

Научная статья
УДК 532
DOI: [10.34759/trd-2023-130-08](https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-08)

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МНОГОКАНАЛЬНОМ КОЛЛЕКТОРЕ

Елена Сергеевна Байметова

Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова,
ИжГТУ имени М.Т. Калашникова

Ижевск, Россия

baimetova.e.s@gmail.com

Аннотация: Работа посвящена исследованию гидродинамических процессов в многоканальном раздающем коллекторе. В качестве рабочей жидкости рассматривается гидравлическое масло Лукойл Гейзер СТ-32. Рассматриваемый коллектор эксплуатируется при скоростях 0,1 – 3 м/с, течение при которых соответствует ламинарному диапазону. В работе проводится моделирование при скорости течения рабочей жидкости 0,1 м/с для 2-х, 4-х, 6-ти и 8 секций коллектора. В результате исследования получены распределения давления и скорости потока, построены гидродинамические характеристики многоканального коллектора.

Ключевые слова: численное моделирование, многосекционный коллектор, гидродинамика, математическое моделирование

Для цитирования: Байметова Е.С. Численное моделирование гидродинамических

Original article

NUMERICAL SIMULATION OF HYDRODYNAMIC PROCESSES IN A MULTICHANNEL COLLECTOR

Elena S. Baimetova

M.T. Kalashnikov Izhevsk State Technical University,

Izhevsk, Russia

baimetova.e.s@gmail.com

Abstract: Hydraulic device being considered in the article represents a component part of the heat exchanger, which includes distributing and receiving collectors. These collectors are interconnected by a set of eight parallel identical sections, located across the channels of the working fluid supply and discharge. Each section consists of six micro-channels, which inner finning is accomplished in the form of symmetrical trapezoids with a narrow upper edge. The operative range of velocities for the given type of hydraulic device is 0.1-3 /s, and the flow within this operative range is laminar. The article presents modeling at the working fluid velocity of 0.1 m/s for two, four, six and eight sections of the collector according to the fundamental technique described in the I.E. Idelchik's reference book on hydraulic resistances. Numerical modeling was performed with the openFoam package for solving continuum mechanics problems in the stationary setting based on finite volumes using the simpleFoam solver. Computations were made by the method of establishing using iteration convergence procedure by the velocity mis-tie of 10^{-7} and pressure mis-tie

of 10^{-6} . The delivery collector computational grid was built in the Salome package and consists of 6 million tetrahedral elements for the eight-section collector. Analysis of the results obtained by the theoretical calculation of hydraulic resistances differs greatly from the numerical modeling data at the identical problem setting, which might be associated with poor applicability of the I.E. Idelchik's technique for this kind of structures, and flagrant necessity for new techniques introduction for hydraulic resistance computing of complex collector systems. As the result of the study, the flow velocity distribution and pressure difference, decreasing with the number of sections increasing, were obtained as well, and the absence of hydraulic plugging along the equiscalar surfaces was demonstrated.

Keywords: numerical simulation, multi-section collector, hydrodynamics, mathematical modeling

For citation: Baimetova E.S. Numerical simulation of hydrodynamic processes in a multichannel collector. *Trudy MAI*, 2023, no. 130. DOI: [10.34759/trd-2023-130-08](https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-08)

Введение

Многоканальные коллекторы используются в различных сферах деятельности человека: в промышленности, энергетике, авиационной технике, а также в гидравлических системах, основное направление использования, в которых – распределение потока рабочей жидкости по каналам отвода, к примеру, для дальнейшего эффективного охлаждения потока [1]. Рассматриваемое устройство является частью теплообменного аппарата, который кроме исследуемого

раздающего коллектора включает в себя принимающий коллектор. Коллекторы соединены между собой набором идентичных секций, расположенных поперек основных каналов подвода и отвода, с микроканалами внутри каждой секции (Рисунок 1).

