

Heat Transfer Slot Matrix for Compact Rotary Heat Exchangers with Ultra-High Regeneration Ratio for Microturbines

Kostyukov A. V.

Kosach L. A.

Moscow Polytechnic University
Moscow, Russian Federation

Abstract. This paper considers the problem of the influence of distancing elements in slot matrix channels on the thermohydraulic characteristics of the matrix of a rotary heat exchanger having various values of the height of the slot channels. The following tasks were carried out: mathematical modeling of thermohydraulic processes in different slot channels having constant height along them (from 0.3 mm to 0.5 mm); analysis of the influence of the slit channels' height, the number of distancing elements in rows, the distance between rows and the total number of elements on the average value of the Nusselt number and on the pressure drop; analysis of the effect of changes in speed and temperature conditions on thermal and hydraulic characteristics. The most important results are the following facts: the influence of the relative location of the distancing elements on the thermohydraulic characteristics of the flow is negligible; changes in the temperature and speed regime of the laminar flow practically does not affect the intensity of convection in the matrix channels; an increase in the height of the slot channel leads to a relatively small decrease in the average value of the Nusselt number.

The significance of the results obtained is that they can be the basis for adjusting the methods of design calculations of rotary heat exchangers taking into account the decrease in thermal efficiency caused by the presence of distancing elements in the channels of their matrices. Recommendations can be made to minimize the number of distancing elements without considering their mutual location.

Keywords: heat exchange, microturbine, regenerative heat exchanger, convection, Nusselt number, hydraulic loss.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.1-57.10>

UDC: 621.438

Matrice cu fantă și curea de transfer de căldură pentru schimbătoare de căldură rotative compacte cu o rată de regenerare ultra-înaltă pentru microturbine

Kostiucov A. V., Kosaci L.A.

Universitatea politehnică din Moscova, Moscova, Federația Rusă

Rezumat. Scopul lucrării este de a efectua cercetare analitică al efectului proeminențelor distanțierelor asupra caracteristicilor termo-hidraulice ale matricei de transfer de căldură cu fante cu bandă a unui schimbător de căldură rotativ la diferite înălțimi ale canalelor fante. Pentru atingerea acestui scop, au fost rezolvate următoarele sarcini: modelarea matematică a proceselor termo-hidraulice în canale cu fante cu bandă de o înălțime constantă dată (de la 0,3 mm la 0,5 mm cu un pas de 0,05 mm) cu un regim de curgere laminar caracteristic rotativ; schimbătoare de caldura; analiza influenței numărului de elemente distanțiere din rânduri, a distanței dintre rânduri, precum și a numărului total de elemente din canal asupra valorii medii a numărului Nusselt și asupra mărimii căderii de presiune; analiza influenței modificărilor regimurilor de viteză și temperatură asupra caracteristicilor termo-hidraulice; analiza influenței înălțimii canalului cu fante asupra valorii medii a numărului Nusselt și asupra mărimii căderii de presiune. Rezultatele cele mai importante sunt stabilirea următoarelor fapte: poziționării reciproce a elementelor distanțiere pe benzi asupra caracteristicilor termo-hidraulice a fluxului este nesemnificativ mică; o creștere a temperaturii pereților canalelor fante, de asemenea, nu duce la o schimbare semnificativă a naturii transferului de căldură în canalele cercetate; o modificare a regimului de viteză a fluxului laminar nu are practic niciun efect asupra intensității transferului de căldură în canalele considerate; o creștere a înălțimii canalului cu fante duce la o scădere relativ mică a numărului Nusselt mediat pe lungimea canalului. Semnificația rezultatelor obținute constă în faptul că pe baza acestora este posibil să se corecteze metodele de calcul de proiectare ale schimbătoarelor de căldură rotative pentru a ține cont de scăderea eficienței termice cauzată de prezența proeminențelor distanțiere în canalele matricelor acestora. De asemenea, pe baza datelor obținute, se pot face recomandări pentru a minimiza numărul de proeminențe distanțiere fără referire poziționarea reciprocă a acestora.

