

АЭРОДИНАМИКА И ПРОЦЕССЫ ТЕПЛООБМЕНА ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ / AERODYNAMICS AND HEAT TRANSFER PROCESSES OF AIRCRAFT

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.122.52>

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЗДУХО-ВОЗДУШНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА НА ОСНОВЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПУЧКА ОРЕБРЕННЫХ U-ОБРАЗНЫХ ТРУБОК

Научная статья

Попова Д.К.^{1,*}, Кузнецов Н.Б.², Кортиков Н.Н.³, Бабий Ю.И.⁴

¹ ORCID : 0000-0001-8028-6405;

² ORCID : 0000-0002-8452-7154;

³ ORCID : 0000-0002-7569-3492;

⁴ ORCID : 0000-0003-0536-2775;

^{1,2} АО "ОДК-Климов", Санкт-Петербург, Российская Федерация

³ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация

⁴ СИГМА Технологии, Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (daria_well96[at]mail.ru)

Аннотация

В настоящей статье опробована IOSO-технология оптимизации параметров воздухо-воздушного теплообменника (ВВТ) с интенсификаторами теплообмена в виде оребрения наружной поверхности трубок. Многокритериальная оптимизация выполнена с использованием поверхности отклика и алгоритма непрямо́й оптимизации на основе самоорганизации. Оптимальность рассматривается в смысле получения конструкции ВВТ, которая обладает улучшенными значениями исследуемых целевых функций: степени охлаждения, потери давления в тракте охлаждаемого (компрессорного) воздуха, потери давления в тракте охлаждающего (контурного) воздуха и величина поверхности теплообмена. Результаты оптимизации сопоставлены с исходным (базовым) прототипом ВВТ.

Ключевые слова: теплообменник, IOSO-технология, многокритериальная оптимизация, интенсификация теплообмена, степень охлаждения, потери давления.

INCREASING THE EFFICIENCY OF AN AIR-AIR HEAT EXCHANGER BASED ON MULTICRITERIA OPTIMIZATION OF A BUNDLE OF FINNED U-SHAPED TUBES

Research article

Popova D.K.^{1,*}, Kuznetsov N.B.², Kortikov N.N.³, Babiy Y.I.⁴

¹ ORCID : 0000-0001-8028-6405;

² ORCID : 0000-0002-8452-7154;

³ ORCID : 0000-0002-7569-3492;

⁴ ORCID : 0000-0003-0536-2775;

^{1,2} Joint Stock Company "KLIMOV", Saint-Petersburg, Russian Federation

³ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russian Federation

⁴ Sigma Technology, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (daria_well96[at]mail.ru)

Abstract

In this article, an IOSO-technology for optimizing the parameters of an air-air heat exchanger (AHE) with heat exchange intensifiers in the form of finning on the outer surface of the tubes is tested. A multicriteria optimization is performed using the response surface and an indirect optimization algorithm based on self-organization. The optimization is considered in terms of obtaining an AHE design which has improved values of the studied target functions: cooling degree, pressure loss in the cooled (compressor) air path, pressure loss in the cooled (contour) air path and the heat exchange surface value. The optimization results are compared with the initial (basic) prototype of AHE.

Keywords: heat exchanger, IOSO-technology, multicriteria optimization, heat exchange intensification, cooling degree, pressure losses.

Введение

Повышение эффективности воздухо-воздушного теплообменника (ВВТ) представляет собой актуальную задачу и имеет важное практическое значение [1], [2], поскольку уровень температуры газа перед турбинами высокого давления возрастает от одного поколения авиационных двигателей к другому [3].

Система охлаждения турбины высокого давления и ВВТ являются общей частью всей воздушной системы авиационного двигателя (рисунок 1). Наличие ВВТ позволяет снизить уровень максимальной температуры рабочих и сопловых лопаток турбин высокого давления, температуру диска турбины, охладить опоры ротора турбины двигателя, следовательно, увеличить ресурс и надежность всей турбины.

