https://doi.org/10.15350/17270529.2022.1.8

УДК 533+536.24

Особенности теплового режима маслоохладителя с развитой внешней поверхностью

А. Ю. Армянин, Е. С. Байметова, М. Е. Хвалько

Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, Россия, 426069, Ижевск, ул. Студенческая, 7

Аннотация. Для отвода образующихся при работе гидравлических систем на периодических режимах излишков тепла от рабочей жидкости требуется применение специальных конвективных теплообменных аппаратов – маслоохладителей, геометрия которых напрямую влияет на их эффективность. В данной работе рассмотрены вопросы реализуемых в проточных трактах и корпусе промышленного маслоохладителя тепловых режимов. Методами математического моделирования решена задача сопряженного теплообмена в каналах и корпусе маслоохладителя. Решение нелинейной системы уравнений сохранения строится методом конечных объемов с использованием Open source платформы openFoam. В результате вычислительного эксперимента выявлены и описаны реализуемые тепловые и аэрогидродинамические режимы работы элемента охлаждающей секции. Показана неравномерность нагрева корпуса охлаждающей секции. На основе анализа полученных полей газодинамических и теплофизических величин показана целесообразность конструктивной оптимизации исполнения внешнего оребрения.

Ключевые слова: математическое моделирование, сопряженная задача теплообмена, задача оптимизации, маслоохладители, система охлаждения.

✉ *Елена Байметова, e-mail: baimetova.e.s@gmail.com*

Peculiarities of the Thermal Regime of an Oil Cooler with a Developed External Surface

Aleksej Yu. Armyanin, Elena S. Baymetova, Mikhail E. Hval'ko

Kalashnikov Izhevsk State Technical University (7, Studencheskaya St., Izhevsk, 426069, Russian Federation)

Summary. For removing excess heat from working fluid, which forms during the hydraulic system operation in periodic modes, special convective heat exchangers such as oil coolers, the geometry of which directly affects their efficiency, are required. In this paper, we consider the issues of thermal regimes in flow paths and the body of an industrial oil cooler. The object of the study is a multi-section collector with a complex cross-sectional shape of the liquid supply channels and with a developed outer surface for effective cooling. The cooling section is made in the form of a flat tube with longitudinal inner channels with rectangular cross-sections, in which additional longitudinal ribs are placed to provide machine oil flow turbulence. It allows intensifying the heat exchange between the viscous medium and metal wall by preventing the formation of a laminar boundary layer. The heat-exchanger outer surface is equipped with multiple double-sided ribs to increase the device heat efficiency. By methods of mathematical modeling, the problem of conjugate heat exchange in the oil cooler channels and body is solved. The models of a heat-conducting viscous incompressible fluid, heat-conducting viscous compressible gas and heat conduction in a solid are used. The discretization of the basic equations is carried out by the finite volume method using the Open source product openFoam. As a result of the computational experiment, the realized thermal and aero-hydrodynamic modes of operation of a single element of the cooling section are revealed and described. The uneven heating of the cooling section body is shown. On the basis of the analysis of the obtained fields of gas-dynamic and thermophysical values the expediency of the constructive optimization of the external finning design is shown.

Keywords: mathematical modeling, coupled heat exchange problem, optimization problem, oil coolers, cooling system.

✉ *Elena Baymetova, e-mail: baimetova.e.s@gmail.com*

ВВЕДЕНИЕ

Технические устройства, работающие с некоторой периодичностью и предусматривающие наличие рабочих циклов [1], имеют широкий спектр применения в различных технических системах. Рабочий цикл таких устройств сопряжен со сжатием и расширением рабочих сред, вследствие чего сопряжен с нагревом этих сред. Поэтому распространенным техническим решением является применение специальных конвективных теплообменных аппаратов для отвода избыточного тепла, конструктивное исполнение которых существенно влияет на тепловую эффективность таких устройств [2]. Одной из наиболее эффективных схем таких теплообменных аппаратов являются устройства типа "радиатор", представляющие собой сложный коллектор из набора внутренних пластин-коллекторов с малоразмерными внутренними каналами сложной формы и развитой внешней поверхностью. К данному виду устройств можно отнести и маслоохладители.

В работах [3 – 16] приводятся результаты численных и экспериментальных исследований влияния внутренней геометрии каналов на гидродинамику и теплообмен. Так, в работах [5, 6] показано, что профилирование внутренних каналов является удобным и эффективным инструментом для турбулизации течения с одной стороны и определяет образование вторичных вихревых противотечений – с другой. В работах [7 – 9] исследовано влияние прямоугольной формы внутреннего канала на эффективность теплоотдачи в стенку в рамках стационарного течения газа. Там же в [7] приведены первые аналитические модели для математического описания процессов переноса тепла в профилированных каналах различной геометрии, представлены результаты экспериментального исследования процессов сопряженного теплообмена в каналах треугольного сечения.

Аспекты прикладного использования общих закономерностей управления эффективностью теплоотвода путем профилирования внутреннего канала, в том числе использования модифицированных лунками, канавками, траншеями и т.п. поверхностей, приведены в работах [10 – 14]. В [15] выявлено и показано, что дополнительно к непосредственной форме канала угловое расположение стенок, а именно – угол наклона боковых стенок, является одним из управляющих параметров для интенсификации теплоотдачи в прямоугольной каверне при начальной степени турбулентности потока более 0.15. Обобщение значительного числа результатов исследования влияния параметров набегающего потока, а именно – начальной степени турбулентности, на процессы интенсификации теплоотдачи во внутренних каналах, в виде математической модели для оценки предельных параметров конвективного теплообмена и гидравлического сопротивления с учетом степени начальной интенсивности турбулентности потока представлено в работе [16].

Известно значительное количество работ, посвященных вопросам интенсификации конвективного теплообмена за счет внешней турбулизации течения вблизи поверхностей теплосъема. Применение данного похода базируется на идее управления параметрами пограничного слоя в зоне взаимодействия внешнего потока газа с поверхностью теплосъема [17, 18]. Экспериментально [17 – 22] обосновано увеличение интенсивности конвективного теплообмена при повышении турбулентности набегающего потока. Результаты экспериментального исследования влияния интенсивности турбулентности на процессы сопряженного теплообмена для криволинейной внешней поверхности сложной геометрии, представлены в [23].