Cuvinte-cheie: transfer de căldură, microturbina, schimbător de căldură regenerativ, convecție, număr Nusselt, pierderi hidraulice.

Теплопередающая ленточно-щелевая матрица для компактных роторных теплообменников со сверхвысокой степенью регенерации для микротурбин

Костюков А. В., Косач Л. А.

Московский политехнический университет

Москва, Российская Федерация

Аннотация. Целью работы является проведение аналитического исследования влияния дистанцирующих выступов на теплогидравлические характеристики ленточно-щелевой теплопередающей матрицы роторного теплообменника при различных величинах высоты щелевых каналов. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: математическое моделирование теплогидравлических процессов в ленточно-щелевых каналах заданной постоянной высоты (от 0.3 мм до 0.5 мм с шагом 0.05 мм) при характерном для роторных теплообменных аппаратов ламинарном режиме течения; анализ влияния количества дистанцирующих элементов в рядах, расстояния между рядами, а также суммарного количества элементов в канале на среднее значение числа Нуссельта и на величину перепада давления; анализ влияния изменения скоростного и температурного режимов на теплогидравлические характеристики; анализ влияния высоты щелевого канала на среднее значение числа Нуссельта и на величину перепада давления. Наиболее важными результатами является установление следующих фактов: влияние взаимного расположения дистанцирующих элементов на лентках на теплогидравлические характеристики потока незначительно мало; увеличение температуры стенок щелевых каналов также не приводит к значительному изменению характера теплообмена в исследуемых каналах; изменение скоростного режима ламинарного течения также практически не влияет на интенсивность теплообмена в рассматриваемых каналах; увеличение высоты щелевого канала приводит к сравнительно небольшому уменьшению среднего по длине канала значения числа Нуссельта. Значимость полученных результатов состоит в том, что на их основе можно скорректировать методики проектировочных расчётов роторных теплообменников для учёта снижения тепловой эффективности, вызванного наличием дистанцирующих выступов в каналах их матриц. Также на основе полученных данных можно составить рекомендации по минимизации количества дистанцирующих выступов без привязки к их взаимному расположению.

Ключевые слова: теплообмен, микротурбина, регенеративный теплообменный аппарат, конвекция, число Нуссельта, гидравлические потери.

ВВЕДЕНИЕ

Малоразмерные газотурбинные двигатели (микротурбины) представляют собой многоцелевые источники энергии, востребованные, в частности, в распределённой энергетике [1-4]. Такие двигатели работают по циклу Брайтона с внешней регенерацией теплоты, то есть, в их конструкцию включён теплообменник. Регенерация теплоты позволяет повысить эффективность работы и, следовательно, топливную экономичность микротурбин до уровня, позволяющего конкурировать с поршневыми двигателями внутреннего сгорания [5, 6]. Актуальной задачей является повышение эффективности работы теплообменников.

Оптимизации теплообменников посвящено достаточно много работ [7-9], в большей их части при этом в качестве объекта исследования выбираются рекуперативные теплообменные аппараты. Для этого вида теплообменников характерен непрерывный обмен рабочих сред теплотой при обтекании теплопередающей

поверхности, разделяющей их. Во вращающихся регенеративных теплообменниках потоки горячего и холодного теплоносителей поочередно обтекают теплопередающие элементы теплообменника.

Наиболее часто в микротурбинах устанавливаются рекуперативные теплообменники [10-13]. По сравнению с рекуперативными теплообменниками вращающиеся регенеративные теплообменники обладают значительно более высокими значениями коэффициента компактности [6]. Следствием этого является возможность создания роторного теплообменника, имеющего сверхвысокую степень регенерации (порядка 95%) при приемлемых габаритах и массе устройства. Использование в таком теплообменнике ленточно-щелевой матрицы с малой высотой щелей (меньше 1 мм) позволяет осуществить ламинарное течение газа в плоских каналах, имеющих очень малые значения отношения высоты канала к его ширине.

