

УДК 62-6
DOI: 10.18799/24131830/2024/3/4506
Шифр специальности ВАК: 2.1.3

Сравнительный анализ двухмерного и трехмерного моделирования процессов теплопереноса при работе газового инфракрасного излучателя в помещении

Б.В. Борисов, А.В. Вяткин, В.И. Максимов✉, Т.А. Нагорнова

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉elf@tpu.ru

Аннотация. Актуальность. Для сокращения затрат на отопление в больших помещениях локальные рабочие зоны предлагается обогревать системами на основе газовых инфракрасных излучателей, способных направлять радиационный тепловой поток. Однако широкое применение газовых инфракрасных излучателей тормозится имеющимися сложностями с предварительной оценкой перемещения конвективно-радиационных тепловых потоков, от чего зависит количество и расположение отопительных приборов. Предварительная оценка осложняется необходимостью в ряде случаев одновременным 3D-моделированием множества физических процессов. Для сокращения временных затрат на расчеты необходимо оценить возможность замены трудоемкого 3D-моделирования методикой расчета системы отопления с применением газовых инфракрасных излучателей на основе 2D-подхода. **Цель:** доказать, что применение двухмерной модели рассматриваемых процессов позволяет получить основные характеристики теплового режима помещения, дающие возможность заменить пространственное моделирование. **Объект:** система отопления с газовым инфракрасным излучателем «светлого» типа и система приточно-вытяжной вентиляции в качестве системы воздухообмена. **Методы:** двухмерное и трехмерное математическое моделирование процессов сопряженного теплопереноса методом конечных элементов. Математическое моделирование проводилось в программной среде COMSOL Multiphysics с использованием модулей: «The Heat Transfer in Fluids Interface», «Surface-to-Surface Radiation» и «The Turbulent Flow, k-ε Interface». **Результаты.** Приведены результаты математического моделирования, выполненные в трехмерной и двухмерной постановках. Представлено распределение температур по воздуху и ограждающим конструкциям, а также линии тока нагреваемого и нагретого воздуха в объеме помещения. Проведено сравнение результатов двумерного и трехмерного моделирования, по результатам которого установлено удовлетворительное сходство рассчитанных средних температуры воздуха в локальной рабочей зоне. Различие составило менее 2 °С для разных пространственных подходов к моделированию.

Ключевые слова: газовый инфракрасный излучатель, объект теплоснабжения, конвективный теплообмен, тепловые условия, локальная рабочая зона

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект № 20-19-00226).

Для цитирования: Сравнительный анализ двухмерного и трехмерного моделирования процессов теплопереноса при работе газового инфракрасного излучателя в помещении / Б.В. Борисов, А.В. Вяткин, В.И. Максимов, Т.А. Нагорнова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 3. – С. 61–69. DOI: 10.18799/24131830/2024/3/4506

UDC 62-6
DOI: 10.18799/24131830/2024/3/4506

Comparative analysis of two-dimensional and three-dimensional modeling of heat transfer during operation of a gas infrared heater indoor

B.V. Borisov, A.V. Vyatkin, V.I. Maksimov✉, T.A. Nagornova

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉elf@tpu.ru

Abstract. Relevance. It is proposed to heat local work areas with systems based on gas infrared heaters, capable of directing radiative heat flow to reduce heating costs in large premises. However, the widespread use of gas infrared heaters is hampered by the existing difficulties with the preliminary assessment of convective-radiative heat flows movement, on which the number and location of heating devices depends. The preliminary assessment is complicated by the need in some cases for 3D modeling of complex physical processes. It is necessary to evaluate the possibility of replacing labor-intensive 3D modeling with a method for calculating a heating system using gas infrared emitters based on a 2D approach to reduce the time spent on calculations. **Aim.** To prove that the use of a two-dimensional model of the processes under consideration makes it possible to obtain the main characteristics of the thermal regime of the premises, making it possible to replace spatial modeling. **Objects.** Heating system with a light-type gas infrared heater and an air exchange system. **Methods.** Two-dimensional and three-dimensional mathematical modeling of conjugate heat transfer processes using the finite element method. Mathematical modeling was carried out in the COMSOL Multiphysics software environment using the modules: "Heat Transfer Interface in Liquids", "Radiation between Surfaces" and "Turbulent Flow, k- ϵ Interface". **Results.** The article presents the results of mathematical modeling performed in three-dimensional and two-dimensional formulations. The distribution of temperatures in the air and enclosing structures, as well as the flow lines of heated air and air, which was heating, in the volume of the premise are presented. The results of two-dimensional and three-dimensional modeling were compared. Satisfactory similarity of the calculated average air temperatures in the local working area was established based on the results. The difference was less than 2°C for different spatial modeling approaches.

