

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПОРИСТО-СЕТЧАТОЙ МАТРИЦЕ РОТОРНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА

А.В. Костюков<sup>1</sup>

А.Р. Макаров<sup>2</sup>

В.Г. Мерзликин<sup>1,3</sup>

MerzlikinV@mail.ru

<sup>1</sup> Московский политехнический университет, Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup> Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

<sup>3</sup> Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

Выполнено физико-математическое моделирование теплогидравлических процессов в пористо-сетчатой матрице, состоящей из 10 слоев металлической сетки, используемой в теплопередающих элементах роторных теплообменников. Получены зависимости, описывающие процессы нагрева и охлаждения в пористо-сетчатой матрице. Для апробации полученных зависимостей проведен расчет степени регенерации в роторном теплообменнике транспортной микротурбины мощностью 270 кВт посредством математического моделирования теплогидравлических процессов в пористо-сетчатой матрице. Результаты расчета степени регенерации данного теплообменника с применением уточненных температурных зависимостей фактора Колборна показали хорошее совпадение с экспериментальными данными в пределах 1,5 %

### Ключевые слова

*Микротурбина, теплообменник, пористо-сетчатая матрица, теплоотдача*

Поступила в редакцию 06.04.2016

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

---

В настоящее время в России происходит частичный переход от централизованного энергоснабжения к распределенному, в котором упор делается на мало-размерные теплоэлектростанции (ТЭС), работающие на газе и возобновляемых источниках энергии [1, 2]. Это вызвано ростом спроса на энергоносители со стороны потребителей относительно небольшой мощности, ростом объемов жилищного строительства и увеличением доли малоэтажной застройки, большими территориями страны, неохваченными централизованными системами электро- и газоснабжения, низкими плотностями электрических нагрузок на больших территориях в зонах действия систем централизованного электро-снабжения, большой протяженностью изношенных электрических сетей в зонах малых нагрузок, большими вложениями при строительстве теплотрасс, а также большими потерями при их эксплуатации и др.

Аналогичные тенденции развития теплоэнергетики наблюдаются также за рубежом [3, 4].

В качестве перспективных мини-ТЭС рассматриваются работающие на дешевом топливе (природном газе) энергоустановки на базе поршневых газовых

двигателей и микротурбин. Микротурбины имеют существенно меньшее техническое обслуживание. Например, российские ТЭС на базе поршневых ДВС характеризуются техническим обслуживанием с интервалом 1000...1500 моточасов (6–8 раз в год). Текущий ремонт американских микротурбин «Capstone» (одна из ведущих американских фирм по производству микротурбин [5, 6]) осуществляется на месте установки один раз в год и сводится к внешнему осмотру, замене или чистке воздушного фильтра.

Одним из важнейших элементов микротурбин является теплообменник. Такой теплообменник обеспечивает современным микротурбинам достаточно высокую эффективность (электрический КПД микротурбинных энергетических установок находится в пределах 29...34 %). Установка в микротурбине теплообменника приводит к существенному снижению ее габаритно-массовых показателей. Поэтому вопрос создания высокоэффективного компактного теплообменника является одним из основных при проектировании микротурбин. В настоящее время на микротурбинах в основном устанавливают неподвижные теплообменники-рекуператоры [5–8].

