УДК 621.5.09:621.362 DOI: 10.34031/ES.2022.3.001

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА В КАНАЛАХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Базыкин Д.А.[1], Ильичев В.А.[1], Орехов Е.А.[2], Бараков А.В.[1]

[1]ВГТУ, г. Воронеж
[2]ООО ФПК «Космос-Нефть-Газ», г. Воронеж

Аннотация
В данной статье рассматриваются некоторые варианты повышения эффективности экспериментальной термоэлектрической генераторной установки, разработанной с целью изучения, проектирования и создания энергетических установок данного типа, при непосредственной эксплуатации которых отсутствуют процессы горения топлива, предназначенных для электроснабжения промышленных потребителей, располагающихся на значительном расстоянии от централизованного электроснабжения, а именно – объектов добычи, распределения и транспортировки природного газа, показана принципиальная схема упомянутой энергетической установки, описаны принцип работы и основные преимущества ее применения. Повышение эффективности установки в представленном исследовании заключается в интенсификации теплообмена в профилированных каналах прямоугольного поперечного сечения, по которым подаются потоки газообразного теплоносителя с разной температурой. Показано несколько вариантов возможной интенсификации теплообмена, заключающейся в реализации внутри каналов интенсификаторов в виде поперечных сплошных перегородок, попеременно изменяющих направление движения теплоносителя. В представленном исследовании проведено численное моделирование нескольких вариантов интенсификации теплообмена с различными геометрическими размерами проходного сечения профилированных каналов и поперечных перегородок, установленных в указанных каналах. В заключении работы показаны результаты проведенного численного моделирования, выполнена оценка эффективности использованных методов, из которых выбран наиболее оптимальный.

Ключевые слова: *интенсификация теплообмена, прямоугольные профилированные каналы, термоэлектрические генераторные модули, вихревая труба, сжатый воздух, природный газ, поперечные перегородки, поток, электроснабжение.*

NUMERICAL SIMULATION OF HEAT TRANSFER INTENSIFICATION OPTIONS IN THE CHANNELS OF A THERMOELECTRIC GENERATOR PLANT

Denis Bazykin[1], Vitaliy Ilyichev[1], Evgeniy Orekhov[2], Aleksander Barakov[1]

Voronezh State Technical University, Voronezh
Financial & Industrial Company KOSMOS-NEFT-GAS, Voronezh

Abstract
This article discusses some options for improving the efficiency of an experimental thermoelectric generator set designed to study, design and create power plants of this type, during direct operation of which there are no fuel combustion processes intended for power supply to industrial consumers located at a considerable distance from the centralized power supply, and namely, objects of production, distribution and transportation of natural gas, a schematic diagram of the mentioned power plant is shown, the principle of operation and the main advantages of its application are described. Improving the efficiency of the installation in the present study consists in intensifying heat transfer in profiled channels of rectangular cross section, through which flows of gaseous coolant with different temperatures are supplied. Several variants of the possible heat transfer in-

tensification are shown, which consist in the implementation of intensifiers inside the channels in the form of transverse solid partitions, alternately changing the direction of the coolant movement. In the presented study, numerical simulation of several variants of heat transfer intensification with different geometric dimensions of the flow section of profiled channels and transverse baffles installed in these channels was carried out. In conclusion, the results of the numerical simulation are shown, the effectiveness of the methods used is evaluated, of which the most optimal one is selected.

Keywords: *heat transfer intensification, rectangular profiled channels, thermoelectric generator modules, vortex tube, compressed air, natural gas, transverse baffles, flow, power supply.*

Введение

Большая часть разведанных к настоящему времени месторождений природного газа расположена в районах нашей страны, которые значительно удалены от транспортных, экономических, промышленных центров инфраструктуры и централизованной подачи электроэнергии. С целью поддержания непрерывной работоспособности элементов оборудования, применяемого при добыче, предварительной подготовке, распределении и последующей транспортировке природного газа, необходимо обеспечивать постоянную подачу электроэнергии к указанным объектам. В данных районах отсутствует централизованное энергоснабжение [1, 2]. Степень удаленности объектов добычи газа от центров электроснабжения порой достигает нескольких сотен километров. Возведение электросетей такой протяженности требует довольно высоких капиталовложений и не всегда осуществимо в связи с особенностями ландшафта местностей, а также суровыми климатическими условиями данных районов. Наиболее целесообразным решением в приведенных условиях является применение источников автономной генерации электроэнергии непосредственно на промыслах.

