

УДК 621.565.944

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ТЕПЛООБМЕННИКА-КОНДЕНСАТОРА АВИАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА

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

¹*Новосибирский государственный технический университет*

²*Сибирский государственный университет водного транспорта*

В настоящее время ведутся работы по испытаниям отечественных импортозамещенных пассажирских самолетов Суперджет-100, МС-21, Ту-214. Одной из важных систем данных самолетов является система кондиционирования воздуха. Система имеет в своем составе два «проблемных» теплообменника: теплообменник-конденсатор с обмерзанием поверхности и первичный теплообменник с термическими напряжениями. Данная статья посвящена исследованию работы перспективной инновационной модели для импортозамещения теплообменника-конденсатора. Иностранные компании предлагают достаточно практичные, но крайне неэффективные варианты борьбы с обмерзанием теплопередающей поверхности. На кафедре технической теплофизики НГТУ в результате многолетних работ предложен более эффективный способ защиты поверхности теплообменника-конденсатора от обмерзания. В основе лежит глубокое изучение особенностей процесса теплопередачи в перекрестно-точном компактном пластинчато-ребристом теплообменнике. В частности, предложено вместо создания противообледенительной системы теплообменника-конденсатора, используемой на иностранных самолетах, просто «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 на специализированном авторском пакете программ кафедры технической теплофизики НГТУ. Первичные исследования в данном направлении подтвердили предложенный способ защиты от обмерзания. В работе изложены результаты исследования процессов теплопередачи одного из перспективных вариантов решения данной задачи.

Ключевые слова: система кондиционирования воздуха, теплообменник-конденсатор, обмерзание, противообледенительная система, компактный пластинчато-ребристый теплообменник, шаг оребрений, температура теплопередающей поверхности.

DOI: 10.17212/1727-2769-2025-4-59-71

Введение

В современных авиационных системах кондиционирования воздуха (СКВ) для пассажирских самолетов используется достаточно экономичная схема типа «петля» [1, 2]. Отличительной ее особенностью является наличие теплообменника-конденсатора для конденсации водяных паров из влажного воздуха с последующим их удалением. Главная проблема тепло-

обменника связана с рабочими температурами воздуха на входе: по горячему тракту это примерно 30...40 °С, по холодному тракту симметрично – 30...–40 °С. Специфика процесса теплопередачи в компактном пластинчато-ребристом терекрестно-точном теплообменнике (КПРТ) приводит к тому, что примерно 50 % теплопередающей поверхности имеет отрицательную температуру. В итоге сконденсированная влага приводит к обледенению поверхности, особенно на входных кромках со стороны холодного теплоносителя.

Инженеры фирм Боинг и Аэробас предложили и используют для решения данной проблемы три классических приема [3–5]:

- внедрения на входных кромках трубок противообледенительной системы;
- создание специального обводного канала по холодному тракту;
- подмес горячего воздуха на вход конденсатора для быстрого размораживания намерзшего льда и снега.

Данные приемы используются на всех иностранных самолетах в разном сочетании и исполнении. Основные недостатки следующие: заметное усложнение конструкции теплообменника и всей СКВ в целом (внедрение дополнительных каналов для подвода горячего воздуха и автоматики для их включения). При этом проблема обмерзания остается как специфика схемы СКВ.

В 80-е годы прошлого века кафедра технической теплофизики (ТТФ) НГТУ-НЭТИ участвовала в экспериментальных и численных исследованиях СКВ типа «петля» для разрабатываемого тогда самолета Ту-204 [1, 2]. Полученные опыт и знания по работе агрегатов СКВ на влажном воздухе позволили предложить отечественные альтернативные варианты борьбы с обмерзанием. Основной идеей данных инновационных приемов было использование процессов теплопередачи в КПРТ для задания требуемых значений температуры теплопередающей поверхности с целью исключения зон с отрицательной температурой. Это позволяет предотвратить сам процесс обледенения. Единственный недостаток метода – некоторое усложнение технологии изготовления конструкции теплообменника-конденсатора.

В настоящей работе приведены результаты исследования одной из перспективных конструкций теплообменника-конденсатора с отсутствием зон обмерзания.

Исследование теплообменника-конденсатора с переменным оребрением

Главной проблемой обмерзания конденсатора служат особенности теплопередачи в стандартной конструкции КПРТ: во-первых, перекрестно-точная схема теплообменника, во-вторых, фиксированные параметры оребренной поверхности по горячему и холодному тракту. В этом случае всегда до 50 % теплопередающей поверхности должно иметь отрицательную температуру.

