

УДК 621.565.945.1

doi: 10.18698/0536-1044-2018-11-78-83

## Исследование модели змеевикового теплообменного аппарата с изменяемой геометрией в широком диапазоне чисел Рейнольдса

М.С. Франсузов<sup>1,2</sup>, С.А. Лопухов<sup>1</sup>, А.П. Королева<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова

<sup>2</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана

## An Investigation of a Model of a Coiled Heat Exchanger with Varying Geometry in a Wide Range of Reynolds Numbers

M.S. Frantsuzov<sup>1,2</sup>, S.A. Lopukhov<sup>1</sup>, A.P. Koroleva<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Federal State Unitary Enterprise — Baranov Central Institute of Aviation Motors CIAM

<sup>2</sup> Bauman Moscow State Technical University

Исследовано влияние геометрических размеров змеевикового теплообменного аппарата на характеристики течения в межтрубном пространстве. Проведен конструктивный расчет змеевикового теплообменного аппарата. Выполнено численное моделирование теплообмена для двухмерной модели такого аппарата с изменяемым диаметром навивки внутреннего змеевика. Для каждой из рассматриваемых геометрических моделей выявлены особенности течения и теплообмена при различных значениях числа Рейнольдса. Представлены поля температуры и скорости воздушного потока для различных геометрических моделей при одинаковом расходе теплоносителя. Получены тепловая и гидравлическая характеристики.

**Ключевые слова:** змеевиковый теплообменный аппарат, численное моделирование теплообмена, стационарная задача, тепловая и гидравлическая характеристики

In this paper, the influence of geometric dimensions of a coiled heat exchanger on the flow characteristics in the intertubular space is studied. A design calculation of the coiled heat exchanger is performed. Numerical simulation of heat exchange for a 2D model of an exchanger with a varying diameter of inner coiling is carried out. For each of the geometric models under consideration, conclusions about specific features of flow and heat transfer for different Reynolds numbers are drawn. Fields of temperature and air flow velocity for various geometric models with equal coolant flow rate are presented. Thermal and hydraulic characteristics are obtained.

**Keywords:** coiled heat exchanger, numerical simulation of heat transfer, stationary problem, thermal and hydraulic characteristics

Змеевиковый теплообменный аппарат (ЗТА) — это устройство, в котором теплообменная поверхность выполнена в виде объемного или плоского змеевика, расположенного в корпусе ЗТА, а теплоноситель подается с высоким давлением в трубное пространство змеевика [1, 2].

В настоящее время в некоторых отраслях промышленности, в том числе в ядерной и авиастроительной, существует необходимость охлаждения рабочего тела высокой температуры в ограниченном пространстве. Для решения этой задачи используют ЗТА, так как они обла-

дают рядом преимуществ перед другими теплообменными аппаратами:

- широким диапазоном рабочих давлений и температур;
- самокомпенсацией термических напряжений;
- относительно большой площадью теплообмена при малых габаритных размерах.

Изучение гидродинамических и теплообменных процессов, происходящих в ЗТА, представляет интерес для различных отраслей промышленности.

В работе [3] проведено численное исследование ЗТА промежуточного охлаждения. Акцент сделан на сравнении результатов, полученных для численных экспериментов с различными типами граничных условий.

В статьях [4, 5] выполнено экспериментальное сравнение трех моделей типичного ЗТА. Получены зависимости числа Нуссельта от числа Рейнольдса в трубном и межтрубном пространствах для прямо- и противоточной схем подачи теплоносителей.

В публикациях [6, 7] с помощью численного моделирования и экспериментов исследованы характеристики течения через змеевик спиральной формы. Получены графические зависимости температуры на выходе, числа Нуссельта и падения давления от массового расхода жидкости, а также градиенты скоростей в сечениях змеевика во всех витках. Экспериментальные данные были сопоставлены с результатами математического расчета.

В работах [8–10] проведено экспериментальное исследование характеристик течения в водо-водяном вертикальном ЗТА с цилиндрическим змеевиком. Рассмотрены три модели ЗТА. Предложена критериальная зависимость для определения числа Нуссельта.

Цель работы — исследовать с помощью численного моделирования влияние геометрических размеров на тепловые и гидравлические характеристики течения в межтрубном пространстве ЗТА.

