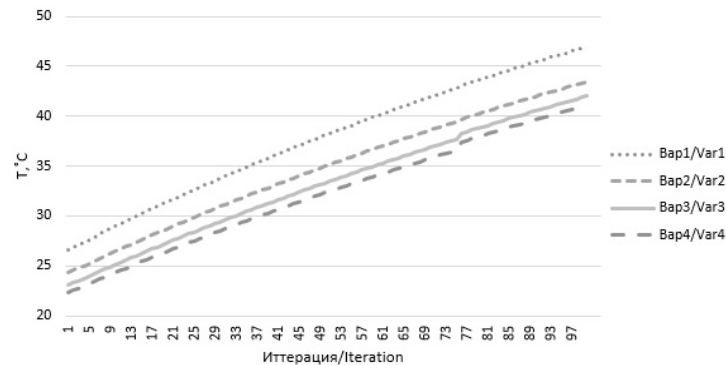


Рис. 4 – График перепада температуры теплопередающей поверхности (серия 1)

Fig. 4 – Graph of the temperature drop of the heat transfer surface plate (series 1)

Серия 2. Исследование параметров теплообменника при изменении шага холодного оребрения

В данной серии расчетов рассматривается вариант теплообменника-регенератора с изменением шага холодного оребрения (табл. 4). В частности, цифры показывают уменьшение шага между ребрами от базовых 2 мм.

Таблица 4 / Table 4

Варианты теплообменников (серия 2)
Heat exchanger options (series 2)

Номер варианта	Теплоноситель	Шаг 1	Шаг 2	Шаг 3	Шаг 4
1, 2, 3, 4	Горячий	1	1	1	1
1	Холодный	1	1	1	1
2	Холодный	0,75	0,5	0,33	0,25
3	Холодный	0,5	0,33	0,25	0,15
4	Холодный	0,33	0,25	0,15	0,15

Распределение температуры горячего и холодного теплоносителя показано на рис. 5 и 6 соответственно.

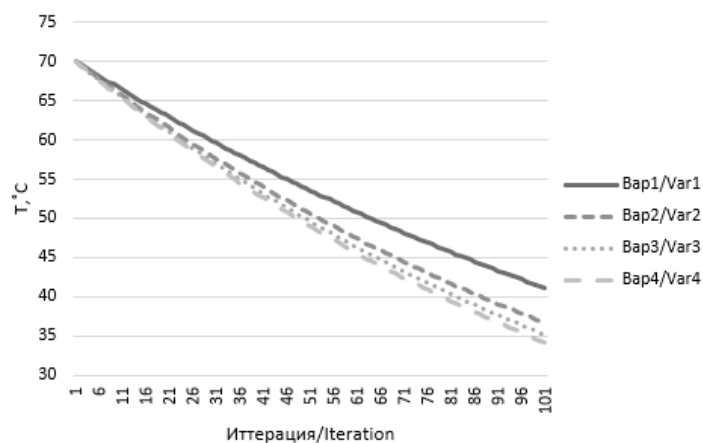


Рис. 5 – График перепада температуры горячего теплоносителя (серия 2)

Fig. 5 – Graph of the temperature drop of a hot coolant (series 2)

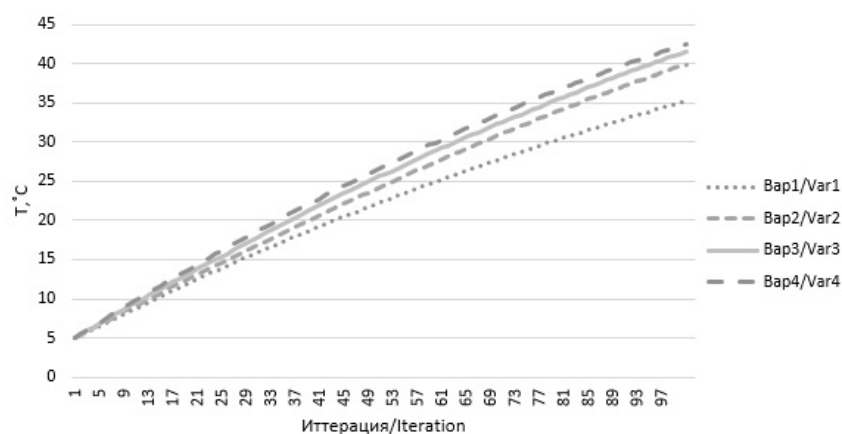


Рис. 6 – График перепада температуры холодного теплоносителя (серия 2)

Fig. 6 – Graph of the temperature drop of a cold coolant (series 2)

Распределение температуры теплопередающей поверхности показано на рис. 7.

