

УДК 621.438

doi: 10.18698/0536-1044-2023-7-77-83

Влияние нестационарности течения теплоносителя в канале матрицы вращающегося теплообменного аппарата на его тепловые параметры при ламинарном течении*

А.В. Костюков¹, Л.А. Косач¹, В.Г. Мерзликин^{1,2}

¹ Московский Политехнический Университет

² Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова

Effect of the heat-transfer agent flow nonstationarity in the matrix channel of a rotating heat exchanger on its thermal parameters with the laminar flow

A.V. Kostyukov¹, L.A. Kosach¹, V.G. Merzlikin^{1,2}

¹ Moscow Polytechnic University

² Plekhanov Russian University of Economics

Исследовано влияние нестационарности процесса ламинарного течения газа в канале ленточно-щелевой матрицы вращающегося теплообменного аппарата на его тепловые характеристики. Выполнено математическое моделирование сопряженного теплообмена при течении потока воздуха вдоль стальных стенок, образующих исследуемый канал. Ввиду особенностей работы вращающегося теплообменного аппарата для получения параметров сопряженного теплообмена в номинальном режиме математическое моделирование проводилось многократно с использованием полученных результатов в качестве начальных условий для следующих расчетов. Установлено, что течение газа в исследуемом канале матрицы теплообменного аппарата становится циклически повторяющимся после 60 циклов. Получены кривые распределения местных значений критерия Нуссельта по длине канала на всех временных шагах процесса течения газа, а также значения критерия Нуссельта, осредненные по длине канала. Показано, что среднее по длине значение критерия Нуссельта плавно растет с течением времени. Определено осредненное по времени значение критерия Нуссельта, которое несколько выше, чем полученные в стационарной постановке.

Ключевые слова: эффективность теплообмена, канал матрицы, регенеративный теплообменный аппарат, критерий Нуссельта, нестационарное течение

The paper studies influence of the non-stationarity process of the laminar gas flow in the band flat matrix channel of the rotating heat exchanger on its thermal characteristics. Conjugate heat transfer was mathematically simulated with the airflow along the steel walls forming the channel under study. In view of peculiarities of the rotating heat exchanger operation and to obtain parameters of the conjugate heat transfer in the nominal mode, mathematical simulation was performed many times using the results previously obtained as the initial conditions for the following calculations. It was established that gas flow in the inves-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Московского политехнического университета в рамках гранта имени В.Е. Фортова.

tigated matrix channel of the heat exchanger became cyclically repetitive after the sixty cycles. Distribution curves of Nusselt criterion local values along the channel length at all time steps of the gas flow process, as well as the Nusselt criterion values averaged over the channel length were obtained. It was shown that the length-averaged Nusselt criterion value was smoothly increasing with time. The time-averaged Nusselt criterion value was determined, and it was somewhat exceeding the values obtained in the stationary setting.

Keywords: heat transfer efficiency, matrix channel, regenerative heat exchanger, Nusselt criterion, nonstationary flow

Топливная экономичность — один из основных критериев оценки двигателя. Малоразмерные газотурбинные двигатели (ГТД), работающие по циклу Брайтона с внешней регенерацией теплоты, т. е. оборудованные теплообменным аппаратом (ТА), могут конкурировать с поршневыми двигателями внутреннего сгорания по топливной экономичности [1–3].

В состав ГТД может входить ТА рекуперативного или регенеративного типа. Несмотря на не очень высокий коэффициент компактности [4], рекуперативные ТА получили широкое распространение в ГТД [5]. Ввиду высокого коэффициента компактности [6–8] только вращающиеся регенеративные ТА [9] позволяют достичь сверхвысокой степени регенерации при приемлемых габаритных размерах и массе. В связи с этим роторные ТА являются перспективными устройствами [3, 10, 11].

Рассмотрен роторный дисковый ТА (РДТА), ленточно-щелевая матрица (далее матрица) которого образована расположенными параллельно друг другу металлическими лентами. В ламинарном режиме течения теплоносителя (ТН) такие каналы характеризуются высокой тепловой эффективностью [12].