При таких условиях щелевые каналы имеют высокую тепловую эффективность [14]

Теплопередающими элементами в такой матрице являются стальные ленты малой толщины (0.1 мм и меньше). Использование керамических материалов позволит поднять уровень рабочих температур [15, 16].

Для того, чтобы по всей длине протяжённого щелевого канала

выдерживалась необходимая его высота, необходима установка дистанцирующих выступов, в данной задаче рассматриваются выступы в виде части сферы. На рисунке 1 показана модель одного щелевого канала теплопередающего пакета.

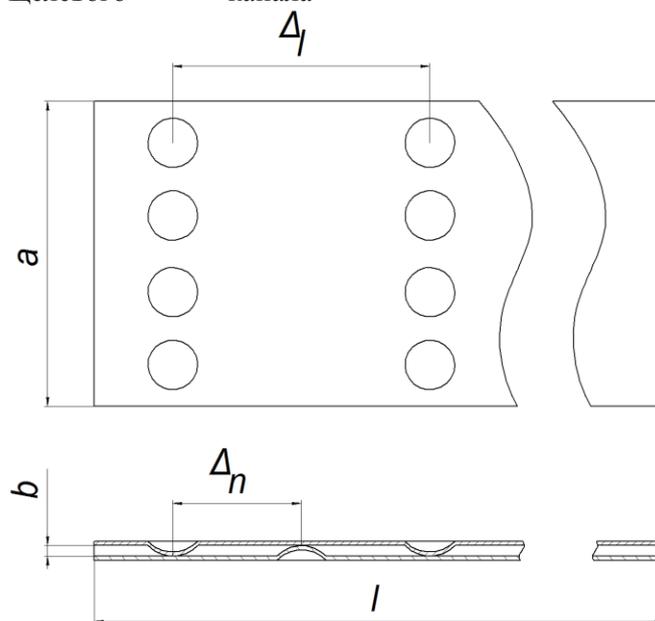


Рис. 1. Модель канала теплопередающего пакета. ¹

Для описания геометрии каналов с выступами используются следующие обозначения:

n_w – количество выступов в расположенном поперёк длины ленты ряду;

Δ_1 – шаг между расположенными поперёк длины ленты рядами выступов на ленте, мм;

Δ_n – шаг между расположенными поперёк длины ленты соседними рядами выступов двух лент, составляющих щелевой канал, мм;

b – высота щелевого канала, мм;

l – длина щелевого канала, мм;

a – ширина щелевого канала, мм.

При наличии дистанцирующих выступов рассматриваемые каналы перестают быть плоскими, следовательно, в их отношении не могут быть применены справочные данные, приводимые для плоских каналов. Гидравлические и тепловые показатели теплопередающей матрицы могут существенно отличаться от показателей, рассчитанных для матрицы с плоскими каналами.

В работе [13] проведено подробное исследование динамики потока газа в микро- и макроканалах прямоугольного сечения, приводятся данные по длине входа для ламинарного течения при различных значениях числа Рейнольдса, но не рассматриваются тепловые процессы в каналах.

В работе [17] рассматривается влияние температурного режима на течение в щели квадратного сечения. Но в данной работе под изменением температурного режима подразумевается увеличение либо уменьшение региона, в котором стенки канала будут адиабатными, в то время как для рассматриваемого случая для анализа влияния температурного фактора на характеристики канала необходимо изменять уровень температуры на его стенках.

В работе [18] рассматривается применение рекуперативного теплообменного аппарата с микроканальной матрицей в составе газотурбинного двигателя, но приводятся только экспериментальные данные по показателям тепловой эффективности.

¹ Appendix 1

В работе [19] рассматривается оптимизация работы роторного теплообменника с использованием расчётного моделирования течения газа в матрице, но матрица имеет структуру сот и задана упрощённо в виде пористого тела.

В работе [20] подробно рассматриваются процессы теплообмена в прямоугольных каналах, приводятся данные по локальным значениям критерия Нуссельта, но отношение высоты рассматриваемого канала к ширине достаточно высоко, а стенки рассматриваемого канала не содержат дополнительных элементов.