Рассмотрены пять геометрических моделей ЗТА с различными диаметрами навивки внут-

ренного змеевика. Получены поля температур, скоростей и давлений. Рассчитаны и сравнены тепловая и гидравлическая характеристики разных геометрических моделей.

**Численное моделирование теплообмена в межтрубном пространстве.** По результатам одномерного расчета теплообменного аппарата [1, 2] получены следующие размеры ЗТА: диаметр обечайки  $D = 45$  мм, диаметры навивки змеевиков — внешнего  $D_1 = 35$  мм и внутреннего  $D_2 = 25$  мм, продольный шаг змеевиков  $S = 12$  мм, числа витков змеевиков — внешнего  $n_1 = 18$  и внутреннего  $n_2 = 19$ , длина ЗТА  $L = 236$  мм. Змеевики — стальные трубки размером  $6 \times 1$  мм.

Исследование течения воздуха в межтрубном пространстве проводилось при его неизменных свойствах.

Геометрическая расчетная модель выполнена в виде двухмерного канала с отверстиями, заменяющими змеевиковые трубки. Для увеличения скорости расчета задачи выбрана осесимметричная геометрия (рис. 1).

Расчетная область представляет собой внутреннюю газодинамическую часть канала, в которой построена сетка. Общее число элементов разбиения варьировалось от 54 843 до 55 751 ед. в зависимости от геометрии.

Расчетная сетка адаптирована для разрешения возмущений, возникающих в прилегающих к трубкам слоях (рис. 2).

Решена стационарная задача моделирования вязкого течения в модели с переменной геометрией и не зависящими от температуры теплофизическими свойствами теплоносителя в широком диапазоне чисел Рейнольдса. Температура воздуха на входе составляла 2000 К. На стенках змеевиков принято граничное условие первого рода: температура — 900 К, толщина стенки — 1 мм.

**Результаты численного моделирования.** На рис. 3 и 4 приведены поля параметров воздушного потока — температуры и скорости — для различных геометрических моделей при одинаковой входной скорости потока  $u = 60$  м/с.

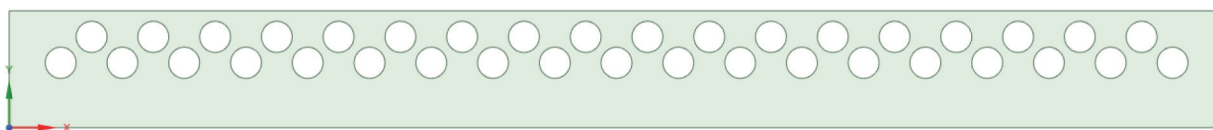


Рис. 1. Геометрическая расчетная модель с диаметром навивки внутреннего змеевика  $D_2 = 25$  мм

