

УДК 629.7.048(075.8)

**АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СРЕДСТВ БОРЬБЫ
С ОБМЕРЗАНИЕМ ТЕПЛООБМЕННИКА-КОНДЕНСАТОРА
ЗА СЧЕТ ПЕРЕМЕННОГО ОТНОШЕНИЯ ТЕРМИЧЕСКИХ
СОПРОТИВЛЕНИЙ ТЕПЛООБМЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

А.В. Чичиндаев, Ю.В. Дьяченко, В.В. Ларичкин, А.И. Кириленко

Новосибирский государственный технический университет

Использование в системе кондиционирования воздуха самолета Ту-204 (Boeing, Airbus, Superjet 100, МС-21 и др.) теплообменника-конденсатора для охлаждения сжатого воздуха за счет холодного воздуха с отрицательной температурой, выходящего из турбины, приводит к ряду эксплуатационных проблем. Главным образом к обмерзанию части теплообменной поверхности, которое является причиной перекрытия живого сечения каналов, роста сопротивления и падения расхода воздуха в системе. Целью настоящей работы являются анализ известных способов борьбы с обмерзанием теплообменника-конденсатора, описание особенностей противообледенительной защиты и предложение вариантов решения данной проблемы. Для задачи оптимизации конструкции теплообменников в настоящей работе используется обобщенный критерий, описывающий отношение термических сопротивлений холодного и горячего тракта, который включает в себя соотношения исходных значения режимов течения теплоносителей; коэффициенты оребрения теплообменной поверхности; факторы, описывающие соотношение режимных параметров теплоносителей и площадей оребрений. Управляя отношением термических сопротивлений, можно получить необходимую температуру теплообменной поверхности, препятствующую обмерзанию. В работе представлены результаты численного исследования влияния различной комбинации изменения режимных и геометрических факторов на уменьшение площади обмерзания поверхности теплообменника-конденсатора, включая использование переменного отношения термических сопротивлений.

Ключевые слова: теплообменник-конденсатор, процессы тепломассообмена и обмерзания, переменное отношение термических сопротивлений, меры противообледенительной защиты теплообменной поверхности.

DOI: 10.17212/1727-2769-2017-4-112-118

Введение

Использование в системе кондиционирования воздуха самолета Ту-204 (Boeing, Airbus, Superjet 100, МС-21 и др.) теплообменника-конденсатора для охлаждения сжатого воздуха за счет холодного воздуха с отрицательной температурой, выходящего из турбины, приводит к ряду эксплуатационных проблем [1–3]. Главная из них – обледенение части теплообменной поверхности, которое является причиной перекрытия живого сечения каналов, роста сопротивления и падения расхода воздуха в системе. Целью настоящей работы являются исследование высокоэффективного способа борьбы с обмерзанием теплообменника-конденсатора за счет использования переменного отношения термических сопротивлений теплообменной поверхности [1–5] и анализ вариантов решения данной проблемы.

1. Эксплуатационные особенности работы конденсатора

Обмерзание конденсатора

Основная эксплуатационная проблема конденсатора состоит в том, что охлаждающий теплоноситель должен иметь на рабочем режиме отрицательную температуру. В этом случае картина тепломассообмена резко усложняется: во-первых, в воздухе за турбиной наряду с переохлажденным аэрозолем появляются взвешенные частицы снега и льда; во-вторых, начинают происходить нестационарные процессы обледенения-плавления льда на входных кромках теплообменной секции; в-третьих, в горячем тракте возникают условия для замерзания сконденсировавшейся влаги. Таким образом, при проектировании конденсатора необходимо предусмотреть противообледенительные меры, препятствующие обледенению в горячем тракте и намерзанию снега на передние кромки теплообменной секции в холодном тракте [1–3].

