

## Способ калибровки цифровой модели ламинарно-турбулентного перехода свободноконвективных потоков стальных панельных радиаторов

С.А. Тихомиров

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва*

**Аннотация:** Моделирование свободной конвекции от стальных панельных радиаторов представляет серьезную научно-техническую задачу. При нагреве вертикальной поверхности радиатора формируется граничный слой теплого воздуха, поднимающийся вдоль стенки. В нижней части потока движение обычно ламинарное, однако по мере развития пограничного слоя он может становиться неустойчивым и переходить в турбулентный режим. На условия перехода помимо температурного напора влияет геометрия отопительного прибора. Высота, количество панелей, наличие вертикальных ребристых элементов отражается на формировании конвективных потоков, а правильная геометрия способствует раннему ламинарно-турбулентному переходу и более интенсивной конвекции. Обычно теплоотдачу определяют при помощи критериальных уравнений и для вертикальных поверхностей критическим условием перехода служит число Грасгофа порядка  $10^9$ , что соответствует температурному напору около  $70^\circ\text{C}$  на высоте порядка  $0,5\text{--}1\text{ м}$ . В реальных условиях эксплуатации панельного радиатора поток воздуха в нижней зоне радиатора остается ламинарным, а выше по высоте переходит в турбулентный режим, но определить точные параметры перехода используя критериальные зависимости не представляется возможным. Предложенная в исследовании CFD-симуляция процесса перехода подвергалась калибровке способом, основанным на данных лабораторных испытаний, проведенных по методике ГОСТ Р 53583-2009 для повышения достоверности полученных расчетных данных.

**Ключевые слова:** отопительные приборы, свободная конвекция, свободное движение потока воздуха, эффективность теплоотдачи, ламинарно-турбулентный переход.

Моделирование процесса перехода к турбулентности представляет собой достаточно трудную задачу [1]. Для численного моделирования свободноконвективных потоков используется решение уравнений Навье–Стокса в приближении Буссинеска и уравнения теплопереноса [2, 3]. В расчётной модели задаются геометрия помещения (классическая испытательная камера по ГОСТ – закрытая изотермическая комната размером порядка  $3.4\times 3.4\times 2.8\text{ м}$ ) и сам радиатор (панели типов 10, 20, 21) с его конструктивными размерами. Формулируются граничные условия: стенам камеры придаются фиксированные температуры (с учетом

охлаждения по стандарту), стенке с радиатором задается источник тепла, соответствующий тепловому потоку радиатора. В таком виде решение задачи возможно с учетом совместного влияния конвекции и излучения [4-6], с различными моделями турбулентности [7] и расчетом границы пограничного слоя [8-10]. В отличие от обычной постановки по паспортным данным, здесь устанавливается величина теплового потока, полученная по результатам лабораторных испытаний [11]. Расчёт ведётся методом конечных объёмов (или конечных элементов) с учётом конвективного и лучистого теплообмена. При необходимости используются модели турбулентности (например,  $k-\epsilon$  или  $k-\omega$  SST), однако необходимо отметить, что стандартные полуэмпирические модели без дополнительных возбуждений зачастую не воспроизводят однозначно ламинарно-турбулентный переход при свободной конвекции [12, 13]. Например, в  $k-\omega$  SST-подходе переход не выражен ярко, а у модели  $k-\epsilon$  положение перехода чувствительно к сетке и настройкам алгоритма. Для настройки модели используются следующие шаги, характеризующие алгоритм калибровки. В первую очередь выполняется построение геометрии и сетки. Создается модель камеры и радиатора (импорт из CAD-систем), генерируется расчётная сетка с возможностью адаптации в областях резких градиентов.

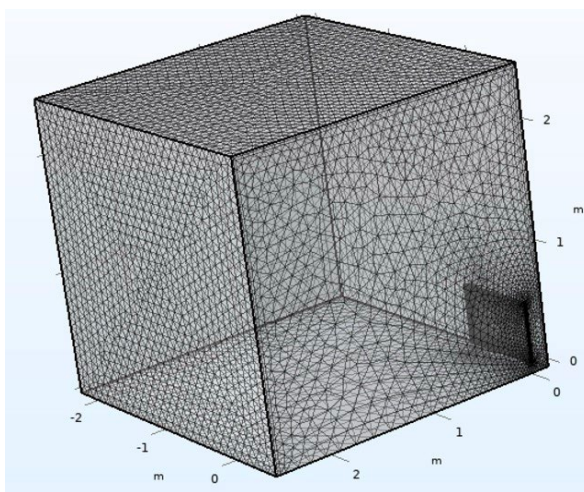


Рис. 1. – Создание модели камеры и радиатора, построение расчетной сетки

В процессе создания модели определена ось симметрии камеры для снижения времени выполнения расчетов и нагрузки на вычислительные мощности.

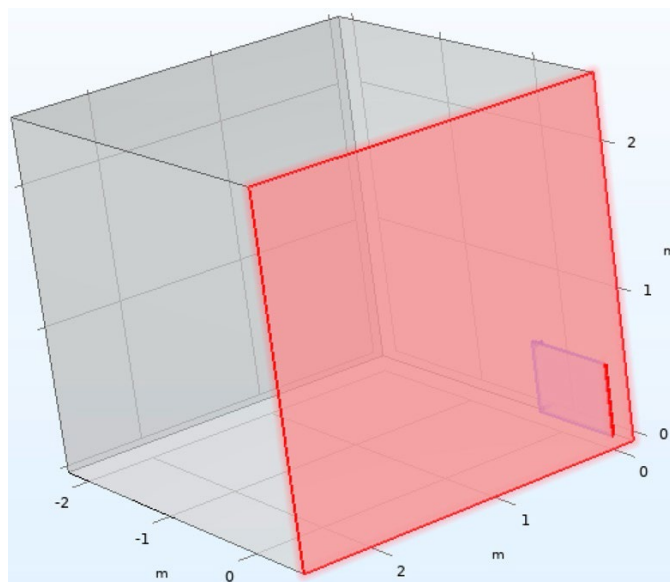


Рис. 2. – Ось симметрии модели камеры и радиатора

Увеличение количества узлов сетки выполнялось при приближении к границе воздух - отопительный прибор.

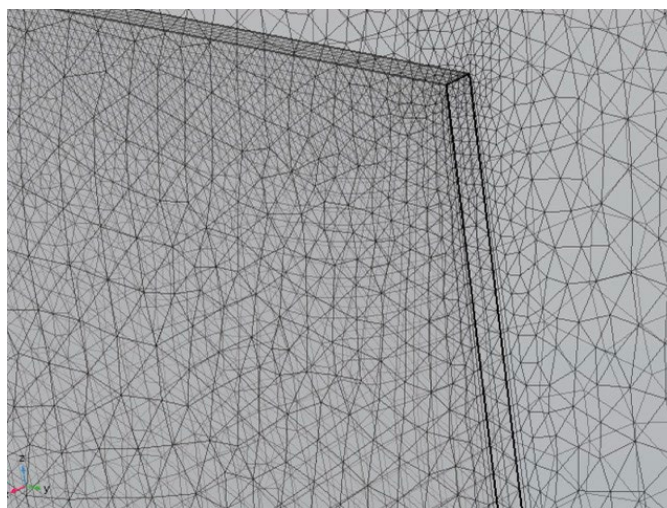


Рис. 3. – Увеличение количества узлов сетки около поверхности радиатора

На втором этапе выполняется задание граничных условий. На внутренних поверхностях стен камеры задаются температуры, обеспечивающие статичные условия эксперимента (в соответствии с ГОСТ Р 53583-2009). На поверхности радиатора задается поток тепла (отопительный

прибор моделируется как тепловой источник). Затем выполняется калибровка теплового потока. Значение теплового потока радиатора выбирается так, чтобы интегральный выход тепла по модели совпал с измеренным в лаборатории, и, вместо паспортного значения, вводится скорректированное экспериментальное значение тепловой мощности. После этого проводится верификация расчёта. Результаты симуляции сравнивают с экспериментальными данными по суммарному тепловыделению и по имеющимся измерениям температуры воздуха в характерных точках помещения для валидации модели. При необходимости итеративно корректируются параметры расчета, такие как свойства воздуха, плотность, коэффициенты излучения, а затем и параметры сетки.

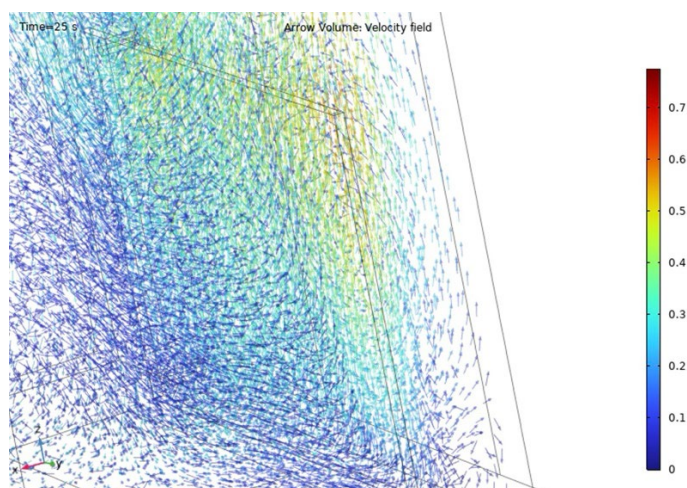


Рис. 4. – Скорости воздуха в зоне поверхности панели радиатора

Такой алгоритм позволяет параметризовать модель по геометрии радиатора, его материалам и условиям, а точность интегрального результата обеспечивается прямой подстройкой под эксперимент. Аналогичный подход показывал хорошее согласие с экспериментом. Например, [14] в своей CFD-модели подтвердили, что численные данные согласуются с экспериментальными результатами, а на других объектах верификация по натурным данным давала удовлетворительное совпадение.

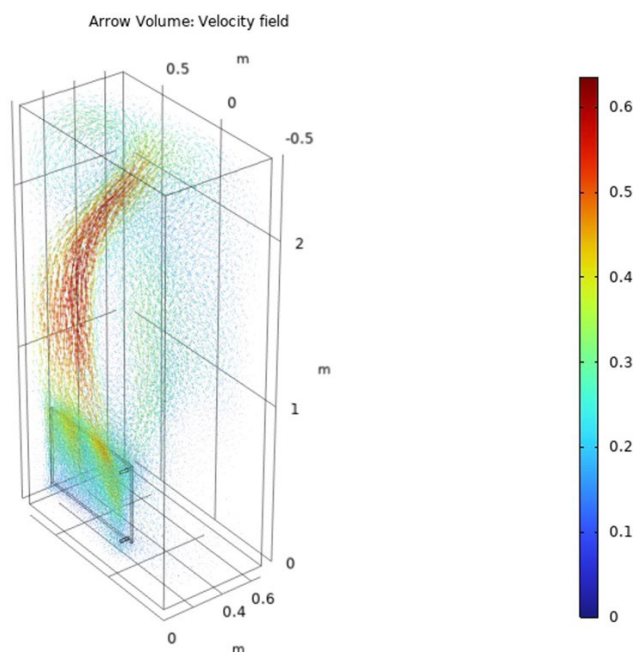


Рис. 5. – Оценка влияния геометрии панели радиатора на распределение скоростей движения воздуха в камере

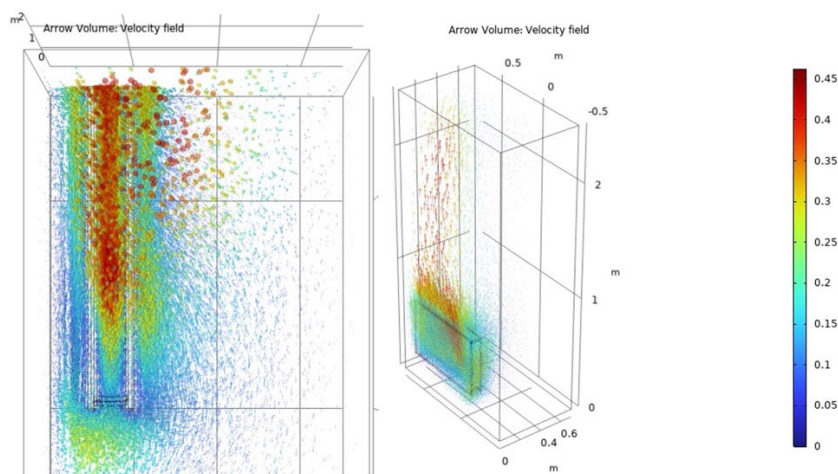


Рис. 6. – Учет влияния числа панелей радиатора и расстояния между ними на распределение скоростей движения воздуха в камере

Расчёт с откалиброванным (по лабораторным данным) значением теплового потока радиатора дал физически правдоподобные поля температуры и скорости воздуха. В моделируемом объёме отчётливо выделяется ламинарный пограничный слой у нижних участков радиатора и зона перехода по высоте панели, как ожидается по классической теории свободной конвекции. Интегральная тепловая мощность, рассчитанная по

балансу энергии, совпадает с заданной (измеренной) величиной потока. Это подтверждает адекватность модели: сопоставление полученных расчётных данных с экспериментальными измерениями показало хорошее совпадение. Например, в [15] аналогичный CFD-подход для свободной конвекции у горизонтальных круглоребристых труб и пучков из них дал удовлетворительное совпадение расчётов с натурными экспериментами и с лабораторно измеренными характеристиками.

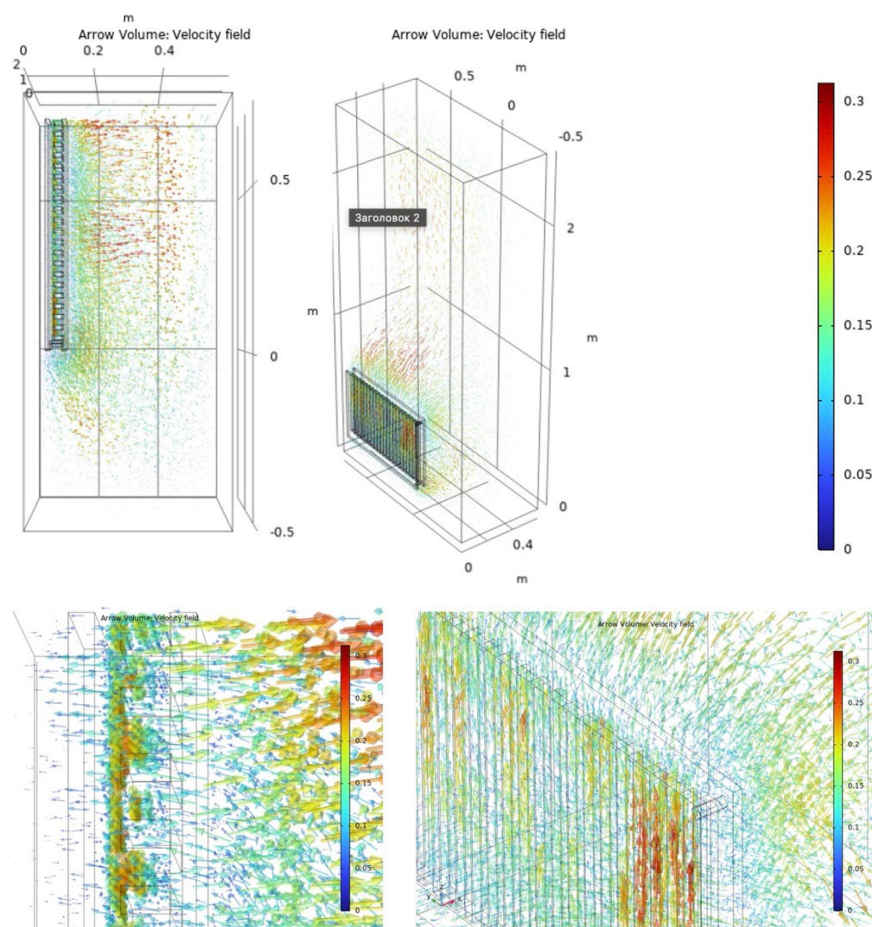


Рис. 7. – Учет влияния вертикального оребрения панелей радиатора и расстояния между ними на распределение скоростей движения воздуха в камере

Калиброванная численная модель обеспечивает высокую точность предсказания интегральных характеристик тепловыделения. Использование CFD позволяет заранее изучить поведение радиатора без изготовления

прототипов, варьируя его геометрию и теплотехнические свойства. Модель легко параметризуется по размерам панелей, наличию оребрения, физическим свойствам материалов и среды, что обеспечивает повторяемость расчётов при разных конфигурациях.

Стоит отметить, что в традиционных лабораторных методиках измеряется лишь суммарная тепловая мощность радиатора, но не даются распределения температуры и скорости воздуха в пространстве. Это означает, что цифровую модель нельзя полноценно верифицировать по локальным полям, а лишь по интегральному выходу. Кроме того, использование подгонки к конкретным экспериментальным данным может привести к «переадаптации» модели под одну точку испытания, снижая её универсальность. Существующие критериальные зависимости перехода, полученные экспериментально, могут существенно отличаться друг от друга и не являются универсальными, поэтому калибровать модель следует с учётом этих разбросов. Так, положение ламинарно-турбулентного перехода сильно зависит от выбора численных схем, турбулентной модели и параметров сетки. Выбор параметров для настройки (помимо теплового потока это могут быть свойства воздуха, настройки турбулентности, разрешение сетки) должен проводиться обоснованно, с анализом чувствительности, чтобы минимизировать неопределённость.

### **Выводы**

Предложенный метод калибровки цифровой модели свободной конвекции радиатора (установкой в расчёте реального лабораторного теплового потока) позволяет добиться высокой точности расчёта интегральных характеристик радиатора и улучшить согласие модели с реальными данными. Такой подход обеспечивает повторяемость вычислений и гибкость моделирования различных конструкций (размеров панелей, оребрения, материалов). Вместе с тем, он требует тщательной валидации:

---

отсутствие экспериментальных полей температуры и скорости затрудняет проверку правильности детализации модели, а подгонка к одним данным может «перекалибровать» модель. Описанный подход на практике целесообразен при переходе к цифровой сертификации отопительных приборов, поскольку позволяет заменять часть экспериментальных испытаний численными с сопоставимой точностью интегральных показателей.

### Литература

1. Бойко А.В., Кириловский С.В., Маслов А.А., Поплавская Т.В. Инженерное моделирование ламинарно-турбулентного перехода: достижения и проблемы (обзор) // Прикладная механика и техническая физика. 2015. Т. 56, № 5(333). С. 30-49. DOI 10.15372/PMTF20150503.
2. Машенков А.Н., Косолапов Е.А., Чебурканова Е.В. Общая система уравнений Буссинеска для одномерной свободной конвекции в плоском вертикальном слое // Приволжский научный журнал. 2012. № 2(22). С. 93-98.
3. Денисихина Д.М. Конвективно-радиационный теплообмен человека в задачах математического моделирования распределенных параметров микроклимата в помещениях // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2014. № 38(57). С. 143-150.
4. Cess R.D. The effect of radiation upon forced-convection heat transfer // Appl. Scient. Res. A. 1961. v.10. №6. pp. 430 – 438.
5. Дунин И.Л., Иванов В.В. Сопряженная задача теплообмена с учетом излучения поверхности // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1974. №4. С. 187 – 190.

6. Иванов В.В., Карасева Л.В. Сопряженный теплообмен в пластине с излучающими наружными поверхностями // Изв. вузов. Сев-Кавк. Регион. Техн. Науки. 2015. № 1. С. 65 – 68.
  7. Денисихина Д.М., Иванова Ю.В., Мокров В.В. Численное моделирование истечения из современных воздухораспределительных устройств // Инженерный вестник Дона. 2018, № 2. URL: [ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_183\\_denisikhina\\_ivanova\\_mokrov.pdf\\_eb27152529.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_183_denisikhina_ivanova_mokrov.pdf_eb27152529.pdf)
  8. Иванов В.В., Карасева Л.В., Тихомиров С.А., Пономаренко А.С. Теплообмен в пограничных слоях на излучающих поверхностях // Инженерный вестник Дона, 2017, №2 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4188/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4188/).
  9. Sparrow E.M., Lin S.H. Boundary layers with prescribed heat flux application to simultaneous convection and radiation // International J. Heat Mass Transfer. 1965, v.202, №1070. pp. 437–448.
  10. Chambre P.L., Acrivos A. On chemical surface reactions in laminar boundary layer flows. J.Appl. Phys., 1956, v.27, № 11. pp. 1322 – 1328.
  11. Саргсян С.В. Исследование способов организации воздухообмена и систем воздухораспределения на физических моделях в лабораторных условиях // Научное обозрение. 2015. № 16. С. 68-71.
  12. Чумаков Ю.С., Храпунов Е.Ф., Малых А.Д. Экспериментальное исследование влияния крупномасштабных возмущений на ламинарно-турбулентный переход в свободноконвективном слое на вертикальной поверхности // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. 2020. Т. 13, № 3. С. 108-118. DOI 10.18721/JPM.13308.
-