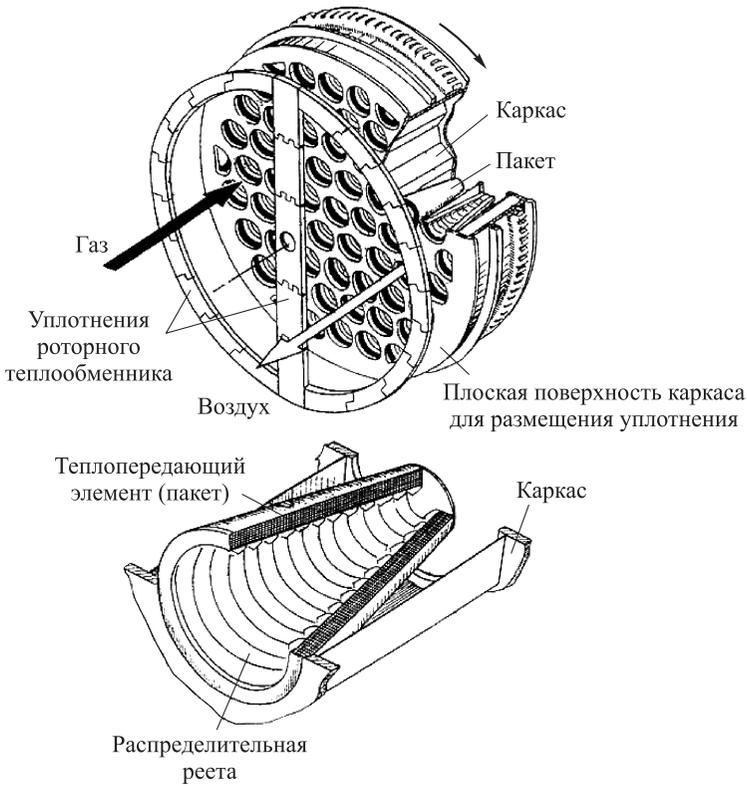
Продолжаются также работы по роторным теплообменникам. Связано это с их результативно реализуемой компактностью и эффективностью. В исследованиях [9–12] высокотемпературные и высокоэффективные микротурбины разрабатываются на основе керамических роторных теплообменников. Главная проблема керамических роторных теплообменников — низкая эффективность их уплотнений, утечки воздуха в уплотнениях достигают 6 %, уплотнения в таких теплообменниках прижимаются к пористой керамической матрице. Для обеспечения достаточного ресурса уплотнения прижимаются к пористой матрице малым давлением, что приводит к очень высоким (до 6 %) утечкам воздуха высокого давления.

Охлаждаемые металлические каркасные роторные теплообменники также могут быть использованы в высокотемпературных микротурбинах (рис. 1) [13]. В таком теплообменнике уплотнения действуют по охлаждаемым, плоским поверхностям каркаса. Конструкция обеспечивает незначительные утечки воздуха в уплотнениях роторного теплообменника до 1...1,5 %.

Одним из вариантов обеспечения охлаждения каркаса роторного теплообменника является выполнение теплопередающих элементов коническими. В этом случае практически вся поверхность каркаса омывается во время работы теплообменника только входящим в теплообменник холодным закомпрессорным воздухом с температурой 450...470 К. В обратном направлении проходящий через конический теплопередающий элемент газ охлаждается до температуры 520...540 К, после чего омывает и охлаждает стенки.

В таких теплообменниках конический теплопередающий элемент образован смотанной в рулон металлической сеткой [13].

Имеющаяся информация по теплогидравлическим характеристикам таких сеток весьма ограничена [14], а для сеток некоторых размеров просто отсутствует. В [15] приведены экспериментальные исследования теплогидравлических



**Рис. 1.** Роторный каркасный теплообменник с коническими теплопередающими элементами из стальной мелкоячейистой сетки

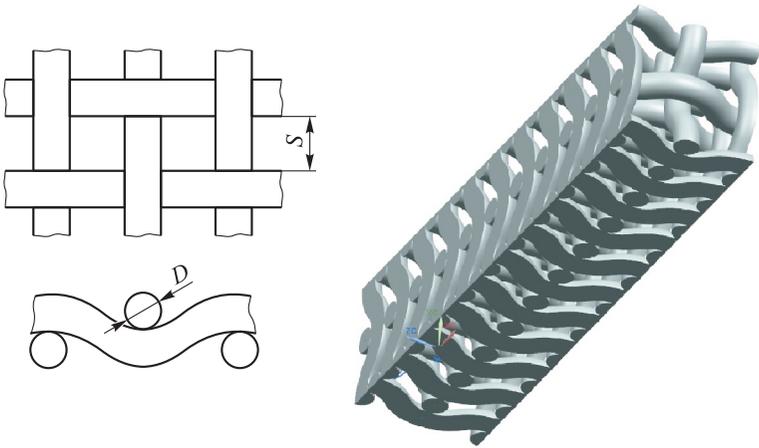
характеристик пористо-сетчатых конических теплопередающих элементов (размер ячейки  $S = 0,2$  мм, диаметр проволоки  $D = 0,13$  мм) роторного теплообменника с применяемой в транспортных газотурбинных двигателях мощностью 270 кВт. Однако исследования проводились в очень узком диапазоне температур матрицы и теплоносителей. В экспериментах сетчатая матрица обдувалась попеременно воздухом с температурой  $T_v = 300...320$  К и в этом же интервале менялась температура сетчатой матрицы  $T_m$ . В реальности температуры входящих в теплообменник воздуха и газа находятся в диапазонах 450...490 К и 870...970 К. Следствием этого явилось значительное (на 3...4 %) несовпадение экспериментально полученной на режиме с температурой матрицы [13], лежащей в диапазоне 500...900 К, и расчетной степени регенерации теплообменника при использовании эмпирической зависимости фактора Колборна [14], полученной по данным эксперимента [16]:

$$J_k = 0,11 Re_x^{-0,46}, \tag{1}$$

где  $Re_x = Re \frac{0,00375}{p^3}$  — модифицированный критерий Рейнольдса (Re);  $p$  — пористость матрицы.