Keywords: gas infrared heater, heat supply facility, convective heat exchange, thermal conditions, local work area

Acknowledgements: This work is supported by the Russian Science Foundation (grant no. 20-19-00226).

For citation: Borisov B.V., Vyatkin A.V., Maksimov V.I., Nagornova T.A. Comparative analysis of two-dimensional and three-dimensional modeling of heat transfer during operation of a gas infrared heater indoor. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 3, pp. 61–69. DOI: 10.18799/24131830/2024/3/4506

Введение

Повышение энергетической эффективности зданий является одной из самых значимых проблем в промышленном секторе [1, 2]. Основная причина низкой энергетической эффективности промышленных зданий связана с недостаточной теплоизоляцией ограждающих конструкций. Из-за больших объемов промышленных помещений на их отопление требуется большое количество теплоты [3]. Зачастую обустроенные рабочие места в промышленных помещениях занимают меньшую часть общей площади [4, 5].

Наиболее подходящей системой отопления для промышленных помещений является использование локальной системы отопления, в частности применение лучистых систем отопления [6–8]. В качестве основного оборудования лучистых систем отопления используются газовые инфракрасные излучатели (ГИИ) [9, 10].

Однако из-за сложных физических процессов, по сравнению с традиционными системами отопления, возникают проблемы с определением параметров воздуха в локальной рабочей зоне и во всем помещении. Кроме того, необходимо наличие системы воздухообмена в помещении для удаления продуктов горения, выделяющихся при работе ГИИ. Система воздухообмена может оказывать дополнительное влияние на формирование теплового режима в локальной рабочей зоне [11–18].

Таким образом, существует необходимость в создании методики расчета системы отопления на базе ГИИ.

Для оценки работы системы отопления локальной рабочей зоны необходимо использовать трехмерную модель, учитывающую геометрию представленного помещения и расположенного внутри оборудования. Однако сложность использования трехмерной модели связана с высокими требованиями к вычислительным мощностям и временем расчетам. Таким образом, необходимо упростить модель, например, использовать двумерную постановку для возможности проведения предварительных расчетов.

Цель работы – доказать, что при расчете по двумерной модели получаются результаты основных характеристик теплового режима помещения, удовлетворительно согласующиеся с результатами, полученными при трехмерном моделировании.

Численные исследования

Для проведения математического моделирования в трехмерной постановке рассмотрено помещение известных размеров $L_x=10 \times L_y=5 \times L_z=4,4$ м. Толщина ограждающих конструкций (стен, пола и потолка) данного помещения принята как $L_{wall}=0,1$ м. В рассматриваемом помещении выделена локальная рабочая зона, в которой находится горизонтальная панель (размеры $L_{x_{tb}}=0,6$ м, $L_{y_{tb}}=1,2$ м, $L_{z_{tb}}=0,05$ м), имитирующая оборудование. Поверхность горизонтальной панели располагалась на оси симметрии ГИИ на высоте 760 мм от пола. Выделенная локальная рабочая зона обогревается ГИИ (размеры $L_{x_{GIE}}=0,164$ м, $L_{y_{GIE}}=0,4$ м, $L_{z_{GIE}}=0,1$ м), расположенным на высоте 2,975 м. В помещении также расположена система воздухообмена. Местораспо-

ложение элементов рассматриваемой области соответствует наиболее типичному варианту их размещения в реальном производственном помещении, схема которого представлена на рис. 1. При расчете воздух считается диатермичной средой, а все поверхности (стен, пола, потолка, ГИИ и оборудования) – непрозрачными серыми. Основные характеристики материалов элементов (объектов) конструкции приведены в таблице.