Однако, совместное исследование гидрогазодинамики и теплообмена устройств, сочетающих в конструкции и внутренние профилированные каналы, и внешнюю развитую поверхность сложной конфигурации, и, как следствие, значительную площадь поверхности теплосъема, остаются малочисленными [24 – 31].

Одним из наиболее распространенных видов аналогичных по конструктивному исполнению теплообменных аппаратов являются автомобильные радиаторы [28 – 31]. При этом основные исследования направлены на изучение методов диагностики рабочих

характеристик данных теплообменных аппаратов [32, 33] и не рассматривают вопросы непосредственного исследования реализуемых в данных устройствах рабочих процессов и тепловых режимов.

Таким образом, рабочие процессы, протекающие в промышленных маслоохладителях, остаются недостаточно изученными, а в его трактах и внешнем развитом оребрении тепловой режим – не исследованным. Данная работа посвящена численному моделированию сопряженного теплообмена во внутренних проточных каналах маслоохладителя, его развитой внешней поверхности с учетом теплопроводности материала корпуса.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Объектом исследования является многосекционный коллектор со сложной формой поперечного сечения каналов подвода жидкости и с развитой внешней поверхностью для эффективного охлаждения теплоносителя. Охлаждающая секция выполнена в виде плоской трубы с продольными внутренними каналами прямоугольного сечения и развитой внешней поверхностью с множественным оребрением (рис. 1).

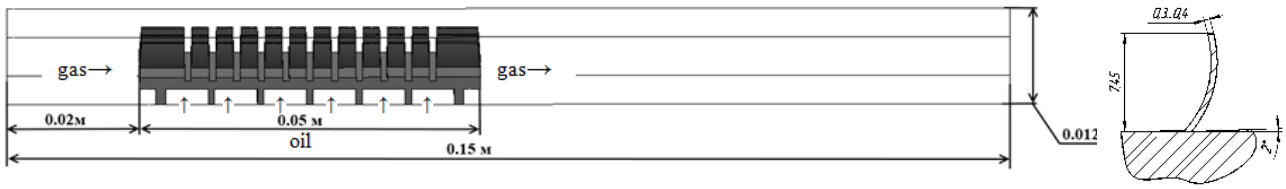


Рис. 1. Расчетная область

Fig. 1. Calculation domain

Процесс охлаждения внутреннего потока рабочей жидкости – гидравлического масла Лукойл Гейзер СТ-32 ($\rho = \frac{1100\text{кг}}{\text{м}^3}$; $c_p = \frac{3100\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot \text{К}$; $\mu = 0.11\,\text{Па} \cdot \text{с}$; $\lambda = 0.41 \frac{\text{Вт}}{\text{м}} \cdot \text{К}$) путем принудительного обдува коллектора маслоохладителя направленным потоком воздуха ($M = \frac{28.96\text{кг}}{\text{кМоль}}$; $c_p = \frac{1004.4\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot \text{К}$; $\mu = 1.831 \cdot 10^{-5}\,\text{Па} \cdot \text{с}$; $\lambda = 0.0261 \frac{\text{Вт}}{\text{м}} \cdot \text{К}$), исследуется в рамках задачи сопряженного теплообмена внутреннего элемента единичной охлаждающей секции при задании условий симметрии на боковых гранях расчетной области. Корпус секции охлаждения выполнен из алюминия ($\rho = 2700 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; $c_p = \frac{903\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot \text{К}$; $\lambda = 237\,\text{Вт/м} \cdot \text{К}$). При построении математической модели процесса охлаждения многосекционного коллектора использовались следующие допущения:

1. Материал прямоугольного канала изотропен.
2. Шероховатость материала не учитывается.

Моделирование проводится на основе решения уравнений сохранения текучих сред для доменов воздуха (air) и гидравлической жидкости (oil) совместно с уравнением теплопроводности в твердом теле для корпуса маслоохладителя (alum):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0\,, \tag{1}$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k}\delta_{ij}\right) + F_i\,, \tag{2}$$

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial \rho H u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial u_i \tau_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial q_j}{\partial x_j} + F_i u_i\,. \tag{3}$$

В системе уравнений (1) – (3) приняты следующие допущения: ρ – плотность среды; u_i – компоненты вектора скорости u; p – давление; μ – динамический коэффициент вязкости; F_i – внешняя массовая сила; $E = C_v T + 0.5u_i^2$ – полная удельная энергия среды; $H = E + p/\rho = C_p T + 0.5u_i^2 = h + 0.5u_i^2$ – полная удельная энтальпия; $\tau_{ij} = 2\mu S_{ij} - \frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k}\delta_{ij}$ – тензор вязких напряжений; $S_{i,j} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)$ – тензор скоростей деформаций; $q_j = \lambda \frac{\partial T}{\partial x_j}$ – тепловой поток; λ – коэффициент теплопроводности среды; T – температура.

В случае моделирования движения газообразных сжимаемых сред система уравнений (1) – (3) дополнялась уравнением состояния идеального газа:

$$p = \rho R T, \tag{4}$$

где R – удельная газовая постоянная, а в случае моделирования несжимаемой жидкости – уравнением постоянства плотности среды:

$$\rho = const. \tag{5}$$

Процесс переноса тепла в канале описывается на основе уравнения:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \lambda \frac{\partial T}{\partial x_i}, \tag{6}$$

где c_p – удельная теплоемкость материала.

Построенная таким образом на основе уравнений сохранения система частных производных (1) – (6) решается приближенно методом конечных объемов в рамках квазистационарной постановки с использованием Open source платформы openFoam с применением решателя chtMultiRegionSimpleFoam, основанного на численной схеме Simple.

Основные граничные условия, используемые при численном моделировании, показаны в таблице. Кроме этого на непроницаемых стенках применялось условие прилипания и условие симметрии на боковых границах.

