

COOLING INTENSIFICATION OF SECONDARY AIR IN AIR-TO-AIR HEAT EXCHANGE OF TURBOJET BYPASS ENGINE

S. L. Panchenko ^a, T. V. Grasko ^b

Military science center of Air Force "Prof. N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin military and air academy"

^a psl84@mail.ru, ^b grasko83@mail.ru

Submitted 2021, September 28

Abstract. The article substantiates the need to intensify the process of cooling the elements of gas turbines of modern and promising turbojet bypass engines. Since an increase in the gas temperature in front of the turbine makes it possible to increase the specific thrust of the engines with unchanged dimensions and weight, this direction is therefore relevant. But an increase in the gas temperature can negatively affect the strength characteristics of the turbine parts, which can lead to a decrease in the reliability of its parts and, as a consequence, to the premature decommissioning of the engine. In this article, using the example of a turbine cooling system containing an air-to-air heat exchanger, it is proposed to intensify air cooling by installing ribbon flow swirlers in an air-to-air heat exchanger, which will increase the heat transfer coefficient from air to the wall of the heat exchanger tubes and increase the efficiency of turbine cooling.

Keywords: turbojet bypass engine; turbine cooling; air-to air heat exchange; ribbon swirler; heat dissipation coefficient; heat transfer coefficient.

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ВТОРИЧНОГО ВОЗДУХА В ВОЗДУХО-ВОЗДУШНОМ ТЕПЛОБМЕННИКЕ ДВУХКОНТУРНОГО ТУРБОРЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

С. Л. Панченко ^а, Т. В. Грасько ^б

*Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»*

^а psl84@mail.ru, ^б grasko83@mail.ru

Поступила в редакцию 28.09.2021

Аннотация. Обоснована необходимость интенсификации процесса охлаждения элементов газовых турбин современных и перспективных турбореактивных двухконтурных двигателей. Так как повышение температуры газа перед турбиной позволяет увеличить удельную тягу двигателей при неизменных габаритах и массе, данное направление является актуальным. Но увеличение температуры газа может негативно сказаться на прочностных характеристиках деталей турбины, что может привести к снижению надежности ее деталей и, как следствие, преждевременному снятию двигателя с эксплуатации. На примере системы охлаждения турбины, содержащей воздушно-воздушный теплообменник, предложена интенсификация охлаждения воздуха путем установки в воздушно-воздушном теплообменнике ленточных завихрителей по-

тока, позволяющих увеличить коэффициент теплоотдачи от воздуха к стенке трубок теплообменника и повысить эффективность охлаждения турбины.

Ключевые слова: турбореактивный двухконтурный двигатель; охлаждение турбины; воздуховоздушный теплообменник; ленточный завихритель; коэффициент теплоотдачи; коэффициент теплопередачи.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большинство летательных аппаратов военного назначения оснащены газотурбинными двигателями (ГТД), при проектировании которых важное значение имеет выполнение требований тактико-технического задания, в части уменьшения габаритных размеров и массы двигателя при обеспечении заданной удельной тяги.

Снижение массогабаритных характеристик двигателя при обеспечении заданной абсолютной тяги или наоборот, повышение тяги при неизменных габаритных размерах и массе, достигается увеличением удельной тяги. Известно, что удельную тягу ГТД можно увеличить за счет возрастания температуры газов перед турбиной. Например, в турбореактивном двухконтурном двигателе с форсажной камерой сгорания (ТРДДФ) при повышении данной температуры на 60 К тяга увеличивается почти на 6–7 % при неизменной массе и габаритных размерах [1]. Поэтому обеспечение высоких значений температуры газов перед турбиной является одним из основных направлений в авиационном двигателестроении [2, 3].