Для нахождения уточненной зависимости выполняли математическое моделирование теплогидравлических процессов в пористо-сетчатой матрице.

Расчетная модель представляла собой фрагмент теплопередающей матрицы, состоящей из десяти слоев сеток с шагом  $S$  и диаметром  $D$  проволоки (рис. 2). Математическое моделирование базировалось на решении системы уравнений, включающей уравнения Навье — Стокса. Расчетно-теоретические оценки энергетических характеристик и состояния теплогидравлического процесса выполнялись с использованием программного комплекса ANSYS CFX [17]. Теплофизические свойства воздуха и газа задавались в виде табличных зависимостей от температуры.



**Рис. 2.** Исследуемая пористо-сетчатая матрица, состоящая из десяти слоев сеток с шагом  $S$ , выполненных из проволоки диаметром  $D$

Численный эксперимент выполнялся в области чисел Рейнольдса  $Re = 10...70$  (ламинарный режим течения). Продувка воздухом матрицы проводилась до момента полного ее нагрева или охлаждения. Температуры воздуха  $T_B$  и матрицы  $T_M$  брались приближенными к их реальным значениям в роторном теплообменнике при нагреве  $T_B = 965$  К,  $T_M = 300$  К и охлаждении  $T_B = 500$  К,  $T_M = 965$  К.

Как правило, фактор Колборна представляется в виде зависимости только от числа Рейнольдса  $J_k = f(Re_x)$ . В настоящей работе результаты расчета обрабатывались по методике, изложенной в [13].

Для каждого выбранного расчетного момента времени определялись модифицированный критерий Рейнольдса  $Re_x$  и фактор Колборна  $J_k$ , а также температурные факторы для случаев нагрева  $Te_{heat}$  и охлаждения  $Te_{cool}$ , рассчитанные по температурам матрицы  $T_{matr}$  и воздушного потока на входе  $T_{air in}$  и на выходе  $T_{air out}$  из теплообменника:

$$Te_{heat} = \frac{T_{matr}}{T_{air in}}, \quad Te_{cool} = \frac{T_{air out}}{T_{matr}}.$$

Параметры  $Re_x$ ,  $Te$ ,  $J_k$  находились следующим образом. Для каждого выбранного значения  $Te = const$  была проведена аппроксимация пар значений  $Re_x$ ,  $J_k$  в виде полинома:

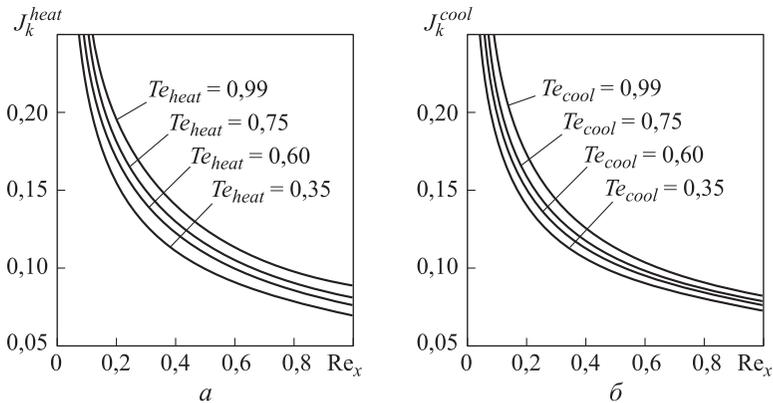
$$J_k = ARe_x^B.$$

Коэффициенты  $A$  и  $B$  определялись по аппроксимационным линейным зависимостям от температурного фактора  $Te$ .