К данному периоду времени накоплен обширный опыт проектирования и создания установок, служащих для автономной генерации, использующих в своем технологическом цикле как традиционные, так и нетрадиционные, возобновляемые источники энергии. В технологическом цикле традиционных устройств генерации электроэнергии зачастую присутствует процесс горения того или иного вида топлива с последующей генерацией электроэнергии за счет выделившегося тепла продуктов сгорания. К указанным устройствам относятся, например, бензиновые, дизельные генераторы, газотурбинные установки, мини-ТЭЦ и др. [4-6]. Но при таких условиях выделяется большое количество веществ, способствующих загрязнению атмосферы. При этом организация процессов горения повышает взрыво- и пожароопасность объектов. Наиболее приоритетным, с точки зрения экологии и безопасности технологического процесса, является применение нетрадиционных и возобновляемых источников энергии.

Задача автономного энергоснабжения оборудования малой мощности, систем и средств автоматики, а также катодной защиты трубопроводов в газодобывающей отрасли промышленности может быть решена посредством использования в технологическом процессе термоэлектрических генераторных модулей, принцип действия которых заключается в возникновении термоэлектродвижущей силы (термоЭДС) в цепи из двух разнородных полупроводниковых материалов при условии поддержания необходимой разности температур в местах контактов между ними, данный эффект имеет название «Термоэлектрический эффект Зеебека» [3].

Положительными характеристиками термоэлектрических генераторных устройств являются отсутствие движущихся и вращающихся частей, шума, различного рода выбросов, высокая надежность, простота монтажа и эксплуатации, отсутствие необходимости в периодическом обслуживании, длительный срок службы [7].

Материалы и методы

В ходе проведенных исследований была спроектирована и изготовлена экспериментальная термоэлектрическая генераторная установка, принципиальная схема которой представлена на рис. 1 [8].

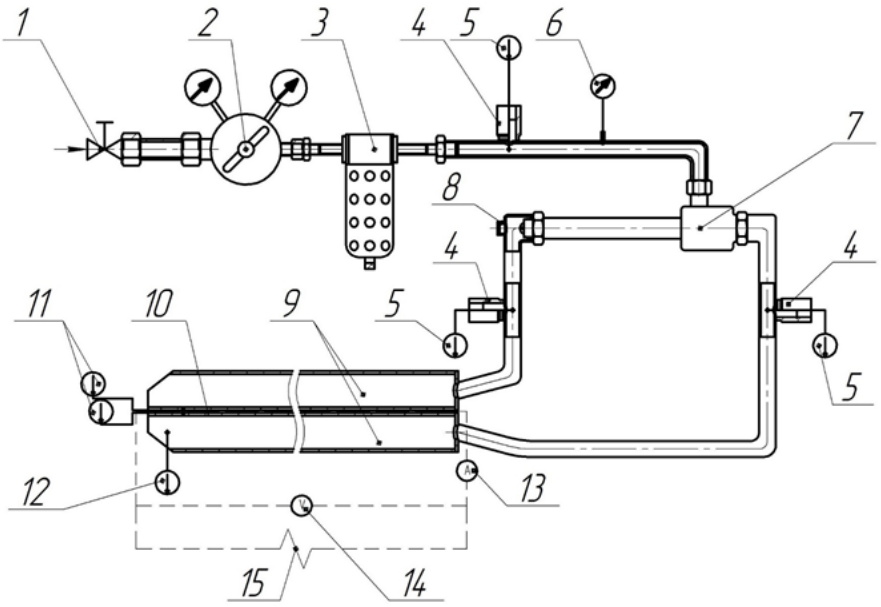


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной термоэлектрической генераторной установки

Принцип генерации электроэнергии в разработанной экспериментальной установке основан на использовании эффекта Зеебека в термоэлектрических генераторных модулях. Как известно, для обеспечения работоспособности данных модулей необходим экологически чистый источник низкопотенциального тепла, правильный выбор и поиск которого также являются достаточно сложными задачами. На газодобывающих промыслах целесообразно в качестве рабочего тела для таких энергетических установок применять непосредственно энергию потока добываемого природного газа. При этом необходимо получить нагретый и охлажденный газовые потоки для создания необходимой разницы температур на противоположных плоскостях термоэлектрических генераторных модулей.