Таблица. Теплофизические свойства материалов ограждающих конструкций и панели, использовавшихся в экспериментах [19]

Table. Thermophysical properties of building envelope materials and panels used in experiments [19]

Объект Object	Материал Material	Плотность ρ , кг м ⁻³ Density, kg m ⁻³	Удельная теплоемкость c , Дж кг ⁻¹ К ⁻¹ , Specific heat, J kg ⁻¹ K ⁻¹	Коэффициент теплопроводности λ , Вт К ⁻¹ м ⁻¹ Thermal conductivity coefficient, W K ⁻¹ m ⁻¹	Степень черноты Emissivity, ϵ
Пол, потолок и стены Floor, ceiling and walls	бетон concrete	2500	840	1,55	0,95
Горизонтальная панель Horizontal panel	сосна pine	520	2300	0,15	0,4

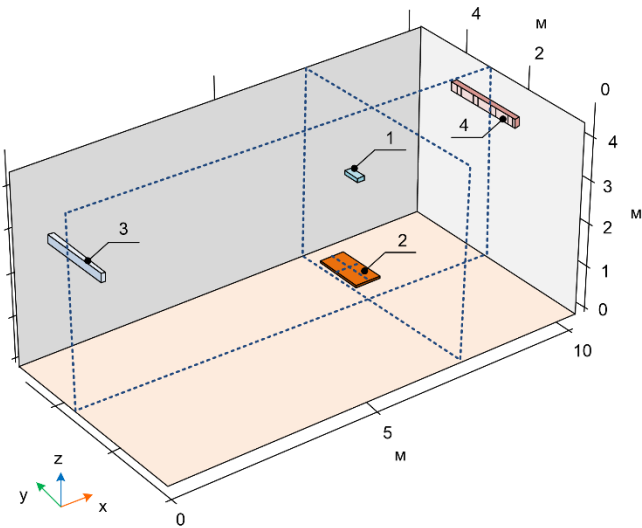


Рис. 1. Схема области решения задачи: 1 – ГИИ, 2 – горизонтальная панель, 3 – зона притока воздуха, 4 – зона оттока воздуха. Пунктирными линиями выделены рассматриваемые сечения

Fig. 1. Problem solution area: 1 – gas infrared heater (GIH), 2 – horizontal panel, 3 – air inflow area, 4 – air outflow area. The sections under consideration are highlighted with dotted lines

Математическое моделирование проведено в рамках модели теплопереноса, описанной в [19, 20].

Математическое моделирование проводилось в программной среде COMSOL Multiphysics с использованием модулей: «The Heat Transfer in Fluids Interface», «Surface-to-Surface Radiation» и «The Turbulent Flow, k- ϵ Interface». Трехмерное математическое моделирование процессов сопряженного теплопереноса – методом конечных элементов для интегрирования уравнений. Параметры радиационного теплового потока рассчитывались с использованием модуля «Surface-to-Surface Radiation» для серых поверхностей с соответствующими степенями черноты в рамках зонной модели с учетом средних угловых коэффициентов [19, 20].

Для уравнений движения воздуха на границах раздела сред «воздух – ограждающие конструкции» задавалось условие прилипания. Для моделирования приточной вентиляции в области притока воздуха задавался его расход и температура, а для вытяжной вентиляции – постоянное давление, равное атмосферному. В качестве начальной температуры всех объектов расчета принималось значение 7 °С, считалось, что поступающий приточный воздух обладает температурой 7 °С.

При решении задач в разделе «Mesh» среды COMSOL Multiphysics по всему рассматриваемому объему задавалась программно-предопределенная сетка «Extra coarse» со сгущением около ГИИ, горизонтальной поверхности и системы вентиляции до сетки «Normal».

Параметры нестационарного решения задачи задавались в разделе «Study» среды COMSOL Multiphysics. Расчет проводился на каждой десятой минуте рассматриваемого времени. Решение дифференциальных уравнений в каждый момент времени проводилось методом BDF.

Для расчета поставленных задач использовался персональный компьютер с процессором Intel®Core™ i7-8700K CPU@3.70GHz×12 и оперативной памятью 32 Гб.

Установлено, что при использовании одних и тех же вычислительных мощностей на расчет задачи в трехмерной постановке затрачивается около 120 минут, а на расчет задачи в двухмерной постановке затрачивается около 30 минут.