В итоге были получены зависимости факторов Колборна для различных значений температурного фактора  $Te$  (рис. 3):

$$J_k^{heat} = (0,036Te_{heat} + 0,074)Re_x^{0,0631Te_{heat} - 0,514},$$

$$J_k^{cool} = (0,027Te_{cool} + 0,091)Re_x^{-(0,143Te_{cool} + 0,32)}. \tag{2}$$



**Рис. 3.** Влияние модифицированного числа Рейнольдса на значения факторов Колборна  $J_k^{heat}$  при нагреве (а) и  $J_k^{cool}$  при охлаждении (б) пористо-сетчатой матрицы для различных значений температурного фактора  $Te$

Проверка формул (2) проводилась путем моделирования теплогидравлических процессов с использованием полученных аппроксимационных зависимостей (1) в пористо-сетчатой матрице теплообменника транспортной микротурбины мощностью 270 кВт (см. рис. 1) и сравнения полученных результатов с известными опытными данными. В роторном теплообменнике теплопередающие элементы располагаются на вращающемся каркасе и во время работы омываются поочередно горячим и холодным теплоносителями. Считалось, что матрица состоит из сетки, рассмотренной ранее.

В качестве расчетной модели использовались секторы цилиндрических ячеек теплообменника с длиной окружности 0,0001м (см. рис. 2). Конические теплопередающие элементы теплообменников математически описывались как пористые тела [17, 18]. Теплогидравлические процессы при протекании через них газа/воздуха описывались полученными зависимостями для фактора Кол-

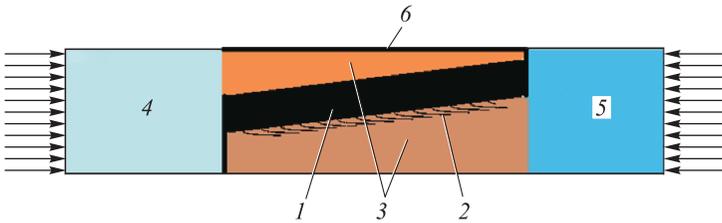
борна (2), а также зависимостями линейного и квадратичного коэффициентов сопротивления пористо-сетчатой матрицы [19, 20]:

$$\alpha = \zeta \frac{\rho^3 \mu Re_x}{0,075 d^2 (1 + \rho Re_x)},$$

$$\beta = \zeta \frac{\rho Re_x}{d(1 + \rho Re_x)},$$

где  $\zeta = 0,5kd \left( \frac{1}{Re_x} + 1 \right)$  — фактор трения;  $d = 4p/k$  — гидравлический диаметр каналов матрицы теплообменника;  $k$  — компактность матрицы;  $\rho$  — плотность воздуха.

Для имитации условий, в которых работает теплопередающий элемент вращающегося теплообменника, в течение одного вычислительного цикла расчетная модель (рис. 4) продувалась попеременно то газом, то воздухом. Поочередная продувка газом и воздухом ячейки теплообменника проводилась до выхода на установившийся режим. Такому режиму соответствовало отличие не более чем на 1 % количества переданной от газа к воздуху теплоты за два смежных оборота.

