

Исследование влияния густоты расчётной сетки на коэффициент теплоотдачи при численном моделировании поперечного обтекания трубного пучка коридорного типа

Д.В. Шевелев, А.А. Жинов, Е.А. Юрик

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. В статье рассматривается численное моделирование поперечного обтекания пятирядного трубного пучка коридорного типа воздушным потоком при сопряженном теплообмене. Исследуемая модель характерна для воздухоохлаждаемых теплообменных аппаратов, таких как воздушные конденсаторы, маслоохладители или градирни. Наружная поверхность труб имела температуру, большую, чем температура потока воздуха. Скорость воздуха соответствовала числу Рейнольдса в узком сечении трубного пучка, характерному для теплообменных аппаратов вышеуказанного типа. Результаты численного моделирования определяются качеством расчётной сетки. При этом, чем больше расчетных ячеек и меньше их размер, тем больше вычислительных и временных ресурсов требуется для решения задачи. Вместе с тем, полученные результаты наиболее приближены к натурному эксперименту.

Цель работы — определение уровня детализации расчётной области, при которой возможно получение корректных результатов численного моделирования сопряженного теплообмена.

Результаты. Исследовано влияние количественных характеристик шести вариантов расчётной сетки на значение среднего коэффициента теплоотдачи. Варианты отличались степенью детализации: числом и величиной ячеек (от крупной к мелкой). В каждом случае получены значения среднего коэффициента теплоотдачи, определяемые степенью погрешности численного эксперимента. Указанные данные сравнивались с данными, полученными при решении критериальных уравнений конвективного теплообмена по трем методикам.

Заключение. Определена погрешность нахождения коэффициента теплоотдачи рассмотренными методами. Установлено, что результаты численного моделирования при высокой степени детализации, близки к результатам, полученным при расчёте по методике Бэра. Полученные результаты могут быть полезны при численном моделировании течений в теплообменных аппаратах с поперечным обтеканием трубных пучков.

Ключевые слова: конвекция; коэффициент теплоотдачи; численное моделирование; Computational Fluid Dynamics (CFD); расчётная сетка; трубный пучок.

КАК ЦИТИРОВАТЬ:

Шевелев Д.В., Жинов А.А., Юрик Е.А. Исследование влияния густоты расчётной сетки на коэффициент теплоотдачи при численном моделировании поперечного обтекания трубного пучка коридорного типа // Известия МГТУ «МАМИ». 2025. Т. 19, № 2. С. **х-у**. DOI: 10.17816/2074-0530-678353 EDN: YIJMZH

Study of the Influence of the Mesh Density on the Heat Transfer Coefficient in Numerical Modeling of the Transverse Flow Around a Tube Bundle of the Corridor Type

Denis V. Shevelev, Andrey A. Zhinov, Elena A. Yurik
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: The paper considers numerical modeling of the transverse flow around a five-row corridor-type tube bundle with an air flow at coupled heat exchange. The studied model is typical for air-cooled heat exchangers such as air condensers, oil coolers or cooling towers. The outer surface of the pipes had a temperature higher than the temperature of the air flow. The air flow rate corresponded to the Reynolds number in the narrow section of the tube bundle, typical for heat exchangers of the abovementioned type. The results of numerical modeling are determined by the quality of the mesh. At the same time, the more the calculation cells and the smaller their size, the more computational power and time budget are required to solve the problem. However, the results obtained are closer to a field experiment.

AIM: Determination of the level of detail of the mesh, at which obtaining correct results of numerical simulation of coupled heat transfer is possible.

RESULTS: The influence of the quantitative characteristics of six mesh variants on the value of the average heat transfer coefficient is estimated. The variants differed in the degree of detail: the number and size of cells (from large to small). In each case, the values of the average heat transfer coefficient are obtained, determined by the degree of error of the numerical experiment. The data obtained were compared with the data obtained when solving the criterion equations of convective heat transfer using three methods.