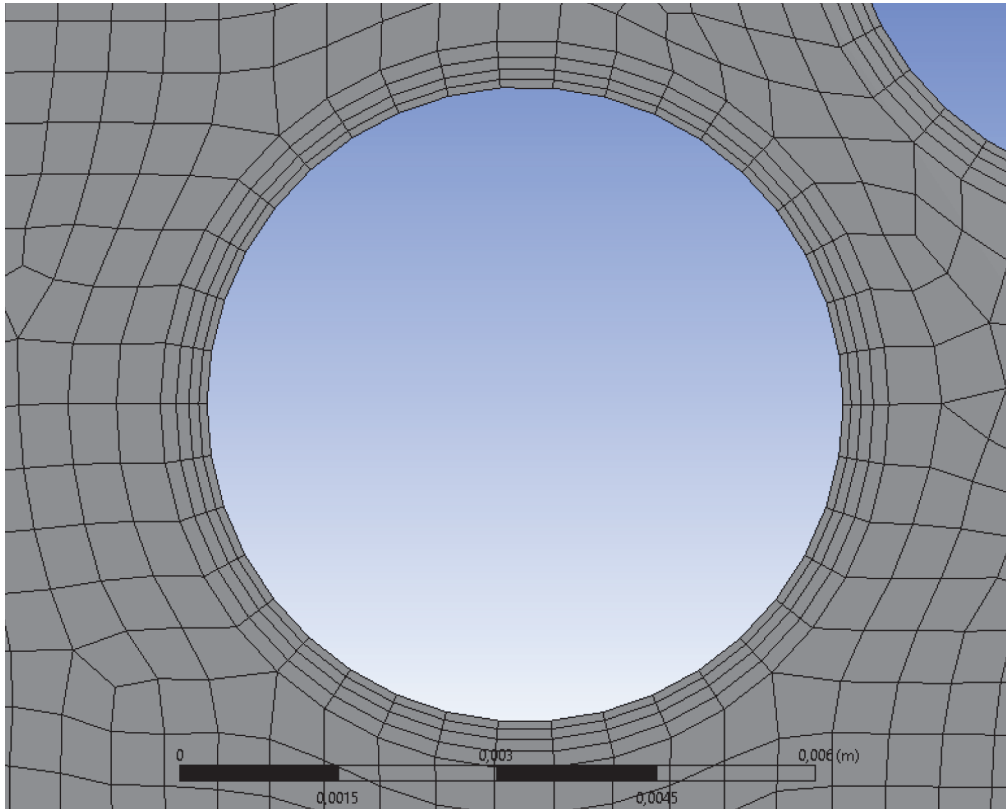


Рис. 2. Расчетная сетка с уплотнениями

При уменьшении диаметра навивки внутреннего змеевика  $D_2$  увеличивается масса воздуха, попадающего в пространство между змеевиковыми трубками, и уменьшается ядро потока в центре, что обеспечивает лучшее и более равномерное по объему ЗТА охлаждение теплоносителя. В табл. 1 приведены значения перепада температур  $\Delta T$  воздуха между входом и выходом из ЗТА при различных значениях входной ско-

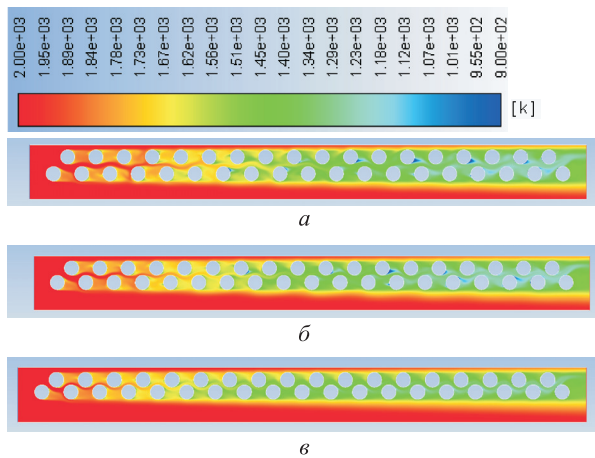
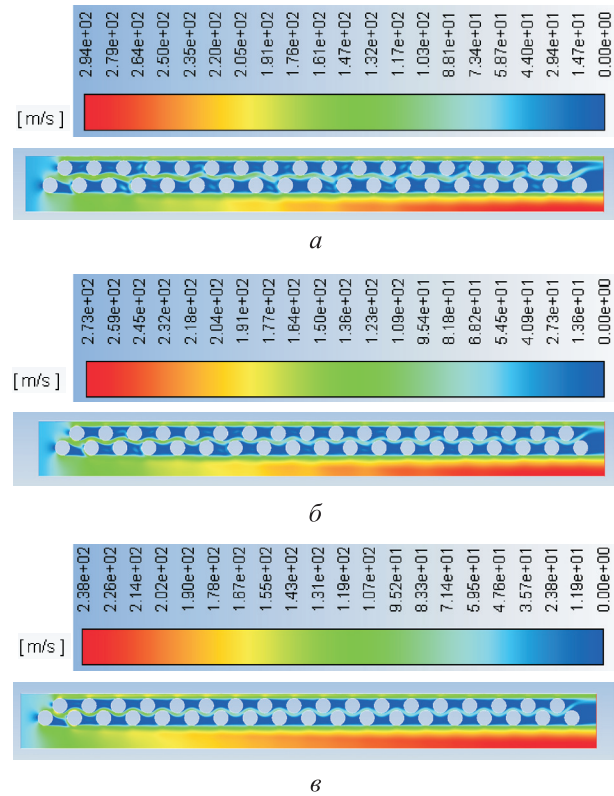
Рис. 3. Поля температуры воздуха, К, в моделях ЗТА с диаметром навивки внутреннего змеевика  $D_2 = 21$  (а), 23 (б) и 25 мм (в)Рис. 4. Поля скорости воздушного потока, м/с, в моделях ЗТА с диаметром навивки внутреннего змеевика  $D_2 = 21$  (а), 23 (б) и 25 мм (в)