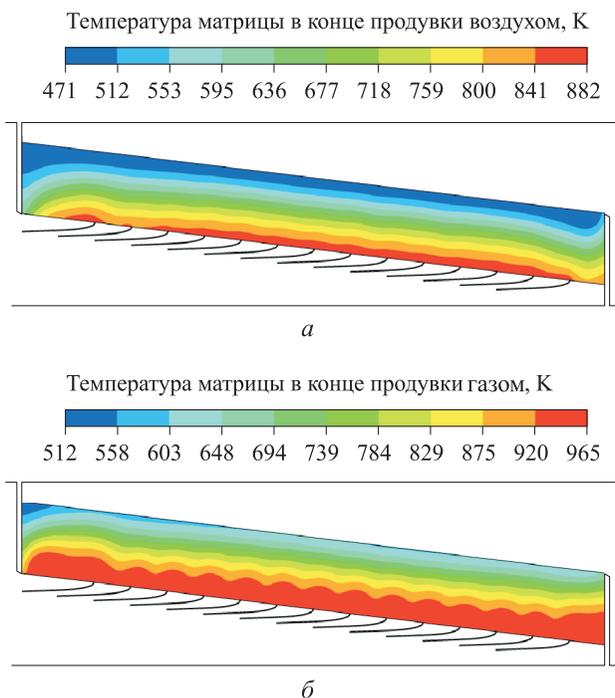


**Рис. 4.** Расчетная модель конического пористо-сетчатого элемента роторного теплообменника (осевой плоский разрез):

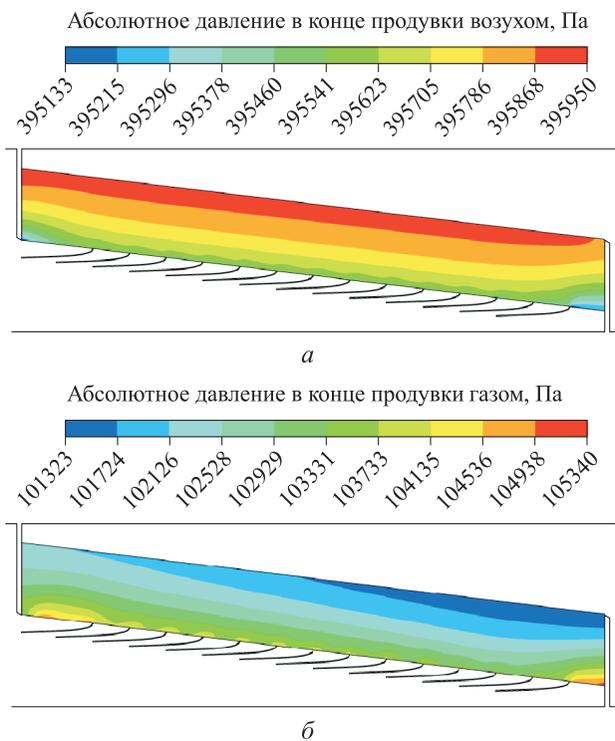
1 — сектор теплопередающего конического пористо-сетчатого теплопередающего элемента; 2 — распределительная решетка для поочередного протока газа и воздуха (жалюзи); 3 — сектор ячейки теплообменника; 4 и 5 — входные патрубки по воздуху и газу; 6 — стенка каркаса теплообменника

При выполнении расчетов были использованы следующие исходные данные: частота вращения теплообменника  $n = 24 \text{ мин}^{-1}$ ; расход газа (воздуха), проходящего через модельную матрицу,  $G = 1,334 \cdot 10^{-5} \text{ кг/с}$  (соответствует расходу газа или воздуха через весь теплообменник,  $G_{\Sigma} = 2 \text{ кг/с}$ ); температура газа  $T_{gas} = 965 \text{ К}$  и воздуха  $T_{air} = 470 \text{ К}$  на входе в теплообменник; на входе в теплообменник давление газа  $P_{gas} = 101325 \text{ Па}$  и воздуха  $P_{air} = 395167 \text{ Па}$ .

В результате численного моделирования были получены распределения температуры и давления в теплопередающей матрице пакета теплообменника (рис. 5, 6), а также значения потерь давления в теплообменнике и температур газа и воздуха на выходе из роторного теплообменника в каждый момент времени его вращения.



**Рис. 5.** Распределение температуры в пористо-сетчатой матрице на устоявшемся режиме в конце продувок воздухом (*a*) и газом (*б*)



**Рис. 6.** Распределение абсолютного давления в пористо-сетчатой матрице на устоявшемся режиме в конце продувок воздухом (*a*) и газом (*б*)

Значения степени регенерации  $\sigma$  и гидравлического сопротивления  $\Delta P$  теплообменника определялись по формулам:

$$\sigma = \frac{T_{mid} - T_{air}}{T_{gas} - T_{air}}, \quad (3)$$

$$\Delta P = \frac{\sum (P_i \Delta t)}{t}, \quad (4)$$

где  $T_{mid} = \frac{\sum (T_i \Delta t)}{t}$  — средняя интегральная температура воздуха на выходе из теплообменника за время половины его оборота;  $i$  — номер текущего шага по времени;  $T_i$  — температура воздуха на выходе теплообменника на  $i$ -м шаге времени;  $\Delta t$  — временной шаг;  $t$  — время половины оборота теплообменника.

В таблице представлены расчетные характеристики теплогидравлических процессов в роторном теплообменнике с коническими пористо-сетчатыми теплопередающими элементами в сравнении с экспериментальными данными. Данные таблицы свидетельствуют, что расчетные характеристики модельного теплогидравлического процесса с применением полученных формул (1) для фактора Колборна дают более близкое (отличающееся не более чем на 1,5 %) совпадение с результатами натурного эксперимента [15].

**Расчетные и экспериментальные характеристики роторного теплообменника с коническими пористо-сетчатыми теплопередающими элементами микротурбины мощностью 270 кВт**

Параметры процесса	Расчет с использованием		Экспериментальные исследования натурного образца роторного теплообменника [15]
	эмпирической формулы (1) [16]	уточненных зависимостей фактора Колборна (2)	
$\Delta P_{gas}$ , Па	3950	4130	4080
$\Delta P_{air}$ , Па	910	990	980
$\sigma$ , %	86,0	83,5	84,0

**Выводы.** 1. Проведено математическое моделирование теплогидравлических процессов в пористо-сетчатой матрице, состоящей из 10 слоев металлической сетки, используемой в теплопередающих элементах роторных теплообменников транспортных микротурбин малой мощности.