Цель данной работы – проведение качественного и количественного анализа влияния дистанцирующих выступов на теплогидравлические характеристики ленточно-щелевой теплопередающей матрицы роторного теплообменника при различных величинах высоты щелевых каналов, различных скоростных и температурных режимах.

I. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводилось в расчётном виде, для этого выполнялось математическое моделирование течения газа в различных вариантах исполнения теплопередающих щелевых каналов матрицы теплообменника.

Для исследования влияния количества и взаимного расположения дистанцирующих выступов на теплогидравлические характеристики канала были рассмотрены пять различных вариантов исполнения канала с фиксированной длиной (96 мм) и высотой щели (0.4 мм):

1. $n_w = 3, \Delta_l = 15 \text{ мм}, \Delta_n = 8 \text{ мм};$
2. $n_w = 4, \Delta_l = 20 \text{ мм}, \Delta_n = 10 \text{ мм};$
3. $n_w = 4, \Delta_l = 15 \text{ мм}, \Delta_n = 8 \text{ мм};$
4. $n_w = 4, \Delta_l = 10 \text{ мм}, \Delta_n = 5 \text{ мм};$
5. $n_w = 5, \Delta_l = 6 \text{ мм}, \Delta_n = 3 \text{ мм}.$

Для исследования влияния температурного режима были заданы два варианта линейного распределения температуры вдоль стенок каналов: от 23°C на входе до 130°C на выходе из канала и от 200°C на входе до 600°C на выходе из канала.

Для исследования влияния числа Рейнольдса были заданы два варианта массового расхода газа через канал, обеспечивающие соответственно значения числа Рейнольдса, равные 116 и 348.

Для исследования влияния высоты щелевого канала были рассмотрены варианты ис-

полнения канала с фиксированной длиной (96 мм) и фиксированным количеством и расположением дистанцирующих выступов ($n_w = 4, \Delta_l = 15 \text{ мм}, \Delta_n = 8 \text{ мм}$), высота которых изменялась от 0.3 мм до 0.5 мм с шагом 0.05 мм.

В расчётные модели были добавлены дополнительные участки перед щелевыми каналами и после них для учёта местных потерь на входе и выходе из каналов.

Для всех проведённых расчётов были заданы: избыточное давление (2000 Па) и полная температура (22°C) на входе в расчётную область (на режиме с повышенной температурой стенок на входе принималась температура 190°C), условия симметрии на границах входных и выходных участков и адиабатные боковые стенки, ограничивающие канал. Расчёты проводились в стационарной постановке, также учитывалась зависимость теплоёмкости при постоянном давлении, динамической вязкости и коэффициента теплопроводности газа от его температуры.

Для обработки результатов в рассматриваемых каналах был построен ряд поперечных сечений с шагом в 5 мм, на полученных небольших участках определялись местные значения критерия Нуссельта. Среднее арифметическое полученных значений представляет собой среднее по длине канала значение критерия Нуссельта.

Для определения местных значений критерия Нуссельта использовалась следующая формула:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot 2 \cdot b}{\lambda} \quad (1)$$

В данном выражении Nu – значение критерия Нуссельта на исследуемом участке;

λ – средний коэффициент теплопроводности на исследуемом участке, Вт/(м·К);

α – средний коэффициент теплоотдачи на исследуемом участке, Вт/(м²·К):

$$\alpha = \frac{Q}{F \cdot dT} \quad (2)$$

В данном выражении F – площадь теплопередающих стенок канала на исследуемом участке, м²;

dT – разность средних температур стенки и газа на исследуемом участке, К:

$$dT = \frac{T_{W(n)} + T_{W(n+1)} - T_{(n)} + T_{(n+1)}}{2} \quad (3)$$

Q – тепловой поток на исследуемом участке, Вт:

$$Q = C_p \cdot G \cdot (T_{(n+1)} - T_n) \quad (4)$$

В данных выражениях T – средняя температура воздуха в сечении (осреднение проводилось по массовому расходу), К;

T_w – средняя температура стенки, К;

G – массовый расхода воздуха, кг/с,

C_p – средняя теплоёмкость воздуха на исследуемом участке, Дж/(кг•К).