Независимо от типа и конструкции РДТА на начальном этапе проектирования обычно выполняют расчет его основных геометрических и теплогидравлических параметров. Расчеты такого типа основаны на одномерных методиках, включающих в себя допущения [13].

Недостатком таких расчетов является не очень высокая точность, но благодаря достаточно простой постановке задачи они проводятся быстро, позволяя в первом приближении оценивать множество вариантов исполнения РДТА.

Методики, используемые при проекционном расчете РДТА, требуют задания значения критерия Нуссельта, характерного для каналов теплопередающей матрицы. В справочнике по теплообменным расчетам [14] для ламинарного течения ТН в щелевых каналах (ЩК) прямоугольного сечения с малой высотой

щели указано минимальное возможное значение критерия Нуссельта, равное 7,62. Оно получено аналитическим способом в стационарной постановке с заданной постоянной температурой стенок, образующих ЩК.

В реальных условиях эксплуатации вращающегося РДТА теплообмен между ТН и матрицей является нестационарным процессом. Это обусловлено тем, что распределение температуры по длине теплопередающих пластин меняется с течением времени по ходу периодических продувок холодным воздухом и горячим газом теплопередающей матрицы вращающегося РДТА.

На основании изложенного можно сделать предположение о том, что эффективность теплообмена в теплопередающей матрице при изменяющихся со временем граничных условиях также будет непостоянной, а значит, следует ожидать изменения значения критерия Нуссельта. Уточнение значения критерия Нуссельта, используемого в проекционных расчетах РДТА, повысит точность расчетов на ранних этапах проектирования.

Цель работы — исследование влияния нестационарности температурных полей теплопередающей матрицы вращающегося РДТА на тепловую интенсивность в ней при ламинарном режиме течения ТН.

Материалы и методы решения задач, принятые допущения. Исследование тепловых процессов при нестационарном течении ТН в ЩК проводили расчетным путем.

Для исследуемого ЩК и образующих его стенок генерировали расчетные сетки, состоявшие из гексаэдрических элементов. Ввиду того, что число Рейнольдса гарантированно не превышает критическое значение, и режим течения ТН остается ламинарным, пограничный слой также остается ламинарным. Поэтому в расчетной сетке не требовалось значительно уменьшать размер ячеек в пристеночной зоне, что является необходимым при турбулентном течении ТН [15, 16].

Расчетную область строили для одного ЩК высотой 0,4 мм. Она включала в себя две части — газовую (непосредственно ЩК, по которому течет воздух) и твердотельную (стальные ленты толщиной 0,1 мм, образующие ЩК). Опорное давление задавали равным атмосферному, режим течения ТН — ламинарным (число Рейнольдса не превышало 500), ввиду низкой скорости потока влияние сжимаемости на процессы теплообмена не учитывали. Параметры воздуха (коэффициент теплопроводности, вязкость и теплоемкость) и стали (коэффициент теплопроводности и теплоемкость) задавали зависящими от температуры.

Моделирование течения ТН в ЩК матрицы РДТА проводили для условий, соответствующих режиму работы в составе ГТД. Для моделирования выбрали временной промежуток, равный 3 с, что соответствует половине оборота диска РДТА при частоте вращения 10 мин⁻¹. Временной шаг задавали равным 0,1 с.

Особенность РДТА с вращающейся матрицей заключается в том, что после начала его работы помимо нестационарности течения ТН в пределах одного ее оборота имеется некоторый период времени, когда в работе устройства нет циклической повторяемости. По истечении этого времени РДТА начинает функционировать квазистационарно: течение ТН остается нестационарным в пределах оборота матрицы, но полученное течение ТН повторяется на последующих оборотах.