Для данных целей может быть использована противоточная вихревая труба, принцип работы которой базируется на вихревом эффекте Ранка-Хилша, заключающемся в термическом разделении газообразного потока при его завихрении. Указанный источник является наиболее подходящим для приведенных условий с точки зрения экологичности процесса [9, 10]. Совместное применение двух приведенных технических решений позволит создать автономную установку, благодаря которой возможна генерация электрической энергии при непосредственном использовании потенциальной энергии газового потока, без осуществления процессов горения различного вида топлив, благодаря чему данное решение является экологичным.

Принцип действия разработанной экспериментальной установки заключается в следующем. При открытии вентиля 1 поток газа подается в установку, после чего проходит через регулятор давления 2, посредством которого происходит регулирование давления газа перед входным устройством вихревой трубы 7. После осуществления регулирования производится очистка газового потока от механических примесей в

фильтре 3, из которого поток очищенного газа тангенциально подается в вихревую трубу 7. В вихревой трубе происходит процесс энергоразделения газа, при этом количественное соотношение холодного и горячего потоков регулируется при помощи дроссельного устройства, доступ к которому осуществляется путем открытия пробки 8. Холодный и горячий потоки газа из вихревой трубы подаются в термоэлектрический генератор, представляющий собой два алюминиевых профилированных канала 9, имеющих прямоугольное поперечное сечение. Между упомянутыми каналами плотно зажаты термоэлектрические генераторные модули 10. Генерируемый термоэлектрическими модулями электрический ток подается к нагрузке 15. С целью контроля характеристик потоков установлены датчики давления 6 и температуры 5, 11, 12, а для контроля характеристик электрического тока используются амперметр 13 и вольтметр 14.

Общее количество термоэлектрических генераторных модулей, использующихся в экспериментальной установке, равняется 39 шт. Габаритные размеры одного модуля составляют (ДхШхВ) 40х40х3,2 мм.

Численное моделирование было выполнено в программе ANSYS CFX для следующих конструкций профилированных каналов:

– базовая (канал прямоугольного профиля 92х42 мм), изображенная на рис. 2;

– с интенсификацией теплообмена, заключающейся в снижении проходного сечения до 92х10 мм и установке поперечных перегородок, попеременно изменяющих направление потока, размером 60х10 мм, установленных с шагом 30 мм, изображенная на рис. 3.

