



Received: 09.07.2024
Revised: 30.09.2024
Accepted: 25.10.2024
DOI: 10.17804/2410-9908.2024.5.107-116

THE EFFECT OF COOLANT FLOW RATE ON THE COOLING EFFICIENCY OF A FINNED TUBE

A. D. Surnin

*Kalashnikov Izhevsk State Technical University,
7 Studencheskaya St., Izhevsk, Udmurt Republic, 426069, Russia*

 <https://orcid.org/0009-0007-9817-5122>  lalagass66@gmail.com

Email: lalagass66@gmail.com

Address for correspondence: ul. Studencheskaya, 7, Izhevsk, Udmurt Rep., 426069, Russia
Tel.: +7 (912) 451-9565

The problem of conjugate heat transfer in a radiator cooling element is solved by numerical methods. The study solves the problem of the motion of continuous media, which is described by the system of the Navier–Stokes equations and the heat transfer equation. These equations are numerically integrated by the control volume method within the OpenFOAM open-source computational platform. The optimal number of grid elements was determined through grid convergence analysis. The obtained results enable the assessment of fluid heating along the channel length and the temperature gradient between the tube wall and the surrounding air. The data obtained for various flow rates of the working fluid inside the finned tube were analyzed, and recommendations for use are given.

Keywords: finned tube, conjugate problem, heat transfer, numerical simulation, OpenFOAM

Reference

1. Koroleva, M.R., Saburova, E.A., and Chernova, A.A. Studying the efficiency of cooling and resistance of ribbed tubular elements. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1675, 012009. DOI: 10.1088/1742-6596/1675/1/012009.
2. Gizatullina, A., Koroleva, M., Mishchenkova, O., and Chernova, A. Numerical investigation of cooling down and aerodynamic resistance processes in ribbed tubular elements. In: *2020 Ivannikov Ispras Open Conference (ISPRAS)*, Moscow, Russia, December 10–11, 2020, IEEE, 2020, pp. 142–149. DOI: 10.1109/ISPRAS51486.2020.00028.
3. Baimetova, E.S., Gizatullina, A.F., Koroleva, M.R., Mishchenkova, O.V., Pushkarev, F.N., and Chernova, A.A. Heat load of bimetallic ribbed tube. *Trudy ISP RAN*, 2021, 33 (5), 271–282. (In Russian).
4. Baymetova, E.S., Chernova, A.A., Koroleva, M.R., and Kelemen, M. Optimization of the developed outer surface of an industrial oil cooler. *MM Science Journal*, 2021, 2021 (June), 4764–4768. DOI: 10.17973/MMSJ.2021_10_2021027.
5. Zhao, W., Wang, Q., and Liu, P. The experimental investigation of recirculation of air-cooled system for a large power plant. *Energy and Power Engineering*, 2010, 2, 291–297. DOI: 10.4236/epe.2010.24041.
6. Fedorov, V.A., Milman, O., Ananyev, P.A., Ptahin, A.V., Zhinov, A.A., Karyshev, A.K., and Shevelev, D.V. Results of experimental and computational analysis of air flow in the circle channels of the air-cooled condensers of steam power plants. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana, Seriya Mashinostroenie*, 2015, 5, 87–105. (In Russian). DOI: 10.18698/0236-3941-2015-5-87-105.