2. Получены уточненные зависимости фактора Колборна, описывающие процессы теплоотдачи при нагреве и охлаждении сеточной теплопередающей матрицы роторного теплообменника транспортных микротурбин.

3. Результаты расчета модельного теплогидравлического процесса в роторном теплообменнике микротурбины мощностью 270 кВт, проведенного с применением температурных зависимостей для фактора Колборна, показали хорошее совпадение с экспериментальными данными в пределах 1,5 %.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Красс М.С.* Электроэнергетика в экономике России // ЭКО. 2012. № 7. С. 136–150.
2. *Отчет о функционировании ЕЭС России в 2015 году* // Системный оператор ЕЭС: веб-сайт. URL: [http://so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2016/ups\\_rep\\_2015.pdf](http://so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2016/ups_rep_2015.pdf) (дата обращения: 04.04.2016).
3. *Бороздина О.Ю., Елисеева И.И., Мертинс К., Риттигхаузен Х.* Национальные стратегии атомной и ветровой энергетики в России и Германии // Финансы и бизнес. 2012. № 3. С. 30–39.
4. *BP statistical review of world energy 2015* // BP global: веб-сайт. URL: <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html> (дата обращения: 04.04.2016).
5. *Capstone Turbine Corporation (CPST)*. URL: <https://www.capstoneturbine.com/> (дата обращения: 04.04.2016).
6. *Combined heat and power systems technology development and demonstration 370 kW high efficiency microturbine* // SciTech Connect: веб-сайт. DOI: 10.2172/1224801 URL: <http://www.osti.gov/scitech/biblio/1224801/> (дата обращения: 05.05.2016).
7. *Elliott Group*. URL: <http://www.elliott-turbo.com> (дата обращения: 04.04.2016).
8. *Heidari-Kaydan A., Hajidavallo E.* Three-dimensional simulation of rotary air preheater in steam power plant // Applied Thermal Engineering. 2014. Vol. 73. No. 1. P. 399–407. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.08.013 URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431114006759>
9. *Turbec S.P.A.* URL: <http://www.turbec.com> (дата обращения: 04.04.2016).
10. *Mioralli P.C., Ganzarolli M.M.* Thermal analysis of a rotary regenerator with fixed pressure drop or fixed pumping power // Applied Thermal Engineering. 2013. Vol. 52. No. 1. P. 187–197. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2012.11.030 URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135943111200782X>
11. *Wilson D.G., Korakianitis T.P.* The design of high-efficiency turbomachinery and gas turbines. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1998.
12. *Wilson D.G., Pfahnl A.C.* A look at the automotive-turbine regenerator system and proposals to improve performance and reduce cost // SAE Technical Paper 970237, 1997. DOI: 10.4271/970237 URL: <http://papers.sae.org/970237>.
13. *Wilson D.G.* The basis for the prediction of high thermal efficiency in WTPI gas-turbine engines. 2002. 8 p. URL: <http://www.readbag.com/wilsonsolarpower-files-efficiency-basis-paper> (дата обращения: 04.05.2016).
14. *Алексеев Р.А., Костюков А.В., Косач Л.А.* Исследование процесса теплоотдачи в сетчатой матрице роторного теплообменника // Известия МГТУ «МАМИ». 2012. № 2. С. 168–173.
15. *Kostyukov A., Makarov A., Alexeev R., Merzlikin V.* The structured rotor-type heat exchange for microturbines // FISITA 2012 World Automotive congress. 27th — 30th November 2012. “Proceedings and Abstracts”. Paper Reference Number F2012-A07-025. Beijing, China. 2012. P. 78–79.
16. *Kays W.M., London A.L.* Compact heat exchangers. New York, 1964. 272 p.
17. *Плотников Д.А.* Разработка и исследование дисковых секционных автомобильных газотурбинных двигателей. Дис. ... канд. техн. наук. М.: МАМИ, 1981. 151 с.
18. *Елисеев С.Ю.* Теоретическое обоснование и реализация методов улучшения характеристик транспортных регенеративных газотурбинных двигателей. Дис. ... канд. техн. наук. М.: МАМИ, 2005. 133 с.