Характеристики жидкости и средняя скорость течения позволяют моделировать движение в ламинарной постановке (число Рейнольдса равно 1000). В то же время течение воздуха с числом Рейнольдса равным примерно 8000 соответствует переходным режимам движения сред и требует учета эффектов турбулентности. Поэтому для расчета параметров в домене gas подключалась модель турбулентности Ментера [34].

Таблица – Граничные условия

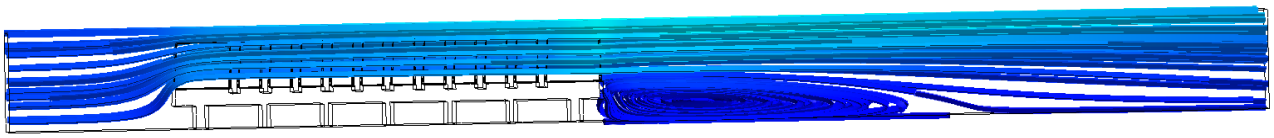
Table – Boundary conditions

Домены/границы Domains/boundaries	**Контактная поверхность** Contact surface	**Вход** Enter	**Выход** Exit
air	$\lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial n} = \lambda_t \frac{\partial T_t}{\partial n}$ $T_g = T_t$	$u_g = 5$ м/с $T_g = 293$К	$\frac{\partial p}{\partial n} = 0$
oil	$\lambda_l \frac{\partial T_l}{\partial n} = \lambda_t \frac{\partial T_t}{\partial n}$ $T_l = T_t$	$p_o = 10 \cdot 10^5$Па $T_o = 333$К	$p_o = 4 \cdot 10^5$Па

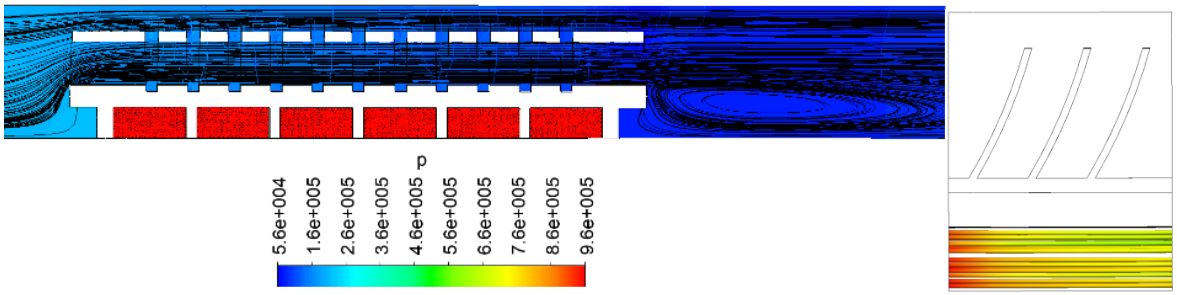
Расчетная сетка построена с использованием утилиты построения сеток blockMesh пакета openFoam и содержит более 10 млн. призматических элементов. На границы сопряжения газ-металл приходится более 900 тыс. граней, металл-жидкость 178 тыс. граней. Сетки на границах сопряжения являются согласованными.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

В результате проведенных расчетов получены распределения полей скорости, давления, температуры и теплового потока вблизи непроницаемых поверхностей рассматриваемого фрагмента внешнего оребрения маслоохладителя, получены интегральные теплофизические характеристики воздушного потока до и после прохождения элементов оребрения. На рис. 2 представлена структура потока воздуха при обтекании единичного охлаждающего элемента, а также структура течения гидравлического масла в каналах на примере центрального канала.



a)



b) *c*)

Рис. 2. Структура потока воздуха в виде пространственных трубок тока (*a*), линий тока в среднем сечении (*b*) и структура потока гидравлического масла (*c*) во внутреннем прямоугольном канале

Fig. 2. Air flow structure in the form of spatial current tubes (a), current lines in the middle section (b) and hydraulic oil flow structure (c) in the inner rectangular channel

Из рис. 2, *a* видно, что структура потока воздуха характеризуется образованием возвратной зоной за единичным элементом секции охлаждения, что обусловлено геометрией секции – наличие уступа, за которым наблюдается формирование вихревой структуры. При этом в зоне узких межщелевых зазоров (рис. 2, *b*), при взаимодействии нагнетаемого воздуха с внешним оребрением элемента, наблюдается слоистое однородное безвихревое течение. Рис. 2, *c* иллюстрирует классическое ламинарное течение вязкой несжимаемой жидкости в прямолинейных каналах. Реализуемые в проточных трактах рассматриваемого единичного элемента охлаждающей секции аэродинамический и гидродинамический режимы, в совокупности, согласно [35] должны обеспечить формирование ламинарного пограничного слоя в прямолинейных каналах подвода масла, что при вышеописанном безвихревом характере натекания воздуха на элементы оребрения должно привести к низкой теплоотдаче и высоким гидравлическим потерям. Распределение температуры по объему конструкции единичного элемента охлаждающей секции и температуры масла по длине каналов приведено на рис. 3.