Таблица 1

**Значения перепада температур воздуха между входом и выходом из ЗТА при различных значениях входной скорости потока и диаметра навивки внутреннего змеевика**

Диаметр навивки внутреннего змеевика $D_2$ , мм	Перепад температур $\Delta T$ , К, при скорости потока $u$ , м/с				
	20	40	60	80	100
25	394	345	311	298	257
24	407	358	319	301	261
23	442	403	342	321	289
22	495	432	385	336	298
21	517	451	398	344	301

рости потока и диаметра навивки внутреннего змеевика.

Как видно из табл. 1, при увеличении входной скорости потока перепад температур снижается. С уменьшением диаметра навивки внутреннего змеевика перепад температур растет, что свидетельствует о более полном использовании поверхности теплообмена при таком изменении геометрии.

В табл. 2 приведены значения перепада давлений  $\Delta p$  воздуха между входом и выходом из ЗТА от входной скорости потока и диаметра навивки внутреннего змеевика

Из табл. 2 следует, что при повышении входной скорости потока увеличивается перепад давлений, так как при вязком трении о трубки змеевиков он пропорционален квадрату скорости потока. С уменьшением диаметра навивки внутреннего змеевика растет перепад давлений, так как вследствие улучшения гидродинамических характеристик потока повышается его средняя скорость в призмеевиковой области, а следовательно, интенсифицируется трение.

Таблица 2

**Значения перепада давлений воздуха между входом и выходом из ЗТА при различных значениях входной скорости потока и диаметра навивки внутреннего змеевика**

Диаметр навивки внутреннего змеевика $D_2$ , мм	Перепад давлений $\Delta p$ , кПа, при скорости потока $u$ , м/с				
	20	40	60	80	100
25	4,5	15,9	33,5	56,9	86,1
24	4,9	17,8	37,1	61,9	93,4
23	6,1	21,6	43,8	71,7	104,1
22	7,1	24,1	47,9	77,9	113,6
21	7,6	26,1	50,6	81,8	118,7

В качестве тепловой характеристики выбрана зависимость числа Нуссельта  $Nu$  от числа Рейнольдса  $Re$  (рис. 5, а), в качестве гидравлической — зависимость коэффициента гидравлического сопротивления  $\xi$  от числа Рейнольдса  $Re$  (рис. 5, б).

Тепловая характеристика  $Nu = f(Re)$  имеет возрастающий характер (вследствие интенсификации конвективного теплопереноса при увеличении числа Рейнольдса  $Re$ ), гидравлическая  $\xi = f(Re)$  — типичный убывающий характер для турбулентного режима течения.

### Выводы

1. При уменьшении диаметра навивки внутреннего змеевика сокращается площадь поверхности змеевиков, а следовательно, и потенциальная площадь теплообмена. Однако при таком изменении геометрии значительно улучшаются гидродинамические характеристики потока, обтекающего змеевики, что позволяет в большей степени использовать имеющуюся

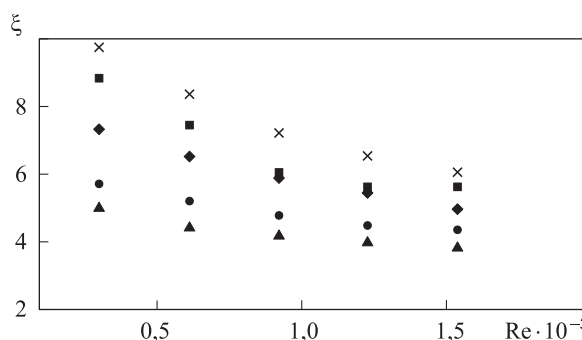
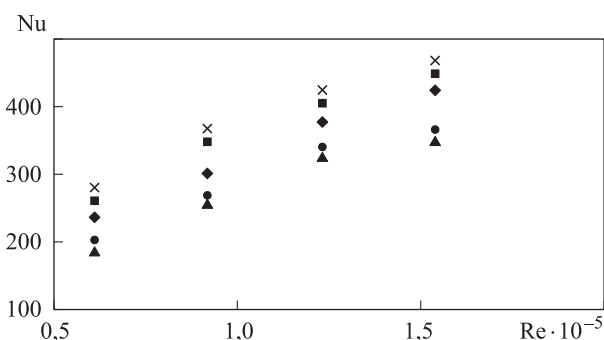