19. Wu Z., Melnik R.V.N., Borup F. Model-based analysis and simulation of regenerative heat wheel // *Energy and Building*. 2006. Vol. 38. No. 5. P. 502–514. DOI: 10.1016/j.enbuild.2005.08.009 URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778805001714>

20. Wei X.J., Joshi Y.K., Ligrani P.M. Numerical simulation of laminar flow and heat transfer inside a microchannel with one dimpled surface // *J. of Electronic Packaging*. 2007. Vol. 129. No. 1. P. 63–70. DOI: 10.1115/1.2429711 URL: <http://electronicpackaging.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1408612>

**Костюков Андрей Вениаминович** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергоустановки для транспорта и малой энергетики» Московского политехнического университета (Российская Федерация, 107023, Москва, Б. Семёновская ул., д. 38).

**Макаров Александр Романович** — канд. техн. наук, профессор кафедры «Эксплуатация автотранспортных средств» Российского университета дружбы народов (Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6).

**Мерзликин Владимир Гаврилович** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологии и оборудование машиностроения» Московского политехнического университета (Российская Федерация, 107023, Москва, Б. Семёновская ул., д. 38), доцент кафедры «Технико-экономические системы» Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова (Российская Федерация, 117997, Москва, Стремянный переулок, д. 36).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Костюков А.В., Макаров А.Р., Мерзликин В.Г. Исследование теплогидравлических процессов в пористо-сечетчатой матрице роторного теплообменника // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*. 2017. № 1. С. 129–140. DOI: 10.18698/0236-3941-2017-1-129-140

**RESEARCH OF THERMAL-HYDRAULIC PROCESSES IN POROUS NET-SHAPED MATRIX FOR ROTARY REGENERATOR**

A.V. Kostyukov<sup>1</sup>

A.R. Makarov<sup>1,2</sup>

V.G. Merzlikin<sup>1,3</sup>

MerzlikinV@mail.ru

<sup>1</sup> Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup> Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russian Federation

<sup>3</sup> Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russian Federation

**Abstract**

This study focuses on physical and mathematical simulation of thermohydraulic processes in porous-mesh matrix consisting of 10 layers of metal mesh used in the heat transfer elements of rotary heat exchangers. We obtained the dependences describing the heating and cooling processes in porous-mesh matrix. To test the received dependences, we calculated the rotary heat exchanger effectiveness of the transport microturbine with the capacity of 270 kW by mathematical simulation of thermohydraulic processes in porous-mesh matrix. The results of calculating the heat exchanger effectiveness with the refined temperature dependences of Colborne factor showed good agreement with the experimental data in the range of 1.5 %

**Keywords**

*Microturbine, heat-exchanger, porous-mesh matrix, heat transfer*

## REFERENCES

- [1] Krass M.S. Electric-power industry in the Russian economy. *EKO [ECO]*, 2012, no. 7, pp. 136–150.
- [2] Otchet o funktsionirovanii EES Rossii v 2015 godu [Report on the functioning of unified electric power system (UEPS) of Russia in 2015]. Sistemnyy operator EES: web-site. Available at: [http://soups.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2016/ups\\_rep2015.pdf](http://soups.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2016/ups_rep2015.pdf) (accessed: 04.04.2016).
- [3] Borozdina O.Yu., Eliseeva I.I., Mertins K., Rittigkhauzen Kh. National strategies for development of nuclear energy in Russia and Germany. *Finansy i biznes [Finance and Business]*, 2012, no. 3, pp. 30–39 (in Russ.).
- [4] BP statistical review of world energy 2015. BP global: website. Available at: <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html> (accessed: 04.04.2016).
- [5] Capstone Turbine Corporation (CPST). Available at: <https://www.capstoneturbine.com/> (accessed: 04.04.2016).
- [6] Combined heat and power systems technology development and demonstration 370 kW high efficiency microturbine. SciTech Connect: website. DOI: 10.2172/1224801 Available at: <http://www.osti.gov/scitech/biblio/1224801/> (accessed: 05.05.2016).
- [7] Elliott Group. Available at: <http://www.elliott-turbo.com> (accessed 04.04.2016).
- [8] Heidari–Kaydan A., Hajidavallo E. Three-dimensional simulation of rotary air preheater in steam power plant. *Applied Thermal Engineering*, 2014, vol. 73, no. 1, pp. 399–407. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.08.013 Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431114006759>
- [9] Turbec S.P.A. Available at: <http://www.turbec.com> (accessed: 04.04.2016).
- [10] Mioralli P.C., Ganzarolli M.M. Thermal analysis of a rotary regenerator with fixed pressure drop or fixed pumping power. *Applied Thermal Engineering*, 2013, vol. 52, no. 1, pp. 187–197. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2012.11.030 Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135943111200782X>
- [11] Wilson D.G., Korakianitis T.P. The design of high-efficiency turbomachinery and gas turbines. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1998.
- [12] Wilson D.G., Pfahl A.C. A look at the automotive-turbine regenerator system and proposals to improve performance and reduce cost. SAE Technical Paper 970237, 1997. DOI: 10.4271/970237 Available at: <http://papers.sae.org/970237>.
- [13] Wilson D.G. The basis for the prediction of high thermal efficiency in WTPI gas-turbine engines. 2002. 8 p. Available at: <http://www.readbag.com/wilsonsolarpower-files-efficiency-basis-paper> (accessed: 04.05.2016).
- [14] Alekseev R.A., Kostyukov A.V., Kosach L.A. Investigation of the heat transfer process in a mesh matrix of a rotary heat exchanger. *Izvestiya MGTU “MAMI”*, 2012, no. 2 (14), pp. 168–173 (in Russ.).
- [15] Kostyukov A., Makarov A., Alexeev R., Merzlikin V. The structured rotor-type heat exchange for microturbines. *FISITA 2012 World Automotive congress. 27th — 30th November 2012. “Proceedings and Abstracts”*. Paper Reference Number F2012-A07-025. Beijing, China. 2012. P. 78–79.