Исследованию внутренней гидродинамики коллекторных систем посвящен обширный ряд работ [1-9]. основополагающая методика для расчета гидравлических сопротивлений в коллекторных системах описана в широко известном справочнике по гидравлическим сопротивлениям И.Е. Идельчика [2]. В работах коллектива авторов [3, 10] показаны экспериментальные зависимости гидравлических сопротивлений аппаратов при различных режимах работы и геометрических характеристиках. В работе [4] рассмотрена исследуемая коллекторная система в полном сборе, но без учета микроканалов, проводится оценка гидродинамических характеристик раздающего и собирающего коллекторов. В [5-9] рассмотрена гидродинамика типовых раздающих коллекторных систем. В работах [11, 12, 17] рассмотрены методы численного и аналитического решения задач о стационарном течении вязкой несжимаемой жидкости. В работах [16-19] рассматриваются прочностные расчеты ребристых поверхностей, в том числе с учетом сопряженного теплообмена в микроканалах коллектора.

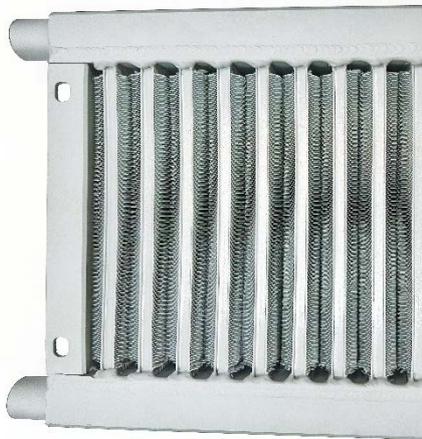
Несмотря на большое количество работ посвященных гидродинамике внутренних процессов коллекторных систем, ввиду постоянной технической модернизации данного класса оборудования, работы, относящиеся к численному моделированию сложных многоканальных коллекторов нетиповых конструкций, требуют проведения новых исследований.

Постановка задачи

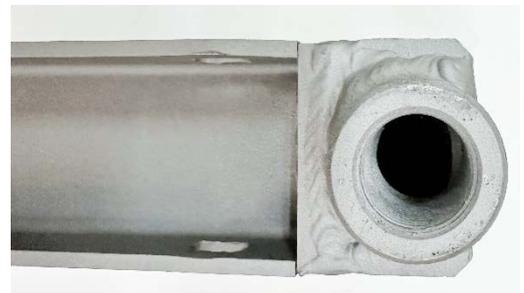
Объектом исследования данной работы является многоканальный раздающий коллектор. Коллектор состоит из канала подвода овального сечения и множественных каналов отвода жидкости. Каналы отвода сгруппированы в секции, каждая из которых содержит по шесть микроканалов прямоугольного сечения с внутренним оребрением. Оребрение необходимо для турбулизации потока, интенсификации теплообмена и увеличении площади теплоотдачи. Геометрия микроканалов представлена на рисунках 1в, 2в и имеет форму симметричных трапеций с узкой верхней кромкой.

Общий вид многоканального коллектора представлен на Рисунке 1. На рисунке 2 изображена расчетная схема раздающего коллектора с границами подвода и отвода рабочей жидкости.

Для выявления гидродинамических характеристик коллектор считался в полной сборке, включающей 8 секций для отвода жидкости, а также с 6-ю, 4-мя и 2-мя секциями, содержащих по 6 микроканалов каждый.



а) общая схема коллектора с 8 секциями



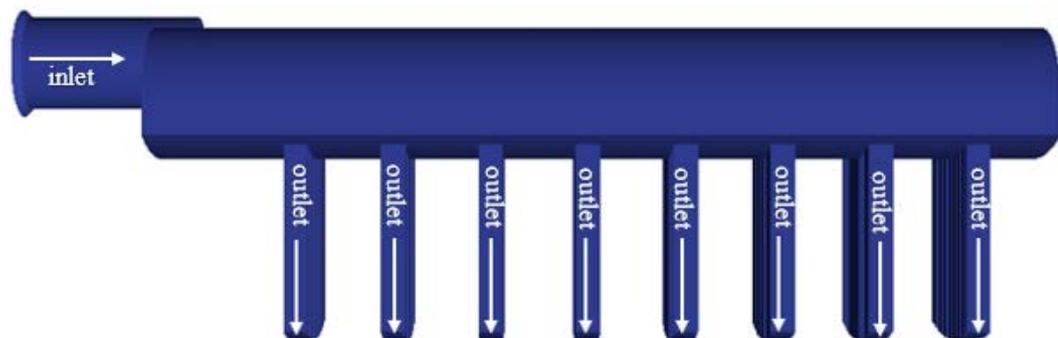
б) входное сечение ($d = 0,0274$ м)