На кафедре ТТФ НГТУ-НЭТИ предложен иной по сравнению с иностранными способ борьбы с обмерзанием теплопередающей поверхности. Для этого предлагается использовать переменные параметры оребрений по длине горячего и холодного тракта (рис. 1). При правильной комбинации параметров оребрений можно добиться исключения зон поверхности с отрицательной температурой. Наиболее детально данный прием и методика расчета изложены в работе [6]. Расчеты выполнялись на специализированном авторском пакете программ кафедры технической теплофизики НГТУ [7-8]. Ниже приведены результаты исследований для одного из благоприятных сочетаний параметров оребрений.

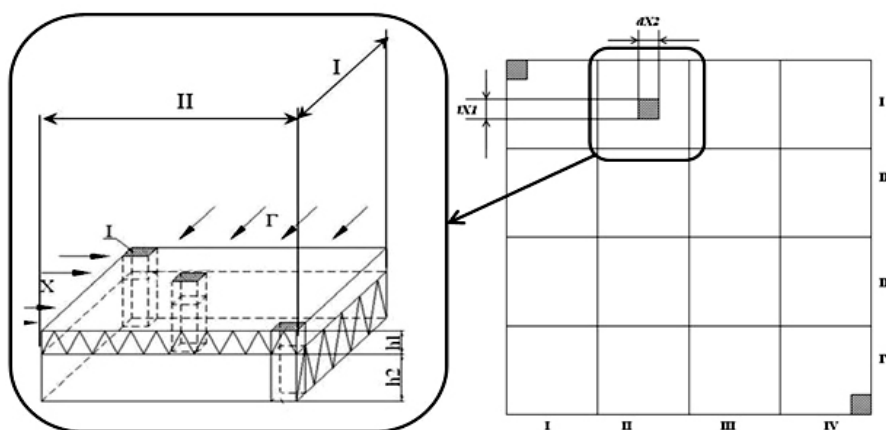


Рис. 1 – Изменение шага оребрения по трактам:

Г (индексы 1, I) – горячее оребрение; X (индексы 2, II) – холодное оребрение;
I–IV – секторы с разными параметрами оребрений, h – высота оребрения, ΔX –
размер расчетной ячейки

Fig. 1 – Changing the fin pitch along the paths:

G (indices 1, I) are hot fins; X (indices 2, II) are cold fins; I–IV are sectors with different
fin parameters, h is a fin height, ΔX is calculation cell

В работе выполнен анализ и выбор оптимального теплообменника из трех исследований: изменение шага горячего оребрения, изменение шага холодного оребрения и изменение шага обоих оребрений. Исходные данные для каждого исследования: параметры теплоносителей (табл. 1), геометрия оребрений (табл. 2) и режимные параметры (табл. 3) были идентичны.

Таблица 1 / Table 1

Параметры теплоносителей
Coolant parameters

Оребрение	Расход, кг/с	Температура, °C	Давление, кПа	Влагосодержание, г/кг
Горячее	0,5	40,0	400,0	0,0
Холодное	0,5	–40,0	100,0	0,0

Таблица 2 / Table 2

Геометрия оребрений
Fin geometry

Оребрение	Высота	Эквивалентный диаметр оребрения	Шаг оребрения	Толщина ребра	Коэффициент оребрения поверхности
Горячее	6,35	1,88	2,56	0,15	0,849
Холодное	7,00	2,94	4,6	0,15	0,780

Таблица 3 / Table 3

Режимные параметры
Mode parameters

Оребрение	Число Рейнольдса	Разница температур, °С
Горячее	2500	30
Холодное	2500	30

1. Серия 1. Исследование параметров теплообменника при изменении шага горячего оребрения

В данной серии расчетов рассматривается вариант теплообменника-конденсатора с изменением шага горячего оребрения (табл. 4). Первый вариант соответствует случаю стандартной компоновки КПРТ с постоянными оребрениями по длине горячего и холодного тракта и является «базой» для сравнения. Варианты 2–4 отличаются от «базовой» за счет уменьшения шага между ребрами холодного оребрения. Это позволяет за счет изменения процесса теплопередачи увеличить температуру поверхности.

Таблица 4 / Table 4

Варианты теплообменников
Heat exchanger options

№ варианта	горячий/холодный	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	0,75	0,5	0,33	0,25
3	горячий	0,5	0,33	0,25	0,15
4	горячий	0,33	0,25	0,15	0,15

Анализ распределения температур горячего теплоносителя (рис. 2). Анализ распределения температур холодного теплоносителя (рис. 3). Анализ распределения температур теплообменной поверхности (рис. 4).