Моделирование трехмерным подходом позволяет определить распределение температур воздуха и поверхностей (рис. 2, а), а также движение воздушных масс в пространстве (рис. 2, б, 3).

При внимательном рассмотрении векторного поля скоростей (рис. 2, б) можно отметить тенденции локальных и глобальных циркуляционных течений, определяемые более наглядно при анализе линий тока (рис. 3).

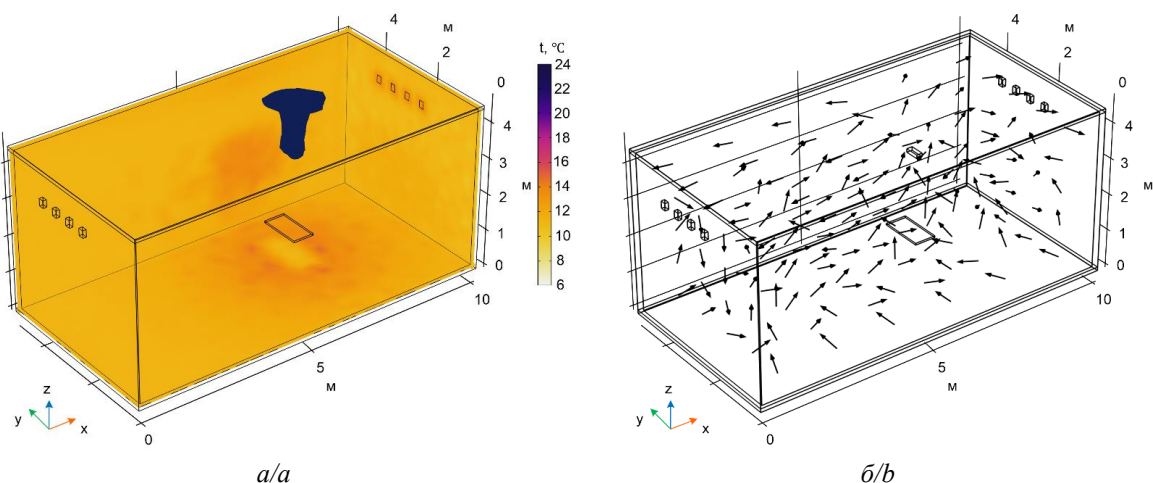


Рис. 2. Распределение температур на поверхностях ограждающих конструкций и область с температурой воздуха 24 °С (а) и векторное поле движения воздуха в рассматриваемой области (б) через 60 минут работы газового инфракрасного нагревателя и системы воздухообмена

Fig. 2. Temperature distribution on the enclosing structures surfaces and the area with an air temperature of 24 °С (a) and vector field of air movement in the area under consideration (b) after 60 minutes of gas infrared heater and supply and exhaust ventilation operation

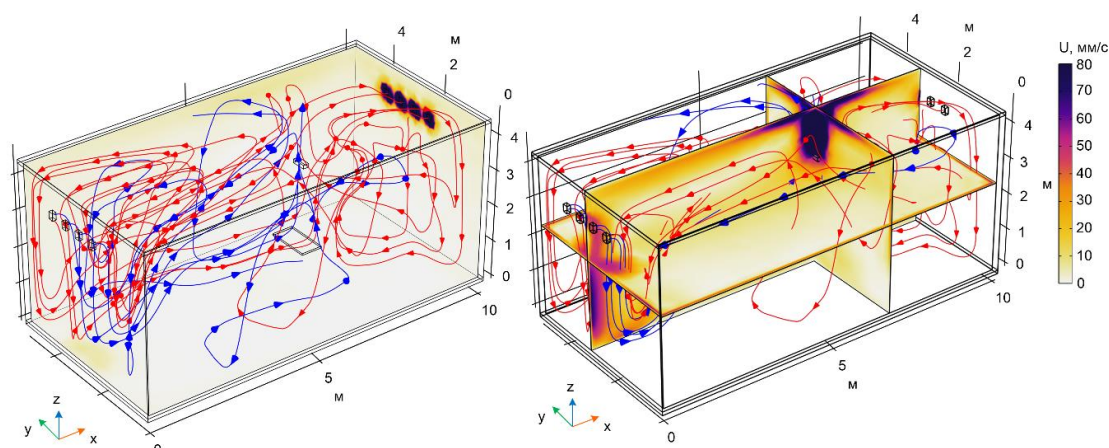


Рис. 3. Движение нагреваемого (синяя линия) и нагретого (красная линия) воздуха в рассматриваемой области через 60 минут работы газового инфракрасного нагревателя и системы воздухообмена