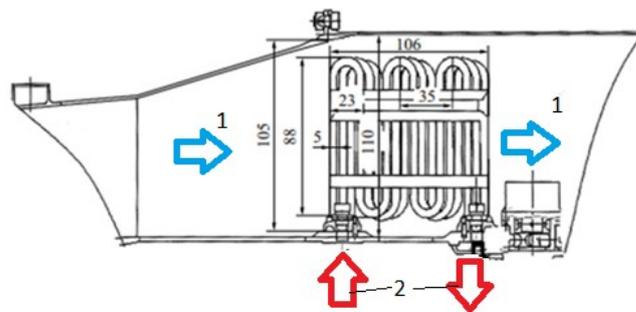


Рисунок 1 - Геометрические характеристики модуля воздухо-воздушного теплообменника с трубками диаметром 5 мм [4]:
 1 – контурный (охлаждающий) поток воздуха; 2 – компрессорный (охлаждаемый) поток воздуха
 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.122.52.1>

Воздухо-воздушный теплообменник ВВТ состоит из модулей, которые включают в себя ряды изогнутых трубок. В каждом ряду зигзагообразные трубки по три или четыре захода уложены поперек проточной части наружного контура двигателя. Охлаждаемый воздух совершает 6 проходов.

Количество труб в пакете, их размеры и расположение существенно влияют на тепловую эффективность секции теплообменника. Существуют десятки тысяч возможных вариантов конфигурации пакета труб, но подбор «вручную» не позволяет гарантированно создать оптимальную и энергоэффективную конструкцию теплообменника. В настоящее время в ВВТ применяют пучки, составленные из гладких труб, и трубчатая панель содержит 4 захода (рисунок 2).



Рисунок 2 - Модуль теплообменника с 4 заходами во фланец
 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.122.52.2>

При численном исследовании U-образных трубок ВВТ обнаружено [5], что отрывные течения имеют место не только при обтекании внутренней стенки радиусного (с поворотом потока на 180°) переходного канала, но и далее, на прямых участках ВВТ, расположенных за поворотными участками трубки, где отрывные течения сохраняются и усугубляются (рисунок 3).

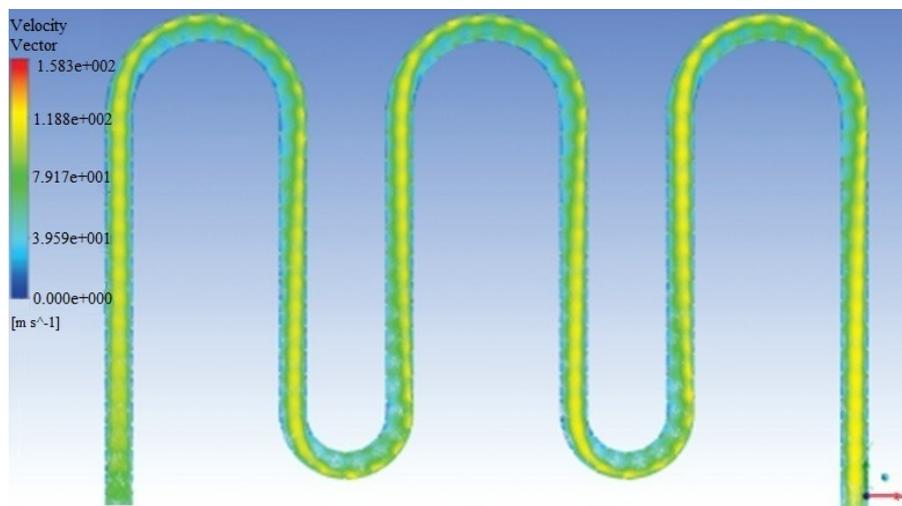


Рисунок 3 - Отрывные течения охлаждаемого воздуха на поворотных и прямых участках гладких трубок воздухо-воздушного теплообменника
 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.122.52.11>

Тепло-гидравлические показатели базового варианта ВВТ характеризуются следующими значениями [6]: потери полного давления охлаждаемого (компрессорного) воздуха $\sigma_T = \frac{\Delta p_T}{p_{Tex}^*} = 8,5\%$; потери полного давления во внешнем контуре $\sigma_X = \frac{\Delta p_X}{p_{Xbx}^*} = 0,35$.

Здесь $\Delta p_T = p_{Tbx}^* - p_{Tbvx}^*$ - перепад давления в тракте для компрессорного воздуха; $\Delta p_X = p_{Xbx}^* - p_{Xbvx}^*$ - перепад давления в тракте для контурного воздуха; T_{Tbx} , T_{Tbvx} , T_{Tbvx} , T_{Tbx} - температуры горячего и холодного потоков воздуха на входе и выходе трубки. Усовершенствование конструкций новых поколений авиационных турбин требует поиска новейших конструктивных решений, которые обеспечивали бы повышение интенсивности охлаждения до значений $\varepsilon \geq 0,5$.