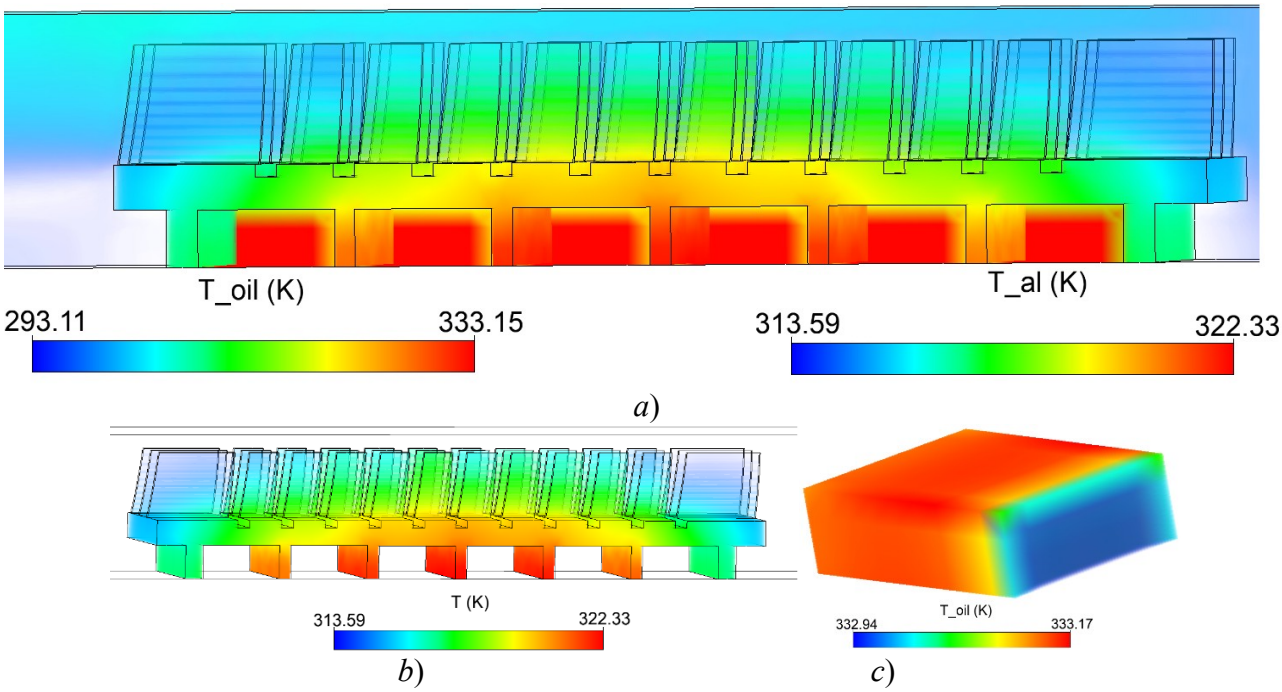


Рис. 3. Объемное распределение температуры воздуха по всем расчетным доменам (*a*), по температуре конструкции единичного элемента охлаждающей секции из алюминия (*b*) и температуры масла по длине центрального канала (*c*)

Fig. 3. Volumetric distribution of air temperature over all calculated domains (a), over the aluminum temperature of a single cooling section design element (b), and over the oil temperature along the length of the central channel (c)

Наблюдается неравномерный нагрев корпуса охлаждающей секции с локализацией температурного максимума в области внутренних центральных каналов, что обусловлено синергией тепловых потоков от внутренних прямоугольных каналов. При этом температура воздуха в зоне контакта (рис. 3, *a*) изменяется по поперечному сечению незначительно (на 2 К). Необходимо отметить, что неравномерность нагрева центральной области алюминиевой конструкции сопряжена с неоднородностью поля температуры по объему жидкости, но не связана с эффективностью теплоотдачи от гидравлической жидкости отдельных внутренних каналов (рис. 4).

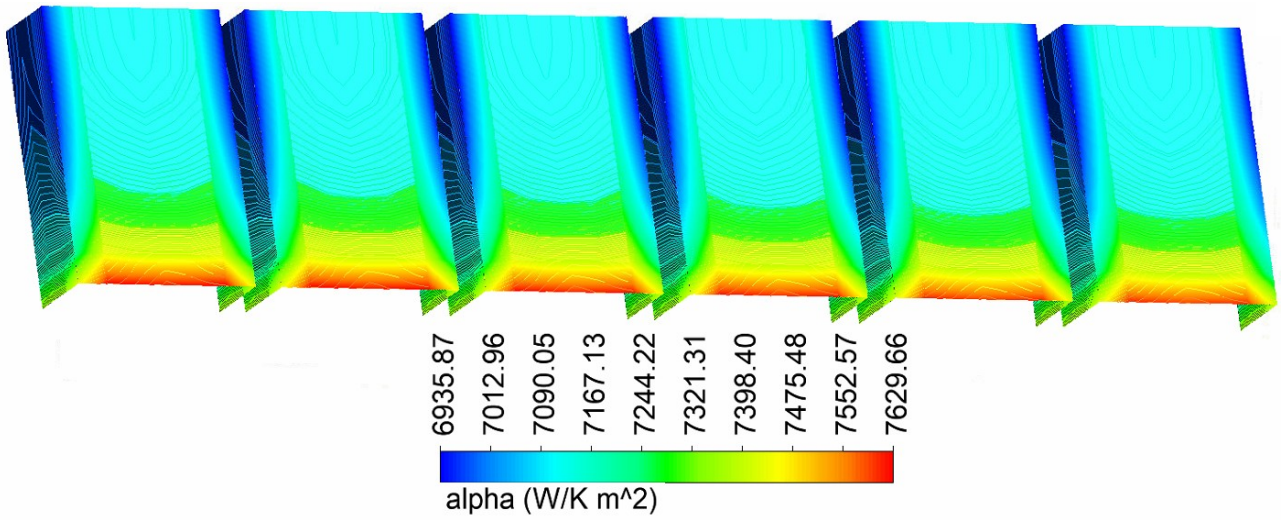


Рис. 4. Распределение коэффициента теплоотдачи по поверхности контакта масло/алюминий внутренних каналов единичного элемента охлаждающей секции

Fig. 4. Distribution of the heat transfer coefficient over the oil/aluminum contact surface of the inner channels of a single cooling section element

Из рис. 4 видно, что по длине канала теплоотдача от масла к материалу корпуса снижается, а также, в виду малости расстояния между каналами минимум коэффициента теплоотдачи при максимальных температурах жидкости и корпуса (рис. 3, *b*-*c*), наблюдается в межканальной области. Там же в центральных каналах (рис. 3, *c*) фиксируется, обусловленное взаимовлиянием внутренних каналов перераспределение тепловых потоков, приводящее к обеспечению дополнительного подвода тепла к гидравлической жидкости, текущей в центральных каналах.