Fig. 3. Movement of cold (blue line) and warm (red line) air in the area under consideration after 60 minutes of gas infrared heater and supply and exhaust ventilation operation

Представленные результаты расчетных полей скоростей и температур формируются к начинающемуся квазистационарному режиму нагрева помещения, примерно через 60 минут работы ГИИ. В дальнейшем, как показывают расчеты, топологически расчетные поля практически не изменяются, а изменения (крайне незначительные) отмечаются только в медленно подрастающих значениях температур. Так, максимальные значения температур, определяемые после начала квазистационарного режима, изменяются примерно на 14 %.

При сравнении линий тока в характерных сечениях, полученных при трехмерном (рис. 4) и двумерных аналогах расчетов (рис. 5) отмечаются некоторые различия. Трехмерное моделирование дает

более «плавные» и более «определенные» в пространстве циркуляционные потоки с сохранением общей тенденции к генерации восходящих и нисходящих потоков воздуха. Наблюдающиеся различия в геометрии и числе циркуляционных течений, полученные в расчетах при 3D- и 2D-моделировании объясняются отсутствием дополнительного измерения при двумерном моделировании. В этом случае течение становится более стесненным и генерирует дополнительные циркуляционные структуры. В то время как при 3D-подходе в районе горизонтальной панели воздух имеет возможность перемещаться сразу в трех плоскостях (рис. 2, б, 3), что способствует формированию более плавных и однозначных потоков в области горизонтальной панели.

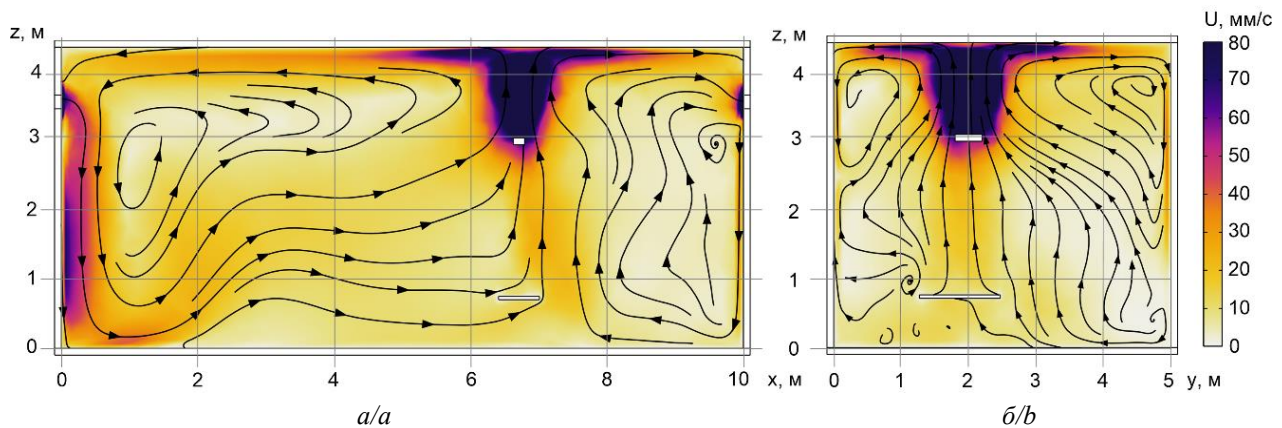


Рис. 4. Поля скоростей и линии тока в сечениях XZ (a) и YZ (a), полученные в результате трехмерного моделирования, через 60 минут работы газового инфракрасного нагревателя и системы воздухообмена

Fig. 4. Velocity fields and streamlines for XZ section (a) and YZ section (b), obtained as a result of three-dimensional modeling, after 60 minutes of gas infrared heater and supply and exhaust ventilation operation