Целью настоящей работы является разработка рекомендаций по достижению этих значений тепловой эффективности за счет применения оребрения наружной поверхности трубок и поиск оптимальных геометрических параметров пучка оребренных труб с помощью IOSO -технологии.

Тепловой и гидравлический расчет ВВТ

Основная особенность процесса теплообмена в ВВТ выражается в том, что лимитирующей стороной в общей тепловой эффективности теплообменника является коэффициент теплоотдачи со стороны контурного воздуха, который примерно в 4-5 раз меньше коэффициента теплоотдачи по компрессорному воздуху.

Расчеты [6] с интенсификаторами теплообмена на внутренней поверхности трубок высотой 0,5 мм показали увеличение потерь давления охлаждаемого воздуха внутри трубок на 42% по сравнению с исходным вариантом ВВТ. Это недопустимо, поскольку этот воздух вследствие своего низкого давления неприменим для системы охлаждения лопаток соплового аппарата и рабочего колеса турбины высокого давления. Поэтому, для увеличения тепловой эффективности ВВТ необходима, прежде всего, интенсификация теплообмена со стороны второго контура за счет наружного оребрения.

Метод теплового и гидравлического расчета ВВТ включает в себя критериальные формулы для определения гидравлического сопротивления и коэффициентов теплоотдачи потоков контурного и компрессорного воздуха в случае установки круговых ребер постоянной толщины [7], [8], [9], [10] на наружной поверхности трубок шахматного пучка.

Код TASK_1 (рисунок 4) [11] основан на совместном решении уравнений сохранения энергии и теплопередачи и написан на языке FORTRAN.

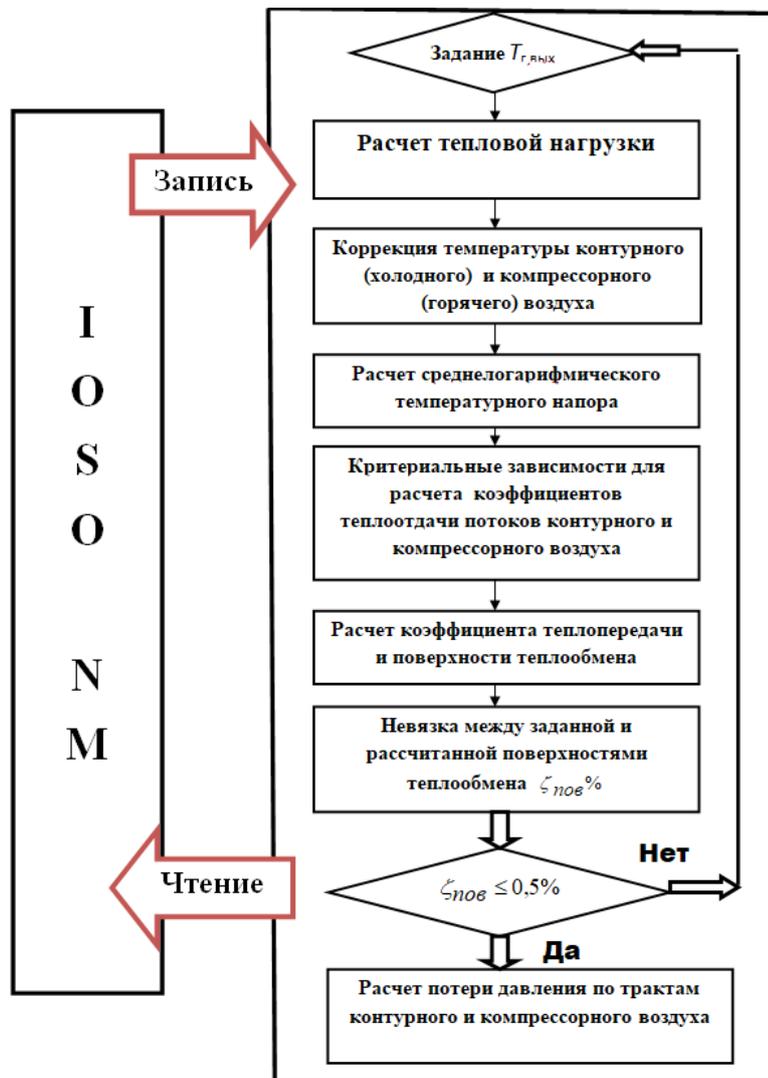


Рисунок 4 - Единая информационная среда с программой IOSO
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.122.52.4>

На начальном этапе задается значение температуры компрессорного воздуха на выходе из теплообменника $T_{г,вых}$ (в программе в качестве первого приближения она принимается равной среднеарифметическому значению входных температур компрессорного и контурного воздуха).