Особенности оптимизации конструкции конденсатора

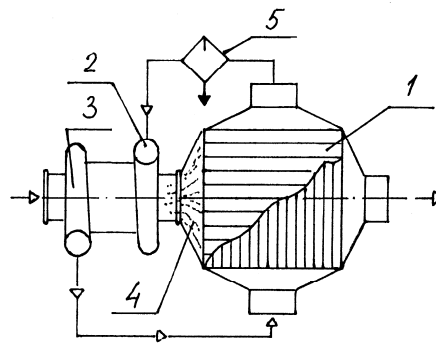
Для задачи оптимизации конструкции теплообменников в настоящей работе используется обобщенный критерий, описывающий отношение термических сопротивлений холодного и горячего тракта $RR = R_{Re} R_{\varphi}$, который включает в себя: соотношения исходных значения режимов течения теплоносителей $R_{Re} = Re_1/Re_2$; коэффициенты оребрения теплообменной поверхности $R_{\varphi} = \varphi_1/\varphi_2$; факторы, описывающие соотношение режимных параметров теплоносителей и площадей оребрений. Управляя отношением термических сопротивлений RR , можно получить необходимую температуру теплообменной поверхности, препятствующую обмерзанию [3–5]. В работе представлены результаты анализа влияния различной комбинации изменения режимных и геометрических факторов на уменьшение площади обмерзания поверхности теплообменника-конденсатора, включая использование переменного отношения термических сопротивлений [3–5].

Рис. 1 – Схема соединения турбохолодильника и теплообменника-конденсатора:

1 – компактный теплообменник; 2 – турбина турбохолодильника; 3 – компрессор турбохолодильника; 4 – аэрозольный туман; 5 – влагоотделитель

Fig. 1 – Diagram of the turbo-cooler and a heat-exchanger-condenser connection:

1 is a compact heat exchanger; 2 is a turbine of a turbine cooler; 3 is a turbo-compressor compressor; 4 is aerosol fog; 5 is a moisture separator



2. Методика проведения исследования

Переменное отношение термических сопротивлений. В работе используется разработанная ранее методика расчетов двухмерной модели расчета теплопередачи в перекрестно-точном компактном пластинчато-ребристом теплообменнике [2–3]. В частности в алгоритм разработанного прикладной пакета программ добавляется разрезание исходной сетки на четыре равных сектора I–IV по длине горячего и холодного тракта (рис. 2). В итоге теплопередающая поверхность разбивается на 16 элементарных «теплообменников», в каждом из которых задаются свои геометрические параметры оребрений [4–5].

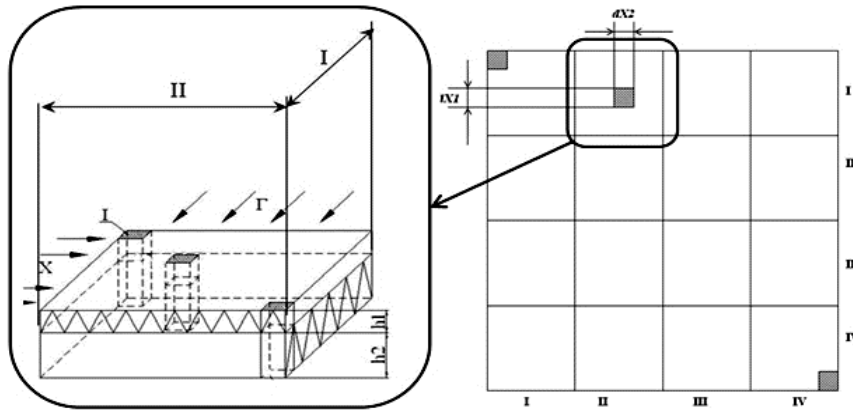


Рис. 2 – Секционное разделение поверхности по трактам:

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

Fig. 2 – Sectional separation of the surface along the paths:

Γ (indices 1, I) is hot finning; X (indices 2, II) is cold finning; I-IV are sectors with different finning parameters, h is the fin height, ΔX is the size of the design cell

3. Влияние переменного отношения термических сопротивлений на температуру поверхности

Распределение температуры при постоянном отношении термических сопротивлений $RR = R_{Re} R_{\phi} = 1$. Представлено на рис. 3: характерная особенность – более 50 % поверхности теплообмена имеет отрицательную температуру, приводящую к ее обмерзанию [1–3].