Рис. 5. Тепловая (а) и гидравлическая (б) характеристики ЗТА с разным диаметром навивки внутреннего змеевика:

▲ —  $D_2 = 25$  мм; ● —  $D_2 = 24$  мм; ◆ —  $D_2 = 23$  мм; ■ —  $D_2 = 22$  мм; x —  $D_2 = 21$  мм

площадь теплообмена. Если диаметр навивки внутреннего змеевика равен 25 мм, то при обтекании змеевиков образуются обширные застойные зоны воздуха, в которых он почти не движется. Это приводит к уменьшению площади активного теплообмена.

2. В рассмотренном диапазоне диаметра навивки внутреннего змеевика тепловая характеристика изменяется на 25...33 %, а гидравлическая — на 36...48 % в зависимости от режима течения.

## Литература

- [1] Генералов М.Б. *Машиностроение. Энциклопедия. Машины и аппараты химических и нефтехимических производств*. Т. IV-12. Москва, Машиностроение, 2004, с. 369–376.
- [2] Фролов К.В. *Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи)*. Санкт-Петербург, Химиздат, 2010, с. 214–250.
- [3] Солонин В.И., Сатин А.А. Моделирование теплообмена в змеевиковом теплообменнике применительно к реакторной установке «УНИТЕРМ». *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2014, № 10, с. 398–412, doi: <http://dx.doi.org/10.7463/1014.0727220>
- [4] Shokouhmand H., Salimpour M.R., Akhvan-Behabadi M.A. Experimental investigation of shell and coiled heat exchangers using Wilson plots. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2007, vol. 35(1), pp. 84–92, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2007.06.001
- [5] Chen C.-N., Han J.-T., Shao L., Chen W.-W., Jen T.-C. Experimental study on CHF characteristics of R134a flow boiling in horizontal helically-coiled tubes. *14<sup>th</sup> International Heat Transfer Conference*, 8–13 August 2010, Washington, 2010, vol. 1, pp. 337–346, doi: 10.1115/IHTC14-22579
- [6] Naphon P. Thermal performance and pressure drop of the helical-coil heat exchangers with and without helically crimped fins. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2007, vol. 34, is. 3, pp. 321–330, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2006.11.009
- [7] Kharat R., Bhardwaj N., Jha R.S. Development of heat transfer coefficient correlation for concentric helical coil heat exchanger. *International Journal of Thermal Sciences*, 2009, vol. 48(12), pp. 2300–2308, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2009.04.008
- [8] Ghorbani N., Taherian H., Gorji M., Mirgolbabaei H. Experimental study of mixed convection heat transfer in vertical helically coiled tube heat exchangers. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2010, vol. 34(7), pp. 900–905, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2010.02.004
- [9] Rennie T.J., Raghavan V.G.S. Experimental studies of a double-pipe helical heat exchanger. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2005, vol. 29(8), pp. 919–924, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2005.02.001
- [10] Ghorbani N., Taherian H., Gorji M., Mirgolbabaei H. An experimental study of thermal performance of shell-and-coil heat exchangers. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2010, vol. 37(7), pp. 775–781, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2010.02.001

## References

- [1] Generalov M.B. *Mashinostroyeniye. Entsiklopediya. Mashiny i apparaty khimicheskikh i neftekhimicheskikh proizvodstv* [Engineering. Encyclopedia. Machines and apparatus of chemical and petrochemical industries]. Vol. 4-12. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 2004, pp. 369–376.
- [2] Frolov K.V. *Metody rascheta protsessov i apparatov khimicheskoy tekhnologii (primery i zadachi)* [Methods for calculating the processes and devices of chemical technology (examples and tasks)]. Sankt-Petersburg, Khimizdat publ., 2010, pp. 214–250.
- [3] Solonin V.I., Satin A.A. Modeling of heat transfer in the helical-coil heat exchanger for the reactor facility “UNITERM”. *Science and education: scientific publication*, 2014, no. 10, pp. 398–412, doi: <http://dx.doi.org/10.7463/1014.0727220> (in Russ.).
- [4] Shokouhmand H., Salimpour M.R., Akhvan-Behabadi M.A. Experimental investigation of shell and coiled heat exchangers using Wilson plots. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2007, vol. 35(1), pp. 84–92, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2007.06.001
- [5] Chen C.-N., Han J.-T., Shao L., Chen W.-W., Jen T.-C. Experimental study on CHF characteristics of R134a flow boiling in horizontal helically-coiled tubes. *14<sup>th</sup> International Heat*