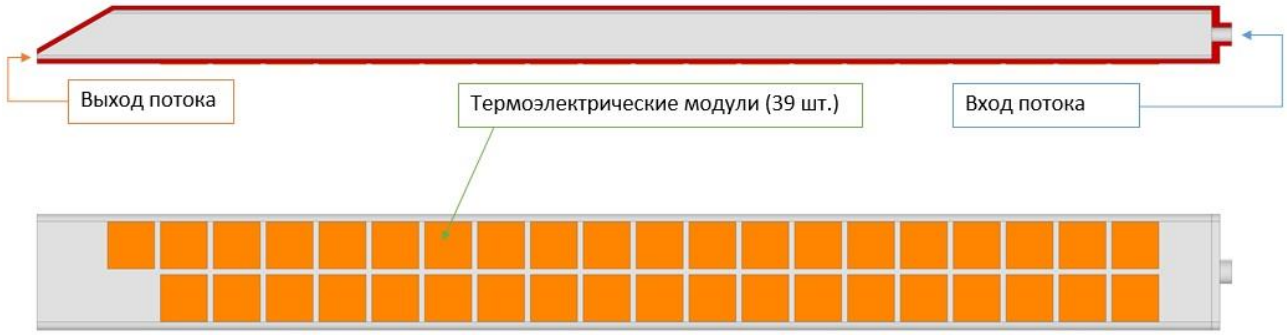


Рис. 2. Базовая конструкция

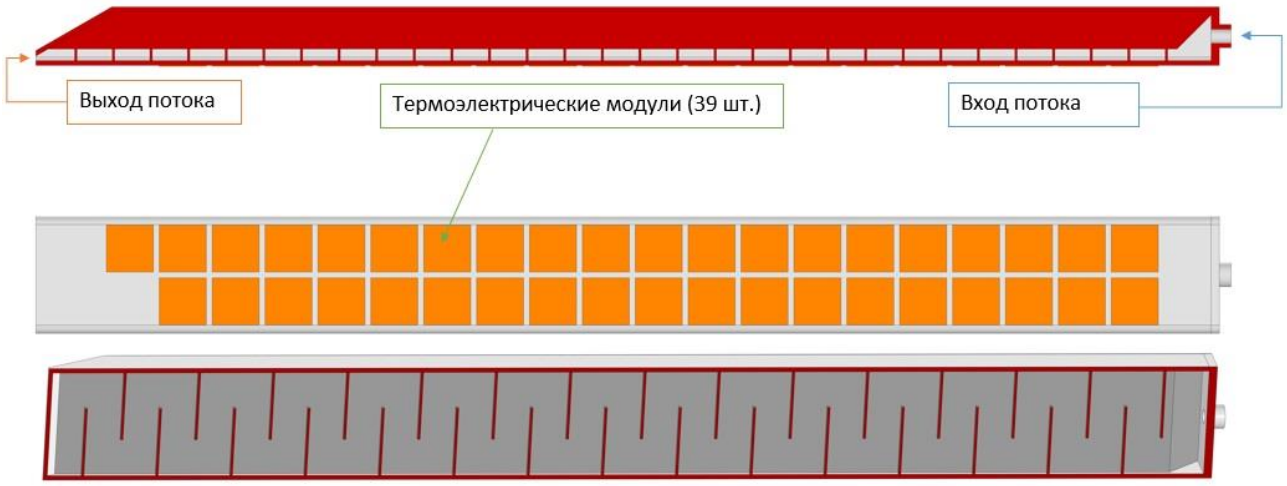


Рис. 3. Конструкция каналов с перегородками 60х10 мм с шагом 30 мм

Для проведения численного моделирования в качестве рабочего тела экспериментальной установки был выбран воздух, т.к. первично предстоящие экспериментальные исследования будут выполнены с использованием воздуха в качестве рабочего тела.

Исходные параметры для потока воздуха соответствуют одному из вариантов режимных параметров холодного и горячего потоков, указанных в паспортных данных вихревой трубы, а именно:

– объемный расход холодного потока 566,5 л/мин при н.у.;
– объемный расход горячего потока 566,5 л/мин при н.у.;
– температура холодного потока –35 °С;
– температура горячего потока +70 °С;
– давление потоков на выходе из профилированных каналов 101 325 Па.

Результаты и обсуждение

В результате проведенного численного моделирования были получены следующие результаты.

Для базового варианта конструкции изменение температуры горячего и холодного потоков и распределение тепловых потоков по длине профилированных каналов представлено, соответственно, на рис. 4, 5 и рис. 6, 7.

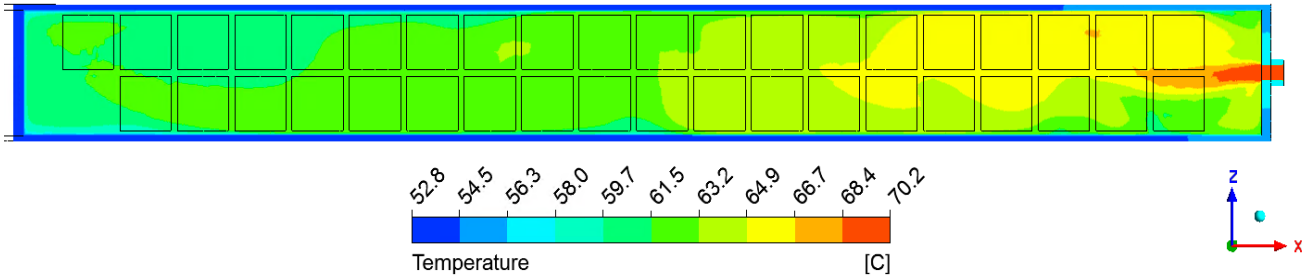


Рис. 4. Распределение температуры горячего потока по длине базовой конструкции профилированного канала

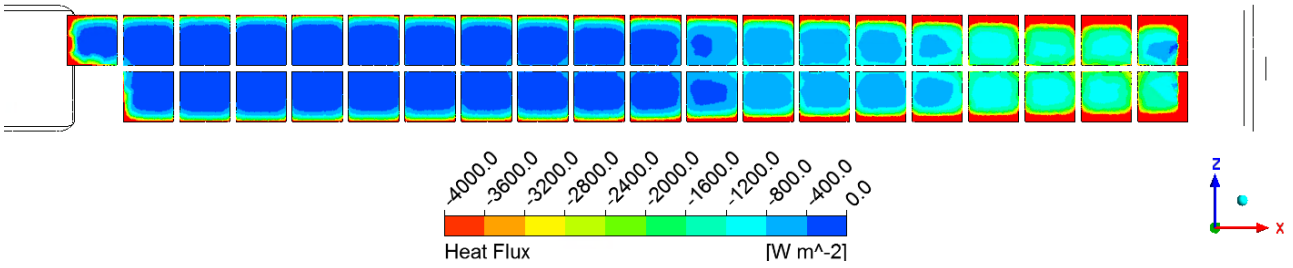


Рис. 5. Распределение теплового потока с горячей стороны по длине базовой конструкции профилированного канала