в) геометрия выходных микроканалов

Рисунок 1 – Многоканальный коллектор.

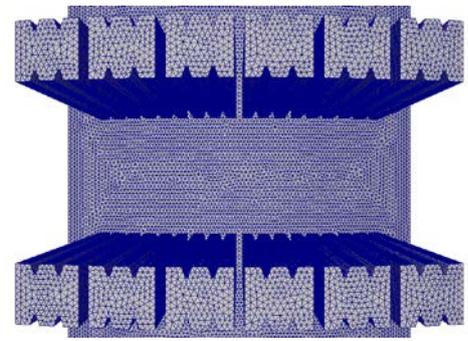
Рабочей жидкостью в системе является гидравлическое масло Лукойл Гейзер СТ-32, характеристики которого определяются следующими величинами: кинематическая вязкость $\nu = 32,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, динамическая вязкость $\mu = 0,0295 \text{ Па} \cdot \text{с}$, плотность $\rho = 897 \text{ кг}/\text{м}^3$, коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,11 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, удельная теплоемкость $c_p = 1500 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, молярная масса $M = 186 \text{ г}/\text{моль}$, коэффициент температуропроводности $a = 8,17 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$, число Прандтля $Pr = 402,7$.



а) схема течения



б) общий вид коллектора с расчетной сеткой



в) геометрия выходных каналов

Рисунок 2 – Общая расчетная схема многоканального коллектора.

Математическая модель

Математическая модель основана на системе уравнений Навье-Стокса. При построении математической модели использовались следующие допущения: течение ламинарное, стационарное, жидкость несжимаемая, вязкость масла постоянная, шероховатость материала не учитывается:

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

$$\frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad (2)$$

где u_i - компоненты вектора скорости u , p - избыточное давление отнесенное к плотности жидкости, ν - кинематический коэффициент вязкости, i, j - индексы принимающие значения 1, 2, 3.

Построенная таким образом на основе уравнений сохранения система уравнений (1)-(2) решается приближенно на основе метода конечных объемов в рамках стационарной постановки. Численное моделирование проводится в пакете для решения задач механики сплошных сред openFOAM, с применением решателя

simpleFoam. Расчет проводился методом установления с использованием итерационной процедуры сходимости по невязке скорости 10^{-7} и давления 10^{-6} . Основные граничные условия, используемые при численном моделировании, приведены в Таблице 1. Выбор граничных условий с учетом пристеночных течений основывался на результатах, рассмотренных в [13].

Таблица 1. Граничные условия

Граница/Параметр	p , м ² /с ²	U , м/с
Inlet	zeroGradient	0,1
Outlet	0	zeroGradient
Walls	zeroGradient	0

Характеристики жидкости и скорость потока позволяют моделировать движение в ламинарной постановке. Расчет числа Рейнольдса при скорости $u = 0,1$ м/с, входном диаметре $d = 0,0274$ м и динамической вязкости гидравлического масла $\mu = 0,0295$ Па·с:

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot d}{\mu} = \frac{897 \cdot 0,1 \cdot 0,02764}{0,0295} = 84$$

Результаты численного моделирования

Расчетная сетка построена с использованием модуля для построения сеток в пакете Salome и конвертирована в пакет openFOAM, сетка содержит около 6 млн тетраэдральных элементов для 8-ми секционного коллектора.

