

УДК 621.565.945.1

doi: 10.18698/0536-1044-2019-5-50-57

Исследование влияния рода граничных условий на интегральные характеристики стендового змеевикового теплообменного аппарата

М.С. Французов^{1,2}, С.А. Лопухов², А.П. Королева²

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана

²ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова»

A Study of the Influence of the Boundary Conditions Type on Integral Characteristics of a Bench Coiled Heat Exchanger

M.S. Frantsuzov^{1,2}, S.A. Lopukhov², A.P. Koroleva²

¹Bauman Moscow State Technical University

²Federal State Unitary Enterprise — Baranov Central Institute of Aviation Motors CIAM

Проведено исследование влияния рода граничных условий на такие интегральные характеристики стендового змеевикового теплообменного аппарата, как перепады температуры и давления. Определено изменение интегральных характеристик в межтрубном пространстве такого аппарата при задании эквивалентных граничных условий первого, второго и третьего рода. Для рассмотренной геометрической модели змеевикового теплообменного аппарата выполнено численное моделирование в широком диапазоне чисел Рейнольдса с учетом реальных теплофизических свойств воздуха. Получены поля температуры, давления воздуха в межтрубном пространстве теплообменного аппарата.

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

A study of the influence of the boundary conditions type on such integral characteristics of a bench coiled heat exchanger as temperature and pressure fluctuations is presented in this paper. The change in the integral characteristics in the annular space of the heat exchanger was determined when specifying the equivalent boundary conditions of the first, second and third types. For the studied geometric model of the heat exchanger, numerical simulation was carried out in a wide range of Reynolds numbers taking into account the real thermal properties of the air. The fields of temperature, pressure and current density distribution in the annular space of the heat exchanger were obtained.

Keywords: coiled heat exchanger, numerical simulation of heat exchange, stationary problem, thermal and hydraulic characteristics, equivalent boundary conditions

Змеевиковые теплообменные аппараты (ЗТА) — это устройства, в которых теплообменная поверхность выполнена в виде объемного или плоского змеевика, расположенного в корпусе

ЗТА, а теплоноситель подается под высоким давлением в трубное пространство змеевика [1, 2].

ЗТА получили широкое распространение в авиационной промышленности благодаря та-

ким достоинствам, как относительно высокая плотность теплового потока, широкий диапазон рабочих температур и давлений. ЗТА используют как в летательных аппаратах, так и в стендовых и экспериментальных установках.

Представление о влиянии различных факторов на задачи численного моделирования позволяет решать эти задачи корректно. Одним из таких факторов можно считать влияние применяемого рода термических граничных условий (ГУ) на решение задачи.

В статье [3] проведено численное исследование ЗТА промежуточного охлаждения. Акцент сделан на сравнение результатов, полученных для численных экспериментов с ГУ разного рода.

В работах [4, 5] выполнено экспериментальное исследование характеристик течения потока в водо-водяном вертикальном ЗТА с цилиндрическим змеевиком. Рассмотрены три модели ЗТА. Предложена критериальная зависимость для определения числа Нуссельта.

В публикациях [6–8] исследовано течение теплоносителя в спиральных трубках трех различных конфигураций. Получены зависимости температуры, давления, коэффициента теплопередачи и числа Нуссельта от расхода теплоносителя в трубах.

В статьях [9, 10] проведено экспериментальное сравнение трех моделей типичного ЗТА. Найдены зависимости числа Нуссельта Nu от числа Рейнольдса Re для трубного и межтрубного пространств при использовании прямой и противоточной схем подачи теплоносителей. Получена критериальная зависимость для определения числа Нуссельта.

Цель работы — исследование влияния рода ГУ на интегральные характеристики — перепады температуры и давления в межтрубном пространстве ЗТА.