В результате проведенного расчета установлены следующие результаты:

- изменение шага горячего оребрения снизило эффективность процесса теплопередачи: температура горячего теплоносителя уменьшилась до 5 °С в сравнении с «базовой», холодного – увеличилась до 5 °С;
- сравнение температур теплопередающей поверхности показало линейный рост по всей длине до 7...8 °С.

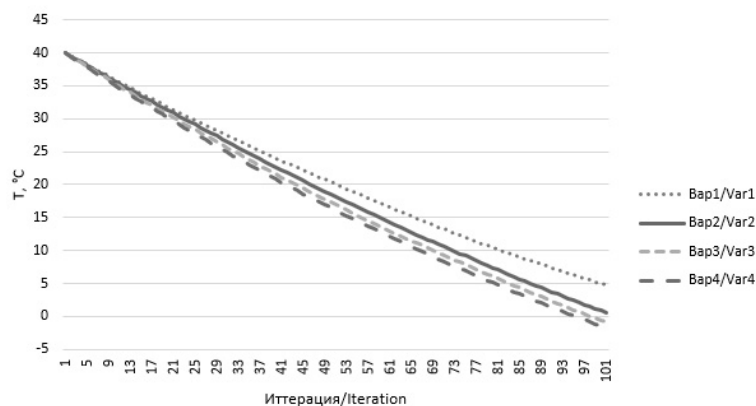


Рис. 2 – График перепада температуры горячего теплоносителя

Fig. 3 – Graph of the temperature difference of the hot coolant

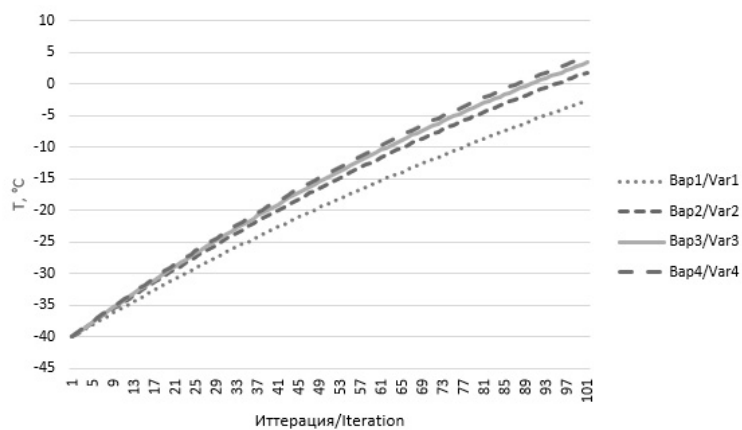


Рис. 3 – График перепада температуры холодного теплоносителя

Fig. 3 – Graph of the temperature difference of the cold coolant

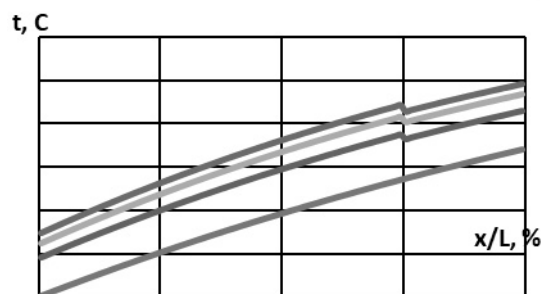


Рис. 4 – График перепада температуры пластины теплообменной поверхности

Fig. 4 – Graph of the temperature difference of the heat transfer surface plate

Обобщенный анализ представлен в табл. 5.

Таблица 5 / Table 5

Противообледенительная характеристика
Anti-icing performance

Вариант	Средняя температура поверхности, °С	Перепад температур по поверхности, °С	Площадь обмерзания, %
1	3,55	46,40	37,8
2	9,13	46,77	18,3
3	10,98	50,93	17,3
4	12,13	54,96	17,3

В итоге: в «базовом» варианте имеется минимальная температура поверхности и площадь поверхности с отрицательной температурой достигает почти 40 % поверхности. В модифицированных вариантах 2–4 (расположены выше «базовой» версии) площадь с отрицательной температурой (потенциального «обмерзания») сокращается до 17 %.

2. Серия 2. Исследование параметров теплообменника при изменении шага холодного оребрения

В данной серии расчетов рассматривается вариант теплообменника-конденсатора с изменением шага холодного оребрения (табл. 6).