В то же время возрастание температуры газов перед турбиной приводит к увеличению температурных нагрузок на элементы газовой турбины (сопловые аппараты, рабочие лопатки, диски), а также на подшипники и другие детали опор роторов в большей степени турбины высокого давления. Данное обстоятельство снижает надежность и ресурс элементов ГТД, поэтому обеспечение необходимого охлаждения турбины является актуальным вопросом [2, 3].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим систему охлаждения турбины ТРДДФ. Сопловые аппараты, рабочие лопатки, диски и корпус турбины охлаждаются воздухом, отбираемым из-за компрессора или частью вторичного воздуха камеры сгорания. При этом часть вторичного воздуха не используется для поддержания рабочего процесса в камере сгорания и сразу поступает на охлаждение элементов газовой турбины. В большинстве случаев вторичный воздух, имеющий высокую температуру, проходит через трубки воздуховоздушного теплообменника (ВВТ), установленного на корпусе основной камеры сгорания и находящегося внутри второго контура двигателя. Проходя через трубки ВВТ, воздух охлаждается воздухом второго контура, обтекающим трубки теплообменника снаружи, при этом его температура уменьшается, он поступает в проточную часть газовой турбины и охлаждает ее элементы.

Очевидно, что для повышения эффективности охлаждения элементов газовой турбины необходимо обеспечить снижение температуры охлаждающего воздуха в воздуховоздушном теплообменнике на большее количество градусов. Данного эффекта можно достичь путем интенсификации процесса теплообмена.

ВВТ, применяемый в ТРДДФ, представляет собой секционный агрегат, каждая секция которого состоит из нескольких изогнутых трубок. Известно, что интенсифицировать процесс теплообмена в трубчатых теплообменниках возможно увеличением площади поверхности теплообмена или коэффициента теплопередачи. Увеличение площади поверхности теплообмена может быть достигнуто изменением геометрических размеров или оребрением теплообменной поверхности, а увеличение коэффициента теплопередачи – изменением скорости потока, режима движения, установкой турбулизаторов и завихрителей (ленточного, шнекового, спи-

рального типа), наложением пульсаций на поток с целью отрыва пограничного слоя, в котором передача теплоты происходит в основном теплопроводностью [4].

МЕРОПРИЯТИЯ ПО ИНТЕНСИФИКАЦИИ ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЗДУХА

В данной работе предлагаются мероприятия по интенсификации теплообмена в воздушно-воздушном теплообменнике турбореактивного двухконтурного двигателя с форсажной камерой сгорания АЛ-31Ф, устанавливаемого на самолеты семейства Сухого. Данный теплообменник предназначен для снижения температуры воздуха, идущего на охлаждение турбины, воздухом второго контура двигателя. Теплообменник имеет кольцевую форму, размещен во втором контуре и состоит из 64 модулей [5]. Модуль представляет собой паяную конструкцию и состоит из шести трубок и двух фланцев, с помощью которых трубки крепятся к основному корпусу камеры сгорания. Схема модуля ВВТ изображена на рис. 1.

В данном теплообменнике часть вторичного воздуха из основной камеры сгорания перед подачей на охлаждение конструкции турбины высокого давления охлаждается в трубках. При этом конвективный теплообмен осуществляется следующим образом: от горячего воздуха, проходящего внутри трубок теплообменника, теплота переходит к стенкам трубок, а от стенок – к более холодному воздуху второго контура. Таким образом, происходит отвод теплоты от горячего воздуха из основной камеры сгорания, который после этого имеет более низкую температуру, что положительно сказывается на охлаждении деталей турбины и, соответственно, надежности ее работы, а также ресурсе двигателя в целом.

Как известно [6], коэффициент теплопередачи теплоты от более горячего теплоносителя к более холодному через цилиндрическую стенку рассчитывается, исходя из основного уравнения теплопередачи:

$$k_l = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_{\text{вн}}} + \frac{1}{2\lambda} \frac{d_{\text{нар}}}{d_{\text{вн}}} + \frac{1}{\alpha_2 d_{\text{нар}}}}, \quad (1)$$

где k_l – линейный коэффициент теплопередачи, Вт/м·К; α_1, α_2 – коэффициенты теплоотдачи соответственно от горячего теплоносителя к стенке трубки и от стенки к холодному теплоносителю, Вт/(м²·К); $d_{\text{нар}}, d_{\text{вн}}$ – наружный и внутренний диаметр трубки, м; λ – коэффициент теплопроводности материала стенки трубки, Вт/(м·К).