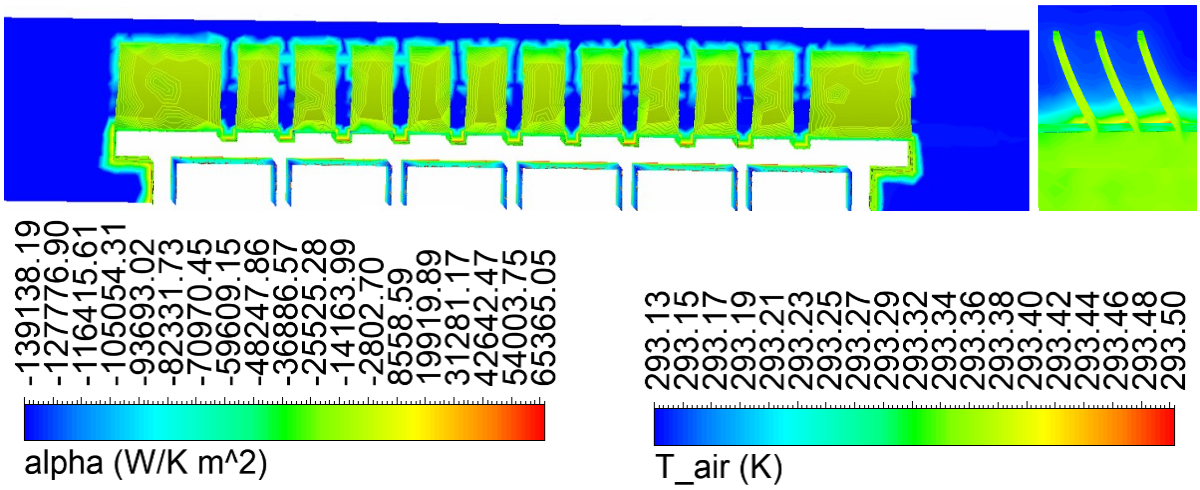


Рис. 5. Распределение коэффициента теплоотдачи от жидкости в корпус, от корпуса к воздуху поле температуры нагнетаемого воздуха

Fig. 5. Distribution of heat transfer coefficient from liquid to enclosure, from enclosure to air and discharge air temperature field

Из распределения полей теплоотдачи от масла к алюминию и от конструкции к воздуху (рис. 5) видно, что внешнее профилирование корпуса позволяет увеличить эффективность конвективного теплообмена – максимальные коэффициенты теплоотдачи соответствуют межреберным канавкам, однако размеры внешнего оребрения требуют оптимизации для повышения эффективности маслоохладителя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено численное моделирование аэрогидрогазодинамики и сопряженного теплообмена в устройстве охлаждения гидравлического масла. Выявлены и описаны реализуемые тепловые и аэрогидродинамические режимы работы единичного элемента охлаждающей секции. Выявлен, описан и обоснован неравномерный нагрев корпуса охлаждающей секции с локализацией температурного максимума в области внутренних центральных каналов. Показана эффективность дополнительного оребрения и профилирования внешней развитой поверхности теплообменного аппарата и необходимость конструктивной оптимизации исполнения внешнего оребрения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Плотников Л. В. Газодинамика и теплообмен пульсирующих потоков в системах газообмена устройств периодического действия: Дисс. докт. техн. наук. Екатеринбург. 2021. 344 с.

REFERENCES

1. Plotnikov L. V. *Gazodinamika i teploobmen pul'siruiushchikh potokov v sistemakh gazoobmena ustroistv periodicheskogo deistviia* [Gas dynamics and heat exchange of pulsating flows in gas exchange systems of periodic devices]. Diss. dokt. tekhn. nauk. Ekaterinburg, 2021, 344 p. (In Russian).

2. Helgeland A., Mardal K. A., Haughton V., Reif B. A. P. Numerical simulations of the pulsating flow of cerebrospinal fluid flow in the cervical spinal canal of a Chiari patient // Journal of Biomechanics, 2014, vol. 47 (5), pp. 1082-1090. https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2013.12.023

3. Королева М. Р., Терентьев А. Н., Чернова А. А. Гидродинамика коллектора сложной формы // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2021. № 3 (58). С. 50-55.

4. Гиззатуллина А. Ф., Байметова Е. С., Хвалько М. Е., Армянин А. Ю. Параметрические исследования вынужденного конвективного теплообмена системы охлаждения // Химическая физика и мезоскопия. 2021. Т. 23. № 4. С. 393-402. https://doi.org/10.15350/17270529.2021.4.35

5. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.

6. Идельчик И. Е. Аэрогидродинамика технологических аппаратов. (Подвод, отвод и распределение потока по сечению аппаратов). М.: Машиностроение, 1983. 351 с.

7. Sugiyama H., Akiyama M., Shibata K. Heat and Mass Transfer Analysis of Developing Turbulent Flow in a Square Duct // Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series B, 1991, vol. 57 (535), pp. 1044-1050. https://doi.org/10.1299/kikaib.57.1044

8. Huser A., Biringen S. Direct numerical simulation of turbulent flow in a square duct // Journal of Fluid Mechanics, 1993, vol. 257, pp. 65-95. https://doi.org/10.1017/S002211209300299X

9. Myong H. K. Numerical investigation of fully developed turbulent fluid flow and heat transfer in a square duct // International Journal of Heat and Fluid Flow, 1991, vol. 12, pp. 344-352. https://doi.org/10.1016/0142-727X(91)90023-O

10. Şenay G., Kaya M., Gedik E., Kayfeci M. Numerical investigation on turbulent convective heat transfer of nanofluid flow in a square cross-sectioned duct // International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow, 2019, vol. 29 (4), pp. 1432-1447. https://doi.org/10.1108/HFF-06-2018-0260

11. Liu J., Hussain S., Wang W., Xie G. et al. Heat transfer enhancement and turbulent flow in a rectangular channel using perforated ribs with inclined holes // Journal of Heat Transfer, 2019, vol. 141 (4), 041702. https://doi.org/10.1115/1.4042841

12. Kumar R., Kumar A., Goel V. Performance improvement and development of correlation for friction factor and heat transfer using computational fluid

2. Helgeland A., Mardal K. A., Haughton V., Reif B. A. P. Numerical simulations of the pulsating flow of cerebrospinal fluid flow in the cervical spinal canal of a Chiari patient. *Journal of Biomechanics*, 2014, vol. 47 (5), pp. 1082-1090. https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2013.12.023

3. Koroleva M. R., Terent'ev A. N., Chernova A. A. Gidrodinamika kollektora slozhnoi formy [Hydrodynamics of a collector of complex shape]. *Vestnik Rybinskoi gosudarstvennoi aviatsionnoi tekhnologicheskoi akademii im. P.A. Solov'eva* [Vestnik of P.A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical], 2021, no. 3 (58), pp. 50-55. (In Russian).