Таблица 6 / Table 6

Варианты теплообменников
Heat exchanger options

Номер варианта	Горячий/холодный	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	4	2	1	1
3	Холодный	6	3	1,5	1
4	Холодный	8	4	2	1

Анализ распределения температур горячего теплоносителя (рис. 5).

Анализ распределения температур холодного теплоносителя (рис. 6).

В результате проведенного расчета установлены следующие результаты:

- изменение шага холодного оребрения снизило эффективность процесса теплопередачи: температура горячего теплоносителя уменьшилась до 7 °С в сравнении с «базовой», холодного – увеличилась до 8 °С;
- сравнение температур теплопередающей поверхности показало нелинейный рост по всей длине до 13...17 °С на входных самых холодных краях теплообменника-конденсатора.

Анализ распределения температур теплообменной поверхности (рис. 7).

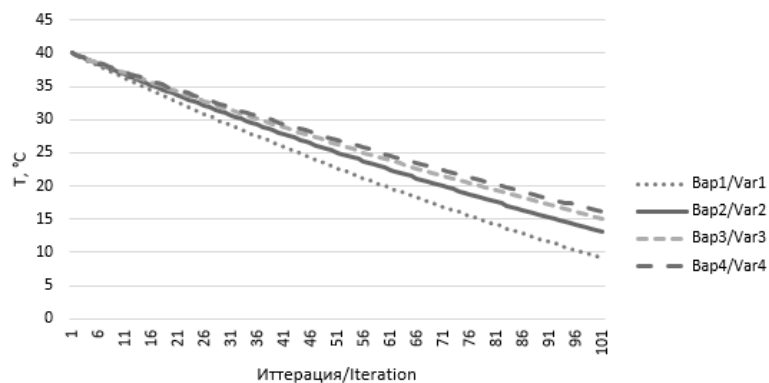


Рис. 5 – График перепада температуры горячего теплоносителя

Fig. 5 – Graph of the temperature difference of the hot coolant

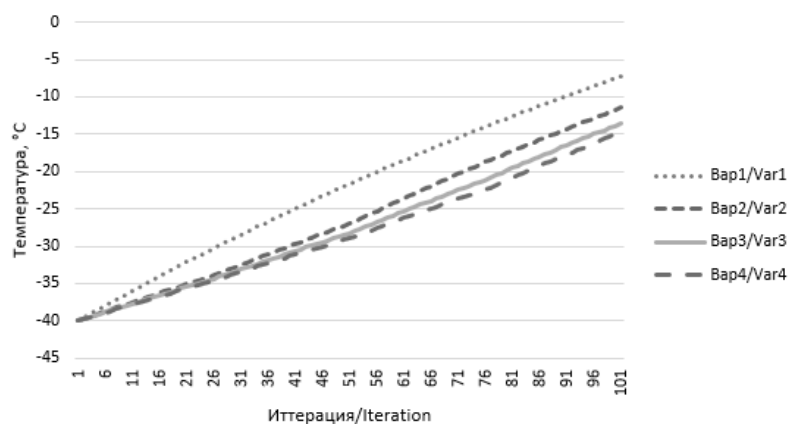


Рис. 6 – График перепада температуры холодного теплоносителя

Fig. 6 – Graph of the temperature difference of the cold coolant

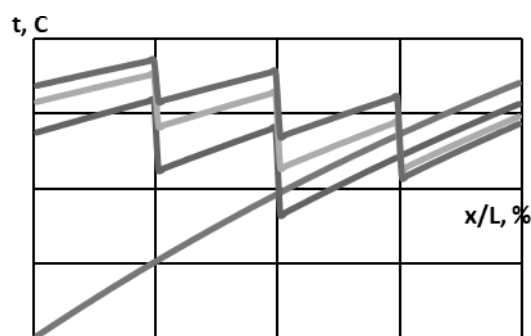


Рис. 7 – График перепада температуры пластины теплообменной поверхности

Fig. 7 – Graph of temperature difference of the heat transfer surface plate

Анализ оптимального варианта (табл. 7).

Таблица 7 / Table 7

Противообледенительная характеристика

Anti-icing performance

Вариант	Средняя температура поверхности, °С	Перепад температур по поверхности, °С	Площадь обмерзания, %
1	3,55	46,40	37,8
2	15,36	38,92	4,08
3	18,64	20,86	0,0
4	21,18	16,70	0,0

В итоге: в модифицированных вариантах площадь поверхности с отрицательной температурой сокращается с 4 до 0 % по сравнению с «базовым» вариантом (почти 40 % поверхности).