CONCLUSION: The error of finding the heat transfer coefficient by the considered methods is determined. It is found that the results of numerical modeling with a high degree of detail are close to the results obtained in the calculation using the Baer method. The results obtained can be useful in numerical modeling of flows in heat exchangers with transverse flow around tube bundles.

Keywords: convection; heat transfer coefficient; numerical modeling; Computational Fluid Dynamics (CFD); mesh; tube bundle.

TO CITE THIS ARTICLE:

Shevelev DV, Zhinov AA, Yurik EA. Study of the Influence of the Mesh Density on the Heat Transfer Coefficient in Numerical Modeling of the Transverse Flow Around a Tube Bundle of the Corridor Type. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2025;19(2):x–y. DOI: 10.17816/2074-0530-678353 EDN: YIJMZH

Submitted: 10.04.2025

Accepted: 25.07.2025

Published online: 25.07.2025

.

ВВЕДЕНИЕ

Численный эксперимент позволяет оценить верность выполненных проектно-конструкторских расчётов теплоэнергетического оборудования, уменьшить требуемый объём натурного моделирования, ускоряет и удешевляет процесс его разработки [1].

Моделирование гидравлических, газодинамических и тепловых процессов возможно в различных пакетах компьютерных программ, таких как Star-CCM+ [2], Siemens FLOEFD [3], FlowVision [4], OpenFOAM [5] и др.

В основу моделирования процессов в любом из таких пакетов положено совместное решение дифференциальных уравнений сохранения: сплошности (неразрывности), импульса, энергии, уравнений состояния и теплообмена [6].

Численное решение сопряженной задачи газодинамики и теплообмена — одна из ключевых задач, решаемых при проектировании современного теплообменного оборудования, например, трубных пучков воздушных конденсаторов и вентиляторных градилен паротурбинных установок. При этом количество обтекаемых труб в аппарате может достигать десятков и сотен. Численное моделирование в таком случае требует значительных вычислительных ресурсов из-за очень большого числа ячеек в расчетной области и малых шагов по времени при расчете, что усложняет или делает невозможным решение оптимизационных задач, направленных на повышение эффективности данного вида теплообменных аппаратов.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью данного исследования является задача поиска наименьшего уровня детализации расчётной области, при которой возможно получение корректных результатов численного моделирования сопряжённого теплообмена в трубном пучке.

В работе [7] решалась похожая задача. Исследовалось влияние густоты расчётной сетки при численном моделировании процесса теплоотдачи с поверхности цилиндра при его поперечном обтекании воздушным потоком. При изучении двумерной модели, было установлено, что при числе расчетных ячеек на поверхности наружной образующей цилиндра более 45, относительная погрешность определения коэффициента теплоотдачи не превышает 3%.

При обтекании трубного пучка, гидродинамическая картина становится значительно более сложной. Спутные следы, возникающие за трубками каждого ряда, оказывают влияние на процесс обтекания следующих по потоку рядов, что оказывает воздействие на величину коэффициента теплоотдачи для них. Точность моделирования отрывных явлений с поверхности трубок и вихревых зон в спутных следах, безусловно, будет зависеть от детализации расчётной сетки.

МЕТОДЫ

За объект исследования был взят коридорный трубный пучок, с геометрическими характеристиками, представленными на рис. 1.

Решалась внешняя двумерная задача.

В качестве граничных условий входа, выхода и стенок были выбраны параметры, характерные для воздухоохлаждаемых теплообменных аппаратов, таких как воздушные конденсаторы, маслоохладители или градири [8]. Для натекающего на трубный пучок воздушного потока была задана температура $t_{\text{ж}} = 292\text{K}$ (20°C), наружная поверхность труб имела постоянную температуру $t_{\text{ст}} = 333\text{K}$ (60°C). Скорость воздуха, натекающего на трубный пучок, составляла величину $c = 4,23\text{м/с}$, что соответствует числу Рейнольдса в узком сечении трубного пучка $Re = 2 \cdot 10^4$, характерному для теплообменных аппаратов вышеуказанного типа.