4. Gizzatullina A. F., Baymetova E. S., Hval'ko M. E., Armyanin A. Yu. Parametricheskie issledovaniia vynuzhdennogo konvektivnogo teploobmena sistemy okhlazhdeniia [Parametric studies of convective heat exchange in cooling system]. *Khimicheskaia fizika i mezoskopiia* [Chemical Physics and Mesoscopy], 2021, vol. 23, no. 4, pp. 393-402. (In Russian). https://doi.org/10.15350/17270529.2021.4.35

5. Kutateladze S. S. *Osnovy teorii teploobmena* [Fundamentals of the theory of heat transfer]. Moscow: Atomizdat Publ., 1979. 416 p.

6. Idel'chik I. E. Aerogidrodinamika tekhnologicheskikh apparatov. (Podvod, otvod i raspredelenie potoka po secheniiu apparatov) [Aerohydrodynamics of technological devices. (Supply, discharge and flow distribution along the section of the apparatus)]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1983. 351 p.

7. Sugiyama H., Akiyama M., Shibata K. Heat and Mass Transfer Analysis of Developing Turbulent Flow in a Square Duct. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series B*, 1991, vol. 57 (535), pp. 1044-1050. https://doi.org/10.1299/kikaib.57.1044

8. Huser A., Biringen S. Direct numerical simulation of turbulent flow in a square duct. *Journal of Fluid Mechanics*, 1993, vol. 257, pp. 65-95. https://doi.org/10.1017/S002211209300299X

9. Myong H. K. Numerical investigation of fully developed turbulent fluid flow and heat transfer in a square duct. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 1991, vol. 12, pp. 344-352. https://doi.org/10.1016/0142-727X(91)90023-O

10. Şenay G., Kaya M., Gedik E., Kayfeci M. Numerical investigation on turbulent convective heat transfer of nanofluid flow in a square cross-sectioned duct. *International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow*, 2019, vol. 29 (4), pp. 1432-1447. https://doi.org/10.1108/HFF-06-2018-0260

11. Liu J., Hussain S., Wang W., Xie G. et al. Heat transfer enhancement and turbulent flow in a rectangular channel using perforated ribs with inclined holes. *Journal of Heat Transfer*, 2019, vol. 141 (4), 041702. https://doi.org/10.1115/1.4042841

12. Kumar R., Kumar A., Goel V. Performance improvement and development of correlation for friction factor and heat transfer using computational fluid

dynamics for ribbed triangular duct solar air heater // Renewable Energy, 2019, vol. 131, pp. 788-799. https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.078

13. Sharma N., Tariq A., Mishra M. Experimental Investigation of Heat Transfer Enhancement in Rectangular Duct with Pentagonal Ribs // Heat Transfer Engineering, 2019, vol. 40 (1-2), pp. 147165. https://doi.org/10.1080/01457632.2017.1421135

14. Schindler A., Younis B. A., Weigand B. Large-Eddy Simulations of turbulent flow through a heated square duct // International Journal of Thermal Sciences, 2019, vol. 135, pp. 302-318. https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.09.018

15. Дьяченко А. Ю., Терехов И., Ярыгина Н. И. Обтекание турбулентным потоком поперечной каверны с наклонными боковыми стенками. Часть 2. Теплообмен // Прикладная механика и техническая физика. 2007. Т. 48, № 4. С. 23-29.

16. Dreitser G. A., Lobanov I. E. Limiting Intensification of Heat Exchange in Tubes Due to Artificial Turbulization of the Flow // Инженерно-физический журнал. 2003. Т. 76, № 1. С. 46-51.

17. Леонтьев А. И., Олимпиев В. В. Теплофизика и теплотехника перспективных интенсификаторов теплообмена (обзор) // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2011. № 1. С. 7-31.

18. Попов И. А. Интенсификация теплообмена. Физические основы и промышленное применение интенсификации теплообмена. Казань: КГТУ им. А.Н. Туполева, 2009. 560 с.

19. Дыбан Е. П., Эпик Э. Я. Теплообмен и гидродинамика турбулизированных потоков. Киев: Наукова Думка, 1985. 296 с.

20. Simonich J., Bradshaw C. P. Effect of free-stream turbulence on heat transfer through a turbulent boundary layer // Journal of Heat Transfer, 1978, vol. 100, no. 4, pp. 671-677. https://doi.org/10.1115/1.3450875

21. MacMullin R., Elrod W., Rivir R. Effects of free stream turbulence from a circular wall jet on a flat plate heat transfer and boundary layer flow // American Society of Mechanical Engineers (ASME), Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, Amsterdam, Netherlands, June 6-9, 1988. 10 p.