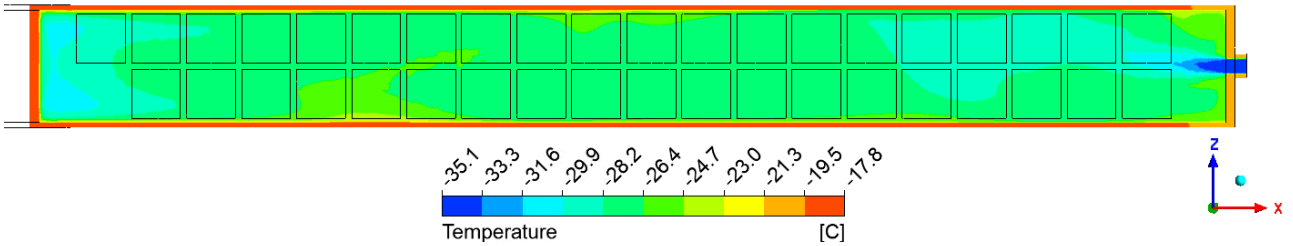


Рис. 6. Распределение температуры холодного потока по длине базовой конструкции профилированного канала

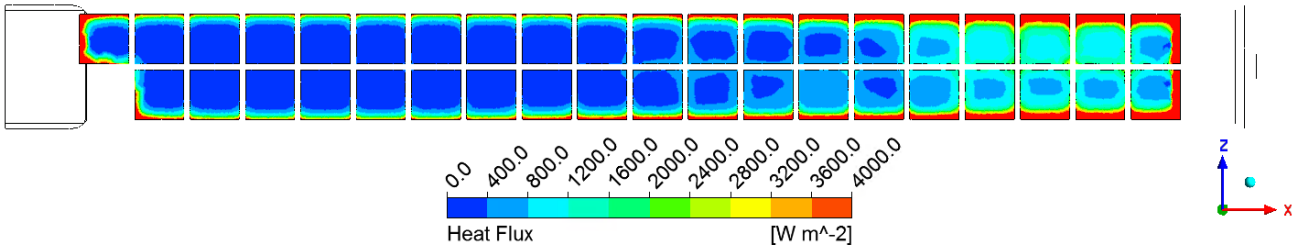


Рис. 7. Распределение теплового потока с холодной стороны по длине базовой конструкции профилированного канала

Как известно, эффективность генерации электроэнергии термоэлектрическими модулями в основном зависит от разности температур между сторонами модуля и количества подведенного тепла. И чем выше разность температур между холодной и горячей поверхностями, тем выше, эффективность модуля, тем большее значение величины генерируемой электрической мощности можно получить, но до определенного предела, который непосредственно зависит от конструкции самого термоэлектрического генераторного модуля. При этом имеется и минимально необходимая разность температур, при которой модуль начинает генерировать полезную электроэнергию и которая также зависит от конструктивных характеристик.

Из приведенных иллюстраций (рис. 4 – рис. 7) можно заметить, что в базовой конструкции профилированных каналов происходит практически равномерное и скоротечное распределение теплового потока по всей длине канала, в результате чего большое количество тепла теряется и устремляется к выходной части канала. При этом первые девять рядов термоэлектрических генераторных модулей получают определенную долю теплового потока, но данного значения недостаточно для их эффективной работы.

Для варианта конструкции профилированного канала с примененными методами интенсификации теплообмена изменение температуры горячего и холодного потоков, а также распределение тепловых потоков по длине профилированных каналов представлено, соответственно, на рис. 8, 9 и рис. 10, 11.