Численное моделирование процессов теплоотдачи проводилось в пакете Siemens FLOEFD. Рассматривались случаи детализации расчётной сетки уровнем от 2 до 7, согласно настройкам автоматического построителя сетки FLOEFD.

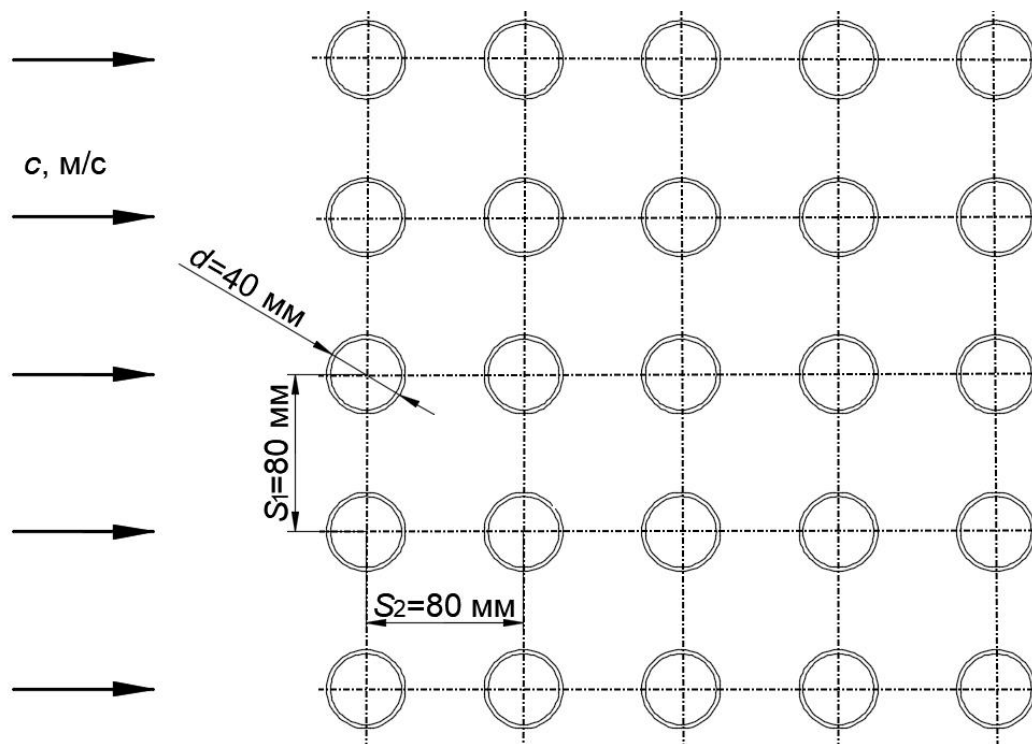


Рис. 1. Геометрические характеристики исследуемого трубного пучка.

Fig. 1. Geometrical characteristics of the tube bundle under study.

Конфигурация исследованных вариантов расчётной сетки в окрестностях обтекаемого цилиндра приведена на рис. 2.

Количественные характеристики рассмотренных вариантов расчётной сетки сведены в табл. 1.

Таблица 1. Количественные характеристики рассмотренных вариантов расчётной сетки
Table 1. Quantitative characteristics of the considered variants of the computational mesh

Уровень детализации сетки	2	3	4	5	6	7
Кол-во ячеек	2478	6328	8704	15792	126367	233193
Ячеек на поверхности раздела твердой/газообразной среды	1656	2412	2784	4158	23313	33273
Среднее количество ячеек на поверхности одной трубки	83	121	140	208	1165	1664

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результатом моделирования стало определение термодинамических и кинематических параметров потока в расчётной области, что позволило найти средний по наружной поверхности трубок коэффициент теплоотдачи [9]. Критерием остановки процесса численного моделирования являлось достижение сходимости среднего коэффициента теплоотдачи средней трубки в четвертом ряду в 3% от среднего значения от итерации к итерации.