Индексы «n» и «n+1» соответствуют входу в исследуемый участок и выходу из него соответственно.

Для определения потерь статического давления использовалась следующая формула:

$$dP = P_{in} - P_{out} \quad (5)$$

данном выражении P_{in} – среднее давление во входном сечении, Па;

P_{out} – среднее давление в выходном сечении, Па.

Исследуемые геометрические параметры были приведены к безразмерному виду путём ввода безразмерного коэффициента, учитывающего количество элементов в канале:

$$k_d = n_w \cdot \frac{l}{\Delta_l} \quad (6)$$

II. РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты исследования влияния количества и взаимного расположения дистанцирующих выступов, а также скоростного режима на величину среднего по длине канала значения критерия Нуссельта и на величину потерь давления приведены в табл. 1. Также в таб. 1 включены результаты, полученные при моделировании течения газа в плоском щелевом канале без дистанцирующих выступов.

Таблица 1².

Средние значения критерия Нуссельта и величины гидравлических потерь для различных вариантов исполнения каналов на разных скоростных режимах³.

№	n _w	Δ _l , мм Δ _l , mm	k _d	Δ _n , мм Δ _n , mm	Re _{in} =116		Re _{in} =348	
					Nu _{ave}	dP, Па dP, Pa	Nu _{ave}	dP, Па dP, Pa
1	0	-	-	-	8.30	499	8.35	1515
2	3	15	19.2	8	7.85	555	7.88	1875
3	4	20	19.2	10	7.78	549	7.89	1838
4	4	15	25.6	8	7.66	572	7.71	1998
5	4	10	38.4	5	7.24	617	7.32	2242
6	5	6	80	3	6.57	794	6.53	3322

Результаты исследования влияния температурного режима на среднее по длине канала значение критерия Нуссельта при

различных вариантах исполнения канала представлены в табл. 2.

Таблица 2⁴.

Средние значения критерия Нуссельта и величины гидравлических потерь для различных вариантов исполнения каналов на разных температурных режимах⁵.

№	n _w	Δ _l , мм Δ _l , mm	k _d	Δ _n , мм Δ _n , mm	T _{wall} =[23°C; 130°C]		T _{wall} =[200°C; 600°C]	
					Nu _{ave}		Nu _{ave}	
1	0	-	-	-	8.30		8.30	
2	3	15	19.2	8	7.85		7.87	
3	4	20	19.2	10	7.78		7.70	
4	4	15	25.6	8	7.66		7.66	
5	4	10	38.4	5	7.24		7.19	
6	5	6	80	3	6.57		6.68	

Результаты исследования влияния высоты щелевого канала с дистанцирующими выступами на величину среднего по длине канала значения критерия Нуссельта и на

величину потерь давления приведены в табл. 3.

Таблица 3⁶.

Средние значения критерия Нуссельта и величины гидравлических потерь при различных высотах щелевого канала⁷.

№	b, мм b, mm	Nu _{ave}	dP, Па dP, Pa
1	0.30	7.75	1400
2	0.35	7.69	811
3	0.40	7.66	573
4	0.45	7.59	399
5	0.50	7.57	297

III. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ данных табл. 1 показывает, что при ламинарном режиме течения внесение дистанцирующих выступов в конструкцию теплопередающих элементов приводит к снижению среднего по длине канала значения критерия Нуссельта, и, следовательно, снижению тепловой эффективности матрицы теплообменника. Также добавление выступов приводит к увеличению уровня гидравлических потерь.

На основе данных, представленных в табл. 1, можно сделать вывод о том, что при глубоко ламинарном режиме течения наиболее важным параметром дистанцирующих выступов является их количество, а взаимное расположение выступов на лентах и количество выступов в рядах влияет на теплогидравлические характеристики течения незначительно.