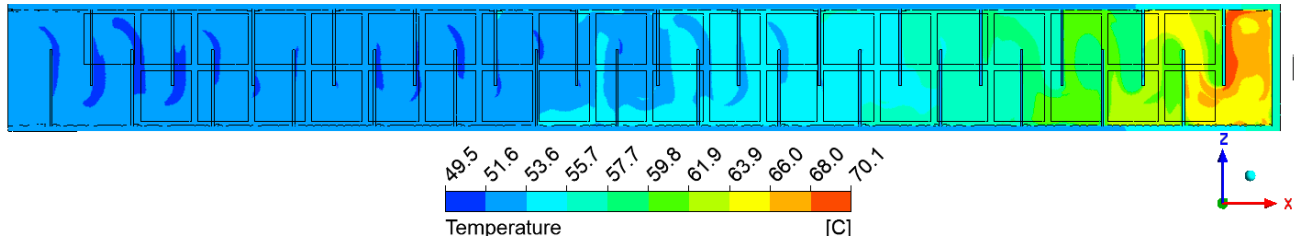


Рис. 8. Распределение температуры горячего потока по длине профилированного канала с использованием методов интенсификации теплообмена

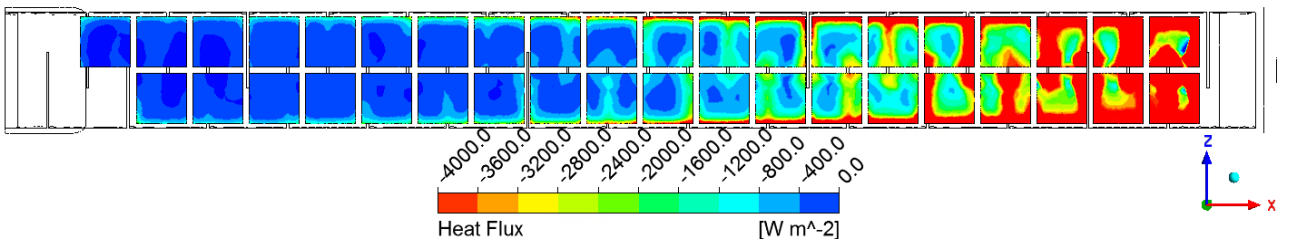


Рис. 9. Распределение теплового потока с горячей стороны по длине профилированного канала с использованием методов интенсификации теплообмена

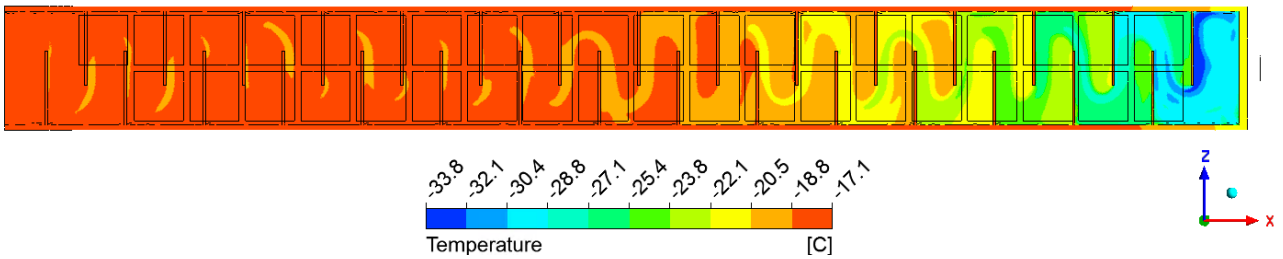


Рис. 10. Распределение температуры холодного потока по длине профилированного канала с использованием методов интенсификации теплообмена

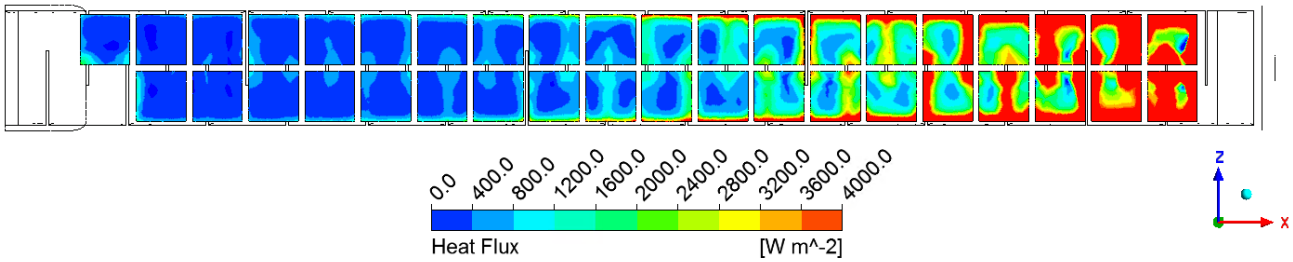


Рис. 11. Распределение теплового потока с холодной стороны по длине профилированного канала с использованием методов интенсификации теплообмена