7. Zhukauskas, A.A. *Konvektivnyi teploobmen v teploobmennikakh* [Convective Transfer in Heat Exchangers]. Nauka Publ., Moscow, 1982, 472 p. (In Russian).
8. Garcia, A., Vicente, P.G., and Viedma, A. Experimental study of heat transfer enhancement with wire coil inserts in laminar-transition-turbulent regimes at different Prandtl numbers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, 48 (21–22), 4640–4651. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.04.024.
9. Baimetova, E.S., Gizzatullina, A.F., and Pushkarev, F.N. Solving the conjugate heat transfer problem in the ribbed tube with OpenFOAM. *Khimicheskaya Fizika i Mezoskopiya*, 2021, 23 (2), 154–164. (In Russian). DOI: 10.15350/17270529.2021.2.14.
10. Koroleva, M.R., Mishchenkova, O.V., Kelemen, M., and Chernova, A.A. Theoretical research of the internal gas dynamics processes of measurements of hot air curtain with cross-flow fan. *MM Science Journal*, 2020, 2020 (June), 3966–3972. DOI: 10.17973/MMSJ.2020_06_2020028.
11. Raeder, T., Tenenev, V.A., Koroleva, M.R., and Mishchenkova, O.V. Nonlinear processes in safety systems for substances with parameters close to a critical state. *Russian Journal of Nonlinear Dynamics*, 2021, 17 (1), 119–138. DOI: 10.20537/nd210109.
12. Volkov, K.N. and Emelianov, V.N. *Vychislitelnye tekhnologii v zadachakh mekhaniki zhidkosti i gaza* [Computational Technologies in the Problems of Fluid and Gas Mechanics]. Fizmatlit Publ., Moscow, 2012, 468 p. (In Russian).
13. Korolyova, M.R., Terentyev, A.N., and Chernova, A.A. Fluid dynamics of a complicated collector. *Vestnik RGATA Imeni P.A. Solovyeva*, 2021, 3 (58), 50–55.
14. Isachenko, V.P., Osipova, V.A., and Sukomel, A.S. *Teploperedacha* [Heat Transfer]. OOO TID Aris Publ., Moscow, 2014, 416 p.
15. Available at: <https://openfoamwiki.net/index.php/ChtMultiRegionFoam> (circulation date 21.05.2024).
16. Available at: <https://www.openfoam.com/documentation/user-guide/4-mesh-generation-and-conversion/4.3-mesh-generation-with-the-blockmesh-utility> (circulation date 21.05.2024).
17. Available at: <https://doc.openfoam.com/2306/tools/pre-processing/mesh/manipulation/topoSet/>
18. Available at: <http://www.paraview.org/> (circulation date 21.05.2024).
19. Sukhanovskii, A. and Vasiliev, A. Physical mechanism of the convective heat flux increasing in case of mixed boundary conditions in Rayleigh-Bénard convection. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 185, 122411. DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122411.



Подана в журнал: 09.07.2024

УДК 533+536.24

DOI: 10.17804/2410-9908.2024.5.107-116

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТНОГО РЕЖИМА ПОДАЧИ ХЛАДАГЕНТА НА ОХЛАЖДАЮЩЮЮ СПОСОБНОСТЬ ОРЕБРЕННОЙ ТРУБКИ

А. Д. Сурнин

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ижевский государственный университет им. М. Т. Калашникова»
ул. Студенческая, 7, Ижевск, Удмуртская Республика, 426069, Россия*

 <https://orcid.org/0009-0007-9817-5122>  lalagass66@gmail.com

Электронная почта: lalagass66@gmail.com

Адрес для переписки: ул. Студенческая, 7, Ижевск, Удмуртская Республика, 426069, Россия
Тел.: +7 (912) 451-95-65

Численно решена задача сопряженного теплообмена охлаждающего элемента радиатора. В работе реализуется решение задачи о движении сплошных сред, описываемом системой уравнений Навье – Стокса и уравнением теплопередачи. Эти уравнения численно интегрируются методом контрольных объемов в открытой интегрируемой платформе для численного решения задач механики сплошных сред openFOAM. Было определено оптимальное количество элементов расчетной сетки путем сеточной сходимости. Полученные результаты позволяют оценить прогрев жидкости по длине канала, а также перепад температур на стенках трубки и в окружающем ее воздухе. Проведен анализ полученных данных для различных скоростей рабочей жидкости внутри оребренной трубки, даны рекомендации к использованию.

Ключевые слова: оребренная трубка, сопряженная задача, теплообмен, численное моделирование, openFOAM

1. Введение

В радиаторах и маслоохладителях чаще всего используются трубчатые теплообменники [1–4] из-за их компактности, простоты эксплуатации и большой площади теплообмена. При этом вопросы эффективности теплообменных аппаратов различных конструкций, работающих на одной среде (например, вода – вода) экспериментально исследованы в работах [5–8]. С другой стороны, вопросы организации эффективного теплоотвода в конвективных теплообменных устройствах, работающих в разных средах (воздух – масло, газ – хладагент, вода – газ и т. д.), [9] остаются недостаточно исследованными. Открытым остается и вопрос однозначного определения эффективности теплообменного оборудования, в виду чего исследование влияния рабочих и геометрических параметров на охлаждающую способность тепловых устройств, работающих с гетерогенными средами, остается актуальным и востребованным.