Результаты численного моделирования при скорости подачи масла 0,1 м/с для 2-х, 4-х, 6-ти и 8-ми секционного раздающего коллектора показаны на Рисунках 3-4 и не противоречат [14, 15, 20].

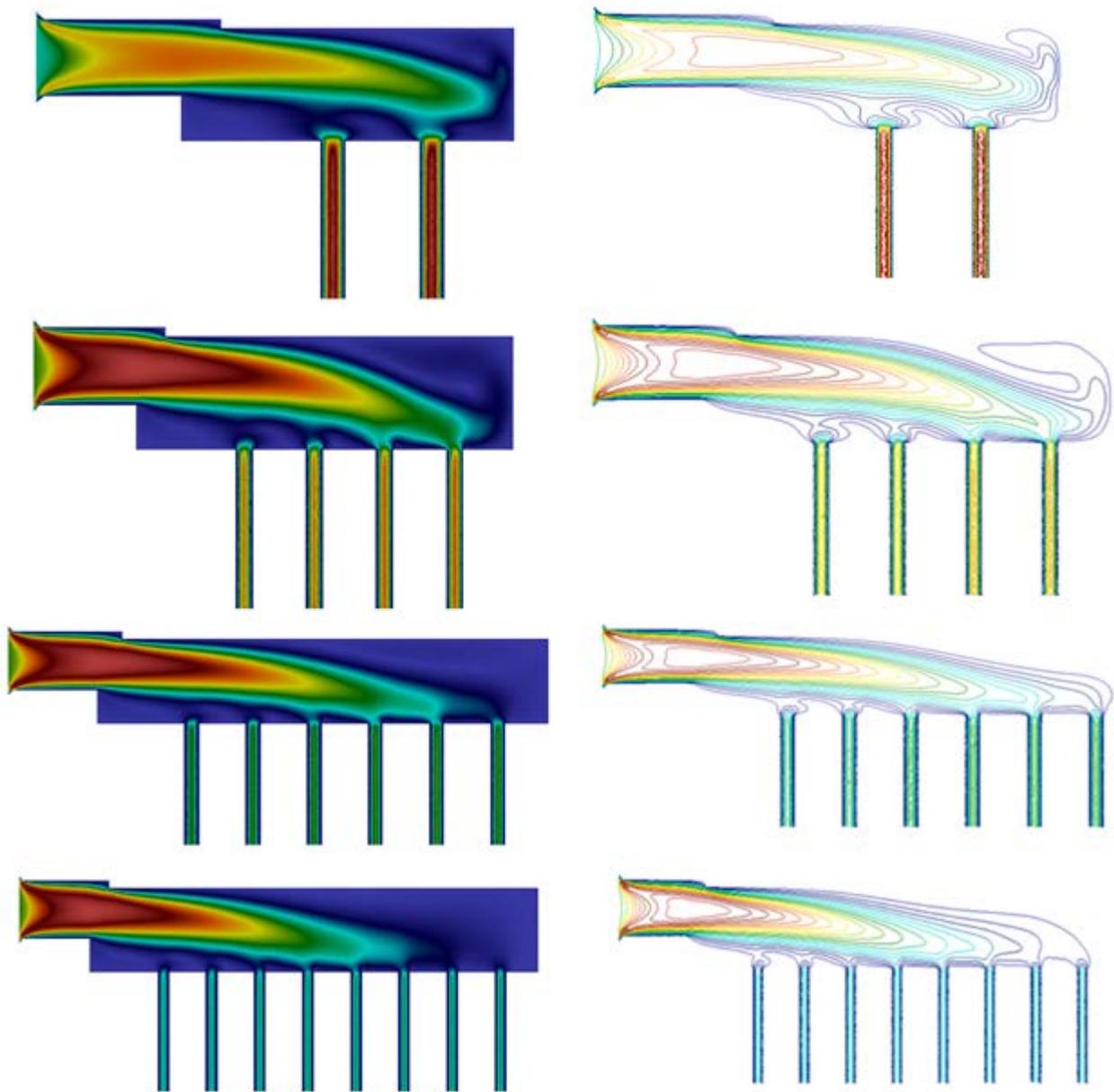


Рисунок 3 – Внутренняя гидродинамика при скорости 0,1 м/с.