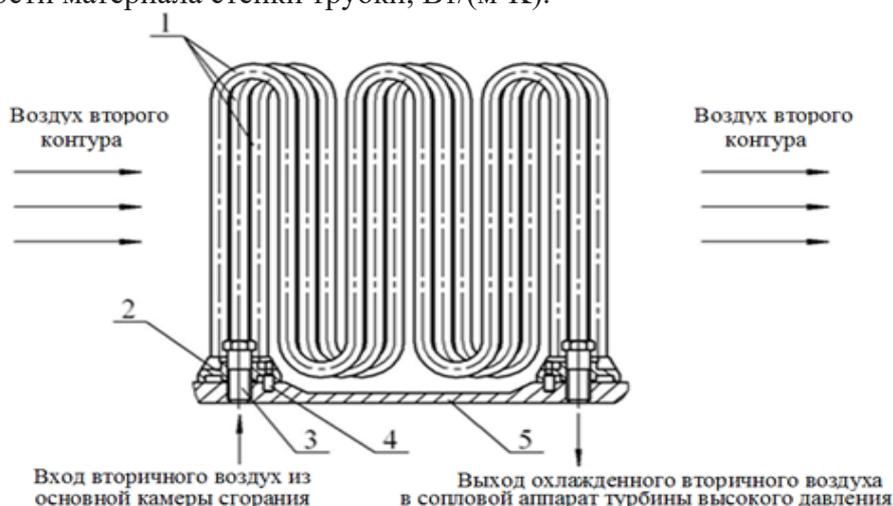


Рис. 1. Модуль воздушно-воздушного теплообменника:

1 – трубки; 2 – фланец; 3 – винт; 4 – штифт; 5 – корпус основной камеры сгорания

Как видно из уравнения (1), интенсифицировать процесс теплообмена, то есть повысить общий коэффициент теплопередачи k_l можно, увеличив либо оба коэффициента теплоотдачи α_1 и α_2 , либо один из них. Также можно увеличить коэффициент теплопроводности материала стенки λ , но для этого нужно применить материал трубок теплообменника с большим по величине значением данного коэффициента.

Известно [6], что коэффициент теплоотдачи от жидкой или газообразной среды к твердой стенке зависит от множества факторов (геометрических размеров канала, физических свойств горячего и холодного теплоносителей, скорости и режима их движения и т.д.). Поэтому для упрощения расчетов величины α используют теорию подобия и прежде всего безразмерные критерии: Рейнольдса (Re), определяющий режим движения (ламинарный, турбулентный) и Прандтля (Pr), характеризующий физические свойства теплоносителя. Для турбулентного режима (в авиационных ГТД течение газа принимаем за турбулентное), достаточно определить только два вышеприведенных критерия подобия. Зная данные критерии, по эмпирическим зависимостям для различных режимов, являющихся критериальными уравнениями, можно найти критерий Нуссельта (Nu), характеризующий процесс теплообмена между жидкой или газообразной средой и твердой стенкой и представляющий собой безразмерное значение коэффициента теплоотдачи:

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}, \quad (2)$$

где l – определяющий размер, м (в случае движения жидкостей или газов по круглым трубам определяющим размером является внутренний диаметр); α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); λ – коэффициент теплопроводности теплоносителя при средней температуре, Вт/(м·К).

В общем виде критериальное уравнение для вычисления критерия Нуссельта выглядит следующим образом:

$$Nu = A Re^m Pr^n, \quad (3)$$

где A , m , n – постоянные величины, полученные эмпирическим путем. Для различных условий (движение в каналах разной формы, обтекание плоской пластины и т.д.) численные значения данных величин различны.

Как говорилось выше, в теплообменниках трубчатого типа одним из способов увеличения коэффициентов теплоотдачи α_1 и α_2 является установка турбулизаторов, в частности, ленточных или шнековых завихрителей потока теплоносителя.

Известно [4], что интенсификацию процесса теплообмена в трубе можно осуществить, закручивая поток теплоносителя вокруг продольной оси трубы. Установка устройства завихрения, которое может быть выполнено, в том числе и в виде ленточных завихрителей, обеспечивает закрутку потока, при этом увеличивается скорость теплоносителя и возникают вторичные течения, усиливающие теплообмен между ядром потока и слоем теплоносителя у стенки трубы, в результате чего обеспечивается увеличение коэффициента теплоотдачи и, в соответствии с уравнением (1), коэффициента теплопередачи [4].