Настоящая работа направлена на изучение влияния рабочих параметров хладагента на тепловую эффективность одиночной оребренной трубки.

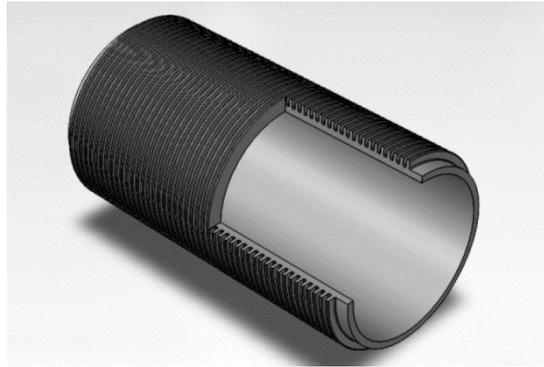


Рис. 1. Оребренная труба

Оребренные трубки (рис. 1) представляют собой тонкостенную трубку с прикрепленными к ней ребрами. Геометрически ребра могут представлять собой кольца большего диаметра, тонкую спиральную ламель, продольные полосы и т. д. (ГОСТ Р 51364-99 Аппараты воздушного охлаждения). Основное назначение ребер – увеличение площади теплообмена и, соответственно, передача большего количества тепла от трубы в окружающее пространство.

2. Постановка задачи и методы решения

Рассматривается задача сопряженного теплообмена в системе хладагент – металл – воздух в условиях экстремального отвода тепла от воздушного потока. Протяженная поверхность теплоотдачи вызывает вопрос о прогреве охлаждающей жидкости внутри трубки и эффективности охлаждения воздуха по всей длине трубки. Расчетная область приведена на рис. 2. Хладагент подается в трубку сверху вниз под действием силы тяжести. Нагнетаемый охлаждаемый воздух подается нормально по отношению к потоку хладагента. Расстояние между входом воздуха в расчетную область и оребренной трубкой составляет 100 мм, между оребренной трубкой и областью выхода воздуха – 250 мм, что соответствует рекомендациям [1–3, 9].

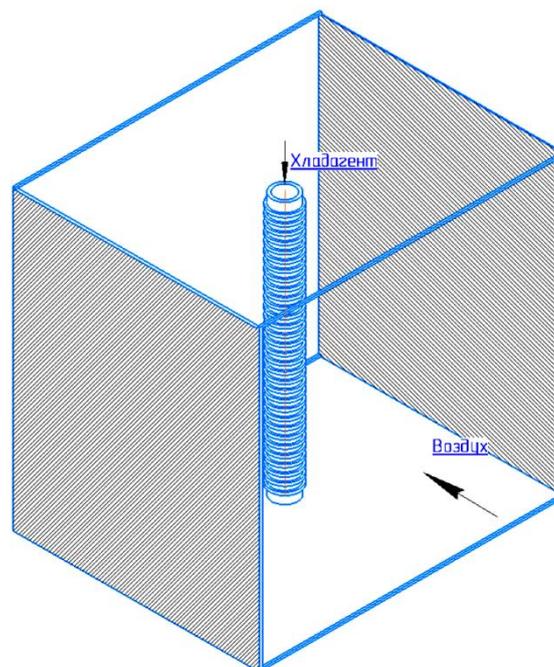


Рис. 2. Расчетная модель



Оребренная трубка, выполненная из алюминия, имеет следующие параметры: диаметр трубы – 25 мм; толщина стенки – 2 мм; радиус ребра – 10 мм; толщина ребра – 1 мм; расстояние между ребрами – 5 мм. Рабочей охлаждающей средой является этиленгликоль (плотность $\rho = 1116 \text{ кг/м}^3$, вязкость $\mu = 0,000011 \text{ Па}\cdot\text{с}$), а охлаждаемой средой – нагнетаемый внешним компрессором воздух (плотность $\rho = 1,204 \text{ кг/м}^3$, динамическая вязкость $\mu = 0,0000181 \text{ Па}\cdot\text{с}$). Поскольку скорость движения воздуха в охлаждаемом тракте составляет 4 м/с, что составляет менее 0,5 М [1], для описания аэродинамики [10–12] применяется модель вязкого несжимаемого теплопроводного газа, динамика жидкости [13] описывается в рамках модели несжимаемой вязкой теплопроводной жидкости.