Перепад давления при скорости подачи масла 0,1 м/с для 2-х, 4-х, 6-ти и 8-ми канального раздающего коллектора представлен на Рисунке 4.

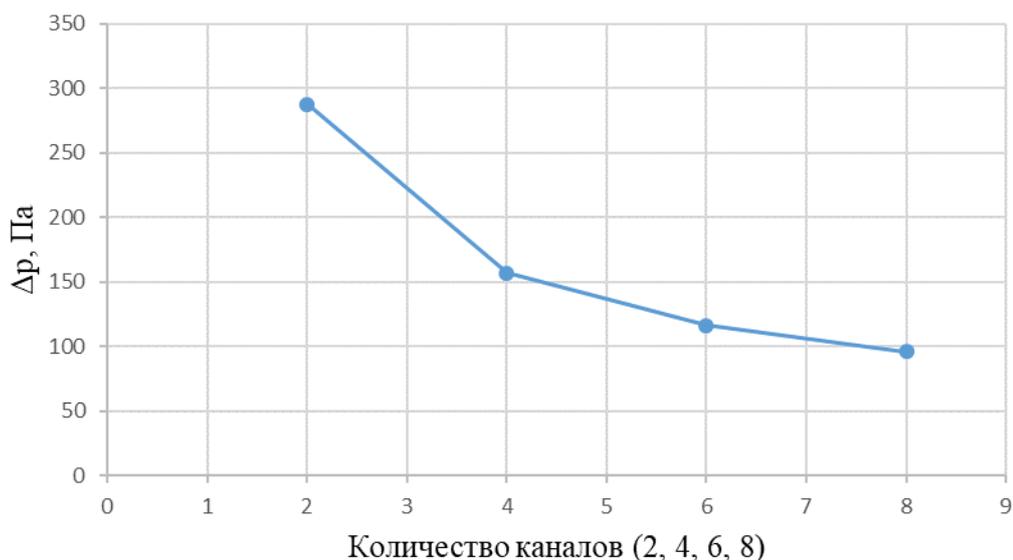


Рисунок 4 – Перепад давления в зависимости от количества каналов раздающего коллектора.

По Рисунку 4 видно, что с увеличением количества секций коллектора, перепад давления снижается, что обусловлено геометрией конструкции.

Анализ гидравлических сопротивлений раздающего коллектора проводился на основе теоретических данных рассчитанных согласно [2] - $\zeta_{\text{теор.}}$, а также по результатам численного моделирования в среде openFOAM - $\zeta_{\text{числ.}}$. Данные занесены в Таблицу 2.

Таблица 2. Гидравлические сопротивления раздающего коллектора

Параметр/количество каналов	2	4	6	8
Δp, Па	287,8965	156,7677	116,1469	95,7899
$\zeta_{\text{числ.}}$	64,1910	34,9538	25,8967	21,3578
$\zeta_{\text{теор.}}$	2,3861	2,5141	2,5672	2,5983

Сравнение результатов численного моделирования и теоретических данных

приведенных в Таблице 2 показывает существенное отличие $\zeta_{\text{теор.}}$ и $\zeta_{\text{числ.}}$, что может быть связано со слабой применимостью методики представленной в [2] для данного вида конструкции и явной необходимостью осуществления введения новых методик расчета гидравлических сопротивлений сложных коллекторных систем. Это, в первую очередь, связано с наличием большого спроса на данные виды технических устройств, а также с постоянной модернизацией типовых конструкций коллекторов.

Заключение

Анализ скоростных полей в раздающем коллекторе показывает несимметричность ядра потока гидравлической жидкости, что связано с геометрическими характеристиками раздающего коллектора, а также обусловлено количеством секций. С увеличением количества секций основной поток приходится на центральные каналы, однако явной гидравлической закупорки в соответствии с изоповерхностями скоростных полей (Рисунок 2) не выявлено.