В данной работе предлагается установка ленточных завихрителей внутри каждой трубки модуля ВВТ, в результате чего повышается коэффициент теплоотдачи от горячего (охлаждаемого) воздуха основной камеры сгорания к стенкам конструкции модуля теплообменника, соответственно увеличивается коэффициент теплопередачи, что обеспечивает интенсификацию процесса теплообмена и охлаждения воздуха.

Схема модуля ВВТ с установленными ленточными завихрителями (с разрезом одной трубки) показана на рис. 2. Модель трубки модуля ВВТ в разрезе, построенная в программе КОМПАС-3D, изображена на рис. 3.

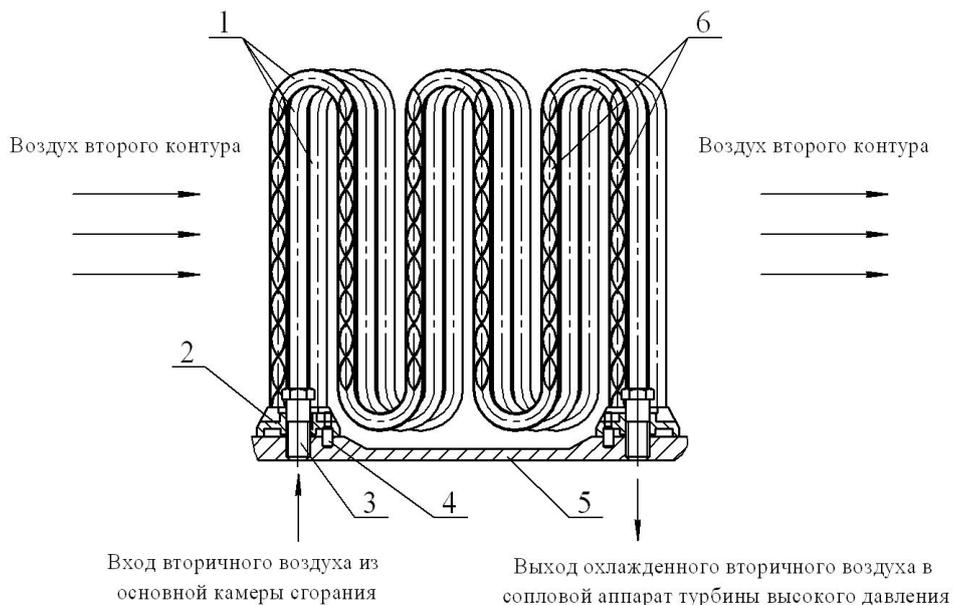


Рис. 2. Модуль воздухо-воздушного теплообменника с установленными ленточными завихрителями:
 1 – трубки; 2 – фланец; 3 – винт; 4 – штифт; 5 – корпус основной камеры сгорания;
 6 – ленточные завихрители



Рис. 3. 3D-модель трубки модуля воздухо-воздушного теплообменника с установленными ленточными завихрителями для интенсификации теплообмена

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА

Приведем методику расчета коэффициента теплоотдачи α_1 от охлаждаемого воздуха к стенке, а также результаты расчета данного коэффициента в теплообменнике без ленточного завихрителя и с его установкой. Для этого запишем исходные данные по характеристикам ВВТ и свойствам охлаждаемого воздуха (табл. 1) [1, 7].

Таблица 1. Характеристики воздухо-воздушного теплообменника и параметры охлаждаемого воздуха внутри трубок

Параметр, обозначение, единица измерения	Значение
Массовый расход охлаждаемого воздуха внутри трубок G , кг/с	6,45
Температура охлаждаемого воздуха на входе в трубки $t_{\text{вх}}$, °C	500
Температура охлаждаемого воздуха на выходе из трубок $t_{\text{вых}}$, °C	300
Средняя температура охлаждаемого воздуха $t_{\text{ср}}$, °C	400
Плотность охлаждаемого воздуха при средней температуре ρ , кг/м ³	0,524
Удельная изобарная теплоемкость охлаждаемого воздуха при средней температуре c_p , Дж/(кг·К)	1068
Кинематическая вязкость охлаждаемого воздуха при средней температуре ν , м ² /с	$62,53 \cdot 10^{-6}$
Коэффициент теплопроводности охлаждаемого воздуха при средней температуре λ , Вт/(м·К)	0,0515
Наружный диаметр трубки ВВТ $d_{\text{нар}}$, м	0,006
Внутренний диаметр трубки ВВТ $d_{\text{вн}}$, м	0,005
Число трубок в модуле ВВТ n_t	6
Число модулей ВВТ n_m	64

Расчет производится следующим образом.