Таким образом, математическая модель движения текучих сред основана на уравнениях Навье – Стокса. Скорость охлаждающей жидкости и ее физические характеристики указывают на ламинарный режим движения, поэтому модели турбулентности при расчете движения хладагента не использовались. Система уравнений, описывающая движение сплошных сред в общем случае, имеет вид

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

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

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial \rho E u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial u_i \tau_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial q_j}{\partial x_j} + F_i u_i. \quad (3)$$

В приведенных выше формулах приняты следующие обозначения: ρ – плотность среды; u – компоненты вектора скорости; p – давление; μ – динамический коэффициент вязкости; F – внешняя массовая сила; $E = C_p T + 0.5 u_i^2$ – полная удельная энергия; $\tau_{ij} = 2\mu S_{ij} - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij}$ – 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; $q = \lambda \frac{\partial T}{\partial x_j}$ – тепловой поток; λ – коэффициент теплопроводности среды; T – температура; C_p – теплоемкость при постоянном давлении.

Моделирование процессов теплоотдачи в оребренной трубке проводится на основе уравнения теплопроводности [13]:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = \nabla(\lambda \nabla T). \quad (4)$$

Начальные условия определены параметрами невозмущенных сред. Граничные условия представлены в таблице.

Решение системы уравнений (1)–(4) реализуется в рамках квазистационарного приближения методом контрольных объемов в открытой интегрируемой платформе для численного решения задач механики сплошных сред openFoam с помощью решателя chtMultiRegionSimpleFoam [14]. Дискретизация расчетной области по пространству (рис. 3) производилась с использованием 11 миллионов шестигранных элементов с применением утилит построения сеток blockMesh [15] и topoSet [16] пакета openFoam; визуализация результатов моделирования производилась с использованием пакета paraView [17]. Оптимальное количество элементов расчетной сетки определено по результатам исследования сеточной сходимости (рис. 4).

Таблица

Граничные условия

Домены/границы	Трубка	Ребра	Вход	Выход
Воздух	$\lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial n} = \lambda_t \frac{\partial T_t}{\partial n}$ $T_g = T_t$	$\lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial n} = \lambda_e \frac{\partial T_e}{\partial n}$ $T_g = T_e$	$u_g = 4 \text{ м/с}$ $T_g = 333 \text{ К}$	$p_g = 10^5 \text{ Па}$
Хладагент	$\lambda_l \frac{\partial T_l}{\partial n} = \lambda_t \frac{\partial T_t}{\partial n}$ $T_l = T_t$	–	$u_l = 0,1; 0,5; 1; 1,5;$ 2 м/с $T_l = 213 \text{ К}$	$p_l = 10^5 \text{ Па}$
Трубка	–	$\lambda_t \frac{\partial T_t}{\partial n} = \lambda_e \frac{\partial T_e}{\partial n}$ $T_t = T_e$	–	–

Здесь λ – коэффициент теплопроводности среды; T – температура среды; p – давление; u – вектор скорости; g – газ; t – трубка; l – хладагент.