Таким образом, в результате проведенного численного моделирования исследованы особенности гидродинамики в многоканальном коллекторе сложной формы. Выявлено значительное расхождение в расчетах гидравлических сопротивлений.

Список источников

1. 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, pp. 4764-4768. DOI: [10.17973/MMSJ.2021_10_2021027](https://doi.org/10.17973/MMSJ.2021_10_2021027)

2. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1992. – 671 с.
3. Филиппов Г.Ф., Меламед Л.Э., Тропкина А.И. Иерархия моделей анализа коллекторных систем и макромасштабный анализ // Проблемы энергетики. 2010. № 5-6. С. 3-17.
4. 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.
5. Дельнов В.Н. Гидродинамика типичных раздающих коллекторных систем. ЯЭУ: современные представления и перспективы исследования // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2020. № 4. С. 116-128. DOI: [10.55176/2414-1038-2020-4-116-128](https://doi.org/10.55176/2414-1038-2020-4-116-128)
6. Быстров П.И., Михайлов В.С. Гидродинамика коллекторных теплообменных аппаратов. - М.: Энергоиздат, 1982. – 224 с.
7. Решетов В.А., Смирнов В.П., Пикулева Т.А. Гидравлика кругового раздаточного коллектора // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Реакторостроение. 1976. № 2 (13). С. 65-74.
8. Решетов В.А. К расчету кругового раздаточного коллектора // Вопросы атомной науки и техники Серия: Физика и техника ядерных реакторов. 1980. № 2 (11). С. 65-71.
9. Лунина С.В., Дельнов В.Н. Тестовые расчеты гидродинамики раздающих коллекторных систем теплообменников и реакторов // Вопросы атомной науки и

- техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2020. № 4. С. 129-137.
DOI: [10.55176/2414-1038-2020-4-129-137](https://doi.org/10.55176/2414-1038-2020-4-129-137)
10. Санчугов В.И., Рекадзе П.Д. Расчёт гидродинамических характеристик стендовых систем // Труды МАИ. 2022. № 124. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=167005>. DOI: 10.34759/trd2022-124-10
11. Лебедев Р.В., Лифшиц С.А. Стационарное течение реологически сложной жидкости в бесконечном щелевом канале // Труды МАИ. 2011. № 44. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=25016>
12. Лебедев Р.В., Лифшиц С.А. Исследование критических режимов течения обобщенно-вязких сред в трубчатом реакторе // Труды МАИ. 2011. № 46. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=26013>
13. Березко М.Э. Влияние выбора граничных условий на результаты расчёта пристеночных течений // Труды МАИ. 2022. № 122. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=164197>. DOI: 10.34759/trd-2022-122-09
14. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Дрофа, 2012. - 678 с.
15. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Гидродинамика. Т. 6. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 736 с.
16. Армянин А.Ю., Байметова Е.С., Хвалько М.Е. Особенности теплового режима маслоохладителя с развитой внешней поверхностью // Химическая физика и мезоскопия. 2022. Т. 24. № 1. С. 93-103. DOI: [10.15350/17270529.2022.1.8](https://doi.org/10.15350/17270529.2022.1.8)
17. Байметова Е.С., Хвалько М.Е., Армянин А.Ю. Моделирование сопряженного теплообмена в микроканалах в среде openFOAM // Труды Института системного

программирования РАН. 2022. Т. 34. № 5. С. 205-214. DOI: [10.15514/ISPRAS-2022-34\(5\)-14](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2022-34(5)-14)

18. Baimetova E.S., Koroleva M.R. Research of conjugate heat transfer in a collector of a complex shape of an external fins // XXI International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2022), Novosibirsk, 2022, pp. 13-14. DOI: [10.53954/9785604788967_13](https://doi.org/10.53954/9785604788967_13)

19. Малинин Г.В. Методики расчета ребристых пластин на прочность и устойчивость // Труды МАИ. 2021. № 121. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=162655>. DOI: 10.34759/trd-2021-121-08.