1. Определяется массовый расход воздуха на одну трубку G_t , кг/с:

$$G_m = \frac{G}{n_t n_m}, \quad (4)$$

где G – массовый расход охлаждаемого воздуха в теплообменнике, кг/с; n_t, n_m – соответственно число трубок в одном модуле и модулей в конструкции ВВТ.

2. Определяется объемный расход воздуха на одну трубку G_v , кг/с:

$$G_v = \frac{G_m}{\rho}, \quad (5)$$

где ρ – плотность воздуха при средней температуре, кг/м³.

3. Рассчитывается скорость движения воздуха в одной трубке c , м/с:

$$c = \frac{4G_v}{\pi d_{\text{вн}}^2}, \quad (6)$$

где $d_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр трубки, м.

4. Определяется критерий Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{c d_{\text{вн}}}{\nu}, \quad (7)$$

где ν – кинематическая вязкость воздуха при средней температуре, м²/с.

5. Определяется критерий Прандтля охлаждаемого воздуха:

$$\text{Pr} = \frac{c_p \mu}{\lambda}, \quad (8)$$

где c_p – удельная изобарная теплоемкость воздуха при средней температуре, Дж/(кг·К); λ – коэффициент теплопроводности воздуха при средней температуре, Вт/(м·К).

6. Определяется критерий Нуссельта в соответствии с критериальным уравнением конвективного теплообмена при движении газов в цилиндрическом канале.

В первую очередь критерий Нуссельта определяется при отсутствии завихрителей в трубке в соответствии с критериальным уравнением [4]:

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43}. \quad (9)$$

7. По формуле (2) определяется коэффициент теплоотдачи от горячего воздуха к стенке трубки при отсутствии ленточных завихрителей, Вт/(м²·К):

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_{вн}}. \quad (10)$$

8. Определяется критерий Нуссельта при наличии ленточных завихрителей [4]:

$$Nu_1 = 0,3 Re^{0,6} Pr^{0,43} \left(\frac{d_{вн}}{D} \right)^{0,135}, \quad (11)$$

где D – диаметр завихрителя, м. В данном случае завихрители устанавливаются таким образом, что их диаметр D приблизительно равен внутреннему диаметру трубок $d_{вн}$.

9. В соответствии с формулой (2) определяется коэффициент теплоотдачи от охлаждаемого воздуха к стенке трубки при наличии ленточных завихрителей:

$$\alpha_1 = \frac{Nu_1 \cdot \lambda}{d_{вн}} \quad (12)$$

Приведем результаты расчета коэффициента теплоотдачи по вышеизложенному алгоритму для ВВТ при отсутствии ленточных завихрителей в трубках, а также с их установкой (табл. 2).

Таблица 2. Результаты расчета коэффициента теплоотдачи в воздухо-воздушном теплообменнике при отсутствии завихрителей потока охлаждаемого воздуха и с их установкой

Параметр, обозначение, единица измерения	Значение	
	при отсутствии завихрителей	с установкой завихрителей
Критерий Нуссельта Nu	220	298,5
Коэффициент теплоотдачи α , Вт/(м ² ·К)	2266	3074,55

Из табл. 2 видно, что при установке завихрителей потока воздуха коэффициент теплоотдачи от охлаждаемого воздуха к стенке трубки α_1 увеличился, следовательно, в соответствии с уравнением (1) коэффициент теплопередачи также увеличится, что свидетельствует об обеспечении интенсификации процесса теплообмена между охлаждаемым воздухом, идущим на охлаждение элементов газовой турбины, и охлаждающим воздухом второго контура двигателя. Воздух, охлажденный интенсивнее, будет иметь меньшую температуру, что позволит охладить горячие части турбины до меньших температур, что, в свою очередь, положительно скажется на надежности и ресурсе турбины и двигателя в целом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе обоснована необходимость снижения температуры воздуха, идущего на охлаждение турбины турбореактивного двухконтурного двигателя с форсажной камерой сгорания, а также предложено мероприятие по интенсификации теплообмена в ВВТ.

