

Received: 31.05.2023

Revised: 20.07.2023



Accepted: 25.08.2023

DOI: 10.17804/2410-9908.2023.4.006-014

HYDRODYNAMIC LOAD ON A MULTI-SECTION HEAT EXCHANGER

E. S. Baimetova

M. T. Kalashnikov Izhevsk State Technical University, 7 Studencheskaya St., Izhevsk, 426069, Russia

 <https://orcid.org/0000-0002-4534-0936>  baimetova.e.s@gmail.com

E-mail: baimetova.e.s@gmail.com

Address for correspondence: *7 Studencheskaya St., Izhevsk, 426069, Russia*

Tel.: +7 (912) 447-8295

The article considers the issues of numerical modeling of a multi-section heat exchanger using the tools of the OpenFOAM open source package. The multi-section heat exchanger is operated at velocities ranging between 0.1 and 2 m/s. Numerical simulation is carried out for a complete assembly of 8 sections. Each section contains six transverse microchannels with internal fins to increase heat transfer. Hydraulic oil with a kinematic viscosity of $0.000032 \text{ m}^2/\text{s}$ is used as the working fluid. As a result of numerical simulation, the hydrodynamic characteristics at the entrance to the microchannels were evaluated depending on the number of sections, as well as hydraulic resistances were evaluated depending on the pressure drop and the flow velocity of the working fluid.

Keywords: numerical simulation, hydrodynamic load, multi-section heat exchanger, distributing collector

References

1. Filippov, G.F., Melamed, L.E., and Tropkina, A.I. Models hierarchy of header devices analysis and macroscale analysis. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy, Problemy Energetiki*, 2010, 5–6, 3–17. (In Russian).
2. Delnov, V.N. Hydrodynamics of typical distribution header systems of nuclear power plants: modern views and research perspectives. *Voprosy Atomnoy Nauki i Tekhniki, Seriya Yadernno-Reaktornye Konstanty*, 2020, 4, 116–128. DOI: 10.55176/2414-1038-2020-4-116-128. (In Russian).
3. Gabrianovich, B.N. and Delnov, V.N. Hydrodynamics of headersystems of nuclear power plants. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy, Yadernaya Energetika*, 2007, 1, 113–121. (In Russian).
4. Gabrianovich, B.N., Delnov, V.N., and Yuryev, Yu.S. Features of coolant flow in distributing collector systems of nuclear power reactors with liquid metal cooling. In: *Trudy 3 Konf. TZhMT–2008 “Tyazhelye Zhidkometallicheskie Teplonositeli v Yadernykh Tekhnologiyakh”* [The Third Conference on Heavy Liquid Metal Coolants in Nuclear Technologies, Obninsk, 2008: Proceedings. Vol. 2]. GNTs RF-Fiziko-energeticheskiy in-t im. A.I. Leypunskogo Publ., Obninsk, 2010. (In Russian).
5. Dubonosov, A.Yu. and Gaponenko, A.M. *Gidrodinamika Vkhodnykh Tsilindricheskikh Kollektorov Teploobmennykh Apparátov Teploenergeticheskikh Ustanovok* [Hydrodynamics of Entrance Cylindrical Collectors of Heat-Exchange Devices of Heat Power Installations: Monograph]. Izd. Dom–Yug Publ., Krasnodar, 2013, 124 p. (In Russian).
6. Bystrov, P.I. and Mikhailov, V.S. *Gidrodinamika Kollektornykh Teploobmennykh Apparátov* [Hydrodynamics of Collector Heat-Exchange Apparatus]. Energoizdat Publ., Moscow, 1982, 223 p. (In Russian).

7. Koroleva, M.R., Terentyev, A.N., and Chernova, A.A. Fluid dynamics of a complicated collector. *Vestnik Rybinskoy Gosudarstvennoy Aviatsionnoy Tekhnologicheskoy Akademii im. P.A. Solovyeva*, 2021, 3 (58), 50–55. (In Russian).
8. Lunina, S.V. and Delnov, V.N. Test Calculations of Hydrodynamics of Distribution Header Systems in NPP Heat Exchangers and Reactors. *Voprosy Atomnoy Nauki i Tekhniki, Seriya Yadernno-Reaktornye Konstanty*, 4, 129–137. DOI: 10.55176/2414-1038-2020-4-129-137. (In Russian).
9. Baimetova, E.S. and Koroleva, M.R. Research of conjugate heat transfer in a collector of a complex shape of an external fin. In: *XXI International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2022)*, Novosibirsk, August 08–14, 2022: Abstracts. FGBU SO RAN, 2022, 13–14. DOI: 10.53954/9785604788967_13.
10. 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.
11. Kudinov, V.A., Kartashov, E.M., Kovalenko, A.G., and Kudinov I.V. *Gidravlika: Uchebnik i Praktikum dlya Srednego Professionalnogo Obrazovaniya* [Hydraulics: Textbook and Practical Work for Secondary Vocational Education, ed. by V.A. Kudinov, 4th ed.]. Izdatelstvo Yurayt Publ., Moscow, 2023, 386 p. (In Russian).
12. Idelchik, I.E. *Spravochnik po Gidravlicheskim Soprotivleniyam* [Handbook of Hydraulic Resistances]. Mashinostroenie Publ., Moscow, 1992, 671 p. (In Russian).

Подана в журнал: 31.05.2023



УДК 532

DOI: 10.17804/2410-9908.2023.4.006-014

ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ НАГРУЗКА МНОГОСЕКЦИОННОГО ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА

Е. С. Байметова

*Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашикова,
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск, 426069, Россия*

 <https://orcid.org/0000-0002-4534-0936>  baimetova.e.s@gmail.com

Электронная почта: baimetova.e.s@gmail.com

Адрес для переписки: ул. Студенческая, 7, г. Ижевск, 426069, Россия

Тел.: +7 (912) 447-82-95

В работе рассматриваются вопросы численного моделирования гидродинамики многосекционного теплообменного аппарата с использованием инструментов пакета с открытым исходным кодом OpenFOAM. Многосекционный теплообменный аппарат эксплуатируется в скоростном диапазоне 0,1–2 м/с, численное моделирование проводится для полной сборки, составляющей 8 секций. Каждая секция содержит 6 поперечных микроканалов с внутренним оребрением для увеличения теплоотдачи. В качестве рабочей жидкости используется гидравлическое масло с кинематической вязкостью 0,000032 м²/с. В результате численного моделирования проведена оценка гидродинамических характеристик на входе в микроканалы в зависимости от количества секций, а также оценка гидравлических сопротивлений в зависимости от перепада давления и скорости подачи рабочей жидкости.

Ключевые слова: численное моделирование, гидродинамическая нагрузка, многосекционный теплообменный аппарат, раздающий коллектор

1. Введение

Теплообменные аппараты (ТА) сложной геометрии широко распространены в нефтехимической промышленности, в металлургии, энергетике, в системах отопления, на компрессорных станциях и тепловых электростанциях. Исследованию гидродинамики ТА посвящено большое количество научных публикаций, например [1–5]. Конструкция теплообменников во многом зависит от их назначения. Во многих случаях они выполняются в виде сложных коллекторных систем, гидродинамические особенности которых напрямую влияют на работу устройства. Гидравлическая неравномерность в таких ТА может нарушить температурный режим, значительно увеличить сопротивление и снизить тепловую эффективность [6]. Вопросы гидродинамики коллекторных систем рассматриваются в работах [2, 7–9]. В [2] рассмотрена гидродинамика типовых раздающих коллекторных систем. В работе [7] рассмотрена исследуемая коллекторная система в полном сборе без учета микроканалов, проводится оценка гидродинамических характеристик раздающего и собирающего коллекторов. В работах [8–10] рассмотрены методы численного и аналитического решения задач о стационарном течении вязкой несжимаемой жидкости.

Рассматриваемый в настоящей работе многосекционный теплообменный аппарат включает в себя раздающий коллектор, который является объектом исследования, и принимающий коллектор. Общая схема теплообменника приведена на рис. 1 а. Коллекторы соединены между собой набором из 8 параллельных идентичных секций, расположенных поперек каналов подвода и отвода рабочей жидкости. Каждая секция содержит 6 микроканалов,

внутреннее оребрение которых выполнено в виде симметричных трапеций с узкой верхней кромкой (рис. 1 *з*).

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.

2. Постановка задачи

В работе исследуется составная часть ТА – раздающий 8-секционный коллектор, по которому прогоняется рабочая жидкость с диапазоном скоростей 0,1–2 м/с. Многосекционный раздающий коллектор в полной сборке представлен на рис. 1 *а*. Канал подвода рабочей жидкости выполнен в виде трубы круглого сечения с диаметром $d = 0,0274$ м, каналы отвода сгруппированы в 8 секций, каждая из которых содержит по шесть микроканалов с внутренним оребрением (рис. 1 *з*).

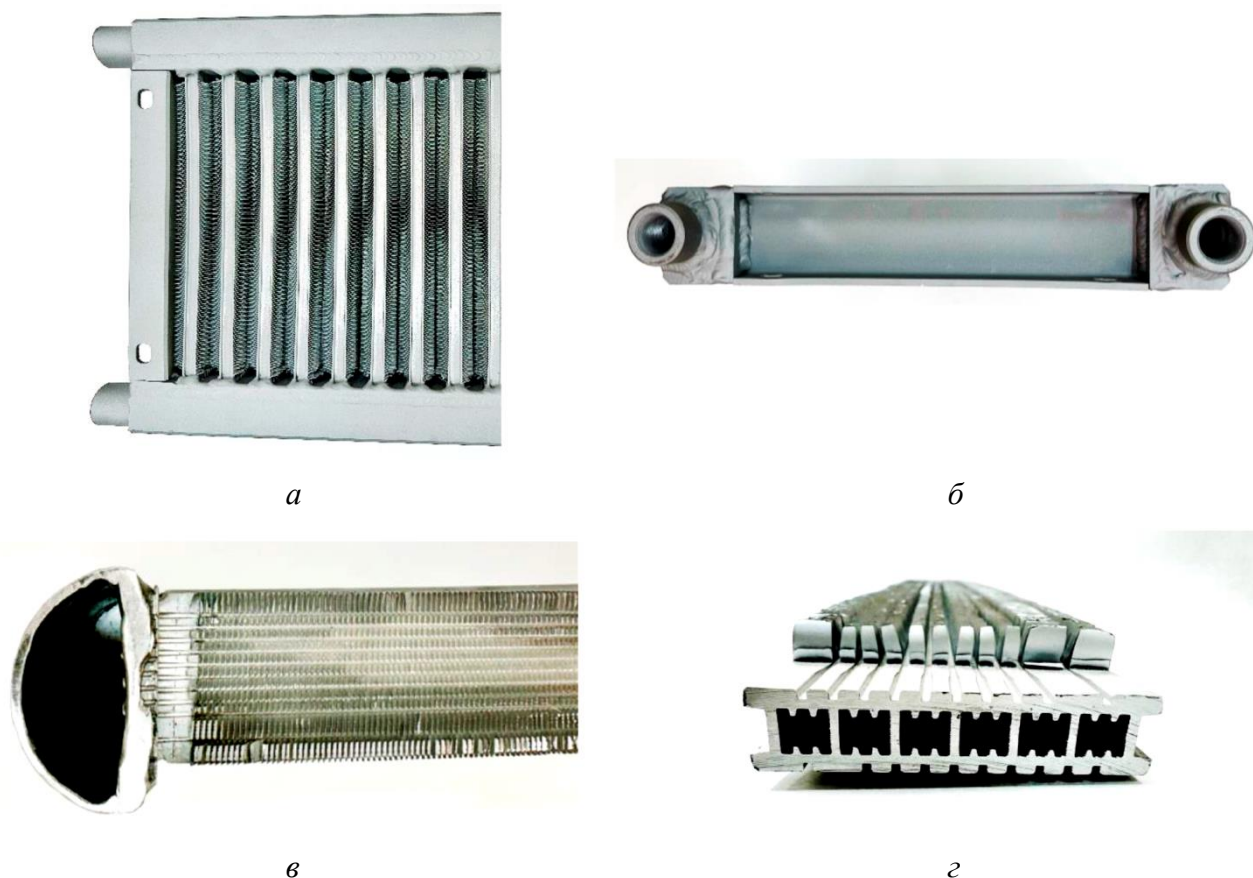


Рис. 1. Многосекционный коллектор: общая схема гидравлической модели (*а*); каналы подвода и отвода рабочей жидкости (полная сборка) (*б*); геометрия входа в раздающий коллектор (*в*); внутренняя геометрия выпускных микроканалов (*г*)

На рис. 2 изображена расчетная схема раздающего многосекционного коллектора. Расчетная сетка построена с использованием модуля для построения сеток Mesh в свободно распространяемом пакете Salome и импортирована в пакет openFOAM для дальнейшего численного моделирования. Сетка содержит 6 млн тетраэдральных элементов для 8-секционного раздающего коллектора. Визуализация данных проводилась в пакете ParaView.

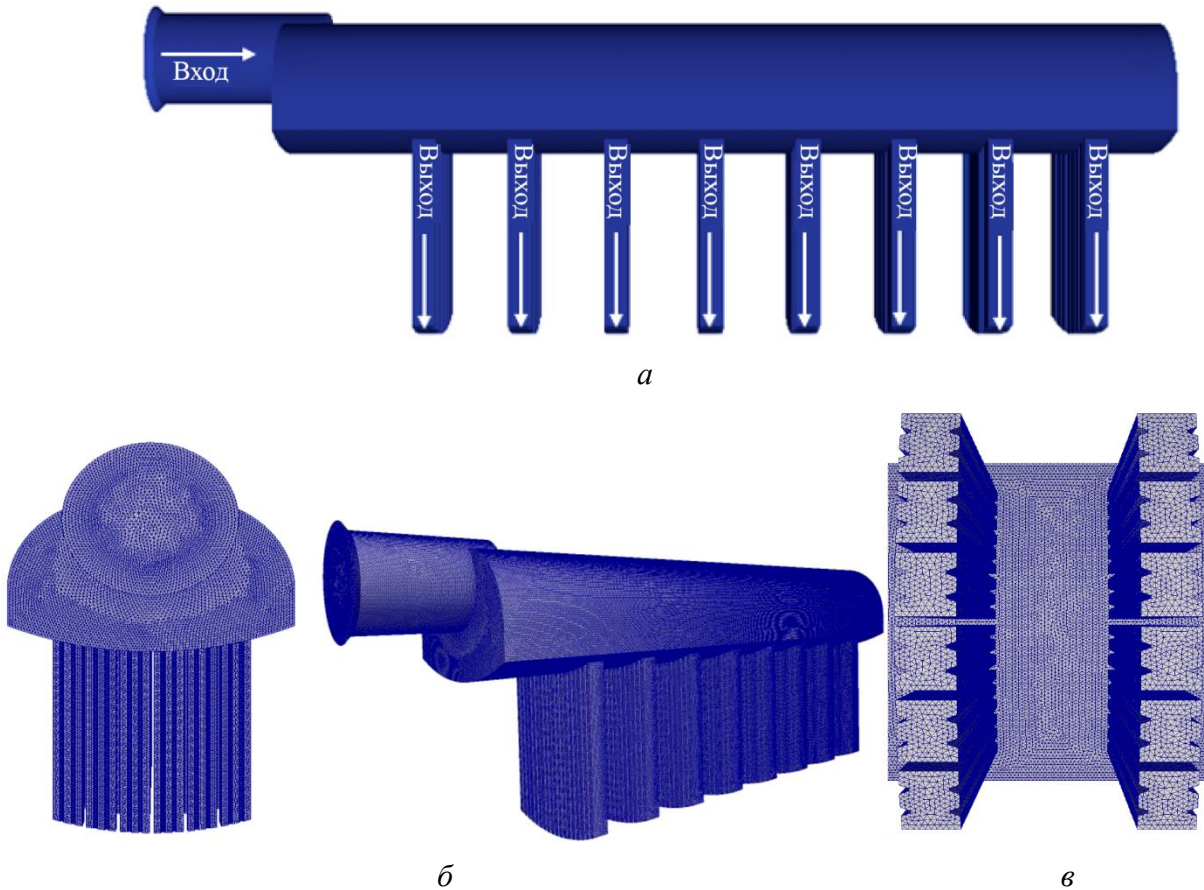


Рис. 2. Расчетная схема многосекционного теплообменного аппарата: схема подвода и отвода рабочей жидкости (а); расчетная сетка раздающего коллектора (б); геометрия микроканалов (в)

Граничные условия, используемые при численном моделировании в пакете openFOAM:

- на входе подача рабочей жидкости со скоростями 0,1–2 м/с с шагом 0,5 м/с;
- на выходе избыточное давление 0 Па;
- на стенках условие прилипания.

Математическая модель основана на системе уравнений Навье–Стокса. При построении математической модели использовались следующие допущения: течение ламинарное, стационарное, жидкость несжимаемая, вязкость рабочей жидкости 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 ϑ , p – избыточное давление, отнесенное к плотности жидкости, ν – кинематический коэффициент вязкости, i, j – индексы, принимающие значения 1, 2, 3.

3. Результаты численного моделирования

Расчет числа Рейнольдса в диапазоне скоростей 0,1–2 м/с представлен в табл. 1. Характеристики жидкости и скорость потока позволяют моделировать движение в ламинарной постановке. Расчет проводился по эквивалентному диаметру входа в коллектор $d = 0,0274$ м, динамической вязкости и плотности рабочей жидкости $\mu = 0,295$ Па·с, $\rho = 897$ кг/м³:

$$Re_{\theta} = \frac{\rho \cdot |\theta| \cdot d}{\mu},$$

$$Re_{0,1} = \frac{897 \cdot 0,1 \cdot 0,0274}{0,0295} = 83,$$

$$Re_{0,5} = \frac{897 \cdot 0,5 \cdot 0,0274}{0,0295} = 417,$$

$$Re_1 = \frac{897 \cdot 1 \cdot 0,0274}{0,0295} = 833,$$

$$Re_{1,5} = \frac{897 \cdot 1,5 \cdot 0,0274}{0,0295} = 1250,$$

$$Re_2 = \frac{897 \cdot 2 \cdot 0,0274}{0,0295} = 1666.$$

Таблица 1

Зависимость числа Рейнольдса от скорости подачи рабочей жидкости

V	0,1 м/с	0,5 м/с	1 м/с	1,5 м/с	2 м/с
Re	83	417	833	1250	1666

На рисунке 3 слева представлены изоповерхности модуля скорости в многосекционном раздающем коллекторе при различных значениях скорости на входе, а справа приведены профили скорости на входе в микроканалы. По геометрическому строению ядра течения рабочей жидкости, представленному в виде изоповерхностей скоростного поля, можно оценить неравномерность структуры течения. Параболический профиль скорости в коллекторе, характерный для ламинарного течения, наблюдается при скорости подачи жидкости 0,1 м/с. Начиная со скорости 0,5 м/с структура потока становится волнообразной, реагируя на многоканальную многосекционную конструкцию ТА. Явной гидравлической закупорки каналов не наблюдается, что видно по профилям скоростей на входе в микроканалы (рис. 3 справа).

Работа коллекторной системы оценивалась по равномерности входных профилей в микроканалы. При $V = 0,1$ м/с наблюдается более равномерное распределение потока по секциям, скорость подачи в секции не превышает 0,07 м/с, что обусловлено низким расходом на входе. Увеличение расхода рабочей жидкости при скорости $V = 0,5$ м/с на входе приводит к неравномерному распределению скоростей в микроструях. Максимальный расход наблюдается в 5-й секции и соответствует максимуму скорости 0,4 м/с. Волновая структура течения в коллекторе приводит к трансформации гидравлической нагрузки секций и микроканалов. Расход жидкости в первых трех секциях снижается. При входной скорости потока $V = 1$ м/с возрастает работа секций с 4-й по 8-ю, максимальный пик расхода также наблюдается в 5-й секции. Аналогичное распределение гидравлической нагрузки наблюдается для скоростей 1,5 м/с и 2 м/с. В последнем случае можно отметить локальный минимум скорости в 7-й секции.

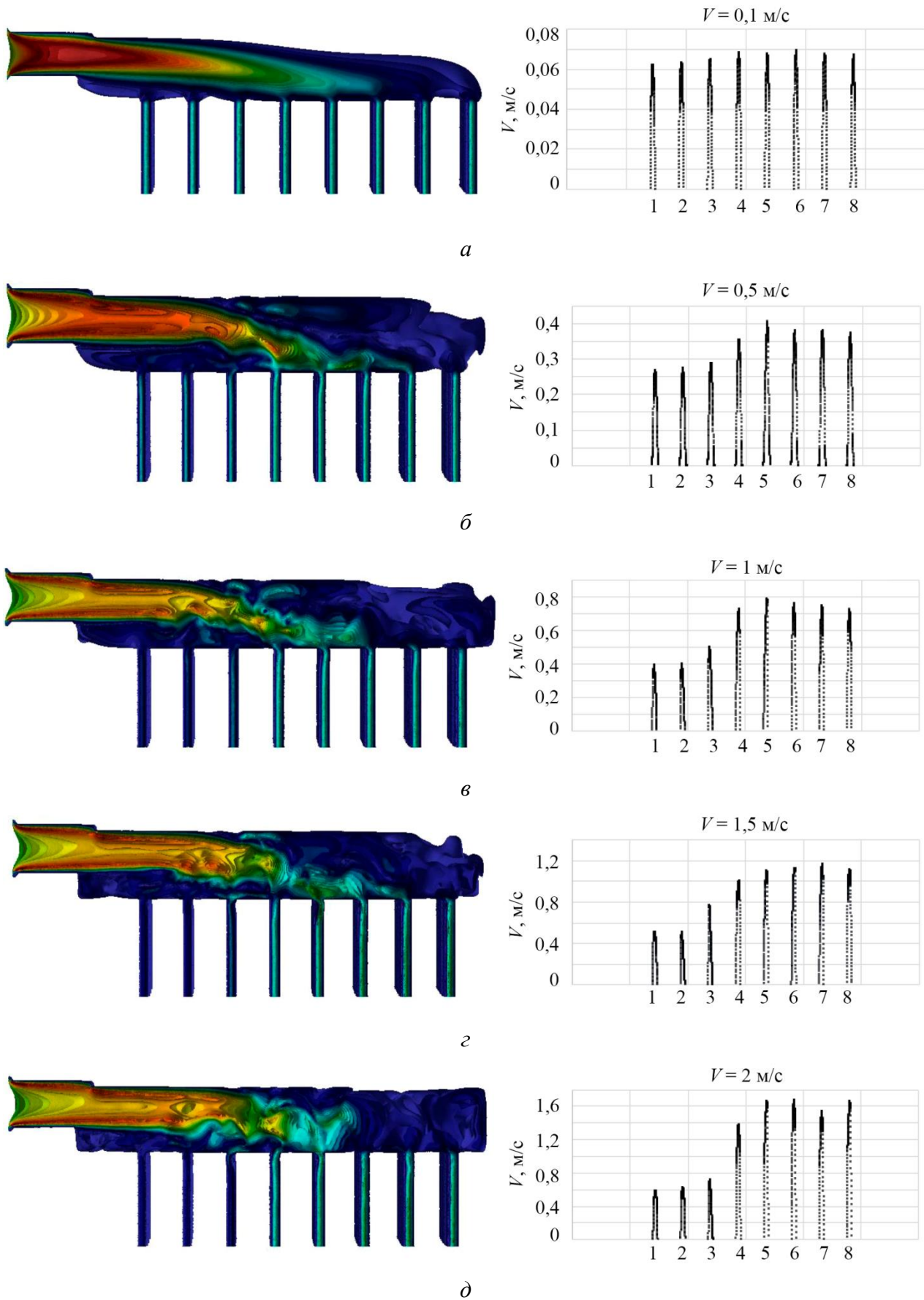


Рис. 3. Гидродинамическая нагрузка многосекционного ТА:
0,1 м/с (а); 0,5 м/с (б); 1 м/с (в); 1,5 м/с (г); 2 м/с (д)

Анализ местных гидравлических сопротивлений раздающего коллектора проводился по формуле Вейсбаха–Дарси [11], по данным численного моделирования, теоретические значения гидравлических сопротивлений получены согласно широко распространенному справочнику по гидравлическим сопротивлениям [12], данные занесены в таблицу 2.

Таблица 2

Гидравлические сопротивления раздающего коллектора

Параметр	Скорость, м/с				
	0,1 м/с	0,5 м/с	1 м/с	1,5 м/с	2 м/с
Δp , Па	95,789	201,026	450,873	747,175	1141,062
$\zeta_{\text{числ}}$	4,485	1,792	1,005	0,740	0,636
$\zeta_{\text{теор}}$ [12]	2,598	2,427	2,353	2,317	2,295
ε ,	72,6	26,2	57,3	68,1	72,3

В таблице 2 ε – оценка относительной погрешности расчета $\zeta_{\text{числ}}$ и $\zeta_{\text{теор}}$, которая проводилась по формуле

$$\varepsilon = \frac{|\zeta_{\text{теор}} - \zeta_{\text{числ}}|}{\zeta_{\text{теор}}} \cdot 100 \%$$

Полученные результаты $\zeta_{\text{числ}}$ и $\zeta_{\text{теор}}$ не согласуются, что связано с нетиповой конструкцией исследуемого раздающего коллектора, и указывают на необходимость разработки новых методик расчета гидравлических сопротивлений.

3. Заключение

В работе рассматривались вопросы численного моделирования гидродинамики многосекционного теплообменного аппарата с использованием инструментов пакета с открытым исходным кодом OpenFOAM. Анализ гидродинамической нагрузки многосекционного ТА позволил оценить влияние входной скорости на работу микроканалов. Выявлено, что при скорости жидкости более 0,5 м/с снижается нагрузка первых трех секций устройства, что необходимо учитывать при анализе тепловой эффективности ТА. Согласно полученным данным, потери давления возрастают с ростом скорости подачи рабочей жидкости. Гидравлические сопротивления, полученные численным и теоретическим методами, снижаются, однако плохо согласуются между собой. Это указывает на явную необходимость в доработке методик расчета гидравлических сопротивлений, ориентированных на конкретную конструкцию ТА.

Литература

1. 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.
2. Дельнов В. Н. Гидродинамика типичных раздающих коллекторных систем // Вопросы атомной науки и техники. серия: ядерно-реакторные константы. – 2020. – № 4. – С. 116–128. – DOI: 10.55176/2414-1038-2020-4-116-128.
3. Габрианович Б. Н., Дельнов В. Н. Гидродинамика коллекторных систем ядерных энергетических установок // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2007. – № 1. – С. 113–121.
4. Габрианович Б. Н., Дельнов В. Н., Юрьев Ю. С. Особенности течения теплоносителя в раздающих коллекторных системах реакторов ЯЭУ с жидкометаллическим охлаждением // Труды 3 межотрасл. конф. ТЖМТ–2008 «Тяжелые жидкометаллические теплоносители

- в ядерных технологиях», Обнинск, 15–19 сентября, 2008 : в 2-х т. – Обнинск : ГНЦ РФ-Физико-энергетический ин-т им. А. И. Лейпунского, 2010. – Т. 2.
5. Дубонос А. Ю., Гапоненко А. М. Гидродинамика входных цилиндрических коллекторов теплообменных аппаратов теплоэнергетических установок. – Краснодар : Изд. Дом-Юг, 2013. – 124 с.
 6. Быстров П. И., Михайлов В. С. Гидродинамика коллекторных теплообменных аппаратов. – М. : Энергоиздат, 1982. – 223 с.
 7. 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.
 8. 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.
 9. 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, August 08–14, 2022 : abstracts. – С. 1–14. – DOI: 10.53954/9785604788967_13.
 10. 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, No. June. – P. 4764–4768. – DOI: 10.17973/MMSJ.2021_10_2021027.
 11. Гидравлика: учебник и практикум для среднего профессионального образования / В. А. Кудинов, Э. М. Карташов, А. Г. Коваленко, И. В. Кудинов / под ред. В. А. Кудинова. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Издательство Юрайт, 2023. – 386 с.
 12. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – Москва : Машиностроение, 1992. – 671 с.