20. Колодежнов В.Н., Веретенников А.С. Течение в цилиндрическом канале нелинейной вязкопластической жидкости // Труды МАИ. 2022. № 125. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=168169>. DOI: 10.34759/trd-2022-125-09

References

1. 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, pp. 4764-4768. DOI: 10.17973/MMSJ.2021_10_2021027

2. Idel'chik I.E. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam* (Manual of hydraulic resistances), Moscow, Mashinostroenie, 1992, 671 p.

3. Filippov G.F., Melamed L.E., Tropkina A.I. *Problemy energetiki*, 2010, no. 5-6, pp. 3-17.

4. Koroleva M.R., Terent'ev A.N., Chernova A.A. *Vestnik Rybinskoi gosudarstvennoi aviatsionnoi tekhnologicheskoi akademii im. P.A. Solov'eva*, 2021, no. 3 (58), pp. 50-55.

5. Del'nov V.N. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Yaderno-reaktornye konstanty*, 2020, no. 4, pp. 116-128. DOI: 10.55176/2414-1038-2020-4-116-128
6. Bystrov P.I., Mikhailov V.S. *Gidrodinamika kollektornykh teploobmennyykh apparatov* (Hydrodynamics of collector heat exchangers), Moscow, Energoizdat, 1982, 224 p.
7. Reshetov V.A., Smirnov V.P., Pikuleva T.A. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Reaktorostroenie*, 1976, no. 2 (13), pp. 65-74.
8. Reshetov V.A. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki Seriya: Fizika i tekhnika yadernykh reaktorov*, 1980, no. 2 (11), pp. 65-71.
9. Lunina S.V., Del'nov V.N. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Yaderno-reaktornye konstanty*, 2020, no. 4, pp. 129-137. DOI:10.55176/2414-1038-2020-4-129-137
10. Sanchugov V.I., Rekadze P.D. *Trudy MAI*, 2022, no. 124. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=167005>. DOI: 10.34759/trd2022-124-10
11. Lebedev R.V., Lifshits S.A. *Trudy MAI*, 2011, no. 44. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=25016>
12. Lebedev R.V., Lifshits S.A. *Trudy MAI*, 2011, no. 46. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=26013>
13. Berezko M.E. *Trudy MAI*, 2022, no. 122. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=164197>. DOI: 10.34759/trd-2022-122-09
14. Loitsyanskii L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* (Fluid and gas mechanics), Moscow, Drofa, 2012, 678 p.
15. Landau L.D., Lifshits E.M. *Teoreticheskaya fizika. Hidrodinamika*. (Theoretical physics. Hydrodynamics), vol. 6, Moscow, FIZMATLIT, 2001, 736 p.

16. Armyanin A.Yu., Baimetova E.S., Khval'ko M.E. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya*, 2022, vol. 24, no. 1, pp. 93-103. DOI: 10.15350/17270529.2022.1.8
17. Baimetova E.S., Khval'ko M.E., Armyanin A.Yu. *Trudy Instituta sistemnogo programmirovaniya RAN*, 2022, vol. 34, no. 5, pp. 205-214. DOI: 10.15514/ISPRAS-2022-34(5)-14
18. Baimetova E.S., Koroleva M.R. Research of conjugate heat transfer in a collector of a complex shape of an external fins, *XXI International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2022)*, Novosibirsk, 2022, pp. 13-14. DOI: 10.53954/9785604788967_13
19. Malinin G.V. *Trudy MAI*, 2021, no. 121. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=162655>. DOI: 10.34759/trd-2021-121-08.
20. Kolodezhnov V.N., Veretennikov A.S. *Trudy MAI*, 2022, no. 125. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=168169>. DOI: 10.34759/trd-2022-125-09

Статья поступила в редакцию 21.04.2023

Одобрена после рецензирования 28.04.2023

Принята к публикации 27.06.2023

The article was submitted on 21.04.2023; approved after reviewing on 28.04.2023; accepted for publication on 27.06.2023