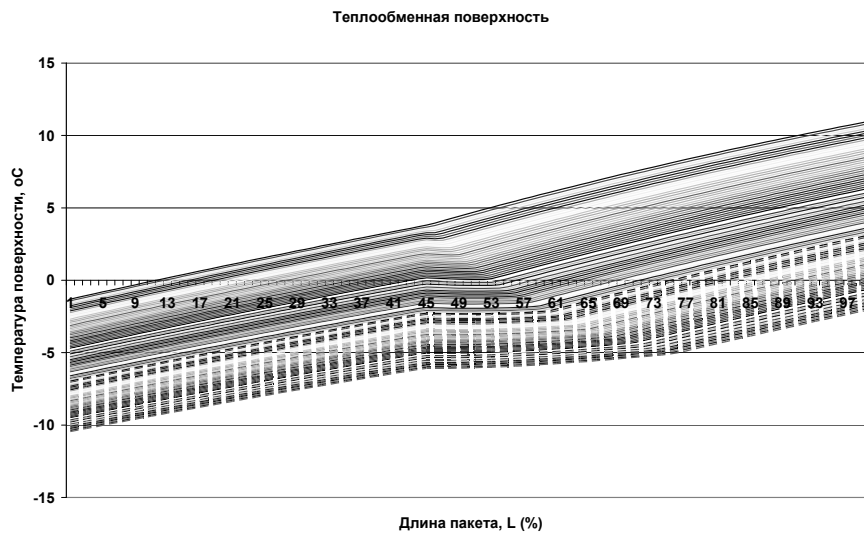


Рис. 3 – Распределение температуры при постоянном отношении термических сопротивлений в холодном и горячем трактах

Fig. 3 – Temperature distribution with a constant ratio of thermal resistances in the cold and hot regions

Распределение температуры при переменном отношении термических сопротивлений $RR = R_{\phi} = 0,25 \dots 4$. В работах [4–5] исследовались три варианта задания переменного отношения термических сопротивлений: изменение по горячему тракту, изменение по холодному тракту, изменение по обоим трактам одновременно. В результате исследований в широком диапазоне $R_{\phi} = 0,25 \dots 4$ удалось установить, что при изменении оребрения по обоим трактам происходит суммарное увеличение температуры теплообменной поверхности и резкое сокращение перепада температуры. Анализируя поля температур теплообменной поверхности, можно сделать вывод, что это совместное изменение отношения термических сопротивлений является самым оптимальным приемом, так 100 % пластины имеет температуру выше 0°C и процент обмерзания поверхности достигает 0 % (рис. 4).

Распределение температуры при переменном отношении термических сопротивлений $RR = R_{Re} = 0,25 \dots 4$. В работах [4–5] исследовались два варианта защиты теплообменной поверхности: от термических напряжений в первичном теплообменнике и обмерзания в теплообменнике–конденсаторе. Установлено, что режимные параметры существенным образом меняют температуру поверхности, но приводят к недостатку – росту гидравлического сопротивления.

Распределение температуры при переменном отношении термических сопротивлений $RR = R_{Re} R_{\phi} = 0,125 \dots 16$. При комбинированном использовании двух параметров R_{Re} и R_{ϕ} можно добиться дополнительного повышения эффективности борьбы с обмерзанием, что зависит от постановки задачи и выделяемых ресурсов.