22. MacMullin R., Elrod W., Rivir R. Free-stream turbulence from a circular wall jet on a flat plate heat transfer and boundary layer flow // Journal of Turbomachinery, 1989, vol. 111, no. 1, pp. 78-86. https://doi.org/10.1115/1.3262240

23. Kestoras M. D., Simon T. W. Combined effects of concave curvature and high free-stream turbulence intensity of boundary layer heat and momentum transport // American Society of Mechanical Engineers, 1993, pp. 1-10 (Code 20061).

dynamics for ribbed triangular duct solar air heater. *Renewable Energy*, 2019, vol. 131, pp. 788-799. https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.078

13. Sharma N., Tariq A., Mishra M. Experimental Investigation of Heat Transfer Enhancement in Rectangular Duct with Pentagonal Ribs. *Heat Transfer Engineering*, 2019, vol. 40 (1-2), pp. 147165. https://doi.org/10.1080/01457632.2017.1421135

14. Schindler A., Younis B. A., Weigand B. Large-Eddy Simulations of turbulent flow through a heated square duct. *International Journal of Thermal Sciences*, 2019, vol. 135, pp. 302-318. https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.09.018

15. D'yachenko A. Yu., Terekhov V. I., Yarygina N. I. Turbulent flow past a transverse cavity with inclined side walls. 2. Heat transfer. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2007, vol. 48, no. 4, pp. 486-491. https://doi.org/10.1007/s10808-007-0061-4

16. Dreitser G. A., Lobanov I. E. Limiting Intensification of Heat Exchange in Tubes Due to Artificial Turbulization of the Flow. *Engineering and Physics Journal*, 2003, vol. 76, no. 1, pp. 46-51.

17. Leont'ev, A.I. Olimpiev V.V.. Teplofizika i teplotekhnika perspektivnykh intensifikatorov teploobmena (obzor) [Heat trahsfer enhancement and flow structure in the channels with dimpled or protruded surface (Review)]. *Izvestiya RAS. Energetika* [Proc. of the RAS. Power Engineering], 2011, pp. 7-31. (In Russian).

18. Popov I. A. *Intensifikatsiia teploobmena. Fizicheskie osnovy i promyshlennoe primenenie intensifikatsii teploobmena* [Intensification of heat exchange. Physical basis and industrial application of heat exchange intensification]. Kazan: KGTU Publ., 2009. 560 p.

19. Dyban E. P., Epik E. Ia. *Teploobmen i gidrodinamika turbulizirovannykh potokov* [Heat transfer and hydrodynamics of turbulent flows]. Kiev: Naukova Dumka Publ., 1985. 296 p.

20. Simonich J., Bradshaw C. P. Effect of free-stream turbulence on heat transfer through a turbulent boundary layer. *Journal of Heat Transfer*, 1978, vol. 100, no. 4, pp. 671-677. https://doi.org/10.1115/1.3450875

21. MacMullin R., Elrod W., Rivir R. *Effects of free stream turbulence from a circular wall jet on a flat plate heat transfer and boundary layer flow*. American Society of Mechanical Engineers (ASME), Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, Amsterdam, Netherlands, June 6-9, 1988. 10 p.

22. MacMullin R., Elrod W., Rivir R. Free-stream turbulence from a circular wall jet on a flat plate heat transfer and boundary layer flow // Journal of Turbomachinery, 1989, vol. 111, no. 1, pp. 78-86. https://doi.org/10.1115/1.3262240

23. Kestoras M. D., Simon T. W. Combined effects of concave curvature and high free-stream turbulence intensity of boundary layer heat and momentum transport. *American Society of Mechanical Engineers*, 1993, pp. 1-10 (Code 20061).

24. Gizzatullina A., Mishchenkova O., Koroleva M., Chernova A. Numerical investigation of cooling down and aerodynamic resistance processes in ribbed tubular elements // Proceedings-2020 Ivannikov Ispras Open Conference, 2020, C. 142-149. https://doi.org/10.1109/ISPRAS51486.2020.00028

25. Baymetova E. S., Chernova A. A., Koroleva M. R., Kelemen M. Optimization of the developed outer surface of an industrial oil cooler // MM Science Journal, 2021, vol. 2021, June, pp. 4764-4768. https://doi.org/10.17973/MMSJ.2021_10_2021027

26. Байметова Е. С., Гиззатуллина А. Ф., Пушкарев Ф. Н. Решение задачи сопряженного теплообмена в оребренной трубке с использованием openFOAM // Химическая физика и мезоскопия. 2021. Т. 23, № 2. С. 154-164. https://doi.org/10.15350/17270529.2021.2.14

27. Koroleva M. R., Saburova E. A., Chernova A. A. Studying the efficiency of cooling and resistance of ribbed tubular elements // Journal of Physics: Conference Series, 2020, vol. 1675, 012009. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1675/1/012009

28. Хабибуллин И. И., Низамутдинов Р. М., Кадыров Р. Г., Николаенка И. В., Гуреев М. В., Тиунов М. В. Численное моделирование процессов теплообмена в аппарате воздушного охлаждения масла // Газовая промышленность. 2019. Т. 780, № 2. С. 84-90.

29. Гуреев М. В., Ермаков А. М., Жукова Ю. В., Кадыров Р. Г., Калимуллин Р. Р., Маршалова Г. С., Миронов А. А., Низамутдинов Р. М., Попов И. А., Скрыпник А. Н., Тиунов С. В., Усенков Р. А., Хабибуллин И. И., Чорный А. Д. Повышение надежности прогнозирования теплогидравлических характеристик трубчато-ребристых радиаторов аппаратов воздушного охлаждения энергоустановок на основе численного и экспериментального исследования // Тепловые процессы в технике. 2020. Т. 12, № 11. С. 482-502. https://doi.org/10.34759/tpt-2020-12-11-482-502

30. Тиунов С. В., Скрыпник А. Н., Маршалова Г. С., Гуреев В. М., Попов И. А., Кадыров Р. Г., Чорный А. Д., Жукова Ю. В. Экспериментальное исследование теплогидравлических характеристик оребренных плоских труб аппарата воздушного охлаждения масла // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 2. С. 138-150. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-138-150

24. Gizzatullina A., Mishchenkova O., Koroleva M., Chernova A. Numerical investigation of cooling down and aerodynamic resistance processes in ribbed tubular elements. *Proceedings-2020 Ivannikov Ispras Open Conference,* 2020. C. 142-149. https://doi.org/10.1109/ISPRAS51486.2020.00028

25. Baymetova E. S., Chernova A. A., Koroleva M. R., Kelemen M. Optimization of the developed outer surface of an industrial oil cooler. *MM Science Journal*, 2021, vol. 2021, June, pp. 4764-4768. https://doi.org/10.17973/MMSJ.2021_10_2021027