По этой причине для моделирования тепловых процессов в матрице РДТА использовали следующую схему расчета. В расчетную область поочередно подавали воздух и горячий газ, при этом результаты каждого такого шага моделирования путем инициализации расчетной области принимали в качестве начальных условий для следующего шага. Такая последовательность повторялась многократно до выхода РДТА на рабочий режим, т. е. до момента, когда параметры потока, осредненные по времени в пределах одного шага расчета, не переставали изменяться на последующих шагах.

Расчет выполняли при следующих граничных условиях:

- избыточное полное давление на входе — 10 кПа;
- полная температура ТН на входе — 416 К;
- массовый расход ТН на выходе — $10,76 \cdot 10^{-5}$ кг/с;
- боковые стенки ЩК — адиабатные;

- на верхних и нижних границах расчетной области заданы условия симметрии.

Значения критерия Нуссельта определяли по результатам расчета в рабочем режиме.

При обработке результатов расчета в области ЩК построены поперечные сечения с шагом 5 мм. В каждый момент времени (в интервале 0...3 с при шаге 0,1 с) для участков, находящихся между соседними сечениями, определяли местное значение критерия Нуссельта. В качестве среднего значения критерия Нуссельта по длине ЩК в выбранный момент времени принято среднее арифметическое всех местных значений.

Критерий Нуссельта на исследуемом участке вычисляли по выражению

$$Nu = \frac{\alpha 2b}{\lambda},$$

где α и λ — средний коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); b — высота ЩК; λ — средний коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

После определения осредненных по длине ЩК значений критерия Нуссельта на всех временных шагах исследуемого процесса получали его значение, осредненное по времени, Nu_{τ} . Для его нахождения использовали выражение

$$Nu_{\tau} = \frac{1}{\tau} \int Nu_{cp} d\tau,$$

где τ — временной промежуток, для которого проводилось моделирование, с; Nu_{cp} — осредненное по длине ЩК значение критерия Нуссельта в данный момент времени; $d\tau$ — шаг разбиения по времени, с.

Результаты исследования. Циклическая повторяемость нестационарных теплогидравлических процессов в рассматриваемом ЩК теплопередающей матрицы РДТА была достигнута после 60 циклов продувок холодным воздухом и горячим газом, т. е. через 60 полных оборотов РДТА. После выхода устройства на рабочий режим установлено, что в начальный момент времени каждого следующего шага расчета распределение температуры вдоль стенки близко к линейному в диапазоне от 477 (в начале ЩК) до 1011 К (в конце ЩК).

В качестве примера на рис. 1, *a* показано распределение температуры в центре и на стенке ЩК через 0,1 с после начала процесса течения ТН. В начальный момент времени (0 с) теплогидравлические процессы отсутствуют, поэтому искомые значения критерия Нуссельта