- Transfer Conference*, 8–13 August 2010, Washington, 2010, vol. 1, pp. 337–346, doi: 10.1115/HTC14-22579
- [6] Naphon P. Thermal performance and pressure drop of the helical-coil heat exchangers with and without helically crimped fins. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2007, vol. 34, is. 3, pp. 321–330, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2006.11.009
- [7] Kharat R., Bhardwaj N., Jha R.S. Development of heat transfer coefficient correlation for concentric helical coil heat exchanger. *International Journal of Thermal Sciences*, 2009, vol. 48(12), pp. 2300–2308, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2009.04.008
- [8] Ghorbani N., Taherian H., Gorji M., Mirgolbabaei H. Experimental study of mixed convection heat transfer in vertical helically coiled tube heat exchangers. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2010, vol. 34(7), pp. 900–905, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2010.02.004
- [9] Rennie T.J., Raghavan V.G.S. Experimental studies of a double-pipe helical heat exchanger. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2005, vol. 29(8), pp. 919–924, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2005.02.001
- [10] Ghorbani N., Taherian H., Gorji M., Mirgolbabaei H. An experimental study of thermal performance of shell-and-coil heat exchangers. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2010, vol. 37(7), pp. 775–781, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2010.02.001

Статья поступила в редакцию 03.09.2018

## Информация об авторах

**ФРАНЦУЗОВ Максим Сергеевич** — младший научный сотрудник отдела «Аэрокосмические двигатели». Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова; ассистент кафедры «Теплофизика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: mfrancuzov@yandex.ru).

**ЛОПУХОВ Станислав Александрович** — инженер отдела «Газовая динамика силовых установок». Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова (111116, Москва, Российская Федерация, Авиамоторная ул., д. 2, e-mail: stanislav.lopukhov1996@gmail.com).

**КОРОЛЕВА Анастасия Павловна** — инженер отдела «Аэрокосмические двигатели». Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова (111116, Москва, Российская Федерация, Авиамоторная ул., д. 2, e-mail: akoroleva@ciam.ru).

## Information about the authors

**FRANTSUZOV Maksim Sergeevich** — Junior Research Scientist, Aerospace Engine Department. Federal State Unitary Enterprise — Baranov Central Institute of Aviation Motors CIAM; Assistant Lecturer, Department of Thermophysics, Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: mfrancuzov@yandex.ru).

**LOPUKHOV Stanislav Aleksandrovich** — Engineer, Gas Dynamics of Power Plants Department. Federal State Unitary Enterprise — Baranov Central Institute of Aviation Motors CIAM (111116, Moscow, Russian Federation, Avaimotornaya St., Bldg. 2, e-mail: stanislav.lopukhov1996@gmail.com).

**KOROLEVA Anastasia Pavlovna** — Engineer, Aerospace Engine Department. Federal State Unitary Enterprise — Baranov Central Institute of Aviation Motors CIAM (111116, Moscow, Russian Federation, Avaimotornaya St., Bldg. 2, e-mail: akoroleva@ciam.ru).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Французов М.С., Лопухов С.А., Королева А.П. Исследование модели змеевикового теплообменного аппарата с изменяемой геометрией в широком диапазоне чисел Рейнольдса. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2018, № 11, с. 78–83, doi: 10.18698/0536-1044-2018-11-78-83

### Please cite this article in English as:

Frantsuzov M.S., Lopukhov S.A., Koroleva A.P. An Investigation of a Model of a Coiled Heat Exchanger with Varying Geometry in a Wide Range of Reynolds Numbers. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2018, no. 11, pp. 78–83 (in Russ.), doi: 10.18698/0536-1044-2018-11-78-83