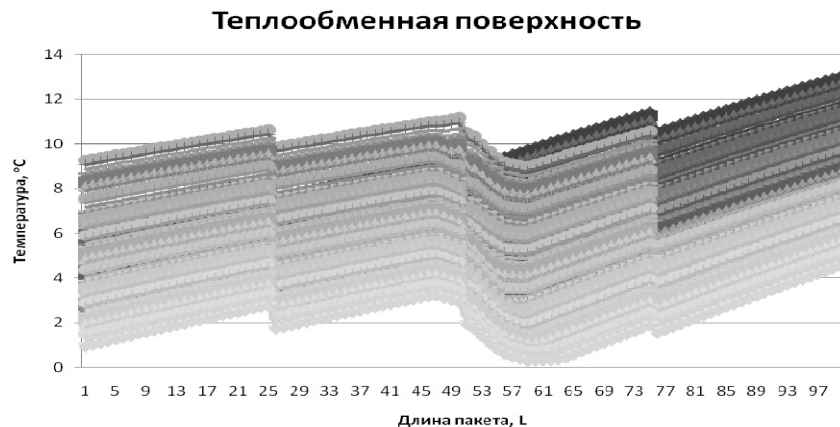


Рис. 4 – Распределение температуры при переменном отношении термических сопротивлений в холодном и горячем трактах

Fig. 4 – Temperature distribution with a variable ratio of thermal resistances in the cold and hot regions

Заключение

В работе представлено описание особенностей предложенной эксплуатационной оптимизации теплообменника-конденсатора, а также результаты анализа получения теплообменника-конденсатора с заданным распределением температур теплообменной поверхности, препятствующим обмерзанию теплообменной поверхности. Проведенный анализ тепловой защиты холодного тракта теплообменника-конденсатора позволил: 1) разработать основные принципы противообледе-

нительной оптимизации конденсатора; 2) исследовать эффективность предложенного варианта оптимизации конденсатора за счет переменного отношения термических сопротивлений; 3) решить актуальную проблему создания незамерзающей конструкции КПРТ, позволяющую повысить надежность и ресурс теплообменника-конденсатора авиационной системы кондиционирования воздуха.

Результаты работы представляют практический интерес при проектировании теплообменного оборудования, работающего на влажном воздухе при отрицательных температурах.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Дьяченко Ю.В., Чичиндаев А.В.** Особенности работы авиационных систем кондиционирования на влажном воздухе: учебное пособие. – 2-е изд. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – 87 с.
2. **Чичиндаев А.В.** Теплообмен влажного воздуха в компактных пластинчато-ребристых теплообменниках: монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – 298 с. – (Монографии НГТУ).
3. **Чичиндаев А.В.** Оптимизация компактных пластинчато-ребристых теплообменников. Теоретические основы: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – 436 с. – (Учебники НГТУ).
4. **Диомидов И.Г.** Исследование влияния переменного отношения термических сопротивлений на распределение температуры в компактном пластинчато-ребристом теплообменнике: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 2013. – 22 с.
5. **Чичиндаев А.В.** Исследование влияния переменного отношения термических сопротивлений на поля температур в теплообменнике-конденсаторе СКВ // Энергетика и теплотехника: сборник научных трудов / под ред. В.Е. Накорякова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. – Вып. 19. – С. 181–187.

AN ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF HEAT-EXCHANGER-CONDENSER ANTI-FROSTING METHODS USING THE VARIABLE RATIO OF THERMAL RESISTANCES OF THE HEAT-EXCHANGE SURFACE

Chichindaev A.V., Dyachenko Yu.V., Larichkin V.V., Kirilenko A.I.
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The use of the heat-exchanger-condenser in the air conditioning system of the Tu-204 (Boeing, Airbus, Superjet 100, MS-21, etc.) for cooling the compressed air by negative temperature cold air leaving the turbine results in a number of operational problems. It is mainly the heat exchange surface frosting which results in channel cross-section frosting, an increase in resistance and a decrease in the airflow in the system. The purpose of this paper is to analyze the known anti-frosting methods for the heat-exchanger-condenser protection, to describe the features of this method and to propose solutions to this problem. To optimize the design of heat exchangers, a generalized criterion that describes the ratio of thermal resistances of cold and hot sections is used in this paper. It includes the ratio of initial values of the heat transfer agent flow state; heat exchange surface finning coefficients; factors describing the ratio of operating parameters and the ribbing area. By controlling the thermal resistance ratio, the desired temperature of the heat exchange surface preventing frosting can be obtained. The paper presents the results of a numerical study of the effect of changing various combinations of operation conditions and geometric factors on the reduction in the heat-exchanger-condenser surface frosting area, including the use of the variable thermal resistance ratio.