В качестве исходных данных выступает поверхность теплообмена F_{OLD} , которая вычисляется по базовой конструкции ВВТ. Расчет ведется методом последовательных приближений и сводится по величине невязки между несведенной поверхностью F_{NEW} и заданной поверхностью теплообмена. Если относительное отклонение между расчетной и принятой поверхностью теплообмена больше 0,5%, принимается новое значение температуры компрессорного воздуха на выходе $T_{г,вых}$ и расчет повторяется до достижения требуемой точности для невязки.

Создание проекта оптимизации в программном комплексе IOSO

Многокритериальная оптимизация состоит в поиске наилучшего (оптимального) решения, удовлетворяющего нескольким не сводимым друг к другу критериям. Целью многокритериальной оптимизации является моделирование выбора, т. е. оценка качества различных вариантов и выявление предпочтений между ними на основе их алгоритмической обработки в соответствии с моделью. Допустимые варианты решения или альтернативы задачи оптимизации рассматриваются как возможные способы достижения поставленных целей. Многокритериальная оптимизация характеризуется введением в процесс поиска нескольких критериев оптимизации (целевых функций) [12], [13].

Геометрические параметры, представленные в программе TASK_1 и выступающие в качестве варьируемых переменных, указаны в таблице 1. В качестве варьируемых переменных выбраны пять параметров этой таблицы. Среди них длина прямолинейной части змеевика L (строка № 3), радиус сгиба трубки R (строка №4), безразмерный поперечный шаг шахматного пучка труб \bar{s}_1 (строка №5), безразмерный продольный шаг шахматного пучка труб \bar{s}_2 (строка №6), высота ребра h (строка №9). Таким образом, задавая численное значение пяти независимых параметров $(L, R, \bar{s}_1, \bar{s}_2, h)$, можно получить большое множество конструктивных вариантов теплообменника.

В качестве критериев оптимизации при проектировании ВВТ выбирают четыре целевые функции (рисунок 6): потери давления по компрессорному тракту (P_1, P_a), которые должны принимать *минимальное* значение; степень

охлаждения ϵ (EPS) - максимальное значение; потери давления по контурному тракту (P2, Па) - минимальное значение; поверхность теплообмена (F, м²) - минимальное значение.

Таблица 1 - Независимые геометрические параметры теплообменника

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.122.52.5>

№	Параметр	Единица измерения	Базовое значение	Комментарий
1	D_1	Мм	4,4	Внутренний диаметр трубки
2	D_2	Мм	5,0	Наружный диаметр трубки
3	L	Мм	70	Длина прямого участка трубки
4	R	Мм	10	Радиусгиба U-образной трубки змеевика
5		–	1,5	Относительный поперечный шаг
6		–	3,4	Относительный продольный шаг
7	N_1	–	4	Число заходов
8	z_1	–	6	Число проходов
9	h	Мм	2	Высота ребра
10	δ	Мм	1,0	Толщина ребра
11	u	Мм	5,0	Расстояние между ребрами

Для организации проекта оптимизации теплообменника необходимо интегрировать созданную ранее - математическую модель с программным комплексом многокритериальной и многопараметрической оптимизации *IOSO NM*. Концепция проекта оптимизации представлена на рисунке 4. Пределы изменения независимых параметров представлены на рисунке 5 в виде фрагмента окна программы *IOSO*. На рисунке 6 указаны целевые функции и отмечается отсутствие ограничений на их значения.

№	ID	Имя	Модель	Формат	Тип	Определение
1	IV1	L	Обычная	1.2	Независимый	0.06<IV1<0.08
2	IV2	R	Обычная	1.2	Независимый	0.015<IV2<0.03
3	IV3	S1	Обычная	1.1	Независимый	1.4<IV3<1.65
4	IV4	S2	Обычная	1.1	Независимый	3.4<IV4<4.07
5	IV5	HP	Обычная	1.3	Независимый	0.001<IV5<0.0025