Распределение теплового потока в профилированных прямоугольных каналах с применением перегородок, попеременно изменяющих направление потока, происходит более равномерно по отношению к поверхностям термоэлектрических генераторных модулей. Основная доля теплового потока приходится на первые восемь рядов модулей по ходу движения потока, а разность температур достигает значений в 90 °C, что позволяет данным модулям осуществлять генерацию электроэнергии с высокой эффективностью. При этом максимальные потери давления в канале при данных условиях составляют 51,15 кПа.

Выводы

В результате проведенных исследований была разработана экспериментальная термоэлектрическая генераторная установка, в которой генерация электроэнергии осуществляется за счет термического разделения газового потока в вихревой трубе и последующей передачи сгенерированного тепла термоэлектрическим генераторным модулям при движении термически разделенных потоков в профилированных каналах с прямоугольным поперечным сечением. В исследовании был использован метод интенсификации теплообмена в указанных каналах, заключающийся в сужении проходного сечения каналов, а также установке поперечных сплошных перегородок, попеременно изменяющих направление движения потока газообразного теплоносителя. В данной работе было выполнено численное моделирование теплообмена в каналах термоэлектрической генераторной установки при базовой конструкции каналов и конструкции с применением указанных методов интенсификации теплообмена. По завершению анализа полученных результатов можно сделать вывод о том, что использованные методы интенсификации теплообмена способствуют повышению эффективности генерации электроэнергии в данной установке и снижению количества используемых модулей при том же значении тепловой мощности, а, соответственно, и капитальных затрат.

Библиографический список

1. Краснова Н.П., Шеин В.М. Децентрализованное теплоэнергоснабжение в России, проблемы и перспективы развития // Успехи современной науки. 2018. № 1. С. 40-43. EDN: YUZUZG
2. Тищенко Н.И. Использование альтернативных источников энергии в энергоснабжении Крайнего Севера // Аллея науки. 2017. Том 2, № 16. С. 40-42. EDN: YNNWXY
3. Лемминг А.Э., Шостаковский П.Г. Решение задач энергетического обеспечения автономных объектов на основе термоэлектрических модулей // Инновации. 2018. № 5. С. 9-13. EDN: YAHMIH
4. Люкайтис В.Ю., Глушков С.Ю. Автономные энергокомплексы, гибридные конструкции с применением возобновляемых источников энергии // Силовое и энергетическое оборудование. Автономные системы. 2019. Том 2, № 2. С. 111-120. EDN: CVPCON. DOI: 10.32464/2618-8716-2019-2-2-111-120
5. Zornek T., Monz T., Aigner M. Performance analysis of the micro gas turbine Turbec T100 with a new FLOX-combustion system for low calorific fuels // Applied Energy. 2015. Vol. 159. P. 276-284. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.08.075
6. Alford A., Nichol P., Frisby B. The Development of a Small High-Speed Steam Microturbine Generator System // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2015. Vol. 90. P. 012067. DOI: 10.1088/1757-899X/90/1/012067
7. Termoelectric generator on Satellites – An Approach for Waste Heat recovery in Space / M. Von Lukowicz, E. Abbe, T. Schmiel, M. Tajmar // Energies. 2016. No 9 (7). P. 1-14. DOI: 10.3390/en9070541
8. Создание экспериментальной электрогенерирующей установки с применением вихревого эффекта Ранка-Хилша / Д.А. Базыкин, В.А. Ильичев, В.В. Курасов, А.В. Бараков // Физико-технические проблемы энергетики, экологии и энергоресурсосбережения: Тр. 24-й научно-техн. конф. Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2022. С. 3-10. EDN: IPNLOZ
9. Белоусов А.М, Исрафилов И.Х., Харчук С.И. Исследование возможностей повышения энергоэффективности вихревой трубы Ранка – Хилша // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. № 7-2. С. 112-121. EDN: VCQCHB
10. Эксплуатация регулируемых вихревых труб Ранка-Хилша в экологически значимых промышленных установках очистки газов (аналитический обзор) / В.А. Девисилов, Д.А. Жидков, В.С. Спиридонов, О.В. Кирикова // Экология и промышленность России. 2013. № 12. С. 14-19. EDN: RNLOUT