3. Серия 3. Исследование параметров теплообменника при изменении шага обоих оребрений

В данной серии расчетов рассматривается вариант теплообменника-конденсатора с изменением шага горячего и холодного оребрения (табл. 8).

Таблица 8 / Table 8

Варианты теплообменников

Heat exchanger options

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

Анализ распределения температур горячего теплоносителя (рис. 8).
Анализ распределения температур холодного теплоносителя (рис. 9).
Анализ распределения температур теплообменной поверхности (рис. 10).

В результате проведенного расчета установлены следующие результаты:

- изменение шага обоих оребрений снизило эффективность процесса теплопередачи: температура горячего теплоносителя уменьшилась до 4 °С в сравнении с «базовой», холодного – увеличилась до 4 °С;
- сравнение температур теплопередающей поверхности показало нелинейный рост по всей длине до 9...21 °С на входных самых холодных кромках теплообменника-конденсатора.

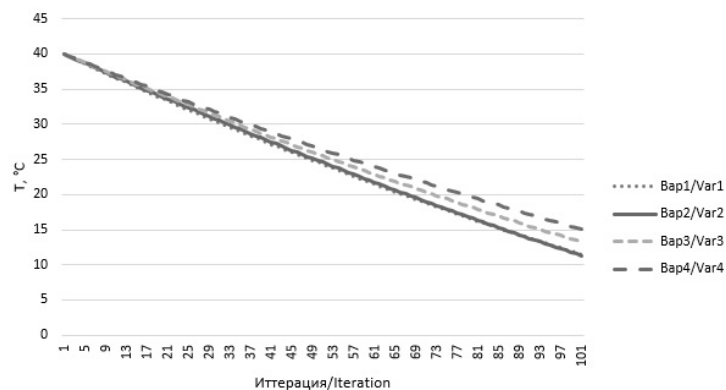


Рис. 8 – График перепада температуры горячего теплоносителя

Fig. 8 – Graph of the temperature difference of the hot coolant

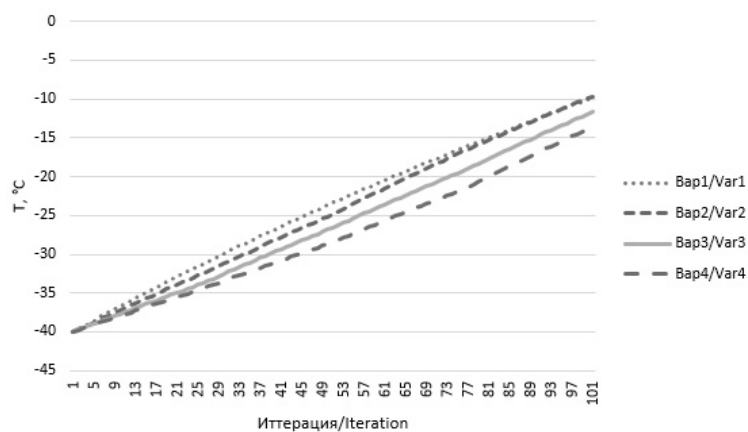


Рис. 9 – График перепада температуры холодного теплоносителя

Fig. 9 – Graph of the temperature difference of the cold coolant

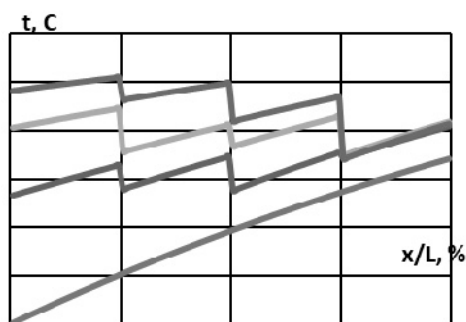


Рис. 10 – График перепада температуры пластины теплообменной поверхности

Fig. 10 – Graph of the temperature difference of the heat transfer surface plate

Анализ оптимального варианта (табл. 9).

Таблица 9 / Table 9

Противообледенительная характеристика
Anti-icing performance

Вариант	Средняя температура поверхности, °С	Перепад температур по поверхности, °С	Площадь обмерзания, %
1	3,55	46,40	37,8
2	10,89	35,12	9,34
3	17,97	21,69	0,0
4	23,81	16,98	0,0

В итоге: в модифицированных вариантах площадь поверхности с отрицательной температурой сокращается с 9 до 0 % по сравнению с «базовым» вариантом (почти 40 % поверхности).