Также на основе данных из табл. 1 можно сделать вывод о том, что влияние изменения скоростного режима на тепловые характеристики канала незначительно, в то время как гидравлические потери с увеличением числа Рейнольдса (и, следовательно, скорости) увеличиваются. Из этого можно сделать вывод, что характер теплообмена в каналах матрицы теплообменника будет сохраняться примерно постоянным при изменении расхода рабочих тел в достаточно широком диапазоне.

Анализ данных табл. 2 показывает, что изменение температурного режима также не приводит к сколько-нибудь существенному

изменению интенсивности теплообмена в исследуемых каналах, для большинства рассмотренных вариантов исполнения каналов полученные на разных температурных режимах средние значения критерия Нуссельта отличаются не более чем на 1%. Ввиду отсутствия значительного влияния температурного режима на тепловые характеристики каналов матрицы теплообменника возможно проведение экспериментальных исследований натуральных образцов или макетов теплообменников при более низком уровне температур, чем те, что наблюдаются в газотурбинных двигателях.

На основе данных из табл. 3 можно сделать вывод о том, что уменьшение высоты щелевого канала приводит к очень небольшому увеличению среднего числа Нуссельта (порядка 2% при изменении размера щели от 0.5 мм до 0.3 мм), при этом гидравлические потери увеличиваются весьма значительно. Поэтому при проектировании ленточно-щелевой матрицы при выборе высоты каналов можно пренебречь влиянием её на тепловую эффективность, рассматривая только влияние на гидравлическую эффективность и компактность теплообменника.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показано, что при использовании щелевых каналов малой высоты, имеющих дистанцирующие выступы на стенках, следует ожидать снижения тепловой и гидравлической эффективности по сравнению с плоскими щелевыми каналами аналогичных размеров. Снижение тепловой эффективности вы-

^{6,7} Appendix 1

ражается в уменьшении интенсивности конвективного теплообмена, то есть, в уменьшении значений критерия Нуссельта.

2. Показано, что существенное влияние на теплогидравлические характеристики канала при ламинарном течении газа в нём оказывает только количество дистанцирующих выступов, в то время как влияние их взаимного расположения очень слабое.

3. Показано, что при ламинарном течении газа влияние скоростного и температурного режимов на тепловую эффективность каналов пренебрежимо мало.

4. Показано, что изменение высоты щелевых каналов слабо влияет на их тепловую эффективность, но гидравлические потери при уменьшении высоты щелевых каналов значительно увеличиваются.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹**Fig. 1.** Model of the slot channel of the heat transfer element.

^{2,3}**Table 1.** The average values of the Nusselt criterion and the magnitude of hydraulic losses for different versions of the channels at different speed modes.

^{4,5}**Table 2.** The average values of the Nusselt criterion and the magnitude of hydraulic losses for different versions of the channels at different temperature conditions.

^{6,7}**Table 3.** The average values of the Nusselt criterion and the magnitude of hydraulic losses at different heights of the slot channel.

Литература (References)