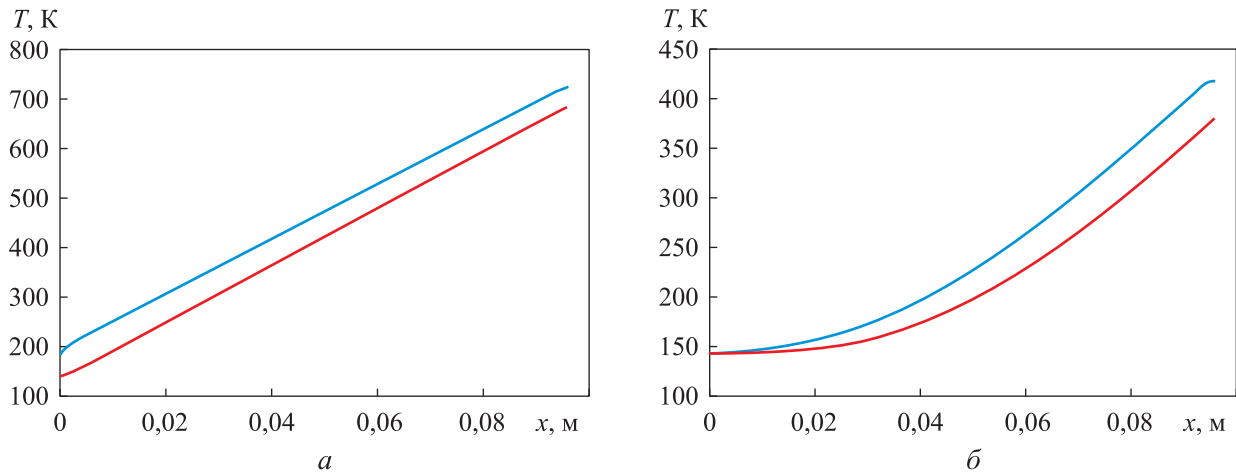


Рис. 1. Распределения температуры T в центре (—) и на стенке ЩК (—) по осевой длине ЩК x через 0,1 (а) и 3,0 с (б) после начала процесса течения ТН

и гидравлических потерь определяли, начиная со следующего временного шага (0,1 с).

Распределение температуры в центре и на стенке ЩК на момент окончания нестационарного течения ТН (через 3 с после его начала) показано на рис. 1, б.

Для каждого момента времени определяли местные значения критерия Нуссельта. В качестве примера на рис. 2 показано распределение их значений по длине ЩК l (в процентах от максимальной длины) в различные моменты времени.

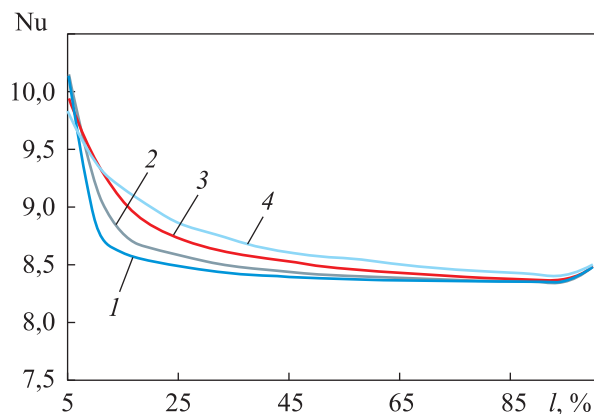


Рис. 2. Распределение местных значений критерия Нуссельта Nu по длине ЩК l через 0,5 (1), 1,0 (2), 2,0 (3) и 3,0 с (4) после начала течения ТН

Теплогидравлические характеристики нестационарного течения ТН

$d\tau$, с	Nu_{cp}	$d\tau$, с	Nu_{cp}
0,5	8,51	2,0	8,65
1,0	8,57	2,5	8,68
1,5	8,61	3,0	8,71

После получения местных значений критерия Нуссельта на каждом временном шаге $d\tau$ определяли средние по длине ЩК значения критерия Нуссельта Nu_{cp} (см. таблицу). Для удобства восприятия в таблице указаны значения Nu_{cp} , полученные не на всех временных шагах.

Осредненное по времени значение среднего по длине ЩК теплопередающей матрицы критерия Нуссельта составило 8,59.

Обсуждение полученных результатов. Анализ результатов, приведенных на рис. 2, показал, что местные значения критерия Нуссельта достаточно плавно стремятся к одной и той же величине, причем с течением времени кривая распределения критерия Нуссельта плавно выгибается в сторону более высоких значений, в основном на начальном участке ЩК. Выходному участку соответствует небольшой подъем местных значений критерия Нуссельта.

Данные, приведенные в таблице, свидетельствуют о том, что с течением времени среднего по длине ЩК значение критерия Нуссельта непрерывно увеличивается. Для условий течения ТН, соответствующих работе РДТА в составе ГТД, среднее по длине значение критерия Нуссельта изменялось в диапазоне 7,93...8,71.

Полученные осредненные по времени значения критерия Нуссельта несколько превышают данные расчетов в стационарной постановке (7,62). В связи с этим при проектировании РДТА следует вносить соответствующую поправку в задаваемые значения критерия Нуссельта.