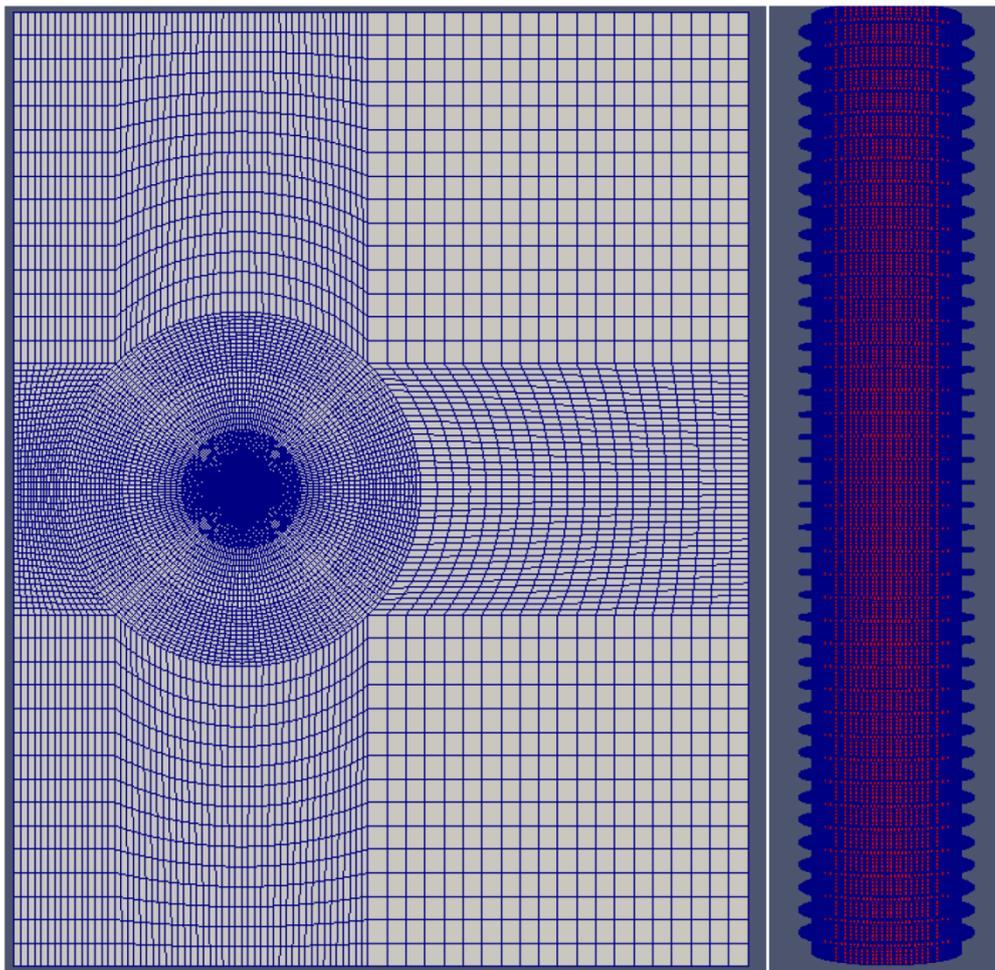


Рис. 3. Расчетная сетка

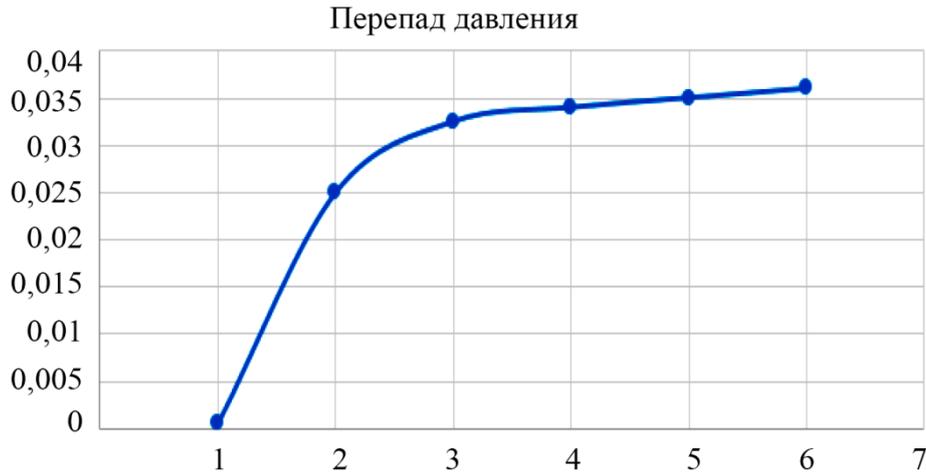


Рис. 4. Сеточная сходимость: зависимость перепада давления от количества элементов по высоте ребра

3. Результаты и обсуждение

В результате численного моделирования получены распределения полей физических параметров рабочих сред. Показано, что при ламинарном течении теплообмен между слоями жидкости, перпендикулярными к стенке трубки, осуществляется преимущественно посредством теплопроводности при условии, что каждый слой жидкости обладает своей собственной скоростью продольного движения. Это в совокупности приводит к одновременному конвективному переносу тепла в продольном направлении. Таким образом, процесс теплообмена при ламинарном режиме течения определяется гидродинамической картиной движения.