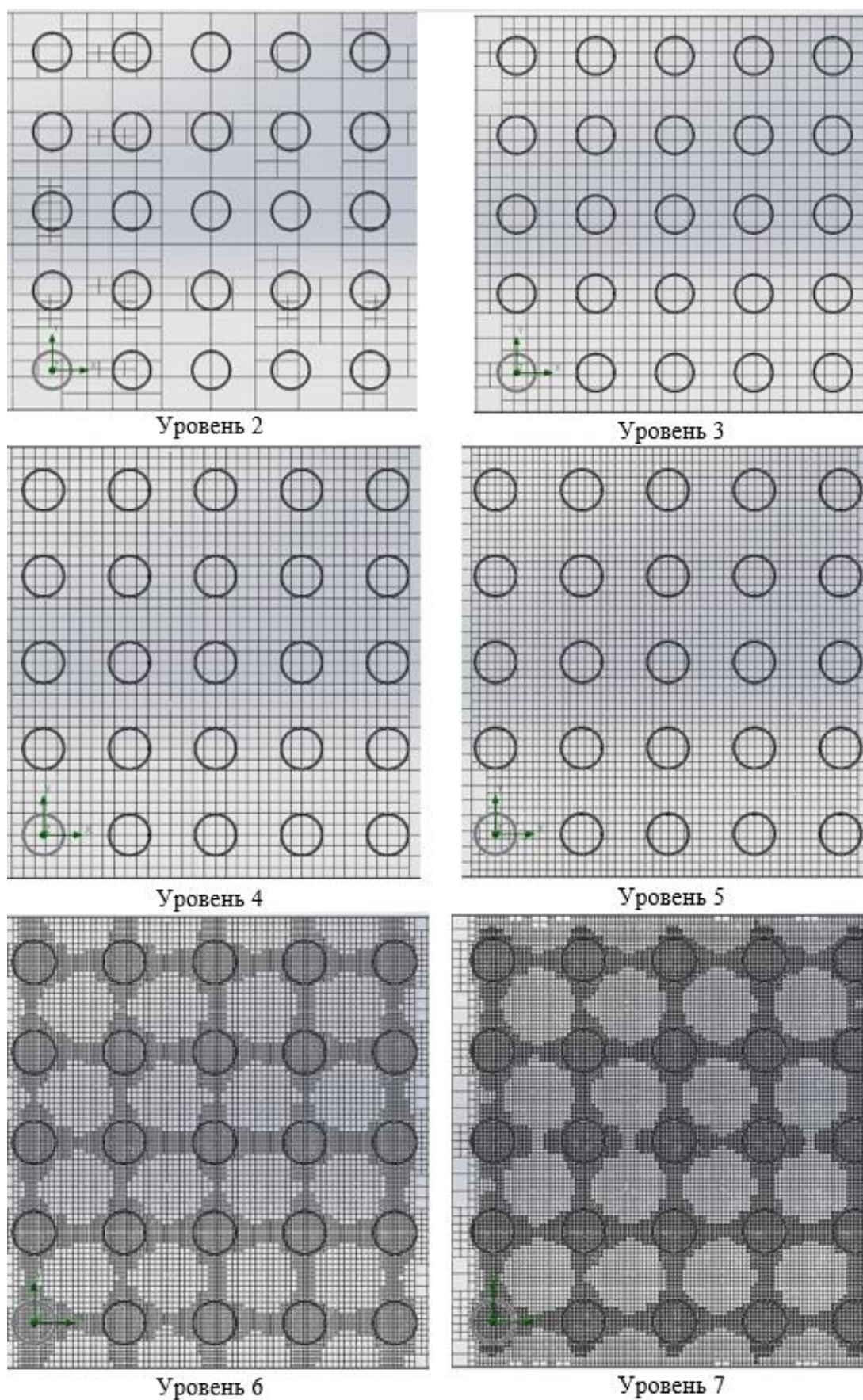


Рис. 2. Конфигурация вариантов расчётной сетки.
Fig. 2. Configuration of mesh variants.