В результате проведенного расчета получены следующие результаты:

- 1) изменение шага холодного обребрения повысило эффективность процесса теплопередачи: температура горячего теплоносителя уменьшилась до 7 °С в сравнении с базовой, холодного – увеличилась до 8 °С;
- 2) температура теплопередающей поверхности нелинейно уменьшилась по всей длине поверхности в пределе до 5...17 °С, максимально – на входных, самых холодных кромках.

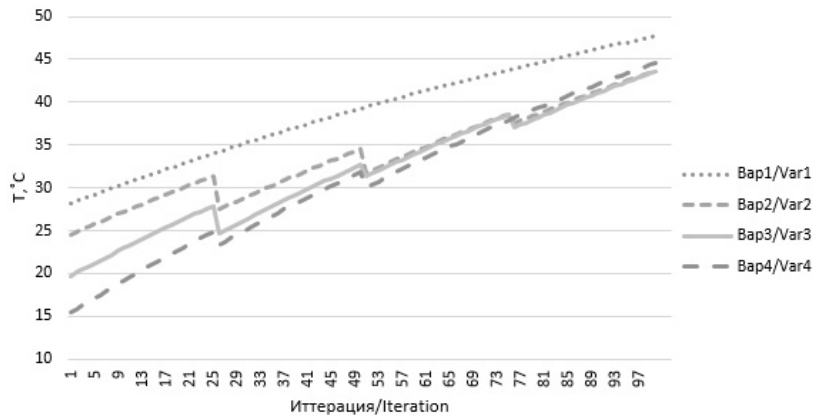


Рис. 7 – График перепада температуры теплопередающей поверхности (серия 2)

Fig. 7 – Graph of the temperature drop of the heat transfer surface plate (series 2)

Серия 3. Исследование параметров теплообменника при изменении шага обоих оребрений

В данной серии расчетов рассматривается вариант теплообменника-регенератора с изменением шага горячего и холодного оребрения (табл. 5).

Таблица 5 / Table 5

Варианты теплообменников (серия 3)
Heat exchanger options (series 3)

Номер варианта	Теплоноситель	Шаг 1	Шаг 2	Шаг 3	Шаг 4
1	Горячий	1	1	1	1
	Холодный	1	1	1	1
2	Горячий	4	0,5	0,33	0,25
	Холодный	0,75	0,5	0,33	0,25
3	Горячий	6	3	1,5	1
	Холодный	0,5	0,33	0,25	0,15
4	Горячий	8	4	2	1
	Холодный	0,33	0,25	0,15	0,15

Распределение температуры горячего теплоносителя показано на рис. 8, холодного теплоносителя – на рис. 9, теплопередающей поверхности – на рис. 10.

В результате проведенного расчета получены следующие результаты:

1) изменение шага обоих оребрений нелинейно сказалось на эффективности процесса теплопередачи: температура горячего теплоносителя не изменилась в сравнении с базовой, холодного – снизилась до 7 °С;

2) сравнение температуры теплопередающей поверхности показало ее нелинейный рост по всей длине поверхности в пределах до 10...20 °С на входных, самых холодных краях теплообменника-регенератора.

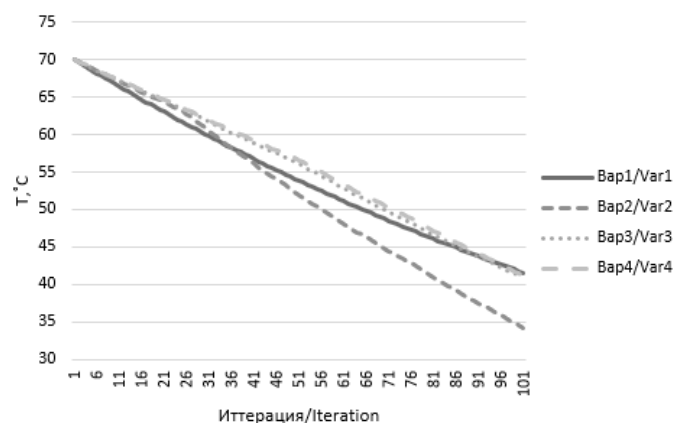


Рис. 8 – График перепада температуры горячего теплоносителя (серия 3)

Fig. 8 – Graph of the temperature drop of a hot coolant (series 3)

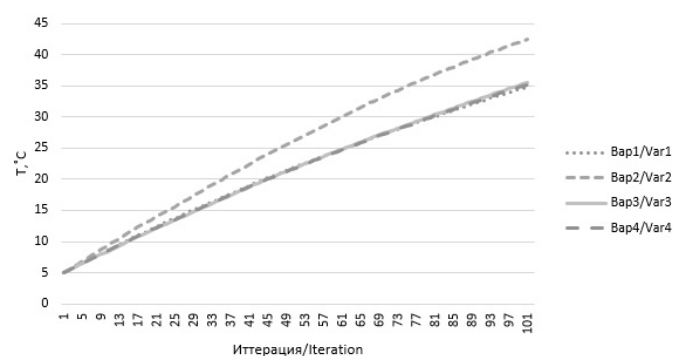


Рис. 9 – График перепада температуры холодного теплоносителя (серия 3)

Fig. 9 – Graph of the temperature drop of a cold coolant (series 3)

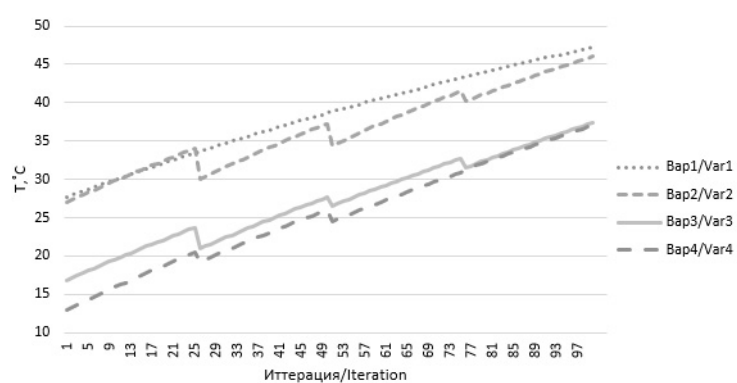


Рис. 10 – График перепада температуры теплопередающей поверхности (серия 3)

Fig. 10 – Graph of the temperature drop of the heat transfer surface plate (series 3)

Заключение

В работе выполнен комплекс исследований распределения температуры горячего и холодного теплоносителей, а также теплопередающей поверхности при изменении шага оребрения в КППТ. Изменение шага оребрения в горячем и холодном трактах приводит к кардинальным изменениям в распределении температур в теплообменнике-регенераторе. При переменном горячем оребрении наблюдается линейное снижение температуры поверхности по всей длине. При переменном холодном оребрении установлено нелинейное снижение температуры на входных сечениях КППТ. При совместном изменении шага обоих оребрений снижение температуры немного больше, чем при изменении только холодного. С позиции распределения температур теплоносителей предпочтителен вариант смены холодного оребрения, так как в этом случае наблюдается снижение температуры горячего теплоносителя при одновременном росте температуры холодного.

ЛИТЕРАТУРА

1. Системы жизнеобеспечения и оборудование летательных аппаратов: учебное пособие / А.В. Чичиндаев, Ю.В. Дьяченко, В.А. Спарин, И.В. Хромова; под ред. А.В. Чичиндаева. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. – 319 с. – (Учебники НГТУ).
2. **Чичиндаев А.В., Хромова И.В.** Массовый открытый онлайн-курс «Современные авиационные системы кондиционирования воздуха». 2022. – URL: <https://stepik.org/112062> (дата обращения: 15.05.2026).
3. Patent № 4198830 US. Fluid conditioning apparatus and system: publ. 22.04.1980 / Carl D. Campbell.
4. Patent № 4246963 US. Heat exchanger: publ. 27.01.1981 / Alexander F. Anderson.
5. Patent № 4352273 US. Fluid conditioning apparatus and system: publ. 05.10.1982 / Robert C. Kinsell, Michael P. Saba, James E. Strang.
6. **Chichindaev A.V., Dyachenko Y.V., Meshkov A.A.** Aircraft heat exchanger-condenser: modeling the features of heat transfer process // Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2021): Proceedings of the 15 International scientific-technical conference. – Novosibirsk, 2021. – P. 640–643. – DOI: 10.1109/APEIE52976.2021.9647675.
7. **Чичиндаев А.В.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022661213 «Программа расчета теплообменника-конденсатора», 10 июня 2022 г.
8. **Чичиндаев А.В., Хромова И.В.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022663673 «Программа расчета теплообменника-конденсатора с переменным оребрением», 19 июля 2022 г.

STUDY OF THE OPERATION OF A HEAT EXCHANGER-REGENERATOR OF AIRCRAFT AIR CONDITIONING SYSTEM

Chichindaev A.V.¹, Vyborov M.R.¹, Khromova I.V.²

¹*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

²*Novosibirsk State University of Water Transport, Novosibirsk, Russia*

Currently, work is underway on testing domestic import-substituted passenger aircraft Superjet-100, MC-21, Tu-214. The air conditioning system is one of the important