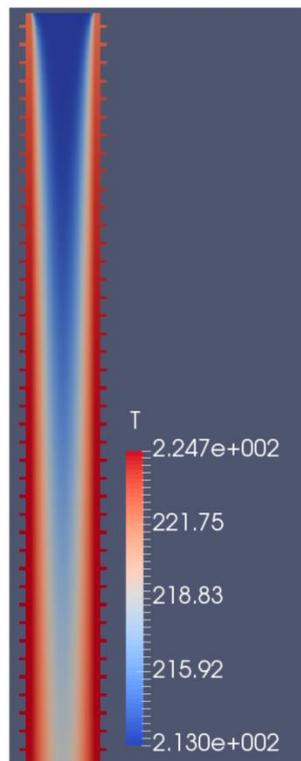


Рис. 5. Распределение температуры в поперечном сечении оребренной трубки

По мере продвижения потока происходит теплообмен между жидкостью и стенкой трубки, приводящий к постепенному повышению температуры хладагента. Вблизи входного

сечения изменение температуры происходит только в тонком слое около стенки трубки. По мере удаления от входного сечения все бóльшая часть потока вовлекается в процесс теплообмена, при этом у стенки трубки формируется тепловой пограничный слой, толщина которого постепенно увеличивается. На определенном расстоянии от входного сечения трубы тепловые пограничные слои смыкаются, и весь поток жидкости начинает участвовать в процессе теплообмена, что представлено на рис. 5.