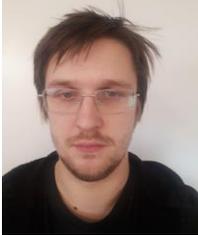
- [1] Banihabib R, Assadi M. The Role of Micro Gas Turbines in Energy Transition. *Energies*. 2022; 15(21):8084. doi:10.3390/en15218084
- [2] Saha, A. K., Chowdhury, S. P., Chowdhury, S., Crossley, P. A., & Gaunt, C. T. Microturbine based distributed generator in smart grid application. *IET Conference Publications*, paper 1052, 2009. doi:10.1049/cp.2009.1136
- [3] Aslanidou I., Rahman M., Zaccaria V., Куприанidis K.G. Micro Gas Turbines in the Future Smart Energy System: Fleet Monitoring, Diagnostics, and System Level Requirements. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 2021, vol. 7. doi:10.3389/fmech.2021.676853
- [4] Konečná, E., Teng, S. Y., Máša, V. New insights into the potential of the gas microturbine in microgrids and industrial applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, vol.134. doi:10.1016/j.rser.2020.110078
- [5] Xusheng S., Yongwei W., Xiulan H. Experimental and Numerical Studies of a Recuperator in Micro Turbines. *E3S Web of Conferences*, 2020, vol. 162. doi:10.1051/e3sconf/202016201005
- [6] Shah R. Compact Heat Exchangers for Microturbines, 2012.
- [7] Asadi M., Mehrabani N. D., Karbasi M., Nadali A., Khoshkhoo R.H. Thermodynamical optimization a plate and frame heat exchanger for microturbine applications. *Journal of American Science*, 2012, vol. 8, pp. 716-723.
- [8] Güllüce H., Özdemir K.. Design and operational condition optimization of a rotary regenerative heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 2020, vol. 177. Doi:10.1016/j.applthermaleng.2020.115341
- [9] Traverso A., Massardo A.F. Optimal design of compact recuperators for microturbine application. *Applied Thermal Engineering*, 2005, vol. 25, pp. 2054-2071. doi:10.1016/j.applthermaleng.2005.01.015
- [10] Hanafizadeh P., Parhizgar T., Gheimasi A.N. Analysis of micro-recuperators in small-sized gas turbines manufacturing potential of Iran. *Energy Equipment and System*, 2015, vol. 3, no. 1, pp. 1-12.
- [11] Li H., Zou Z., Li H., Yiming C., Fu C. Thermal performance of a microchannel primary surface recuperator for portable microturbine generators: Design and experimental study. *Applied Thermal Engineering*, 2022, vol. 206. doi:10.1016/j.applthermaleng.2022.118103
- [12] Kim T., Choi B., Han Y., Do K.H. Experimental and analytical investigation of a wavy fin recuperator for a micro gas turbine. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, vol. 148. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118998
- [13] Ferreira G., Sucena A., Ferrás, L. L., Pinho, F.T., Afonso, A.M. Hydrodynamic Entrance Length for Laminar Flow in Microchannels with Rectangular Cross Section. *Fluids*, 2021, vol. 6, 240, doi:10.3390/fluids6070240
- [14] Neale A., Derome D., Blocken B., Carmeliet J. Determination of Surface Convective Heat Transfer Coefficients by CFD. *Proceedings of the 11th NBEC Canadian Building Science and Technology Conference*, 2007.
- [15] Gutierrez J.A., Mendiburu A.Z., Carvalho J. Thermodynamic study of syngas combustion in gas microturbines with regeneration composed with metallic and ceramic materials. *Applied Thermal Engineering*, 2019, vol. 157. doi:10.1016/j.applthermaleng.2019.01.105
- [16] Kee R.J., Almand B.B., Blasi J., Rosen B.L., Hartmann M., Sullivan N.P., Zhu H., Manerbino A., Menzer S., Coors W. The design, fabrication, and evaluation of a ceramic counter-flow microchannel heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 2011, vol. 31, pp. 2004-2012. doi:10.1016/j.applthermaleng.2011.03.009
- [17] Zukowski M.. Forced convection heat transfer in square duct with heated and adiabatic walls at constant axial heat flux. *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2078. doi:10.1063/1.5092031

- [18] Lewinsohn C. High-efficiency, ceramic microchannel heat exchangers. *American Ceramic Society Bulletin*, 2015, vol. 95, pp. 26-31.
- [19] Nair S., Kotebavi V., Vishwa A. V., Das A. Performance investigation of a rotary heat exchanger installed with four ducts using computational fluid dynamics. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 172. Doi:10.1051/mateconf/201817202005
- [20] Peres N., Afonso A. M., Alves M. A., Pinho F. T. Heat transfer enhancement in laminar flow of viscoelastic fluids through a rectangular duct. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1997, vol. 40.

Сведения об авторах.



Костюков Андрей Вениаминович, кандидат технических наук.
Область научных интересов: микротурбины, теплообменные аппараты.
E-mail: kostukov123@yandex.ru



Косач Лев Анатольевич, старший преподаватель.
Область научных интересов: лопаточные машины, теплообменные аппараты.
E-mail: kosachlev90@mail.ru