Заключение

В работе выполнен комплекс исследований распределения температур горячего и холодного теплоносителей, а также теплопередающей поверхности при изменении шагов оребрений в КППТ. Изменение шага оребрений в горячем и холодном трактах приводят к кардинальным изменениям в распределении температур в теплообменнике-конденсаторе. При переменном горячем оребрении наблюдается линейный рост температуры поверхности по всей длине. При переменном холодном оребрении установлен нелинейный рост температуры в самых опасных входных сечениях КППТ. В результате исследований установлено, что лучшими противообледенительными характеристиками обладает теплообменник при совместном изменении шагов обоих оребрений, при котором наблюдается наибольшая средняя температура теплообменника и отсутствует отрицательная температура поверхности, особенно на входных кромках. Во всех случаях установлено некоторое снижение эффективности работы КППТ, но оно может быть компенсировано пропорциональным увеличением площади теплообменника-конденсатора.

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». – URL: <https://stepik.org/112062> (дата обращения: 29.11.2025).
3. Patent № 4198830 US. Fluid conditioning apparatus and sistem / C.D. Campbell. – 1980.
4. Patent № 4246963 US. Heat exchanger / A.F. Anderson. – 1981.

5. Patent № 4352273 US. Fluid conditioning apparatus and system / R. Kinsell, M.P. Saba, J.E. Strang. – 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. – 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 THE HEAT EXCHANGER-CONDENSER OF THE AIRCRAFT AIR CONDITIONING SYSTEM

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

¹*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

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

Currently, work is underway to test domestic passenger aircraft Superjet-100, MC-21, Tu-214. An important system of these aircraft is the air conditioning system. The system includes a "problematic" condenser heat exchanger with surface freezing. Foreign companies offer quite practical, but extremely ineffective options for combating freezing of the heat transfer surface. As a result of many years of work, the Department of Technical Thermophysics of NSTU has proposed a more effective way to protect the surface of the condenser heat exchanger from freezing. The purpose of this paper is to present this method. It is based on the study of the features of the heat transfer process in a cross-precision compact plate-fin heat exchanger. In particular, 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 a specialized author's software package from the Department of Technical Thermophysics at NSTU. Initial studies in this area have confirmed the proposed method of frost protection. The paper presents the results of a study of heat transfer processes, one of the promising solutions to this problem.

Keywords: air conditioning system, heat exchanger-condenser, freezing, anti-icing system, compact plate-fin heat exchanger, fin pitch, heat transfer surface temperature.

DOI: 10.17212/1727-2769-2025-4-59-71

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"]. Available at: <https://stepik.org/112062> (accessed 29.11.2025).
3. Campbell C.D. *Fluid conditioning apparatus and sistem*. Patent US, no. 4198830, 1980.
 4. Anderson A.F. *Heat exchanger*. Patent US № 4246963, 1981.
 5. Kinsell R., 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, Новосибирский государственный технический университет. 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 at the Department of 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, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: теплофизика, теоретическая теплотехника. Опубликовано 4 научные работы (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: vyborov.2016@stud.nstu.ru).

Vyborov Maxim Romanovich (b. 1998) – a postgraduate student at the Department of Engineering Thermophysics, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on thermal physics and theoretical heat 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, Сибирский государственный университет водного транспорта. Область научных интересов: теплофизика, теоретическая теплотехника. Опубликовано более 182 научных работ. (Адрес: 630099, Россия, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33. E-mail: i@ihromova.ru).

Khromova Irina Vladimirovna (b. 1983) – Candidate of Sciences (Eng.), associate professor, associate professor, Department of Technical Mechanics and Lifting and Transport Machines, Siberian State University of Water Transport. Her research interests are currently focused on thermal physics and theoretical heat engineering. She is the author of 182 research papers. (Address: 33, Schetinkina st., Novosibirsk, 630099, Russia. E-mail: i@ihromova.ru).

*Статья поступила 10 сентября 2025 г.
Received September 10, 2025*

To Reference:

Chichindaev A.V., Vyborov M.R., Khromova I.V. Issledovanie raboty teploobmennika-kondensatora aviatsionnoi sistemy konditsionirovaniya vozdukha [Study of the operation of heat exchanger-condenser of aircraft air conditioning system]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2025, no. 4 (69), pp. 59–71. DOI: 10.17212/1727-2769-2025-4-59-71.