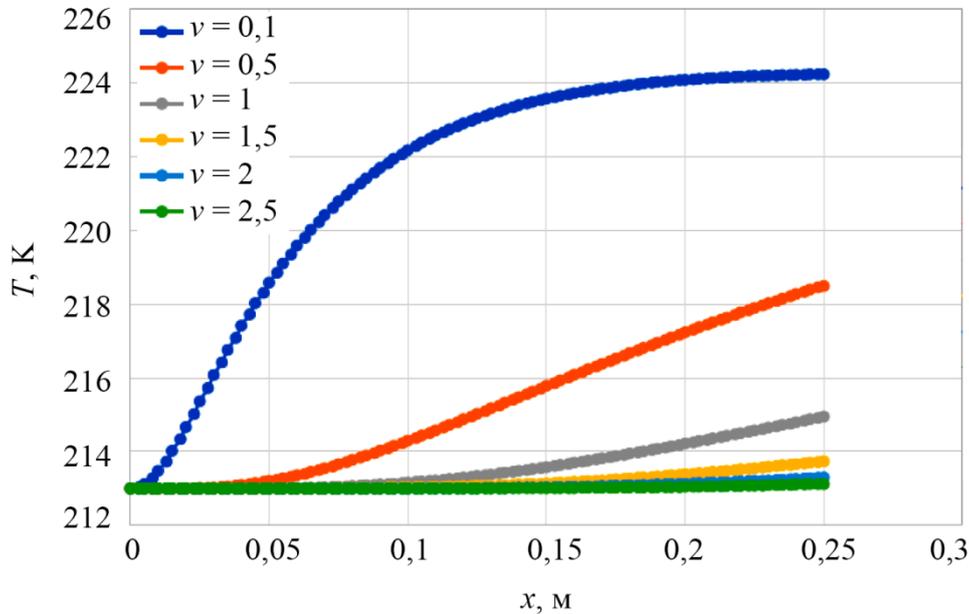


Рис. 6. Сравнение изменений температуры хладагента по длине трубки

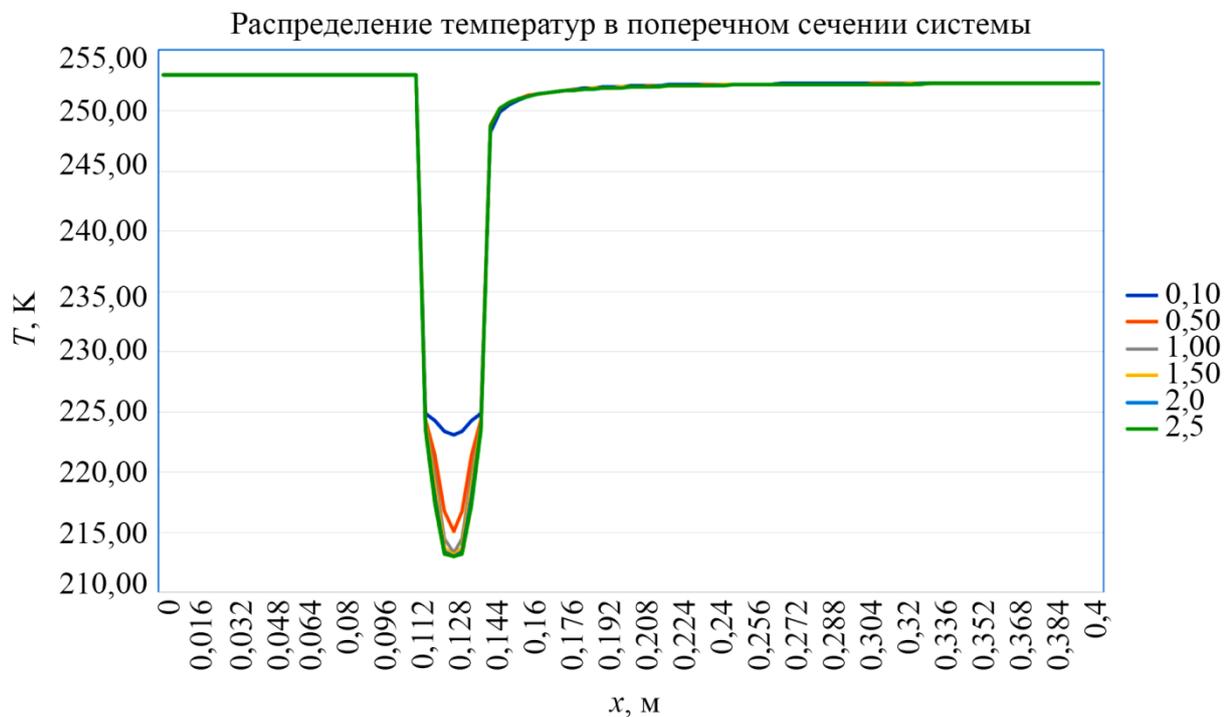


Рис. 7. Температурный профиль в поперечном сечении расчетной области

Из рисунка 6 видно, что при низкой скорости в 0,1 м/с тепловые граничные слои смыкаются вблизи входного сечения, и к концу длины трубки хладагент почти не снимает тепло

со стенок, что так же видно на рис. 5. В то же время при высоких скоростях в 1 м/с и более хладагент в трубке не успевает прогреться и снимает незначительное количество тепла.

Также по распределению температур в поперечном сечении трубки, представленном на рис. 7, видно, что при скоростях 0,1 и 0,5 м/с наблюдаются самые широкие граничные слои снятия тепла. Положение области отрыва потока определяет область минимального теплосъема на внешней поверхности оребренной трубки, область контакта с набегающим потоком газа на переднюю кромку вплоть до боковой поверхности трубки обеспечивает максимальный теплосъем, что видно на рис. 8.



Рис. 8. Распределение температуры в поперечном разрезе расчетной области

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что оптимальная с точки зрения тепловой способности трубки скорость подачи хладагента составляет 0,5 м/с. Именно при этой скорости трубка равномерно прогревается по всей своей длине, при этом перенося максимальное количество тепла, максимальное охлаждение наблюдается в кормовой части трубки и составляет примерно 4 К, стабилизируется поток нагретого воздуха и принимает значение 250 К (рис. 8).

Сопоставление данных позволяет однозначно определить достигаемый первичный перепад температур при взаимодействии потока воздуха с охлаждающим элементом в виде оребренной трубки. Достигаемый перепад температур воздуха составляет 7 К. Такое распределение температур косвенно свидетельствует как о работоспособности конструкции, так и о ее эффективности.

Для максимальной эффективности работы данной оребренной трубки рекомендуется устанавливать ее в змеевидный теплообменный аппарат для равномерного снятия тепла по всей длине трубки.

4. Заключение

В работе исследовано течение несжимаемой жидкости внутри оребренной трубки при ламинарном движении. Выявлена и показана оптимальная скорость движения хладагента по оребренным трубкам.