Рисунок 5 - Фрагмент окна программы IOSO с таблицей входных параметров

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.122.52.6>

№	ID	Имя	Описание	Модель	Критерий	Ограничение	Диапазон
1	RS1	P1	Optimization	Обычная	Минимизировать	↓ Не ограничивать	
2	RS2	EPS	Optimization	Обычная	Максимизировать	↑ Не ограничивать	
3	RS3	P2		Обычная	Минимизировать	↓ Не ограничивать	
4	RS4	F		Обычная	Минимизировать	↓ Не ограничивать	

Рисунок 6 - Фрагмент окна программы IOSO с таблицей выходных параметров

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.122.52.7>

Результаты оптимизации. Парето - оптимальные решения

Программный комплекс *IOSO NM* используется для решения задачи оптимизации в многокритериальной постановке, что позволяет получить заданное число Парето-оптимальных решений, равномерно распределенных в пространстве критериев.

Парето множество — это множество не улучшаемых (по критериям) решений, каждому из которых соответствует свой набор оптимизационных (проектных) параметров.

В процессе оптимизации было выполнено более 1700 расчетных итераций, т.е. выполнен расчет и анализ более 1700 конструктивных решений. В результате оптимизации было найдено точки Парето решений (эти точки ограничивают область, за пределами которой невозможно улучшение одного критерия без ухудшения другого) — инженеру остается выбрать конечный вариант конструкции только из набора, приведенных на рисунках 7 и 8.

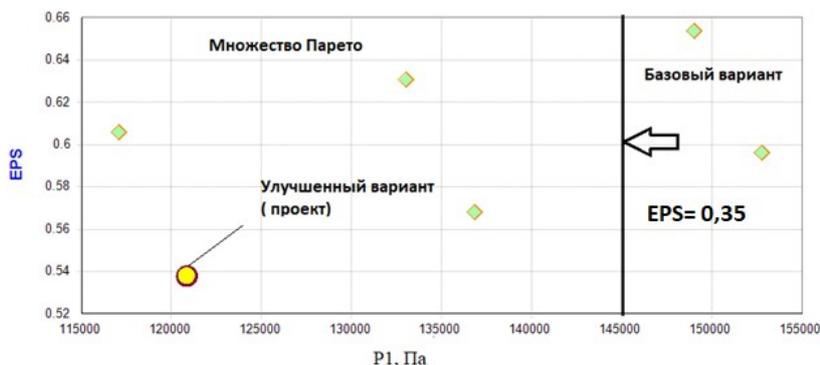


Рисунок 7 - Множество Парето в виде графика изменения степени охлаждения от потери давления в тракте компрессорного воздуха

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.122.52.8>

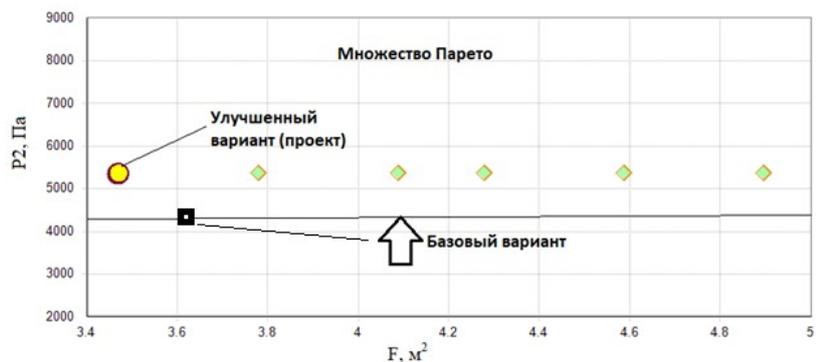


Рисунок 8 - Множество Парето в виде графика изменения потери давления в тракте контурного воздуха от поверхности теплообмена

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.122.52.9>

На рисунке 7 отмечается наличие проекта (таблица 2) со степенью охлаждения $\epsilon=0,537$ (увеличение на 18%) и уменьшенным значением потерь давления в тракте охлаждаемого воздуха по сравнению с базовым вариантом (0,145МПа).

Таблица 2 - Оптимальное по Парето решение для варьируемых параметров

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.122.52.10>

№ обращения	L (м)	R (м)			H (м)
92	0,06	0,02	1,7	3,4	0,001

Это связано с включением в процесс теплообмена оребрения (способствует увеличению тепловой эффективности) с одновременным уменьшением длины прямолинейного участка U -образной трубки (снижает потери давления внутри трубок). Множество Парето на рисунке 8 указывает на уменьшение величины поверхности теплообмена для улучшенного варианта, в котором одновременно имеет место увеличение потерь давления во втором контуре (на 30%) вследствие установки ребер на наружной поверхности трубок.