Выводы

1. Проведено моделирование циклических нестационарных теплогидравлических процессов в теплопередающей матрице РДТА. Циклическая повторяемость теплогидравлических процессов в РДТА достигнута через 60 циклов (оборотов).

2. Получены кривые распределения местных значений критерия Нуссельта по длине ЩК на всех временных шагах вращения РДТА, вышедшего на режим повторяемости теплогидравлических процессов. Показано, что кривые распределения находятся в близком диапазоне значений, а их форма изменяется в сторону бо-

лее высоких промежуточных значений критериев Нуссельта с течением времени.

3. Определены средние по длине значения критерия Нуссельта для каждого временного шага процесса течения ТН. За исключением небольшого промежутка времени после начала процесса течения ТН, распределение средних по длине ЩК теплопередающей матрицы РДТА значений критерия Нуссельта является близким к линейному.

4. Установлено, что осредненное по времени (3 с) значение среднего по длине ЩК теплопередающей матрицы критерия Нуссельта (8,59) несколько выше, чем полученные при расчете в стационарной постановке (7,62).

Литература

- [1] Грачев Л.П., Булат П.В., Есаков И.И. и др. Способ сжигания сверхбедных топливных смесей в камерах сгорания энергетической микротурбины с помощью стримерного разряда. *Проблемы региональной энергетики*, 2018, № 2. URL: https://journal.ie.asm.md/assets/files/08_02_37_2018.pdf
- [2] Костюков А.В., Косач Л.А., Горновский А.С. и др. Многоцелевая высокоэффективная микротурбина мощностью 50 квт. *Наукоград*, 2016, № 2, с. 23–26.
- [3] Шевелев Д.В., Сомкин С.А. Выбор оптимальных параметров термодинамического цикла когенерационных микроТГУ. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2014, № 9, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2014-9-1277>
- [4] Shah R. *Compact heat exchangers for microturbines*. URL: <https://www.sto.nato.int/publications/STO%20Educational%20Notes/RTO-EN-AVT-131/EN-AVT-131-02.pdf> (дата обращения: 15.02.2022).
- [5] Сафонов Е.В., Броммер К.А., Шульц А.О. и др. Особенности конструкции эффективных рекуператоров микрогазотурбинных энергоустановок. *Вестник ЮУрГУ. Сер. Машиностроение*, 2013, № 2, с. 63–67.
- [6] Костюков А.В., Алексеев Р.А. Повышение эффективности роторного теплообменника малоразмерного газотурбинного двигателя. *Известия МГТУ МАМИ*, 2012, № 1, с. 52–58.
- [7] Kilkovský B., Jegla Z. Preliminary design and analysis of regenerative heat exchanger. *Chem. Eng. Trans.*, 2016, vol. 52, pp. 655–660, doi: <https://doi.org/10.3303/CET1652110>
- [8] Melian E., Klein H., Thißen N. Improvement of a nusselt-based simulation model for heat transfer in rotary heat exchangers. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 1, art. 10, doi: <https://dx.doi.org/10.3390/en14010010>
- [9] Kostukov A.V., Kosach L.A., Dementiev A.A. Experimental study of a rotary heat exchanger with a metal mesh matrix. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 2096, art. 012205, doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2096/1/012205>
- [10] Konecna E., Masa V. Review of gas microturbine application in industry. *Chem. Eng. Trans.*, 2019, vol. 76, pp. 355–360, doi: <http://dx.doi.org/10.3303/CET1976060>
- [11] Wołowicz M., Kolasiński P., Badyda K. Modern small and microcogeneration systems-a review. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 3, art. 785, doi: <https://doi.org/10.3390/en14030785>
- [12] Neale A., Derome D., Blocken B. et al Jan. Determination of surface convective heat transfer coefficients by CFD. *Proc. 11th NBEC Canadian Building Sci. Technol. Conf.*, 2007. URL: https://www.researchgate.net/publication/267426300_Determination_of_Surface_Convective_Heat_Transfer_Coefficients_by_CFD (дата обращения: 15.02.2022).
- [13] Reis M.C., Sphaier L.A. Analysis of angular heat conduction in rotary heat regenerators. In: *13th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering (ENCIT)*, 2010. URL:

<https://www.abcm.org.br/anais/encit/2010/PDF/ENC10-0178.pdf> (дата обращения: 15.02.2022).