В табл. 2 приведены значения коэффициента теплоотдачи средней трубки четвёртого ряда трубного пучка на режиме обтекания $Re = 2 \cdot 10^4$, полученные в ходе численного моделирования. Выбор данной контрольной трубки был обусловлен тем, что, начиная с 3-4 ряда коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности трубного пучка перестает меняться по его глубине, и его экспериментальные значения обобщены с помощью критериальных уравнений.

Таблица 2. Значения коэффициента теплоотдачи при различных уровнях детализации сетки
Table 2. Heat transfer coefficient values at different mesh detail levels

Уровень детализации сетки	2	3	4	5	6	7
α , Вт/(м ² ·К)	25,6	29,0	51,6	53,2	59,2	63,1

ОБСУЖДЕНИЕ

Задача конвективного теплообмена при обтекании трубных пучков детально изучена и для неё имеются надежные экспериментальные данные [10–12], обобщенные в виде критериальных уравнений вида

$$Nu = f(Re, Pr) \quad (1)$$

После нахождения числа Нуссельта Nu , можно вычислить коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d} \quad (2)$$

Например, в работе [10], Михеевым М.А., для определения коэффициента теплоотдачи при поперечном обтекании коридорного трубного пучка ($Re > 1 \cdot 10^3$) рекомендуется воспользоваться следующим уравнением

$$Nu = 0,22 Re^{0,65} Pr^{0,36} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25} \quad (3)$$

В работе [11], Жукаускасом А., используется похожая зависимость

$$Nu = 0,26 Re^{0,65} Pr^{0,33} \left(\frac{d}{s_2} \right)^{0,15} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25} \quad (4)$$

В зависимостях (1) и (2) в качестве определяющего размера принимается наружный диаметр трубы, в качестве определяющей скорости — скорость потока в узком сечении трубного пучка; для определения теплофизических параметров потока, определяющей является средняя температура жидкости

$$T_{cp} = \frac{T_{ж} - T_c}{2} \quad (5)$$

В работе [12] Хансом Бэрм для расчёта коэффициента теплоотдачи при обтекании трубного пучка рекомендуется несколько другой подход. Здесь, в качестве базы, определяется число Nu для случая обтекания кругового цилиндра (6) с введением поправочного коэффициента на тип трубного пучка

$$Nu = \sqrt{Nu_{lam}^2 + Nu_{turb}^2}, \quad (6)$$

где

$$Nu_{\text{lam}} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} Re^{0.5} \varphi_1(Pr); \quad (7)$$

$$\varphi_1(Pr) = \frac{Pr^{0.5}}{(1 + 1.973 Pr^{0.272} + 21.29 Pr)^{1/6}}; \quad (8)$$

$$Nu_{\text{turb}} = \frac{0.037 Re^{0.8} Pr}{1 + 2.443 Re^{-0.1} (Pr^{2/3} - 1)}; \quad (9)$$

$$f_A = 1 + 0.7 \frac{\frac{b}{a} - 0.3}{\varepsilon^{3/2} \left(\frac{b}{a} + 0.7 \right)^2}, \quad (10)$$

где $a = \frac{S_1}{d}$, $b = \frac{S_2}{b}$, $\varepsilon = 1 - \frac{\pi}{4a}$.

При определении числа Рейнольдса, в уравнениях (7) и (9), в качестве определяющего размера используется параметр $l = \frac{d\pi}{2}$, а в качестве определяющей скорости — скорость в узком сечении трубного пучка.

Результаты решений критериальных уравнений, для рассматриваемого трубного пучка, с последующим определением коэффициента теплоотдачи α по уравнению (2) приведены в табл. 3.

Таблица 3. Значения коэффициента теплоотдачи, определенные по различным методикам
Table 3. Heat transfer coefficient values determined by various methods

Использованный метод	по методике Михеева	по методике Жукаускаса	по методике Бэра
α , Вт/м²К	83	90	59

Теплофизические свойства воздуха при $t_{cp} = 313K$ ($40^\circ C$) определялись согласно [8].