References

1. Krasnova, N. P., & Shein, V. M. (2018). Detsentralizovannoye teploenergosnabzheniye v Rossii, problemy i perspektivy razvitiya [Decentralized heat and power supply in Russia, problems and development prospects]. *Uspekhi sovremennoy nauki, 1,* 40-43. [In Russian]
2. Tishchenko, N. I. (2017). Ispol'zovaniye al'ternativnykh istochnikov energii v energosnabzhenii Kraynego Severa [Use of alternative energy sources in the energy supply of the Far North]. *Alleya nauki, 2, 16,* 40-42. [In Russian]
3. Lemming, A. E., & Shostakovskiy, P. G. (2018). Resheniye zadach energeticheskogo obespecheniya avtonom-nykh ob"yektov na osnove termoelektricheskikh moduley [Solving the problems of energy supply of autonomous objects based on thermoelectric modules]. *Innovatsii, 5,* 9-13. [In Russian]
4. Lyukaytis, V. Yu., & Glushkov, S. Yu. (2019). Avtonomnyye energokompleksy, gibridnyye konstruktsii s primeneniyem vozobnovlyayemykh istochnikov energii [Autonomous energy complexes, hybrid structures using renewable energy sources]. *Silovoye i energeticheskoye oborudovaniye. Avtonomnyye sistemy, 2 (2),* 111-120. https://doi.org/10.32464/2618-8716-2019-2-2-111-120 [In Russian]
5. Zornek, T., Monz, T., & Aigner, M. (2015). Performance analysis of the micro gas turbine Turbec T100 with a new FLOX-combustion system for low calorific fuels. *Applied Energy, 159*, 276-284. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.08.075

6. Alford, A., Nichol, P., & Frisby, B. (2015). The Development of a Small High-Speed Steam Microturbine Generator System // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 90*, 012067. http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/90/1/012067
7. Von Lukowicz, M., Abbe, E., Schmiel, T., & Tajmar, M. (2016). Termoelectric generator on Satellites – An Approach for Waste Heat recovery in Space. *Energies, 9 (7)*, 1-14. http://dx.doi.org/10.3390/en9070541
8. Bazykin, D. A., Il'ichev, V. A., & Barakov, A. V. (2022). Sozdaniye eksperimental'noy elektrogeneriruyushchey ustanovki s primeneniyem vikhrevogo effekta Ranka-Khilsha [Creation of an experimental power generating plant using the Ranque-Hilsch vortex effect]. In *Physical and technical problems of energy, ecology and energy saving.* Voronezh State Technical University. [In Russian]
9. Belousov, A. M, Israfilov, I. Kh., & Kharchuk, S. I. (2015). Issledovaniye vozmozhnostey povysheniya energoeffektivnosti vikhrevoy truby Ranka – Khilsha [Study of the possibilities of improving the energy efficiency of the Rank-Hilsch vortex tube]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki, 7-2,* 112-121. [In Russian]
10. Devisilov, V. A., Zhidkov, D. A., Spiridonov, V. S., & Kirikova, O. V. (2013). Ekspluatatsiya reguliruyemykh vikhrevykh trub Ranka-Khilsha v ekologicheski znachimykh promyshlennykh ustanovkakh ochistki gazov (analiticheskiy obzor) [Operation of Ranque-Hilsch Adjustable Vortex Tubes in Environmentally Significant Industrial Gas Treatment Plants (Analytical Review)]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii, 12,* 14-19. [In Russian]

Сведения об авторах

Базыкин Денис Александрович, аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет».
SPIN-код: 4585-7335

Ильичев Виталий Александрович, канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет».
E -library AuthorID: 159598

Орехов Евгений Александрович, ведущий конструктор, ООО ФПК «Космос-Нефть-Газ».

Бараков Александр Валентинович, д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»,
SPIN-код: 7468-9330
ORCID: 0000-0002-8351-2778

Authors about

Bazykin Denis Aleksandrovich, graduate student, Voronezh State Technical University.

Ilyichev Vitaliy Aleksandrovich, Cand. of Tech. Sciences, Associate Professor, Voronezh State Technical University.

Orekhov Evgeniy Aleksandrovich, lead designer, Financial & Industrial Company KOSMOS-NEFT-GAS, Voronezh.

Barakov Aleksander Valentinovich, Dr. of Tech. Sciences, Professor, Voronezh State Technical University,
ORCID: 0000-0002-8351-2778