- [14] Кулинченко В.Р. *Справочник по теплообменным расчетам*. Киев, Тэхника, 1990. 163 с.
- [15] Matyushenko A.A., Stabnikov A.S., Garbaruk A.V. Criteria of computational grid generation for turbulence models taking into account laminar-turbulent transition. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2019, vol. 1400, art. 077047, doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1400/7/077047>
- [16] Ефремов В.Р., Курулин В.В., Козелков А.С. др. Использование пристеночных функций для моделирования турбулентного теплового пограничного слоя. *Журнал вычислительной математики и математической физики*, 2019, т. 59, № 6, с. 1037–1046, doi: <https://doi.org/10.1134/S004446691906005X>

References

- [1] Grachev L.P., Bulat P.V., Esakov I.I. et al. Method for burning super-poor fuel mixtures in the combustion chamber of the energy microturbine by means of the streamer discharge. *Problemy regionalnoy energetiki* [Problems of the Regional Energetics], 2018, no. 2, doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1343414> (in Russ.).
- [2] Kostyukov A.V., Kosach L.A., Gornovskiy A.S. et al. Multi-purpose highly efficient micro-turbines with a capacity of 50 kW. *Naukograd*, 2016, no. 2, pp. 23–26. (In Russ.).
- [3] Shevelev D.V., Somkin S.A. Choosing optimal parameters of the thermodynamic cycle of gas microturbine with cogeneration. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2014, no. 9, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2014-9-1277> (in Russ.).
- [4] Shah R. Compact heat exchangers for microturbines. URL: <https://www.sto.nato.int/publications/STO%20Educational%20Notes/RTO-EN-AVT-131/EN-AVT-131-02.pdf> (accessed: 15.02.2022).
- [5] Safonov E.V., Bromer K.A., Shults A.O. et al. Design features of effective recuperator of microturbine. *Vestnik YuUrGU. Ser. Mashinostroenie* [Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry], 2013, no. 2, pp. 63–67. (In Russ.).
- [6] Kostyukov A.V., Alekseev R.A. Increase of effectiveness of a rotary heat exchanger of a small-size gas turbine engine. *Izvestiya MGTU MAMI*, 2012, no. 1, pp. 52–58. (In Russ.).
- [7] Kilkovský B., Jegla Z. Preliminary design and analysis of regenerative heat exchanger. *Chem. Eng. Trans.*, 2016, vol. 52, pp. 655–660, doi: <https://doi.org/10.3303/CET1652110>
- [8] Melian E., Klein H., Thißen N. Improvement of a nusselt-based simulation model for heat transfer in rotary heat exchangers. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 1, art. 10, doi: <https://dx.doi.org/10.3390/en14010010>
- [9] Kostukov A.V., Kosach L.A., Dementiev A.A. Experimental study of a rotary heat exchanger with a metal mesh matrix. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 2096, art. 012205, doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2096/1/012205>
- [10] Konecna E., Masa V. Review of gas microturbine application in industry. *Chem. Eng. Trans.*, 2019, vol. 76, pp. 355–360, doi: <http://dx.doi.org/10.3303/CET1976060>
- [11] Wołowicz M., Kolasiński P., Badyda K. Modern small and microcogeneration systems—a review. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 3, art. 785, doi: <https://doi.org/10.3390/en14030785>
- [12] Neale A., Derome D., Blocken B. et al Jan. Determination of surface convective heat transfer coefficients by CFD. *Proc. 11th NBEC Canadian Building Sci. Technol. Conf.*, 2007. URL: https://www.researchgate.net/publication/267426300_Determination_of_Surface_Convective_Heat_Transfer_Coefficients_by_CFD (accessed: 15.02.2022).
- [13] Reis M.C., Sphaier L.A. Analysis of angular heat conduction in rotary heat regenerators. In: 13th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering (ENCIT), 2010. URL: <https://www.abcm.org.br/anais/encit/2010/PDF/ENC10-0178.pdf> (accessed: 15.02.2022).
- [14] Kulinchenko V.R. *Spravochnik po teploobmennym raschetam* [Handbook on heat transfer calculations]. Kiev, Tekhnika Publ., 1990. 163 p. (In Russ.).
- [15] Matyushenko A.A., Stabnikov A.S., Garbaruk A.V. Criteria of computational grid generation for turbulence models taking into account laminar-turbulent transition. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2019, vol. 1400, art. 077047, doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1400/7/077047>