13. Абрамкина Д.В. Моделирование свободноконвективных течений в системах вентиляции с тепловым побуждением // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017. Т. 44, № 3. С. 136-145. DOI 10.21822/2073-6185-2017-44-3-136-145.
14. Абрамкина Д.В., Абрамян А.А., Шевченко-Эннс Э.Р. Экспериментальное определение коэффициентов конвективной теплоотдачи в системе вентиляции с тепловым побуждением // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018. Т. 45, № 4. С. 133-141. DOI 10.21822/2073-6185-2018-45-4-133-141.
15. Маршалова Г.С., Сухоцкий А.Б., Кунтыш В.Б. Свободно-конвективный теплообмен на круглоребристых трубах и пучках из них // Инженерно-физический журнал. 2023. Т. 96, № 4. С. 1091-1105.

### References

1. Bojko A.V., Kirilovskij S.V., Maslov A.A., Poplavskaya T.V. Prikladnaya mexanika i texnicheskaya fizika. 2015. T. 56, № 5(333). pp. 30-49. DOI 10.15372/PMTF20150503.
2. Mashenkov A.N., Kosolapov E.A., Cheburkanova E.V. Privolzhskij nauchny`j zhurnal. 2012. № 2(22). pp. 93-98.
3. Denisixina D.M. Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arxitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arxitektura. 2014. № 38(57). pp. 143-150.
4. Cess R.D. Appl. Scient. Res. A. 1961. v.10. №6. pp. 430 – 438.
5. Ivanov V.V., Dunin I.L. Izvestiya AN SSSR. Mehanika zhidkosti I gaza, 1974, no. 4, pp. 187-190.
6. Ivanov V.V., Karaseva L.V. Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskij region. Tehnicheskie nauki, 2015, no. 1, pp.65-68.



7. Denisixina D.M., Ivanova Yu.V., Mokrov V.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2018, № 2. URL: [ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_183\\_denisikhina\\_ivanova\\_mokrov.pdf\\_eb27152529.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_183_denisikhina_ivanova_mokrov.pdf_eb27152529.pdf)
8. Ivanov V.V., Karaseva L.V., Tikhomirov S.A., Ponomarenko A.S. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4188/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4188/).
9. Sparrow E.M., Lin S.H. International J. Heat Mass Transfer. 1965, v.202, №1070. pp. 437 – 448.
10. Chambre P.L., Acrivos A. J.Appl. Phys., 1956, v.27, № 11. pp. 1322 –1328.
11. Sargsyan S.V. Nauchnoe obozrenie. 2015. № 16. pp. 68-71.
12. Chumakov Yu.S., Xrapunov E.F., Maly`x A.D. Nauchno-texnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politexnicheskogo universiteta. Fiziko-matematicheskie nauki. 2020. T. 13, № 3. pp. 108-118. DOI 10.18721/JPM.13308.
13. Abramkina D.V. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta. Texnicheskie nauki. 2017. T. 44, № 3. pp. 136-145. DOI 10.21822/2073-6185-2017-44-3-136-145.
14. Abramkina D.V., Abramyan A.A., Shevchenko-E`nns E`.R. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta. Texnicheskie nauki. 2018. T. 45, № 4. pp. 133-141. DOI 10.21822/2073-6185-2018-45-4-133-141.
15. Marshalova G.S., Suxoczkiy A.B., Kuntiy`sh V.B. Inzhenerno-fizicheskij zhurnal. 2023. T. 96, № 4. pp. 1091-1105.

**Дата поступления: 13.07.2025**

**Дата публикации: 25.08.2025**