Данное конструктивное решение в виде установки ленточных завихрителей, позволяет обеспечить турбулизацию потока воздуха и таким образом увеличить коэффициент теплоотдачи до 35 %, что свидетельствует о целесообразности проведения работ по повышению эффективности охлаждения газовых турбин данным способом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Нестеренко В. Г., Аббаварам Р. Р.** Воздухо-воздушные теплообменники системы охлаждения ротора турбины высокого давления в современных авиационных турбореактивных двухконтурных двигателях // Инженерный журнал: наука и инновации. 2018. № 11 (83). Р. 7. DOI: 10.18698/2308-6033-2018-11-1827. [V. G. Nesterenko, R. R. Abbavaram, "Air-to-air heat exchangers of the high-pressure turbine rotor cooling system in modern aviation turbojet", (in Russian), in *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii*, no. 11 (83), p. 7, 2018. DOI: 10.18698/2308-6033-2018-11-1827.]
2. **Иноземцев А. А., Нихамкин М. А., Сандарацкий В. Л.** Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. Т. 2. М.: Машиностроение, 2008. 368 с. [A. A. Inozemcev, M. A. Nihamkin, V. L. Sandratsky, *Basics of designing aircraft gas turbine engine*, (in Russian). Vol. 2. Moscow: Mashinostroenie, 2008.]
3. **Теория**, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок / В. И. Бакулев [и др.]. М.: МАИ, 2003. 688 с. [V. I. Bakulev, et al., *Theory, design and calculation of aircraft engines and power plants*, (in Russian). Moscow: MAI, 2003.]
4. **Лаптев А. Г., Николаев Н. А., Башаров М. М.** Методы интенсификации и моделирования тепломассообменных процессов: Учебно-справочное пособие. М.: Теплотехник, 2011. 335 с. [A. G. Laptev, N. A. Nikolaev, M. M. Basharov, *Methods of intensification and modeling of heat mass transfer processes: Training-referential manual*, (in Russian). Moscow: Teplotekhnik, 2011.]
5. **Турбореактивный** двухконтурный двигатель с форсажной камерой сгорания АЛ-31Ф: учебное пособие / под ред. А. П. Назарова. М.: ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 1987. 363 с. [A. P. Nazarov (ed.), *Turbojet bypass engine with afterburner combustion chamber AL-31F: training manual*, (in Russian). Moscow: VVIA im. N. E. Zhukovskogo, 1987.]
6. **Кобельков В. Н., Улас В. Д., Федоров Р. М.** Термодинамика и теплопередача / под ред. Р. М. Федорова. М.: ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 2004. 328 с. [V. N. Kobekov, V. D. Ulas, R. M. Fedorov, *Thermodynamics and heat transfer*, (in Russian). R. M. Fedorov (ed.). Moscow: VVIA im. prof. N. E. Zhukovskogo, 2004.]
7. **Федоров Р. М., Мелик-Пашаев Н. И.** Таблицы и диаграммы теплофизических величин и газодинамических функций. М.: Военное издательство Министерства Обороны СССР, 1980. 99 с. [R. M. Fedorov, N. I. Melic-Pashaev, *Tables and charts of thermophysical quantities and gas-dynamic functions*, (in Russian). Moscow: Voennoe izdatelstvo Ministerstva Oborony SSSR, 1980.]

ОБ АВТОРАХ

- ПАНЧЕНКО Сергей Леонидович**, канд. техн. наук, доц. каф. авиационных двигателей (ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф.а Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»).
- ГРАСЬКО Тарас Васильевич**, канд. техн. наук, доц. каф. авиационных двигателей (ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф.а Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»).
- PANCHENKO, Sergey Leonidovich**, Cand. of Tech. Sci., Assoc. Prof. of Aviation engines (Dept. of Military science center of Air Force "Prof. N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin military and air academy").
- GRAS'KO, Taras Vasilevich**, Cand. of Tech. Sci., Assoc. Prof. of Aviation engines (Dept. of Military science center of Air Force "Prof. N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin military and air academy").

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 26, no. 1 (95), pp. 102-109, 2022. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).