Расчёт коэффициента теплоотдачи в условиях конвективного теплообмена при поперечном обтекании коридорного трубного пучка с помощью критериальных уравнений показал противоречивые результаты. Минимальное значение коэффициента теплоотдачи соответствует методике Бэра, максимальное — Жукаускаса. Различие между ними составляет порядка 40%. Сравнивая данные, представленные в табл. 3, с результатами численного эксперимента (табл. 2), можно сделать вывод о лучшем соответствии полученных результатов численного моделирования с методикой, описанной Бэрмом в [12]. При 6 и 7 степени адаптации расчётной сетки погрешность составила менее 7%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на то, что расчёт конвективного теплообмена при обтекании трубных пучков возможен с помощью критериальных уравнений, учесть все многообразие геометрических характеристик теплообменных поверхностей и свойств и параметров рабочих тел можно только с помощью натурного эксперимента или численного моделирования (CFD). Несмотря на дешевизну и доступность CFD методов исследования, полученные в ходе моделирования результаты нуждаются в верификации, с целью проверки правильности выбора граничных условий, густоты и конфигурации расчётной сетки, используемых моделей турбулентности.

В данной работе, выполнено численное моделирование конвективного теплообмена при поперечном обтекании трубного коридорного пучка потоком воздуха при числе Рейнольдса

$Re = 20000$. Исследовано влияние густоты расчётной сетки на результат численного моделирования в рамках средней величины коэффициента теплоотдачи с поверхности трубы.

Проведена верификация результатов численного моделирования сравнением с данными, полученными в ходе решения критериальных уравнений. Установлена хорошая сходимость полученных результатов с методикой [12].

Полученные результаты могут быть полезны при численном моделировании воздухоохлаждаемых теплообменных аппаратов с поперечным обтеканием трубных пучков.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Д.В. Шевелев — обзор литературы, сбор и анализ литературных источников и полученных данных, проведение расчетов и написание текста и редактирование статьи; А.А. Жинов — экспертная оценка, подготовка и написание текста статьи; Е.А. Юрик — анализ полученных данных, подготовка и редактирование текста статьи. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

Этическая экспертиза. Неприменимо.

Источники финансирования. Отсутствуют.

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы были использованы фрагменты собственного текста, опубликованного ранее [Жинов А.А., Шевелев Д.В., Юрик Е.А. использование технологии CFD для моделирования конвективного теплообмена при поперечном обтекании цилиндра // Электронный журнал: наука, техника и образование. 2023. № (44). С. 11-20. URL: <http://nto-journal.ru/uploads/articles/120fd0329dc4fa42581c577698296c07.pdf> (дата обращения 19.05.2025)], распространяется на условиях лицензии CC-BY 4.0).

Доступ к данным. Редакционная политика в отношении совместного использования данных к настоящей работе не применима, новые данные не собирали и не создавали.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали два внешних рецензента, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions: Author contributions: D.V. Shevelev: literature review, collection and analysis of literary sources and data obtained, simulations, writing of the text and editing of the manuscript; A.A. Zhinov: expert assessment, preparation and writing of the manuscript text; E.A. Yurik: preparation and editing of the manuscript. All the authors approved the version of the manuscript to be published and agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring that issues related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Ethics approval: N/A.

Funding sources: No finding.

Disclosure of interests: The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality: Parts of the own texts, published earlier, were used in writing the paper: Zhinov AA, Shevelev DV, Yurik EA. The Use of CFD Technology for Modeling Convective Heat Transfer in the Transverse Flow of a Cylinder. Electronic Journal: science, technology and education. 2023(44):11-20. URL: <http://nto-journal.ru/uploads/articles/120fd0329dc4fa42581c577698296c07.pdf> (accessed 19.05.2025), available under the CC-BY 4.0 License.

Data availability statement: The editorial policy regarding data sharing does not apply to this work as no new data was collected or created.