- [16] Efremov V.R., Kurulin V.V., Kozelkov A.S. The use of wall functions for simulating the turbulent thermal boundary layer. *Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki*, 2019, vol. 59, no. 6, pp. 1037–1046, doi: <https://doi.org/10.1134/S004446691906005X> (in Russ.). (Eng. version: *Comput. Math. and Math. Phys.*, 2019, vol. 59, no. 6, pp. 1006–1014 (2019). <https://doi.org/10.1134/S0965542519060058>)

Статья поступила в редакцию 18.01.2023

Информация об авторах

КОСТЮКОВ Андрей Вениаминович — кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Энергоустановки для транспорта и малой энергетики». Московский политехнический университет (107023, Москва, Российская Федерация, Б. Семеновская ул., д. 38, e-mail: kostukov123@yandex.ru).

КОСАЧ Лев Анатольевич — старший преподаватель кафедры «Энергоустановки для транспорта и малой энергетики». Московский политехнический университет (107023, Москва, Российская Федерация, Б. Семеновская ул., д. 38, e-mail: kosachlev90@mail.ru).

МЕРЗЛИКИН Владимир Гаврилович — кандидат технических наук, инженер кафедры «Лаборатория промышленных роботов и средств автоматизации». Московский политехнический университет; доцент кафедры «Экономика промышленности». Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова (117997, Москва, Российская Федерация, Стремянный переулок, д. 36, e-mail: merzlikinv@mail.ru).

Information about the authors

KOSTYUKOV Andrey Veniaminovich — Candidate of Science (Eng.), Head of the Department of Power Plants for Transport and Small-Scale Power Generation. Moscow Polytechnic University (107023, Moscow, Russian Federation, B. Semenovskaya St., Bldg. 38, e-mail: kostukov123@yandex.ru).

KOSACH Lev Anatolyevich — Senior Lecturer, Department of Power Plants for Transport and Small-Scale Power Generation. Moscow Polytechnic University (107023, Moscow, Russian Federation, B. Semenovskaya St., Bldg. 38, e-mail: kosachlev90@mail.ru).

MERZLIKIN Vladimir Gavrilovich — Candidate of Science (Eng.), Engineer, Laboratory of Industrial Robots and Automation Tools. Moscow Polytechnic University; Associate Professor. Department of Economics of Industry. Plekhanov Russian University of Economics (117997, Moscow, Russian Federation, Stremyanny Per., Bldg. 36, e-mail: merzlikinv@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Костюков А.В., Косач Л.А., Мерзликин В.Г. Влияние нестационарности течения теплоносителя в канале матрицы вращающегося теплообменного аппарата на его тепловые параметры при ламинарном течении. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 7, с. 77–83, doi: [10.18698/0536-1044-2023-7-77-83](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-7-77-83)

Please cite this article in English as:

Kostyukov A.V., Kosach L.A., Merzlikin V.G. Effect of the heat-transfer agent flow nonstationarity in the matrix channel of a rotating heat exchanger on its thermal parameters with the laminar flow. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 7, pp. 77–83, doi: [10.18698/0536-1044-2023-7-77-83](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-7-77-83)