Определение этих интегральных характеристик важно, так как они служат для расчета тепловой и гидравлической характеристик ЗТА. Получены поля температуры, давления и плотности теплового потока в межтрубном пространстве ЗТА для широкого диапазона чисел Рейнольдса, отражающие особенности гидродинамики и теплообмена. Приведены результаты сравнения перепадов температуры и давления в зависимости от числа Рейнольдса и рода ГУ.

Численное моделирование теплообмена в межтрубном пространстве ЗТА. Для рассматриваемой геометрической модели выбраны

Таблица 1

Зависимость теплофизических свойств воздуха от температуры

| Теплофизическая величина | Полиномиальная зависимость |
|------------------------------|--|
| Изобарная теплоемкость | $c_p = -4,116 \cdot 10^{-15} T^5 + 1,406 \cdot 10^{-10} T^4 - 5,847 \cdot 10^{-7} T^3 + 8,81 \cdot 10^{-4} T^2 - 0,335 T + 1043$ |
| Кинематическая вязкость | $\mu = 3,886 \cdot 10^{-14} T^3 - 6,38 \cdot 10^{-11} T^2 + 7,759 \cdot 10^{-8} T - 8,917 \cdot 10^{-9}$ |
| Коэффициент теплопроводности | $\lambda = -1,639 \cdot 10^{-13} T^4 + 3,866 \cdot 10^{-10} T^3 - 4,134 \cdot 10^{-7} T^2 + 2,493 \cdot 10^{-4} T - 0,018$ |

следующие размеры ЗТА [1, 2]: диаметр обечайки $D = 40$ мм; диаметр навивки змеевика $D_1 = 24$ мм; продольный шаг змеевика $S = 12$ мм; число витков змеевика $n_1 = 15$; длина ЗТА $L = 200$ мм. В качестве змеевика использована стальная трубка размером 6×1 мм. Согласно работе [1], длина ЗТА должна быть равна 180 мм, однако для исследуемой геометрии расчетная область была искусственно увеличена на 20 мм для корректного решения задачи вблизи выходного сечения.

Исследование течения воздуха в межтрубном пространстве выполнено с учетом зависимости его теплофизических свойств от температуры. Зависимость плотности воздуха от температуры принята такой же, как у идеального газа. Составлены полиномиальные зависимости изобарной теплоемкости, кинематической вязкости и коэффициента теплопроводности от температуры T в диапазоне 200...2500 К (табл. 1).

Моделирование течения воздуха и теплообмена проводилось в двумерной осесимметричной постановке, учитывающей особенности геометрии ЗТА. Геометрическая расчетная модель имела вид двумерного канала с пятнадцатью торовыми элементами, заменяющими спиральный змеевик (рис. 1). Торовые элементы диаметром 24 мм располагались с шагом 12 мм.

Расчетная область представляла собой внутреннюю газодинамическую часть канала, в которой была построена сетка. Общее число элементов разбиения — 96450, толщина сеточного пограничного слоя — $5 \cdot 10^{-4}$ м, коэффициент сгущения — 1,1, количество слоев сгущения — 8. Минимальный размер элементов составлял $3 \cdot 10^{-6}$ м, максимальный — $3 \cdot 10^{-4}$ м.