ones for this. A distinctive feature of the system is the technology of moisture separation in the high-pressure line. For this purpose, a special subsystem is used – a condenser unit consisting of three units: a condenser heat exchanger, a regenerator heat exchanger and a dehumidifier. The purpose of the heat exchanger-regenerator is to ensure the operation of the condenser unit from the perspective of increasing the efficiency of its main mainly, the condenser heat exchanger, and preventing its freezing. Foreign companies offer a classic way of designing a heat exchanger-regenerator. This article is devoted to the study of a promising innovative model for a heat exchanger-regenerator. As a result of many years of work, the Department of Technical Thermophysics at NSTU has proposed a more efficient way of designing a heat exchanger from the perspective of increasing its efficiency. In particular, instead of creating a standard design, it is proposed to "control" the temperature of the heat transfer surface for specified operating conditions. The technique is based on the idea of changing the parameters of the fins from the hot and cold sides of the surface. The calculations were performed using the author's specialized software package from the Department of Technical Thermophysics at NSTU. The paper presents the results of primary studies of heat transfer processes, one of the promising solutions to this problem.

Keywords: air conditioning system, heat exchanger-regenerator, humid air, condensation, evaporation, compact plate-fin heat exchanger, fin pitch, heat transfer surface temperature.

DOI: 10.17212/1727-2769-2026-2-54-64

REFERENCES

1. Chichindaev A.V., D'yachenko Yu.V., Sparin V.A., Khromova I.V. *Sistemy zhizneobespecheniya i oborudovanie letatel'nykh apparatov* [Life support systems and equipment for aircraft]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2019. 319 p.
2. Chichindaev A.V., Khromova I.V. *Massovyi otkrytyi onlain-kurs «Sovremennye aviatsionnye sistemy konditsionirovaniya vozdukha»* [Massive open online course "Modern aviation air conditioning systems"]. 2022. Available at: <https://stepik.org/112062> (accessed 15.05.2026).
3. Campbell C.D. *Fluid conditioning apparatus and system*. Patent US, no. 4198830, 1980.
4. Anderson A.F. *Heat exchanger*. Patent US, no. 4246963, 1981.
5. Kinsell R.C., Saba M.P., Strang J.E. *Fluid conditioning apparatus and system*. Patent US, no. 4352273, 1982.
6. Chichindaev A.V., Dyachenko Y.V., Meshkov A.A. Aircraft heat exchanger-condenser: modeling the features of heat transfer process. *Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2021): Proceedings of the 15 International scientific-technical conference*. Novosibirsk, 2021, pp. 640–643. DOI: 10.1109/APEIE52976.2021.9647675.
7. Chichindaev A.V. *Programma rascheta teploobmennika-kondensatora* [Heat exchanger-condenser calculation program]. Certificate of state registration of computer program No. 2022661213, 2022.
8. Chichindaev A.V., Khromova I.V. *Programma rascheta teploobmennika-kondensatora s peremennym orebreniem* [Program for calculating a heat exchanger-condenser with variable fins]. Certificate of state registration of computer program No. 2022663673, 2022.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Чичиндаев Александр Васильевич – родился в 1960 году, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры технической теплофизики Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: теплофизика, теоретическая теплотехника. Опубликовано более 350 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: chichindaev@corp.nstu.ru).

Chichindaev Aleksandr Vasil'evich (b. 1960) – Doctor of Sciences (Eng.), professor, Professor of the Department Engineering Thermophysics, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on thermal physics and theoretical heat engineering. He is the author of 350 research papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: chichindaev@corp.nstu.ru).



Выборов Максим Романович – родился в 1998 году, аспирант кафедры технической теплофизики Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: теплофизика, теоретическая теплотехника. Опубликовано 4 научных работы (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: vyborov.2016@stud.nstu.ru).

Vyborov Maxim Romanovich (b. 1998) – Postgraduate student at the Department of Engineering Thermophysics, Novosibirsk State Technical University. His research interests include thermal physics, nad theoretical thermal engineering. He is the author of 4 research papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: vyborov.2016@stud.nstu.ru).



Хромова Ирина Владимировна – родилась в 1983 году, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры технической механики и подъемно-транспортных машин Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: теплофизика, теоретическая теплотехника. Опубликовано более 85 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: i@ihromova.ru).

Khromova Irina Vladimirovna (b. 1983) – Candidate of Sciences (Eng.), assistant professor, associate professor Department of Engineering Mechanics and Lifting and Transport Machines, Siberian State University of Water Transport. Her research interests are currently focused on thermal physics, theoretical the heating engineering. She is the author of 85 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: i@ihromova.ru).

Статья поступила 11 сентября 2025 г.
Received September 11, 2025

To Reference:

Chichindaev A.V., Vyborov M.R., Khromova I.V. Issledovanie raboty teploobmennika regeneratora aviatsionnoi sistemy konditsionirovaniya vozdukhа [Study of the operation of a heat exchanger-regenerator of aircraft air conditioning system]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2026, no. 2 (71), pp. 54–64. DOI: 10.17212/1727-2769-2026-2-54-64.