Keywords: Heat-exchanger-condenser, heat and mass transfer and frosting processes, variable ratio of thermal resistances, measures of anti-icing protection of heat exchange surface.

DOI: 10.17212/1727-2769-2017-4-112-118

REFERENCES

1. Dyachenko Y.G., Chichindaev A.V. *Osobennosti raboty aviatsionnykh sistem konditsionirovaniya na vlazhnom vozdukh* [Features of the aircraft air conditioning system on the moist air]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2017. 87 p.
2. Chichindaev A.V. *Teplomassoobmen vlazhnogo vozdukh v kompaktnykh plastinchato-rebristykh teploobmennikakh* [Heat and mass transfer of moist air in compact plate-fin heat exchangers]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2012. 298 p.
3. Chichindaev A.V. *Optimizatsiya kompaktnykh plastinchato-rebristykh teploobmennikov. Teoreticheskie osnovy* [Compact plate-fin heat exchangers optimization. Theoretical foundations]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2017. 436 p.
4. Diomidov I.G. *Issledovanie vliyaniya peremennogo otnosheniya termicheskikh soprotivlenii na raspredelenie temperatury v kompaktnom plastinchato-rebristom teploobmennike*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Investigation of the influence of the variable ratio of thermal resistances on the temperature distribution in a compact plate-finned heat exchanger. Author's abstract of PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2013. 22 p.
5. Chichindaev A.V. [Research on the influence of the thermal resistances variable ratio on the temperature fields in the air conditioning systems heat exchanger-condenser]. *Energetika i teplo tekhnika* [Power engineering and heat engineering]. Novosibirsk, 2015, iss. 19, pp. 181–187. (In Russian).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Чичиндаев Александр Васильевич – родился в 1960 году, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой технической теплофизики, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: теплофизика, теоретическая теплотехника. Опубликовано более 40 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: chichindaev@corp.nstu.ru).

Chichindaev Aleksandr Vassil'evich (b. 1960) – Doctor of Sciences (Eng.), professor, head of the Department of Engineering Thermal Physics, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on thermal physics and theoretical thermal physics. He is the author of more than 40 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: chichindaev@corp.nstu.ru).



Дьяченко Юрий Васильевич – родился в 1944 году, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры технической теплофизики, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: теплофизика, теоретическая теплотехника. Опубликовано более 40 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: ttf_nstu@rambler.ru).

Dyachenko Yuriy Vassil'evich (b. 1944) – Doctor of Sciences (Eng.), professor, professor at the Engineering Thermal Physics Department, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on thermal physics and theoretical thermal physics. He is the author of over 40 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: ttf_nstu@rambler.ru).



Ларичкин Владимир Викторович – родился в 1949 году, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой инженерных проблем экологии, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: теплофизика, промышленная экология. Опубликовано более 70 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: larichkin@corp.nstu.ru).

Larichkin Vladimir Victorovich (b. 1949) – Doctor of Sciences (Eng.), professor, head of the Department of Engineering Ecology, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on thermal physics and industrial ecology. He is the author of more than 70 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: larichkin@corp.nstu.ru).



Кириленко Александр Иванович – родился в 1992 году, аспирант, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: теплофизика, теоретическая теплотехника. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: sashafinagel@yandex.ru).

Kirilenko Aleksandr Ivanovich (b. 1992) – a PhD Student, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on thermal physics and theoretical thermal physics. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: sashafinagel@yandex.ru).

*Статья поступила 01 декабря 2017 г.
Received December 01, 2017*

To Reference:

Chichindaev A.V., Dyachenko Yu.V., Larichkin V.V., Kirilenko A.I. Analiz effektivnosti sredstv bor'by s obmerzaniem teploobmennika-kondensatora za schet peremennogo otnosheniya termicheskikh soprotivlenii teploobmennoi poverkhnosti [An analysis of the efficiency of heat-exchanger-condenser anti-frosting methods using the variable ratio of thermal resistances of the heat-exchange surface]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2017, no. 4 (37), pp. 112–118. doi: 10.17212/1727-2769-2017-4-112-118