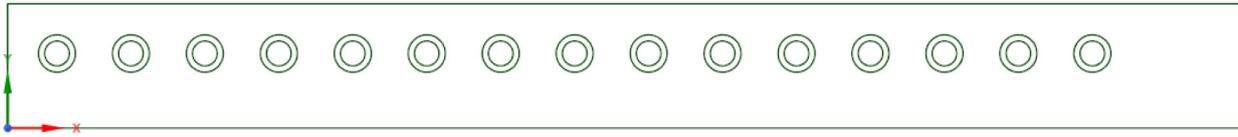


Рис. 1. Геометрическая расчетная модель ЗТА

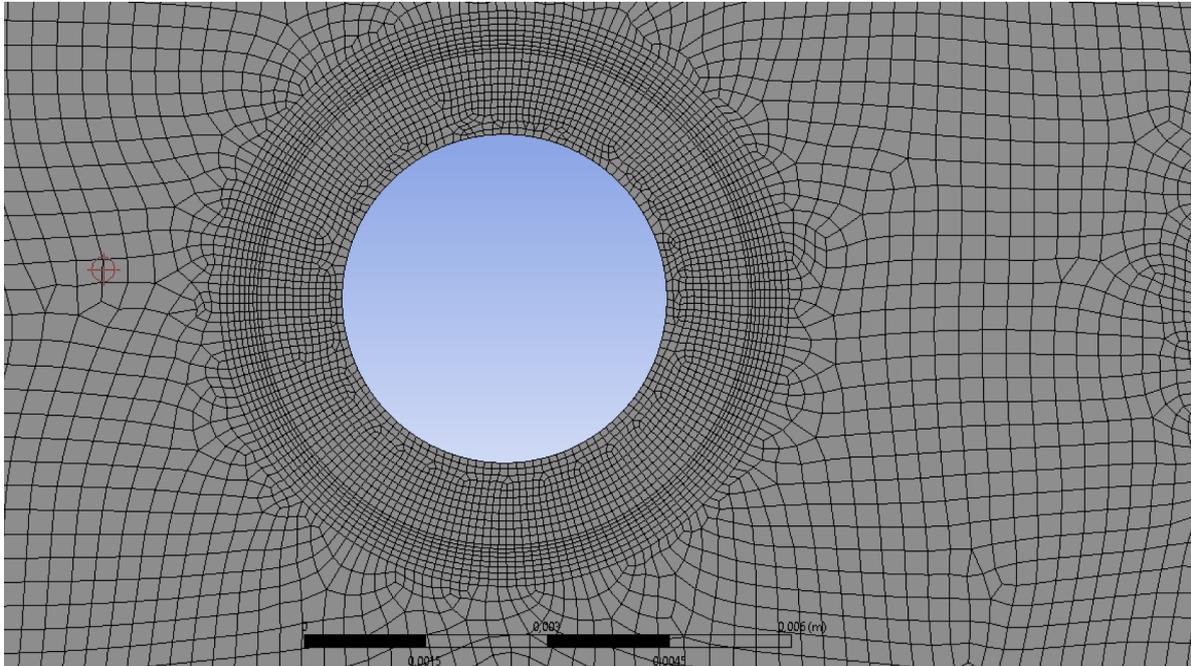


Рис. 2. Фрагмент расчетной сетки

Расчетная сетка была адаптирована для разрешения возмущений, возникающих в прилегающих к трубкам слоях (рис. 2). Параметры сетки выбирались путем исследования сходимости решения.

В канале моделировалось вязкое турбулентное течение воздуха с переменными теплофизическими свойствами. Рассматривалась стационарная задача. Решалась система уравнений Навье–Стокса, осредненных по Фавру, с двухпараметрической моделью турбулентности $k-\omega$ и уравнением идеального газа. Используемый тип решателя — density-based, порядок дискретизации параметров — второй. Окончание расчета определялось из условия сходимости по расходу воздуха и средней температуре внеш-

ней поверхности змеевиков. Расчет прекращался при относительной погрешности по данным параметрам менее 0,1 %.

Задаваемые ГУ показаны на рис. 3.

Результаты численного моделирования. В первой серии расчетов моделировалось течение воздуха и теплообмен с ГУ первого рода. На внутренней поверхности торов задавали температуру 300 К. По результатам расчетов с ГУ первого рода были пересчитаны эквивалентные численные значения для ГУ второго и третьего рода. Для задания ГУ второго рода использовались значения теплового потока на внутренней стенке торов при различных значениях числа Рейнольдса на входе. На рис. 4 показана зави-

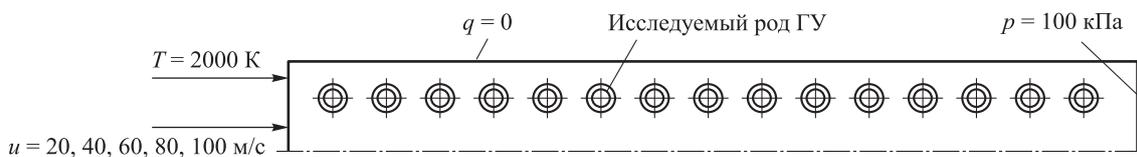


Рис. 3. Задаваемые ГУ

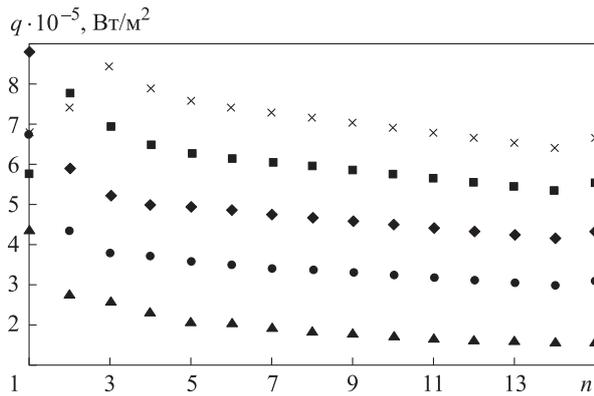


Рис. 4. Зависимость плотности теплового потока q от номера витка змеевика n при различных значениях числа Рейнольдса:
 ▲ — $Re = 10103$; ● — $Re = 20206$; ◆ — $Re = 30309$;
 ■ — $Re = 40413$; × — $Re = 50516$

симось плотности теплового потока q от номера витка змеевика n .

Для пересчета коэффициента теплоотдачи на внутренней стенке змеевиков с целью задания ГУ третьего рода использовались значения теплового потока на внешней стенке торцов $q_{внi}$, значения среднemasовой температуры воздуха в сечениях между змеевиками T_i , во входном и выходном сечениях, а также значения средней

по площади поверхности температуры на внешней стенке торцов $T_{внi}$. Коэффициент теплоотдачи на внутренней стенке змеевиков $\alpha_{H_2O i}$ пересчитывали с помощью следующих формул:

$$\alpha_{H_2O i} = \frac{1}{1/k_i - 1/\alpha_i - \delta/\lambda};$$

$$k_i = \frac{q_{внi}}{T_i - T_{H_2O}}; \quad \alpha_i = \frac{q_{внi}}{T_i - T_{внi}},$$

где k_i — коэффициент теплопередачи; α_i — коэффициент теплоотдачи воздуха; δ — толщина стенки змеевика; λ — коэффициент теплопроводности стали; T_{H_2O} — температура стенок со стороны воды, принимаемая равной 300 К при задании ГУ первого рода.

На рис. 5 и 6 приведены поля температуры и скорости воздуха в межтрубном пространстве ЗТА при входной скорости воздушного потока $u = 60$ м/с и ГУ разного рода.

В табл. 2 и 3 приведены значения перепадов температуры ΔT и давления Δp воздуха между входом в ЗТА и выходом из него для различных

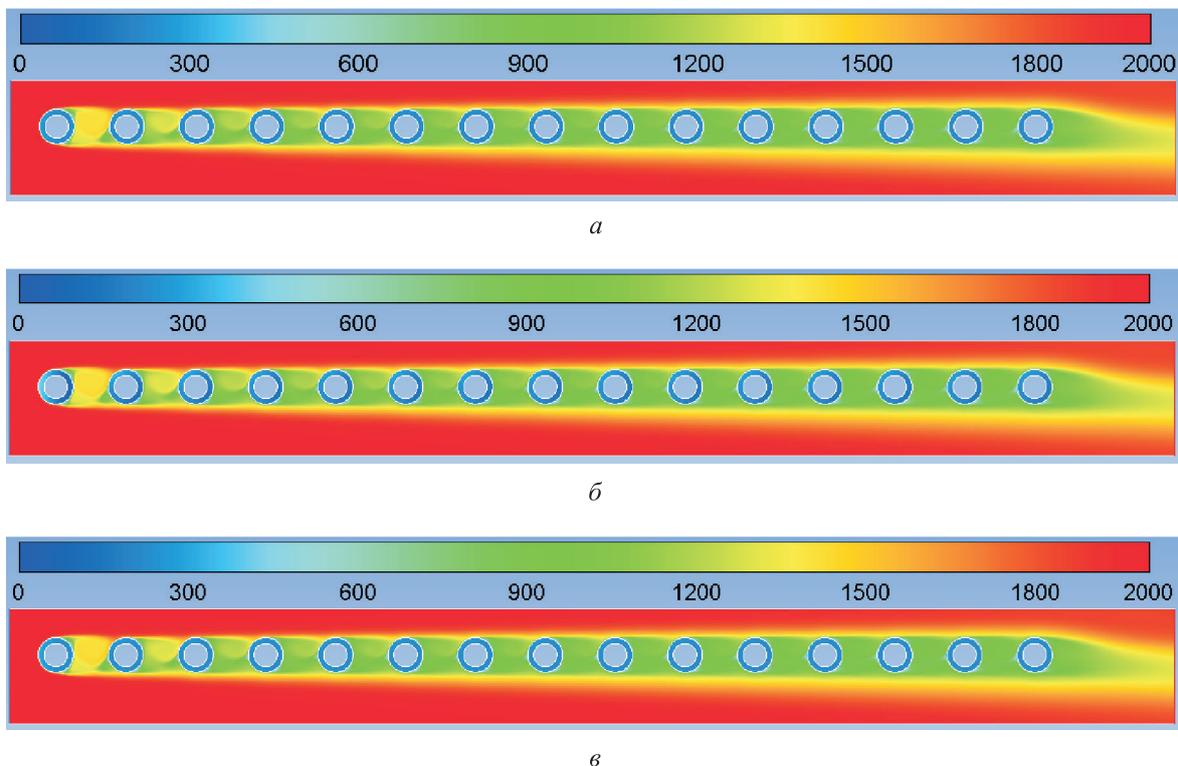


Рис. 5. Поля температуры воздуха, К, в межтрубном пространстве ЗТА при входной скорости воздушного потока $u = 60$ м/с и ГУ первого (а), второго (б) и третьего (в) рода