Заключение

В работе на основе IOSO-технологии оптимизации предложен вариант конструкции воздухо-воздушного теплообменника (ВВТ), который отвечает требованиям, предъявляемым к новому поколению авиационных турбин с интенсивностью охлаждения $\varepsilon \geq 0,5$. Показано, что достижение указанных значений ведет к возрастанию потерь давления во втором контуре авиационного двигателя на 30%.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Иноземцев А.А. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок / А.А. Иноземцев, М.А. Нихамкин, В.Л. Сандраций. – Москва : Машиностроение, 2008 – Т. 2. – 368 с.
2. Иванов В.Л. Теплообменные аппараты и системы охлаждения газотурбинных и комбинированных установок / В.Л. Иванов, А.И. Леонтьев, Э.А. Манушин и др. – Москва : изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 592 с.
3. Нестеренко В.В. Основные принципы методики комплексной оптимизации облика и параметров узлов горячей части современных и перспективных ТВД / В.В. Нестеренко // Вестник Московского авиационного института. – 2009. – Т. 16. – № 6. – С. 82–923.
4. Нестеренко В.Г. Воздухо-воздушные теплообменники системы охлаждения ротора турбины высокого давления в современных авиационных турбореактивных двухконтурных двигателях / В.Г. Нестеренко, Р.Р. Аббаварам // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2018. – Вып. 11. – С.1-16. – DOI: 10.18698/2308-6033-2018-11-1827.
5. Нестеренко В.Г. Воздухо-воздушный теплообменник для системы охлаждения турбины двухконтурных воздушно-реактивных двигателей / В.Г. Нестеренко, Р.Р. Аббаварам // Двигатель. – 2018. – № 5(119). – С.10-12.
6. Горшенин А.С. Методы интенсификации теплообмена / А.С. Горшенин. – Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2009. – 82 с.
7. Лаптев А.Г. Методы интенсификации и моделирования тепло-массообменных процессов / А.Г. Лаптев, Н.А. Николаев, М.М. Башаров. – Москва : Теплотехник, 2011. – 335 с.
8. Письменный Е.Н. Теплообмен и аэродинамика пакетов поперечно-оребрённых труб / Е.Н. Письменный – Киев : Альтерпрес, 2004. – 244 с.
9. Гавра Г.Г. Тепловой и гидравлический расчет теплообменных аппаратов компрессорных установок / Г.Г. Гавра, П.М. Михайлов, В.В. Рис. – Ленинград : Ленинградский политех. институт. 1982. – 72 с.
10. Кортиков Н.Н. Программа расчета теплогидравлических характеристик поверхностей теплообмена в маслоохладителях паровых турбин : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015611055 / Н.Н. Кортиков. – 23.01.2015г.
11. IOSO NM - пакет для условной и безусловной многокритериальной параметрической оптимизации. vers.3.12. СИГМА Технология. 2001-2021. – URL: <http://www.iosotech.com/ru> (дата обращения 17.05.2022)
12. Шишаева А. Оптимизация положения элементов механизированного крыла с использованием программных комплексов FlowVision / А. Шишаева, И. Москалёв, С. Жлуктов и др. // НПС и IOSO. САПР и графика. – 2010. – № 9. – С. 97 – 101.
13. Nesterenko V.G. Improvement of the design and methods of designing tubular air-to-air heat exchangers cooling systems of gas turbines / V.G. Nesterenko, R.R. Abbavaram // Proceedings of the 30th congress of ICAS 2016 Daejeon, South Korea. – URL: https://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2016/data/papers/2016_0433_paper.pdf. (accessed 17.05.2022)