Литература

1. 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. – 1675. – 012009. – DOI: 10.1088/1742-6596/1675/1/012009.
2. Numerical investigation of cooling down and aerodynamic resistance processes in ribbed tubular elements / A. Gizzatullina, O. Mishchenkova, M. Koroleva, A. Chernova // 2020 Ivannikov Ispras Open Conference, ISPRAS 2020 : proceedings. – IEEE, 2020. – P. 142–149. – DOI: 10.1109/ISPRAS51486.2020.00028.
3. Тепловая нагрузка биметаллической оребренной трубки / Е. С. Байметова, А. Ф. Гиззатуллина, М. Р. Королева, О. В. Мищенко, Ф. Н. Пушкарев, А. А. Чернова // *Труды Института системного программирования РАН*. – 2021. – Т. 33 (5). – С. 271–282.



4. Optimization of the developed outer surface of an industrial oil cooler / E. S. Baymetova, A. A. Chernova, M. R. Koroleva, M. Kelemen // *MM Science Journal*. – 2021. – Vol. 2021 (June). – P. 4764–4768. – DOI: 10.17973/MMSJ.2021_10_2021027.
5. Zhao W., Wang Q., Liu P. The experimental investigation of recirculation of air-cooled system for a large power plant // *Energy and Power Engineering*. – 2010. – No. 2. – P. 291–297. – DOI: 10.4236/epe.2010.24041.
6. Результаты экспериментально-расчетных исследований воздушного потока в циркуляционных воздушных конденсаторах паротурбинных установок / В. А. Федоров, О. О. Мильман, П. А. Ананьев, А. В. Птахин, А. А. Жинов, А. К. Карышев, Д. В. Шевелев // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*. – 2015. – № 5. – С. 87–105. – DOI: 10.18698/0236-3941-2015-5-87-105.
7. Жукаускас А. А. Конвективный перенос в теплообменниках. – М.: Наука, 1982. – 472 с.
8. Garcia A., Vicente P. G., Viedma A. Experimental study of heat transfer enhancement with wire coil inserts in laminar-transition-turbulent regimes at different Prandtl numbers // *Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2005. – Vol. 48 (21–22). – P. 4640–4651. – DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.04.024.
9. 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. – DOI: 10.15350/17270529.2021.2.14.
10. Theoretical research of the internal gas dynamics processes of measurements of hot air curtain with cross-flow fan / M. R. Koroleva, O. V. Mishchenkova, M. Kelemen, A. A. Chernova // *MM Science Journal*. – 2020. – Vol. 2020 (June). – P. 3966–3972. – DOI: 10.17973/MMSJ.2020_06_2020028.
11. Nonlinear processes in safety systems for substances with parameters close to a critical state / T. Raeder, V. A. Tenenev, M. R. Koroleva, O. V. Mishchenkova // *Russian Journal of Nonlinear Dynamics*. – 2021. – Vol. 17, No. 1. – P. 119–138. – DOI: 10.20537/nd210109.
12. Волков К. Н., Емельянов В. Н. Вычислительные технологии в задачах механики жидкости и газа. – М.: Физматлит, 2012. – 468 с.
13. Королева М. Р., Терентьев А. Н., Чернова А. А. Гидродинамика коллектора сложной формы // *Вестник РГАТА имени П. А. Соловьева*. – 2021. – № 3 (58). – С. 50–55.
14. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. – 5-е изд., стер. – М.: ООО «ТИД Арис», 2014. – 416 с.
15. URL: <https://openfoamwiki.net/index.php/ChtMultiRegionFoam> (дата обращения 21.05.2024).
16. URL: <https://www.openfoam.com/documentation/user-guide/4-mesh-generation-and-conversion/4.3-mesh-generation-with-the-blockmesh-utility> (дата обращения 21.05.2024).
17. URL: <https://doc.openfoam.com/2306/tools/pre-processing/mesh/manipulation/topoSet/>
18. URL: <http://www.paraview.org/> (дата обращения 21.05.2024).
19. Sukhanovskii A., Vasiliev A. Physical mechanism of the convective heat flux increasing in case of mixed boundary conditions in Rayleigh-Bénard convection // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2022. – Vol. 185. – P. 122411. – DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122411.