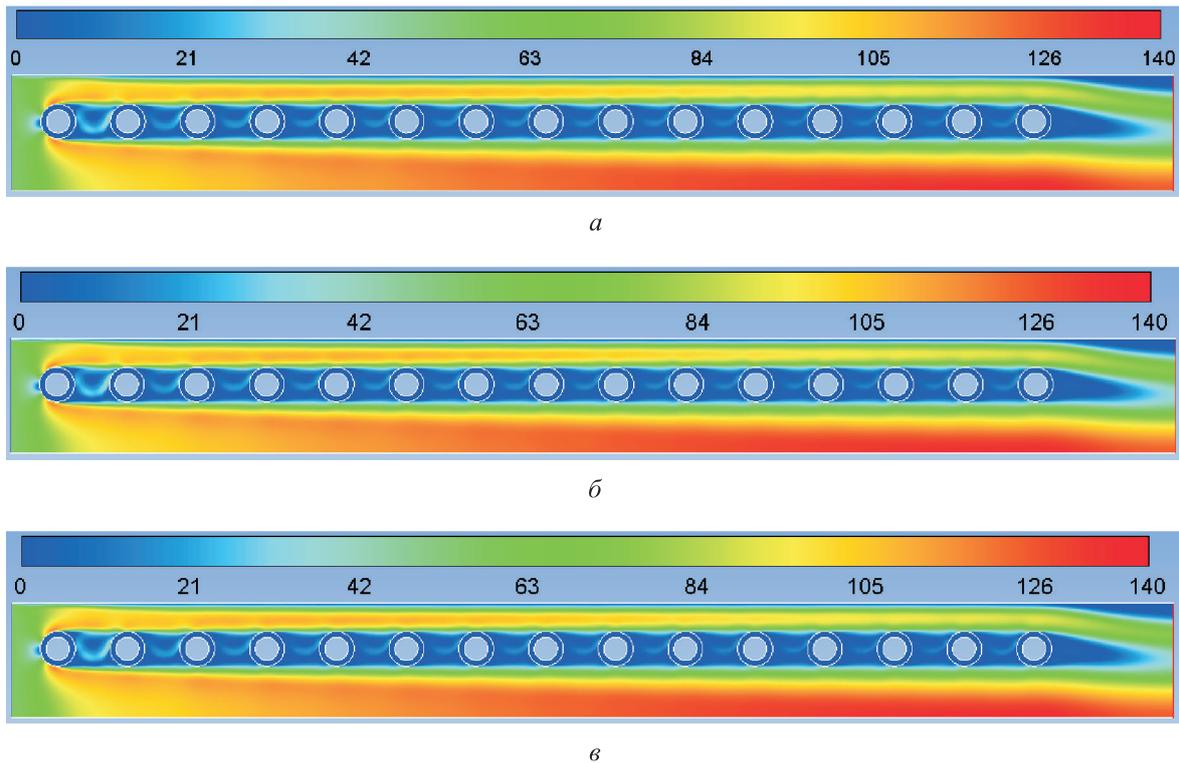


Рис. 6. Поля скорости потока воздуха, м/с, в межтрубном пространстве ЗТА при входной скорости воздушного потока $u = 60$ м/с и ГУ первого (а), второго (б) и третьего (в) рода

значений входной скорости воздушного потока и рода ГУ.

Из табл. 2 и 3 следует, что с повышением входной скорости воздушного потока перепад температуры уменьшается, а перепад давления увеличивается, так как при вязком трении о

Таблица 2

Значения перепада температуры воздуха между входом в ЗТА и выходом из него для различных значений входной скорости потока и рода ГУ

| Род ГУ | Перепад температуры воздуха ΔT , К, при скорости потока u , м/с | | | | |
|--------|---|-----|-----|-----|-----|
| | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 |
| Первый | 576 | 483 | 438 | 394 | 369 |
| Второй | 577 | 483 | 438 | 395 | 369 |
| Третий | 576 | 483 | 438 | 395 | 370 |

Таблица 3

Значения перепада давления воздуха между входом в ЗТА и выходом из него для различных значений входной скорости потока и рода ГУ

| Род ГУ | Перепад давления воздуха Δp , кПа, при скорости потока u , м/с | | | | |
|--------|--|-------|------|------|------|
| | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 |
| Первый | 0,174 | 0,527 | 1,06 | 1,78 | 2,70 |
| Второй | 0,181 | 0,529 | 1,06 | 1,79 | 2,71 |
| Третий | 0,174 | 0,527 | 1,06 | 1,79 | 2,71 |

трубки змеевиков он пропорционален квадрату скорости потока.

На рис. 7 показаны поля температуры воздуха в змеевиковых стенках первых четырех витков при входной скорости потока $u = 60$ м/с и ГУ разного рода.

Можно заметить, что при задании ГУ первого и третьего рода поля температуры воздуха похожи. В то время как при моделировании течения воздуха и теплообмена с ГУ второго рода диапазон температуры внутри змеевика шире, а ее изменение происходит без больших градиентов при переходе от внешней стенки к внутренней.

Для ГУ второго рода поле температуры воздуха охватывает больший диапазон вследствие задания не температуры, а теплового потока. При этом тепловой поток на внутренней стенке распределен равномерно в отличие от случаев с ГУ первого и третьего рода, где максимум плотности теплового потока приходится на передние части змеевиков. Поэтому поле температуры внутри торových элементов при задании ГУ второго рода выглядит несколько нефизичным. Несмотря на это, распределение температуры внутри торových элементов оказывает незначительное влияние на интегральные характеристики.

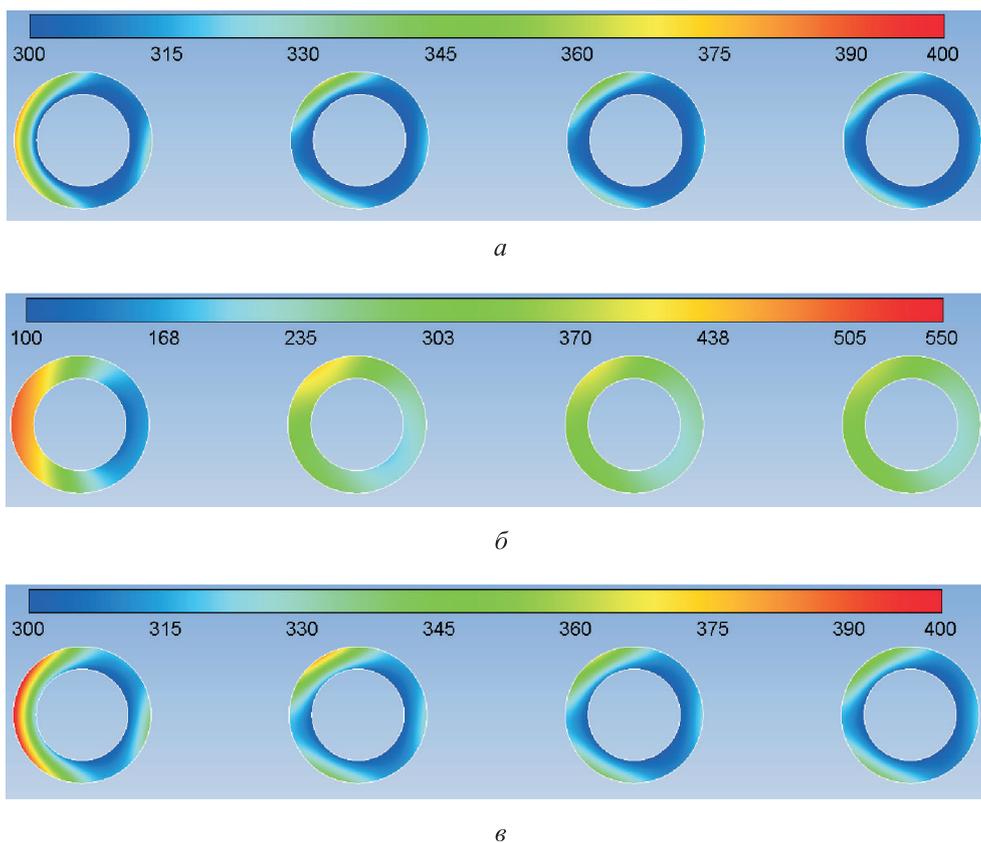


Рис. 7. Поля температуры воздуха, К, в змеевиковых стенках первых четырех витков при входной скорости потока $u = 60$ м/с и ГУ первого (а), второго (б) и третьего (в) рода

Выводы

1. Проведено численное исследование влияния рода ГУ на интегральные характеристики ЗТА.
2. Согласно полученным данным, различия в перепаде температуры при разных режимах течения потока воздуха не превышают 0,3 %, а

различия в перепаде давления — 4 %. Эти результаты входят в границы допустимой инженерной погрешности.

3. При корректном пересчете задаваемых при численном моделировании величин можно решить задачу нахождения необходимых характеристик ЗТА независимо от рода ГУ.

Литература

- [1] Генералов М.Б. *Машины и аппараты химических и нефтехимических производств. Машиностроение. Энциклопедия*. 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: 10.7463/1014.0727220
- [4] Ghorbani N., Taherian H., Gorji M., Mirgolbabaee 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.exptthermfluidsci.2010.02.004
- [5] Salimpour M.R. Heat transfer of a temperature-dependent-property fluid in a shell and tube heat exchangers. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2008, vol. 35(9), pp. 1190–1195, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2008.07.002

- [6] Nathon P., Suwagrai J. Effect of curvature ratios on the heat transfer and flow developments in horizontal spirally coiled tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2006, vol. 50(3–4), pp. 444–451, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.08.002
- [7] Naphon P., Wongwises S. A study of the heat transfer characteristics of a compact spiral coil heat exchanger under wet-surface conditions. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2005, vol. 29, pp. 511–521, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2004.07.002
- [8] 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
- [9] Salimpour M.R. Heat transfer coefficients of shell and coiled tube heat exchangers. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2009, vol. 33(2), pp. 203–207, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2008.07.015
- [10] Shokouhmand H., Salimpour M.R., Akhvan-Behabadi M.A. Experimental investigation of shell and coiled tube 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

References

- [1] Generalov M.B. *Mashiny i apparaty khimicheskikh i neftekhimicheskikh proizvodstv. Mashinostroyeniye. Entsiklopediya* [Machines and devices of chemical and petrochemical industries. Engineering. Encyclopedia]. 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 of the Bauman MSTU*, 2014, no. 10, pp. 398–412 (in Russ.), doi: 10.7463/1014.0727220
- [4] 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
- [5] Salimpour M.R. Heat transfer of a temperature-dependent-property fluid in a shell and tube heat exchangers. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2008, vol. 35(9), pp. 1190–1195, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2008.07.002
- [6] Nathon P., Suwagrai J. Effect of curvature ratios on the heat transfer and flow developments in horizontal spirally coiled tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2006, vol. 50(3–4), pp. 444–451, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.08.002
- [7] Naphon P., Wongwises S. A study of the heat transfer characteristics of a compact spiral coil heat exchanger under wet-surface conditions. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2005, vol. 29, pp. 511–521, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2004.07.002
- [8] 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
- [9] Salimpour M.R. Heat transfer coefficients of shell and coiled tube heat exchangers. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2009, vol. 33(2), pp. 203–207, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2008.07.015
- [10] Shokouhmand H., Salimpour M.R., Akhvan-Behabadi M.A. Experimental investigation of shell and coiled tube 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

Информация об авторах

ФРАНЦУЗОВ Максим Сергеевич — младший научный сотрудник отдела «Аэрокосмические двигатели». ФГУП «ЦИАМ им. 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 «Аэродинамика и термодинамика силовых установок». ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» (111116, Москва, Российская Федерация, Авиамоторная ул., д. 2, e-mail: stanislav.lopukhov1996@gmail.com).

КОРОЛЕВА Анастасия Павловна — инженер отдела «Аэрокосмические двигатели» ФГУП «ЦИАМ им. 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, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: mfrancuzov@yandex.ru).

LOPUKHOV Stanislav Aleksandrovich — Engineer, Department of Aerodynamics and Thermodynamics of Power Plants. 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 влияния рода граничных условий на интегральные характеристики стендового змеевикового теплообменного аппарата. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2019, № 5, с. 50–57, doi: 10.18698/0536-1044-2019-50-57

Please cite this article in English as:

Frantsuzov M.S., Lopukhov S.A., Koroleva A.P. A Study of the Influence of the Boundary Conditions Type on Integral Characteristics of a Bench Coiled Heat Exchanger. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2019, no. 5, pp. 50–57, doi: 10.18698/0536-1044-2019-50-57