Generative AI: No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

Provenance and peer review: This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. *Computational Simulation and Application*. Ed. Jianping Zhu. Croatia: InTech Press; 2011.
2. Star-CCM+ Accessed: 03.11.2024. Available from: <https://star-ccm.com/>
3. Siemens FLOEFD [internet] Accessed: 03.11.2024. Available from: <https://plm.sw.siemens.com/en-US/simcenter/fluids-thermal-simulation/floefd/>
4. FlowVision CFD [internet] Accessed: 03.11.2024. Available from: <https://flowvision.ru/ru/>
5. OpenFOAM [internet] Accessed: 03.11.2024. Available from: <https://www.openfoam.com/>
6. Deich ME. *Technical gas dynamics*. Moscow, Leningrad: Gosenergoizdat; 1961. (In Russ.)
7. Zhinov AA, Shevelev DV, Yurik EA. The use of cfd technology for modeling convective heat transfer in the transverse flow of a cylinder. *Electronic Journal: science, technology and education*. 2023(44):11–20. Accessed: 03.11.2024. Available from: <http://nto-journal.ru/uploads/articles/120fd0329dc4fa42581c577698296c07.pdf>
8. Milman OO, Fedorov VA. *Air-condensing units*. Moscow: MPEI; 2002. (In Russ.)
9. Burtsev SA. Analysis of various factors on the value of the temperature recovery coefficient on the surface of bodies when flown by an air stream. *Science and Education*. 2004(11):1–28. doi: 10.7463/1104.0551021 EDN: VLVEJN
10. Mikheev MA. Calculation formulas for convective heat transfer. *Izvestiya AN SSSR. Power Engineering and Transport*. 1966(5):96–105. (In Russ.)
11. Zhukauskas A, Makaryavichus V, Shlaichyauskas A. *Heat transfer of tube bundles in a transverse fluid flow*. Vilnius, Miitis; 1968. (In Russ.)
12. Baehr H, Stephan K. *Heat and Mass Transfer*. Springer; 2011. doi: 10.1007/978-3-642-20021-2
13. Ametistov EV, Grigoriev VA, Emtsev BT, et al. *Heat and Mass Transfer. Heat Engineering Experiment: Handbook*. Moscow: Energoizdat; 1982. (In Russ.)

ОБ АВТОРАХ / AUTHORS' INFO

* Шевелев Денис Владимирович, канд. тех. наук, доцент кафедры МКЗ «Тепловые двигатели и гидромашины»; адрес: Россия, 248000, Калуга, ул. Баженова, д. 2; ORCID: 0000-0002-7104-3249; eLibrary SPIN: 2076-0373; e-mail: denis.v.shevelev@bmstu.ru	* Denis V. Shevelev, Cand. Sci. (Engineering), Assistant Professor of the Heat Engines and Hydraulic Machines Department; address: 2 Bazhenova st, Kaluga, 248000 Russia; ORCID: 0000-0002-7104-3249; eLibrary SPIN: 2076-0373; e-mail: denis.v.shevelev@bmstu.ru
Соавторы:	Co-Authors:
Жинов Андрей Александрович, канд. тех. наук, доцент, заведующий кафедрой МКЗ «Тепловые двигатели и гидромашины»; ORCID: 0000-0002-6409-4777; eLibrary SPIN: 1078-4808; e-mail: azhinov@bmstu.ru	Andrey A. Zhinov, Cand. Sci. (Engineering), Assistant Professor, Head of the Heat Engines and Hydraulic Machines Department; ORCID: 0000-0002-6409-4777; eLibrary SPIN: 1078-4808; e-mail: azhinov@bmstu.ru
Юрик Елена Алексеевна, канд. тех. наук, доцент кафедры МКЗ «Тепловые двигатели и гидромашины»; ORCID: 0009-0004-9400-0315; eLibrary SPIN: 7520-2944; e-mail: eayurik@bmstu.ru	Elena A. Yurik, Cand. Sci. (Engineering); Assistant Professor of the Heat Engines and Hydraulic Machines Department; ORCID: 0009-0004-9400-0315; eLibrary SPIN: 7520-2944; e-mail: eayurik@bmstu.ru
* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author	