Список литературы на английском языке / References in English

1. Inozemtsev A.A. Osnovy konstruirovaniya aviacionnyh dvigatelej i jenergeticheskix ustanovok [Fundamentals of designing aircraft engines and power plants] / A.A. Inozemtsev, M.A. Nihamkin, V.L. Sandratsli. – Moscow : Mashinostroenie, 2008 – Vol. 2. – 368 p. [in Russian]
2. Ivanov V.L. Teploobmennye apparaty i sistemy ohlazhdenija gazoturbinnih i kombinirovannyh ustanovok [Heat exchangers and cooling systems of gas turbine and combined installations] / V.L. Ivanov, A.I. Leontiev, E.A. Manushin et al. – Moscow : Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2004. – 592 p. [in Russian]
3. Nesterenko V.V. Osnovnye principy metodiki kompleksnoj optimizacii oblika i parametrov uzlov gorjachej chasti sovremennyh i perspektivnyh TVD [Basic principles of the methodology of complex optimization of the appearance and parameters of the hot part nodes of modern and promising TVD] / V.V. Nesterenko // Vestnik Moskovskogo aviacionnogo instituta [Bulletin of the Moscow Aviation Institute]. – 2009. – Vol. 16. – № 6. – P. 82-923. [in Russian]
4. Nesterenko V.G. Vozduho-vozdushnye teploobmenniki sistemy ohlazhdenija rotora turbiny vysokogo davlenija v sovremennyh aviacionnyh turboreaktivnyh dvuhkonturnyh dvigateljah [Air-to-air heat exchangers of the high-pressure turbine rotor cooling system in modern aviation turbojet two-circuit engines] / V.G. Nesterenko, R.R. Abbavaram // Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii [Engineering Journal: Science and Innovation]. – 2018. – Iss. 11. – P.1-16. – DOI: 10.18698/2308-6033-2018-11-1827. [in Russian]

5. Nesterenko V.G. Vozduho-vozdushnyj teploobmennik dlja sistemy ohlazhdenija turbiny dvuhkonturnyh vozdušno-reaktivnyh dvigatelej [Air-to-air heat exchanger for the turbine cooling system of two-circuit air-jet engines] / V.G. Nesterenko, R.R. Abbavaram // Dvigatel' [Engine]. – 2018. – № 5(119). – P.10-12. [in Russian]
6. Gorshenin A.S. Metody intensivikacii teploobmena [Methods of heat exchange intensification] / A.S. Gorshenin. – Samara : Samara State Technical University, 2009. – 82 p. [in Russian]
7. Laptev A.G. Metody intensivikacii i modelirovanija teplo-massoobmennyh processov [Methods of intensification and modeling of heat and mass transfer processes] / A.G. Laptev, N.A. Nikolaev, M.M. Basharov. – Moscow : Teplotekhnika, 2011. – 335 p. [in Russian]
8. Written E.N. Teploobmen i aerodinamika paketov poperechno-orebrennyh trub [Heat exchange and aerodynamics of packages of cross-finned pipes] / E.N. Written – Kiev : Alterpres, 2004. – 244 p. [in Russian]
9. Gavra G.G. Teplovoj i gidravlicheskoj raschet teploobmennyh apparatov kompressornyh ustanovok [Thermal and hydraulic calculation of heat exchangers of compressor units] / G.G. Gavra, P.M. Mikhailov, V.V. Fig. – Leningrad : Leningrad Polytechnic Institute, 1982. – 72 p. [in Russian]
10. Kortikov N.N. Programma rascheta teplogidravlicheskih harakteristik poverhnostej teploobmena v masloohladiteljah parovyh turbin [Program for calculating the thermohydraulic characteristics of heat exchange surfaces in steam turbine oil coolers] : certificate of state registration of the computer program No. 2015611055 / N.N. Kortikov. – 23.01.2015 [in Russian]
11. IOSO NM - paket dlja uslovnoj i bezuslovnoj mnogokriterial'noj parametricheskoj optimizacii. vers.3.12. SIGMA Tehnologija. 2001-2021 [IOSO NM is a package for conditional and unconditional multi-criteria parametric optimization. versions.3.12. SIGMA Technology. 2001-2021]. – URL: <http://www.iosotech.com/ru> (accessed 17.05.2022) [in Russian]
12. Shishaeva A. Optimizacija polozhenija jelementov mehanizirovannogo kryla s ispol'zovaniem programmnyh kompleksov FlowVision [Optimization of the position of the elements of a mechanized wing using FlowVision software systems] / A. Shishaeva, I. Moskalev, S. Zhlyukov et al. // HPC i IOSO. SAPR i grafika [HPC and IOSO. CAD and graphics]. - 2010. – № 9. – P. 97–101.[in Russian]
13. Nesterenko V.G. Improvement of the design and methods of designing tubular air-to-air heat exchangers cooling systems of gas turbines / V.G. Nesterenko, R.R. Abbavaram // Proceedings of the 30th congress of ICAS 2016 Daejeon, South Korea. – URL: https://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2016/data/papers/2016_0433_paper.pdf. (accessed 17.05.2022)