- [16] Kays W.M., London A.L. Compact heat exchangers. New York. 1964. 272 p.
- [17] Plotnikov D.A. Razrabotka i issledovanie diskovykh sektionnykh avtomobil'nykh gazoturbinykh dvigateley: dis. kand. tekhn. nauk [Development and research of the structural rotary regenerators of gas turbine engine: kand. tech. sci. diss.]. Moscow, MAMI Publ., 1981. 151 p.
- [18] Eliseev S.Yu. Teoreticheskoe obosnovanie i realizatsiya metodov uluchsheniya kharakteristik transportnykh regenerativnykh gazoturbinykh dvigateley: dis. kand. tekhn. nauk [Theoretical basis and implementation methods to improve characteristics of transport regenerative gas turbine engines: kand. tech. sci. diss.]. Moscow, MAMI Publ., 2005. 133 p.
- [19] Wu Z., Melnik R.V.N., Borup F. Model-based analysis and simulation of regenerative heat wheel. *Energy and Building*, 2006, vol. 38, no. 5, pp. 502–514.  
DOI: 10.1016/j.enbuild.2005.08.009 Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778805001714>
- [20] Wei X.J., Joshi Y.K., Ligrani P.M. Numerical simulation of laminar flow and heat transfer inside a microchannel with one dimpled surface. *J. of Electronic Packaging*, 2007, vol. 129, no. 1, pp. 63–70. DOI: 10.1115/1.2429711  
Available at: <http://electronicpackaging.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1408612>

**Kostyukov A.V.** — Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor of Power Plants for Transport and Small-Scale Power Generation Department, Moscow Polytechnic University (B. Semenovskaya ul. 38, Moscow, 107023 Russian Federation).

**Makarov A.R.** — Cand. Sci. (Eng.), Professor of Exploitation of Motor Vehicles Department, Engineering Faculty, Peoples' Friendship University of Russia (ul. Miklouho-Maclay 6, Moscow, 117198 Russian Federation).

**Merzlikin V.G.** — Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor of Technology and Equipment of Mechanical Engineering Department, Moscow Polytechnic University (B. Semenovskaya ul. 38, Moscow, 107023 Russian Federation), Assoc. Professor of Technical and Physical Systems Department, Plekhanov Russian University of Economics (Stremyanny per. 36, Moscow, 117997 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Kostyukov A.V., Makarov A.R., Merzlikin V.G. Research of Thermal-Hydraulic Processes in Porous Net-Shaped Matrix for Rotary Regenerator. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. m. N.E. Baumana, Mashinostroyeniye* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Ser. Mech. Eng.], 2017, no. 1, pp. 129–140. DOI: 10.18698/0236-3941-2017-1-129-140

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
[press@bmstu.ru](mailto:press@bmstu.ru) [www.baumanpress.ru](http://www.baumanpress.ru)

Подписано в печать 21.02.2017

Формат 70 × 108/16

Усл.-печ. л. 12,25

Отпечатано в ПАО «Т8 Издательские Технологии».

109316, Москва, Волгоградский пр-т, д. 42, корп. 5.

Тираж 100 экз.