26. Baymetova E. S., Gizzatullina A. F., Pushkarev F. N. Reshenie zadachi sopriazhennogo teploobmena v orebrennoi trubke s ispol'zovaniem openFOAM [Solving the Conjugate Heat Transfer Problem in the Ribbed Tube with OpenFOAM]. *Khimicheskaia fizika i mezoskopiya,* [Chemical Physics and Mesoscopy], 2021, vol. 23, no. 2, pp. 154-164. (In Russian). https://doi.org/10.15350/17270529.2021.2.14

27. Koroleva M. R., Saburova E. A., Chernova A. A. Studying the efficiency of cooling and resistance of ribbed tubular elements. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1675, 012009. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1675/1/012009

28. Khabibullin I. I., Nizamutdinov R. M., Kadyrov R. G., Nikolaenka I. V., Gureev M. V., Tiunov M. V. Chislennoe modelirovanie protsessov teploobmena v apparate vozdushnogo okhlazhdeniia masla [Numerical modeling of heat exchange processes in the oil air cooling device]. *Gazovaia promyshlennost'* [Gas Industry], 2019, vol. 780, no. 2, pp. 84-90. (In Russian).

29. Gureev M. V., Ermakov A. M., Zhukova Yu. V., Kadyrov R. G., Kalimullin R. R., Marshalova G. S., Mironov A. A., Nizamutdinov R. M., Popov I. A., Skrypnik A. N., Tiunov S. V., Usenkov R. A., Khabibullin I. I., Chornyi A. D. Povyshenie nadezhnosti prognozirovaniia teplogidravlicheskikh kharakteristik trubchato-rebristykh radiatorov apparatov vozdushnogo okhlazhdeniia energoustanovok na osnove chislennogo i eksperimental'nogo issledovaniia [Improving the reliability of prediction the thermal-hydraulic characteristics of fin-tube radiators of air cooling devices of power plants based on numerical and experimental study]. *Teplovye protsessy v tekhnike* [Thermal Processes in Technology], 2020, vol. 12, pp. 482-502. (In Russian). https://doi.org/10.34759/tpt-2020-12-11-482-502

30. Tiunov S. V., Skrypnik A. N., Marshalova G. S., Gureev V. M., Popov I. A., Kadyrov R. G., Chornyi A. D., Zhukova Yu. V. Eksperimental'noe issledovanie teplogidravlicheskikh kharakteristik orebrennykh ploskikh trubapparata vozdushnogo okhlazhdeniia masla [Experimental investigation of thermal and hydraulic characteristics of finned flat tubes of the oil air cooling device]. *Energetika. Izvestiya* VUZ. Energetika [Energetika. Proc. of CIS HEI and Power Engineering Associations], 2020, vol. 63, pp. 138-150. (In Russian). https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-138-150

31. Аверкиев Л. А., Пославский А. П., Мануйлов В. С. Сервисно-диагностический комплекс для автотракторных теплообменников // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2007. № 10. С. 41-42.

31. Averkiev L. A., Poslavskii A. P., Manuilov V. S. Servisno-diagnosticheskii kompleks dlia avtotraktornykh teploobmennikov [Service and diagnostic complex for automotive heat exchangers]. *Traktory i sel'skokhoziaistvennye mashiny* [Tractors and Agricultural Machines], 2007, no. 10, pp. 41-42. (In Russian).

32. Аспин В. П., Бондаренко Е. В., Пославский А. П., Мануйлов В. С., Хлуденев А. В. Метод контроля рабочих характеристик радиаторов в эксплуатации // Вестник Московского автомобильно-дорожного института (государственного технического университета). 2008. № 4(15). С. 7-12.

32. Aspin V. P., Bondarenko E. V., Poslavskii A. P., Manuilov V. S., Khludenev A. V. Metod kontrolia rabochikh kharakteristik radiatorov v ekspluatatsii [The inspection method of labour characteristics radiators in exploitation]. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo instituta (GTU)* [Bulletin of the Moscow Automobile and Road Institute (STU)], 2008, no. 4(15), pp. 7-12. (In Russian).

33. Аверкиев Л. А., Пославский А. П., Мануйлов В. С., Хлуденев А. В. Метод диагностирования рабочих характеристик теплообменников транспортных машин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2009. № 3. С. 97-101.

33. Averkiev L.A., Poslavskii A.P., Manuilov V.S., Khludenev A.V. Metod diagnostirovaniia rabochikh kharakteristik teploobmennikov transportnykh mashin [Diagnosis method for operating characteristics of heat exchanger in transport machines]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniia* [Bulletin of the Rostov State University of Railways], 2009, no. 3, pp. 97-101. (In Russian).

34. Menter F. R., Kuntz M., Langtry R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model // Turbulence, Heat and Mass Transfer. Begell House, 2003, 8 p.

34. Menter F.R., Kuntz M., Langtry R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model. T*urbulence, Heat and Mass Transfer.* Begell House, 2003, 8 p.

35. Жукаускас А. А. Конвективный перенос в теплообменниках. М.: Наука, 1982. 472 с.

35. Zhukauskas A. A. *Konvektivnyi perenos v teploobmennikakh* [Convective transfer in heat exchangers]. M.: Nauka Publ., 1982. 472 p.

Поступила 23.03.2022; после доработки 08.04.2022; принята к опубликованию 11.04.2022
Received 23 March 2022; received in revised form 08 April 2022; accepted 11 April 2022

Информация об авторах

Армянин Алексей Юрьевич, *аспирант, ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, Ижевск, Российская Федерация*

Байметова Елена Сергеевна, *старший преподаватель, ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, Ижевск, Российская Федерация, e-mail: baimetova.e.s@gmail.com*

Хвалько Михаил Евгеньевич, *аспирант, ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, Ижевск, Российская Федерация*

Information about the authors

Aleksej Yu. Armyanin, *Post Graduate Student, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation*

Elena S. Baymetova, *Senior Lecturer, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation, e-mail: baimetova.e.s@gmail.com*

Mikhail E. Hval'ko, *PhD Student, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation*