

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 697.245.37

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-4-166-174



Оригинальная статья /Original article

**CFD-анализ воздушных потоков и температур на базе газолучистого отопления
в промышленных условиях**

Е.С. Аралов, Б.М. Кумицкий

Воронежский государственный технический университет,
394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84, Россия

Резюме. Цель. Исследование направлено на изучение сложного взаимодействия между лучистым отоплением и воздушными потоками в промышленных помещениях. Цель состоит в том, чтобы понять динамику температуры, уделяя особое внимание оптимизации энергоэффективности и комфорта в производственных помещениях, отапливаемых двухзонным темным газолучистым обогревателем. **Метод.** Используя Computational Fluid Dynamics (CFD) и программу Ansys для моделирования, в исследовании была разработана модель, представляющая типичные промышленные условия. Этот метод включал определение и проверку параметров температурных градиентов и скорости воздуха, а также тщательное картирование сложностей процесса промышленного нагрева. **Результат.** Анализ обеспечивает подробные графические представления температуры и скорости воздуха в отдельных точках, раскрывая влияние лучистого отопления на модели воздушных потоков. Особое внимание было уделено тому, как температурные профили взаимодействуют с двухзонной системой отопления, раскрывая важные данные, которые помогают понять тепловую динамику в промышленных помещениях. **Вывод.** Полученные данные демонстрируют потенциал для значительного прогресса в области энергосбережения и повышения комфорта работников в промышленных условиях, использующих лучистое отопление. Комплексный подход исследования заполняет критический пробел в существующих исследованиях, подчеркивая необходимость и потенциал для дальнейшего изучения технологий устойчивого отопления в сложных промышленных условиях.

Ключевые слова: лучистое отопление, энергоэффективность, обогрев, Ansys fluent, воздушные потоки, тепловой комфорт

Для цитирования: Е.С. Аралов, Б.М. Кумицкий. CFD-анализ воздушных потоков и температур на базе газолучистого отопления в промышленных условиях. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(4): 166-174. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-4-166-174

**CFD analysis of air flows and temperatures based on radiant heating
in industrial environments**

E.S. Aralov, B.M. Kumicki

Voronezh State Technical University,
84 20th Anniversary of October St., Voronezh 394006, Russia

Abstract. Objective. The study aims to investigate the complex interaction between radiant heating and airflow in industrial environments. The aim is to understand the dynamics of temperature, with particular attention to optimizing energy efficiency and comfort in industrial premises heated by a dual-zone dark gas radiant heater. **Method.** Using Computational Fluid Dynamics (CFD) and Ansys simulation software, the study developed a model that represents typical industrial conditions. This method included the determination and verification of temperature gradients and air velocity parameters, as well as careful mapping of the complexities of the industrial heating process. **Result.** The analysis provides detailed graphical representations of temperature and air

velocity at individual points, revealing the effect of radiant heating on airflow patterns. Particular attention has been paid to how the temperature profiles interact with a dual-zone heating system, revealing important data that helps understand thermal dynamics in industrial environments. **Conclusion.** The findings demonstrate the potential for significant progress in energy savings and improved worker comfort in industrial environments using radiant heating. The integrated research approach fills a critical gap in existing research, highlighting the need and potential for further exploration of sustainable heating technologies in challenging industrial environments.

Key words: radiant heating, energy efficiency, heating, Ansys fluent, air flow, thermal comfort

For citation: E.S. Aralov, B.M. Kumicki. CFD analysis of air flows and temperatures based on radiant heating in industrial environments. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2023; 50(4): 166-174. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-4-166-174

Введение. Системы лучистого отопления становятся все более используемы в промышленных условиях, предлагая повышенную энергоэффективность и комфорт, в отличие от их предшественников, а именно от традиционных систем теплоснабжения. Эти системы обычно основаны на циркуляции нагретого воздуха, что может привести к неравномерному распределению температуры, создавая горячие и холодные точки в помещении. Этот неравномерный нагрев часто приводит к потерям энергии, поскольку система изо всех сил пытается поддерживать постоянную температуру. Кроме того, традиционные методы отопления могут способствовать ухудшению качества воздуха за счет циркуляции пыли, аллергенов и других загрязняющих веществ, что потенциально влияет на здоровье и комфорт жильцов. Обслуживание таких систем может быть сложным и дорогостоящим, требуя регулярной очистки и обслуживания воздухопроводов и фильтров. Потери энергии также распространены в традиционных системах, особенно если в воздуховоде есть утечка, что еще больше снижает эффективность.

По мере усложнения производственных помещений первостепенное значение приобретают точный контроль и понимание распределения температурных полей и воздушных потоков в этих помещениях [1]. Применение двухзонных темных газолучистых обогревателей открыло уникальные возможности в управлении температурным режимом. Хотя их потенциал энергосбережения является многообещающим, всесторонний анализ их влияния на воздушный поток и распределение температуры отсутствует [2-5].

Использование вычислительной гидрогазодинамики (CFD) и специализированных инструментов, таких как программный комплекс Ansys fluent, предлагает путь к решению всесторонних проблем. Комплексы CFD предлагают множество преимуществ, особенно при анализе и моделировании течения жидкости, теплообмена и связанных явлений. Одним из основных преимуществ CFD является его способность моделировать сложную геометрию и модели потока, которые могут быть непрактичными или слишком дорогими для изучения с помощью физических экспериментов [6-8].

Это исследование направлено на изучение взаимодействия между лучистым отоплением и режимами воздушного потока в промышленных помещениях, уделяя особое внимание тонкостям температурных профилей и влиянию на энергосбережение и комфорт человека. Проводя тщательное исследование температуры и скорости воздуха в отдельных точках, исследование направлено на устранение существующих пробелов в знаниях, способствуя более широкому пониманию тепловой динамики в современных производственных условиях [9,10].

Постановка задачи. Данная статья связана со сложным взаимодействием воздушного потока и температуры в производственном помещении, отапливаемом двухзонным газолучистым отопителем. В производственном помещении эффективность и экономичность системы отопления должны быть сбалансированы со сложной динамикой движения воздуха, на которую влияют различные факторы, такие как планировка помещения, размещение оборудования и сама система отопления. Традиционные системы отопления

могут привести к неравномерному распределению температуры, потенциальным потерям энергии и некомфортным условиям труда. Уникальное сочетание лучистого отопления со сложностью промышленных воздушных потоков представляет собой многогранную проблему, требующую глубокого понимания гидрогазодинамики, механизмов теплопередачи и реальных ограничений. Исследование направлено на то, чтобы найти решение этой сложной проблемы, предлагая путь к улучшенному управлению температурным режимом в промышленных условиях.

Методы исследования. Изменения расхода воздуха и температуры в производственном помещении, отапливаемом двухзонной конструкцией газолучистого излучателя, охватывают несколько комплексных и взаимосвязанных подходов. Первоначально разрабатывается подробное геометрическое представление помещения с учетом конкретного расположения и ориентации нагревательных элементов, механизмов, окон, дверей и любых других конструкций, которые могут влиять на потоки воздуха и распределение температуры (рис. 1).

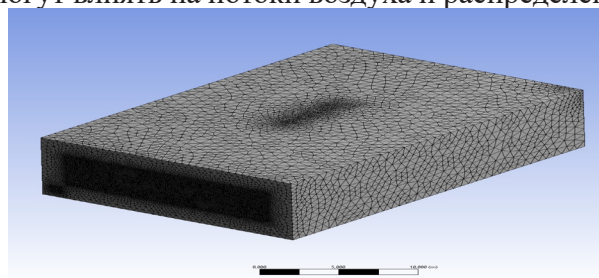


Рис.1. Сеточная модель частного случая производственного помещения с выделением особо важных зон
Fig.1. Grid model of a particular case of a production facility with the allocation of particularly important areas

Вычислительная гидрогазодинамика (CFD) является важнейшим этапом в анализе, где моделирование воздушного перемещения включает моделирование турбулентных и ламинарных потоков, вязкости, градиентов давления и взаимодействия между воздухом и твердыми структурами. Граничные условия тщательно определены, представляя реальные условия, такие как температура на входе и выходе, температура стен и характер систем отопления.

Лучистое отопление тщательно моделируется, чтобы отразить теплообмен между газовыми лучистыми обогревателями и окружающим воздухом, а также воздействие нагрева на близлежащие поверхности. Конвекция, теплопроводность и излучение учитываются в тепловом анализе, обеспечивая всестороннее представление об изменениях температуры. Модели турбулентности могут применяться, если поток имеет турбулентные характеристики, предлагая более точное изображение сложных моделей потока, часто встречающихся в промышленных условиях. Выбор между различными моделями турбулентности, такими как $k-\epsilon$ или $k-\omega$, зависит от конкретного режима потока и доступных экспериментальных или эмпирических данных для проверки [11-14].

Моделирование проводится с использованием специализированного программного обеспечения, такого как Ansys, с использованием численных методов для решения основных уравнений потока жидкости и теплообмена. Моделирование в зависимости от времени может быть выполнено для регистрации переходных режимов воздушного потока и температуры. Наконец, проверка результатов моделирования осуществляется путем сравнения с экспериментальными данными, если они имеются, или с установленными эмпирическими корреляциями. Также можно провести анализ чувствительности, чтобы понять, как изменения таких параметров, как интенсивность отопления, планировка помещения или внешние погодные условия, могут повлиять на результаты [3,7,15].

Вместе эти методы исследования образуют надежный и многогранный подход к анализу динамики воздушного потока и температуры в промышленном помещении, предлагая ценную информацию о влиянии лучистой системы отопления и помогая оптимизировать стратегии обогрева. Рассмотрим основные уравнения и физические законы, которые тесно связаны с процессом воздухообмена, теплопроводности и изменением температуры в

помещении. Такая расчетная последовательность покажет прямые зависимости от исходных параметров. Уравнение Навье-Стокса с учетом силы тяжести (то есть второй закон Ньютона для единичной массы воздуха) имеет вид:

$$\frac{1}{\rho} \nabla p = \nu \Delta V + g \quad (1)$$

где ρ - плотность воздуха; ∇ - оператор набла; p - давление; ν - кинематическая вязкость; Δ - оператор Лапласа; g - ускорение свободного падения.

Стационарное уравнение непрерывности имеет вид:

$$\frac{dT}{dt} = V \nabla T = a \Delta T. \quad (2)$$

К ним нужно добавить еще стационарное уравнение теплопроводности:

$$\frac{dT}{dt} = V \nabla T = a \Delta T. \quad (3)$$

где a - коэффициент температуропроводности воздуха (он связан с коэффициентом теплопроводности λ соотношением: $a = \frac{\lambda}{\rho c_p}$),

где c_p - теплоемкость при постоянном давлении

В отсутствии конвекции ($V=0$) из (1) имеем для невозмущенного давления известную барометрическую формулу:

$$p_0(x) = p_0(0) - \rho_0 g x. \quad (5)$$

Аналогично из (3) получим $\Delta T_0 = 0$ откуда находим линейный закон изменения температуры с высотой

$$T_0(x) = T_0(1 - \frac{x}{L}). \quad (6)$$

Уравнения решаются численными методами, а в программе Ansys, применяются граничные условия, отражающие конкретную производственную среду и систему отопления. Интегрируя эти конкретные формулы, методология исследования предлагает всесторонний и точный подход к пониманию моделей воздушных потоков и их взаимодействия с системой лучистого отопления.

Обсуждение результатов. Проведем анализ графического представления, который демонстрирует пять различных графиков, отображающих зависимость температуры от высоты помещения. Первый график (рис. 2) представляет расположение непосредственно под газолучистым обогревателем, показывает однородность температуры, значения которой лишь незначительно колеблются между 294,3 К и 293,7 К. Эта однородность демонстрирует эффективность системы лучистого отопления в поддержании стабильных тепловых условий в окрестности ее работы

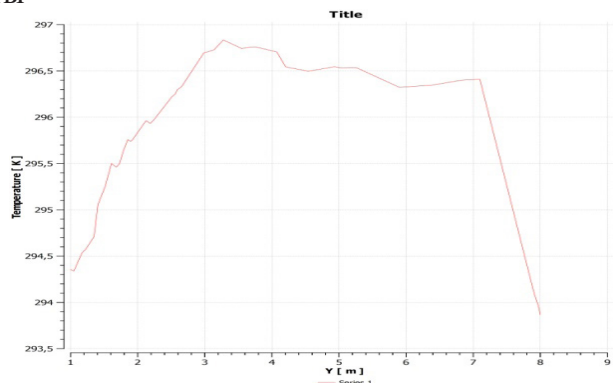


Рис. 2. Данные значений температур под газолучистым обогревателем
Fig. 2. Data of temperature values under the gas-fired heater

Следующие два графика (рис. 3), которые расположены поперечно в трех метрах от обогревателя, представляют более динамичный диапазон температур, изменяющийся от 294,2 К до 302,2 К. Это значительное увеличение может быть связано с влиянием отражателей в конструкции отопителя, которые усиливают нагревательный эффект и, таким образом, приводит к более широкому диапазону температур.

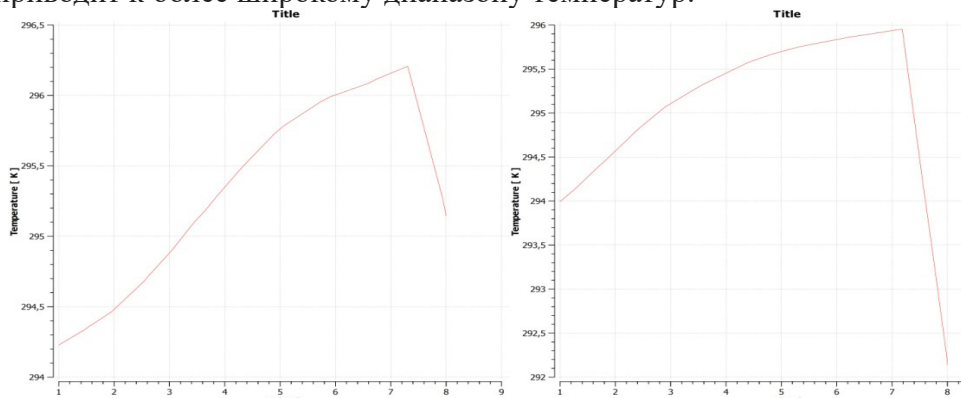


Рис. 3. Данные значений температур в поперечном сечении на расстоянии трех метров от излучателя

Fig. 3. Data of temperature values in the cross section at a distance of three meters from the emitter

Последние два графика (рис.4), представляющие продольное расположение точек на расстоянии пяти метров от нагревателя, показывают разные результаты. Первый, демонстрирует температуры в диапазоне от 294,2 К до 295,1 К, что отражает умеренные колебания. Второй график со значениями температуры от 294 К до 292,2 К указывает на более низкий диапазон. На это снижение, вероятно, влияет близость к приточно-вытяжной вентиляции в помещении, поскольку поток воздуха из вентиляционной системы будет снижать температуру облучаемых поверхностей.

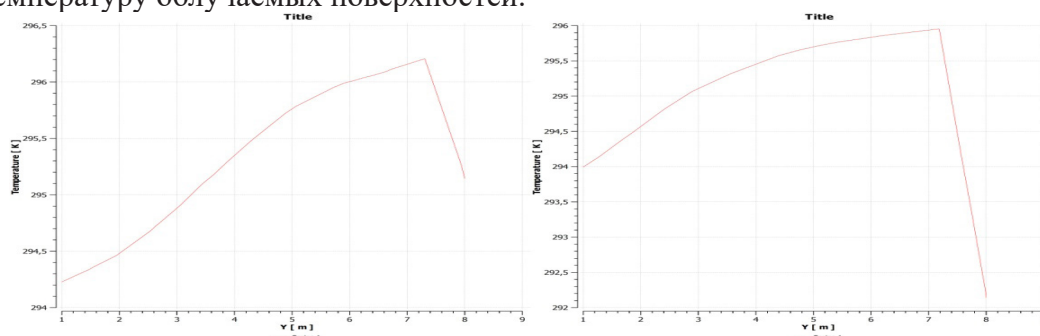


Рис. 4. Данные значений температур в продольном сечении на расстоянии пяти метров от излучателя

Fig. 4. Data of temperature values in the longitudinal section at a distance of five meters from the emitter

В совокупности эти графические идеи раскрывают сложное взаимодействие между лучистым отоплением, отражателями и вентиляцией в помещении. Локальная однородность, влияние отражателей и вентиляция - все это способствует созданию многогранного теплового комфорта в промышленном пространстве. Результаты подчеркивают важность учета пространственного распределения различных элементов в помещении, включая обогреватели, отражатели и точки вентиляции, для полного понимания и управления тепловым поведением в промышленной среде.

Следующие графические изображения в совокупности дают тонкое представление о сложной динамике воздушного потока, на которую влияет газовый инфракрасный обогреватель и другие пространственные элементы в помещении. На первом графике (рис. 5), расположенном непосредственно под лучистым обогревателем, показаны значения скорости воздуха в диапазоне от 0,188 м/с до 0,325 м/с, что иллюстрирует непосредственное влияние лучистого обогрева на воздушный поток. Это может означать, что помимо лучистого теплообмена присутствуют и конвекционные потоки за счет нагрева рефлекторов

и отражателей конфигурация которых представлена в статьях [2,3,4,6], вызванные системой отопления, где температурный градиент заставляет воздух циркулировать быстрее вблизи обогревателя.

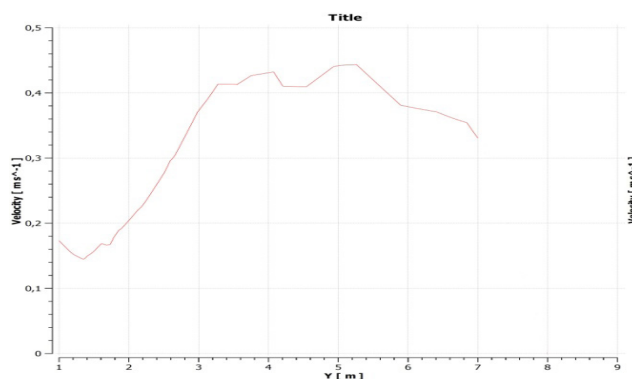


Рис. 5. Данные значений скоростей воздушных потоков под газолучистым обогревателем

Fig. 5. Data on air flow velocities under a radiant gas heater

На следующей паре графиков (рис. 6), расположенных поперек трех метров от нагревателя, представлены скорости от 0,12 м/с до 0,15 м/с. Эти относительно постоянные и умеренные скорости могут указывать на стабилизацию движения воздуха на этом расстоянии, возможно, под влиянием баланса между нагревом и аэродинамикой помещения.

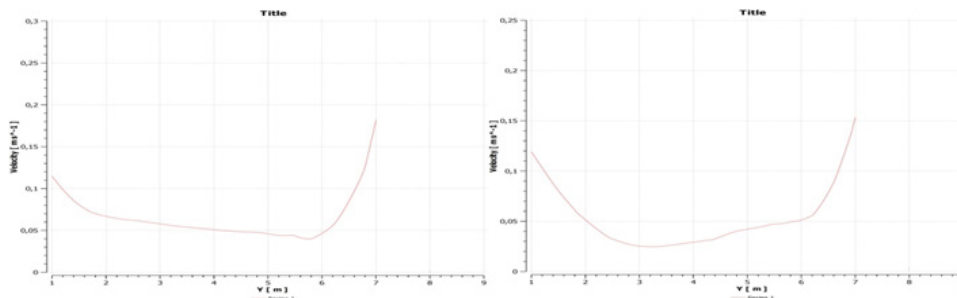


Рис. 6. Данные значений скоростей воздушных потоков в поперечном сечении на расстоянии трех метров от излучателя

Fig. 6. Data on cross-sectional air flow velocities at a distance of three meters from the emitter

Последние два графика (рис. 7), представляющие скорости в продольном направлении в пяти метрах от нагревателя, показывают более разные результаты.

Первый, показывает скорости от 0,052 м/с до 0,08 м/с, отражая уменьшенное влияние нагревателя на этом расстоянии. Второй, со скоростями от 0,15 м/с до 0,04 м/с, заметно выше, что, вероятно, связано с близостью к приточной вентиляции, усиливающей поток воздуха в этой области.

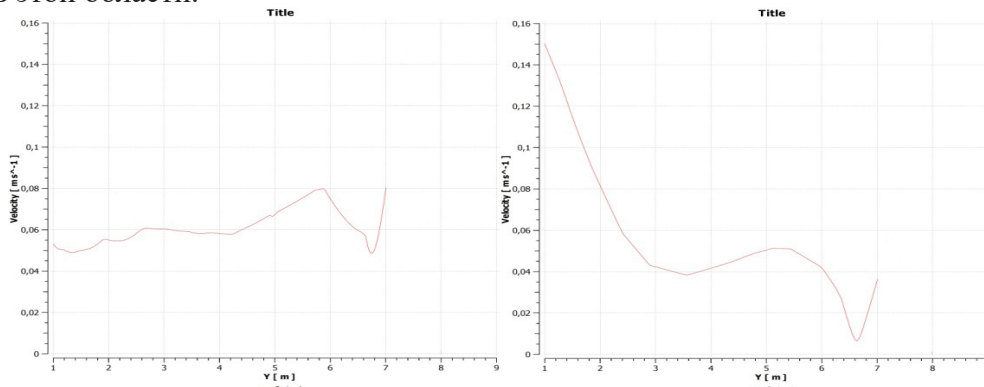


Рис.7. Данные значений скоростей воздушных потоков в продольном сечении на расстоянии пяти метров от излучателя

Fig.7. Data on air flow velocities in a longitudinal section at a distance of five meters from the emitter

Вывод. В заключении можно сказать, что результаты проведенного исследования подчеркивают сложную взаимосвязь между системой отопления, геометрией помещения и вентиляцией. Они подчеркивают прямое влияние лучистого обогревателя на близлежащие воздушные потоки и температурную равномерность, сдерживающее влияние динамики помещения на промежуточных расстояниях и особую роль вентиляции в формировании моделей воздушных потоков.

Представленный материал охватывает целостное понимание взаимодействия между воздушным потоком и температурой в помещении промышленного назначения, особенно с акцентом на влияние эффективной конструкции газолучистого обогревателя. Благодаря тщательному анализу вычислительной гидрогазодинамики (CFD) и подробному изучению графических представлений исследование раскрывает многогранную динамику, определяющую как скорость воздуха, так и распределение температуры.

Однородность температуры, наблюдаемая непосредственно под обогревателем, подчеркивает эффективность лучистого обогрева, тогда как колебания температуры на разных расстояниях от обогревателя подчеркивают влияние отражателей и вентиляции на тепловое поведение. Зависимость воздушного потока от высоты помещения, а также сложное взаимодействие между обогревателем, планировкой помещения и вентиляцией дает представление о контроле и оптимизации условий окружающей среды в промышленных помещениях.

Кроме того, исследование подчеркивает важность использования передовых инструментов моделирования, таких как Ansys fluent, в сочетании с точным моделированием турбулентных и ламинарных потоков, механизмов теплопередачи и реальных ограничений. Этот комплексный подход обеспечивает всестороннее представление о сложной тепловой среде в промышленном помещении, что позволяет принимать решения в стратегиях отопления на основе полученных данных.

Библиографический список:

1. Аралов Е.С. Обеспечение теплового комфорта в помещениях ресторанных комплексов // Научная опора воронежской области : Сборник трудов победителей конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий, Воронеж, 03–28 апреля 2017 года. – Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2017. – С. 95-96.
2. Чуйкин С.В., Аралов Е.С. Разработка конструкции и совершенствование методики расчёта двухзонного тёмного газолучистого обогревателя для отопления промышленных и общественных помещений // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. – 2023. – № 2(254). – С. 29-31.
3. Аралов Е.С. Оптимизация конструкции газолучистого обогревателя темного типа // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. – 2023. – № 1(24). – С. 55-61. – DOI 10.36622/VSTU.2023.24.1.006.
4. Аралов Е.С., Чуйкин С.В. Эффективная конструкция двухзонного темного газолучистого обогревателя // Математическое и экспериментальное моделирование физических процессов : Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Биробиджан, 15 декабря 2022 года / Под научной редакцией В.М. Козина. – Биробиджан: Приамурский государственный университет им. Шолом-Алейхема, 2023. – С. 62-66.
5. Аралов Е.С., Кумицкий Б.М., Бугаевский Д.О. Эффективность теплоизоляционных материалов, применяемых при строительстве наружных ограждающих конструкций // Градостроительство. Инфраструктура. Коммуникации. – 2021. – № 4(25). – С. 26-31.
6. Патент на полезную модель № 213700 U1 Российская Федерация, МПК F24D 5/08, F23M 9/04, F28D 1/047. Двухзонный темный газолучистый обогреватель : № 2022118249 : заявл. 04.07.2022 : опубл. 23.09.2022 / С. В. Чуйкин, Е. С. Аралов.
7. Калинина А.И., Макаров А.Р., Аралов Е.С. Особенности формирования микроклимата в помещениях с повышенной влажностью, с учетом теплотехнических характеристик ограждающих конструкций // Инновации и инвестиции. – 2021. – № 3. – С. 256-259.
8. Aralov E.S., Kumitsky B.M., Kutsigina O.A., Dorniyak O.R. Modeling of the thermal state of a room when using the heating structure of a two-zone dark gas-beam heater // Russian Journal of Building Construction and Architecture. – 2023. – No. 3(59). – P. 16-24. – DOI 10.36622/VSTU.2023.3.59.002.

9. Kumitskiy B., Tul'skaya S., Morozov V., Aralov E., Budnikov V. Hydrodynamics of the Flow of an Ideal Liquid When It Flows Out of the Bottom Hole of a Parabolic Tank // *Modern Problems in Construction : Selected Papers from MPC 2021, Kursk, November 18–19, 2021.* – Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2023. – P. 225-232.
10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023617539 Российская Федерация. Программа расчета коэффициента облучения при лучистом теплообмене прямоугольного обогревателя с элементарной площадкой : № 2023616247 : заявл. 28.03.2023 : опубл. 11.04.2023 / С.В. Чуйкин, Е.А. Копытина, Е.С. Аралов, С.О. Харин ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет».
11. Павлов М.В., Бутовский И.Н. Повышение эффективности системы лучистого отопления теплицы с использованием газовых инфракрасных излучателей // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2019. – № 6(1018). – С. 36-38.
12. Золотаревский С.А. Газовое лучистое отопление - радикальное решение для повышения энергоэффективности и конкурентоспособности промышленных предприятий // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2018. – № 5(106). – С. 46-51.
13. Каштанова Д.С., Ивашкевич А.А. Воздушное отопление складских помещений // Новые идеи нового века: материалы международной научной конференции ФАД ТОГУ. – 2022. – Т. 2. – С. 287-292.
14. Богословский, В.Н. Тепловой режим гражданских зданий // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. – 2023. – № 4. – С. 4-17.
15. Смыков А.А. Тепловой и температурный режим помещений с системами отопления на основе водяных инфракрасных излучателей // Приволжский научный журнал. – 2021. – № 2(58). – С. 98-106.
16. Климанов, В.А. Дозиметрическое планирование лучевой терапии : учебное пособие для студентов высших учебных заведений / В. А. Климанов ; В. А. Климанов. – Москва : Московский инженерно-физ. ин-т (гос. ун-т), 2008. – 175 с. – ISBN 978-5-7262-0969-2.
17. Бухмиров В.В., Крупенников С.А., Солнышкова Ю.С. Модификации зонального метода для решения задач радиационного теплообмена: основные положения // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2009. – № 2. – С. 61-63.
18. Бодров В.И., Бодров М.В., Смыков А.А. Исследование систем лучистого отопления на базе низкотемпературных инфракрасных излучателей // Приволжский научный журнал. – 2019. – № 3(51). – С. 52-57.
19. Идрисов А.З. Перспективы применения газовых инфракрасных излучателей в районах Крайнего Севера // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 1997. – № 3. – С. 55-57.
20. Семикашев, В. В. Теплоснабжение в России: текущая ситуация и проблемы инвестиционного развития // ЭКО. – 2019. – № 9(543). – С. 23-47.
21. Глушков А.Ю., Полосин И.И. Расчет газовых лучистых обогревателей для помещений сложной конфигурации // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. – 2013. – № 11(143). – С. 56-57.

References

1. Aralov E.S. Ensuring thermal comfort in the premises of restaurant complexes. Scientific support of the Voronezh region: Collection of works of the winners of the competition of research works of students and graduate students of VSTU in priority areas of science and technology development, Voronezh, April 03–28, 2017. Voronezh: Voronezh State Technical University, 2017; 95-96. (In Russ)
2. Chuikin S.V., Aralov E.S. Development of the design and improvement of the methodology for calculating a two-zone dark gas-radiant heater for heating industrial and public premises. *Plumbing, Heating, Air Conditioning*. 2023; 2 (254); 29-31. (In Russ)
3. Aralov E.S. Optimization of the design of a gas-radiant heater of a dark type. *Housing and communal infrastructure*. 2023; No. 1(24); 55-61. – DOI 10.36622/VSTU.2023.24.1.006. (In Russ)
4. Aralov E.S., Chuikin S.V. Effective design of a two-zone dark gas-radiant heater. Mathematical and experimental modeling of physical processes: *Collection of materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation*, Birobidzhan, December 15, 2022; Under the scientific editorship of V.M. Kozin. Birobidzhan: Priamursky State University. Sholom Aleichem; 2023; 62-66. (In Russ)
5. Aralov E.S., Kumitsky B.M., Bugaevsky D.O. Efficiency of heat-insulating materials used in the construction of external building envelopes. *Urban planning. Infrastructure. Communications*. 2021; 4 (25); 26-31. (In Russ)
6. Utility model patent No. 213700 U1 Russian Federation, IPC F24D 5/08, F23M 9/04, F28D 1/047. Two-zone dark gas-radiant heater: No. 2022118249: Appl. 07/04/2022 : publ. 23.09.2022; S. V. Chuikin, E. S. Aralov. (In Russ)
7. Kalinina A.I., Makarov A.R., Aralov E.S. Features of microclimate formation in rooms with high humidity, taking into account the thermal characteristics of building envelopes. *Innovations and investments*. 2021; 3; 256-259. (In Russ)
8. Aralov E.S., Kumitsky B.M., Kutsigina O.A., Dorniyak O.R. Modeling of the thermal state of a room when

- using the heating structure of a two-zone dark gas-beam heater. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2023; 3(59); 16-24. – DOI 10.36622/VSTU.2023.3.59.002.
9. Kumitskiy B., Tul'skaya S., Morozov V., Aralov E., Budnikov V. Hydrodynamics of the Flow of an Ideal Liquid When It Flows Out of the Bottom Hole of a Parabolic Tank. *Modern Problems in Construction : Selected Papers from MPC 2021, Kursk, November 18–19, 2021*; Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2023; 225-232.
 10. Certificate of state registration of the computer program No. 2023617539 Russian Federation. The program for calculating the irradiation coefficient for radiant heat transfer of a rectangular heater with an elementary platform: No. 2023616247: Appl. 03/28/2023 : publ. 04/11/2023 / S.V. Chuikin, E.A. Kopytina, E.S. Aralov, S.O. Kharin; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Voronezh State Technical University". (In Russ)
 11. Pavlov M.V., Butovsky I.N. Improving the efficiency of the greenhouse radiant heating system using gas infrared emitters. *BST: Bulletin of construction equipment*. 2019; 6 (1018); 36-38. (In Russ)
 12. Zolotarevsky S.A. Gas radiant heating - a radical solution to improve energy efficiency and competitiveness of industrial enterprises. *Automation and IT in the energy sector*. 2018; 5 (106); 46-51. (In Russ)
 13. Kashtanova D.S., Ivashkevich A.A. Air heating of warehouse premises. *New ideas of the new century: materials of the international scientific conference FAD TOGU*. 2022; 2; 287-292. (In Russ)
 14. Bogoslovsky, V.N. Thermal regime of civil buildings. *AVOK: Ventilation, heating, air conditioning, heat supply and building thermal physics*. 2023; 4; 4-17. (In Russ)
 15. Smykov A.A. Thermal and temperature regime of premises with heating systems based on water infrared emitters. *Privolzhsky scientific journal*. 2021; 2 (58); 98-106. (In Russ)
 16. Klimanov, V.A. Dosimetric planning of radiotherapy : textbook for students of higher educational institutions. VA Klimanov ; V. A. Klimanov. - Moscow: Moscow Engineering Physics. in-t (state university), 2008; 175; – ISBN 978-5-7262-0969-2. (In Russ)
 17. Bukhmirov V.V., Krupennikov S.A., Solnyshkova Yu.S. Modifications of the zonal method for solving problems of radiative heat transfer: basic provisions. *Bulletin of the Ivanovo State Power Engineering University*. 2009; 2; 61-63. (In Russ)
 18. Bodrov V.I., Bodrov M.V., Smykov A.A. Study of radiant heating systems based on low-temperature infrared emitters. *Privolzhsky scientific journal*. 2019; 3 (51); 52-57. (In Russ)
 19. Idrisov A.Z. Prospects for the use of gas infrared emitters in the regions of the Far North. *News of higher educational institutions. Oil and gas*. 1997; 3; 55-57. (In Russ)
 20. Semikashev, VV Heat supply in Russia: current situation and problems of investment development. *EKO*. 2019; 9 (543); 23-47. (In Russ)
 21. Glushkov A.Yu., Polosin I.I. Calculation of gas radiant heaters for premises of complex configuration. *Plumbing, Heating, Air conditioning*. 2013; 11 (143); 56-57. (In Russ)

Сведения об авторах:

Егор Сергеевич Аралов аспирант, старший преподаватель кафедры теплогазоснабжения и нефтегазового дела; vgtu.aralov@yandex.ru; AuthorID: 1010588 ORCID 0000-0002-0974-0801

Борис Михайлович Кумицкий, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и нефтегазового дела; boris-kum@mail.ru; AuthorID: 615658 ORCID 0000-0001-8135-8431

Information about authors:

Egor S. Aralov, Postgraduate student, Senior Lecturer, Department of Heat and Gas Supply and Oil and Gas Business; vgtu.aralov@yandex.ru; AuthorID: 1010588 ORCID 0000-0002-0974-0801

Boris M. Kumitsky, Cand. Sci. (Physical and Mathematical), Assoc. Prof., Department of Heat and Gas Supply and Oil and Gas Business; boris-kum@mail.ru; AuthorID: 615658 ORCID 0000-0001-8135-8431

Конфликт интересов / Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/ Received 25.09.2023.

Одобрена после рецензирования / Revised 17.10.2023.

Принята в печать /Accepted for publication 17.10.2023.