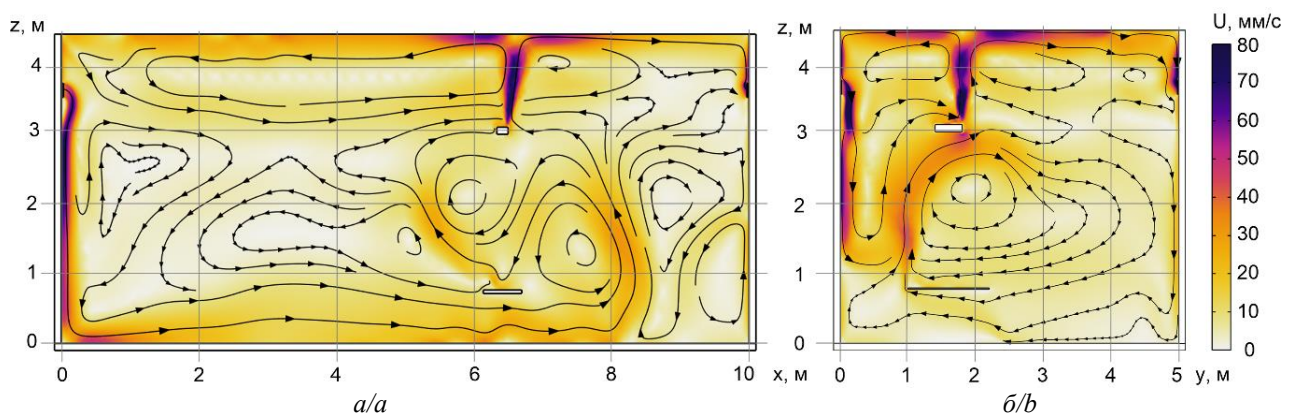


Рис. 5. Поля скоростей и линии тока в сечениях XZ (a) и YZ (a), полученные в результате двухмерного моделирования, через 60 минут работы газового инфракрасного нагревателя и системы воздухообмена

Fig. 5. Velocity fields and streamlines for XZ section (a) and YZ section (b), obtained as a result of two-dimensional modeling, after 60 minutes of gas infrared heater and supply and exhaust ventilation operation

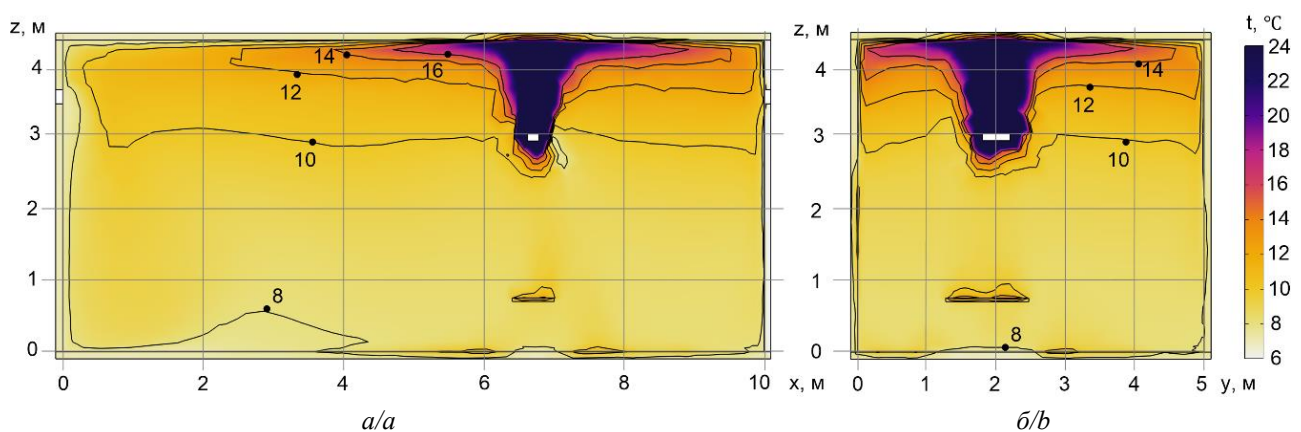


Рис. 6. Поля температур в сечениях XZ (a) и YZ (a), полученные в результате трехмерного моделирования, через 60 минут работы газового инфракрасного нагревателя и системы воздухообмена

Fig. 6. Temperature fields for XZ section (a) and YZ section (b), obtained as a result of three-dimensional modeling, after 60 minutes of gas infrared heater and supply and exhaust ventilation operation

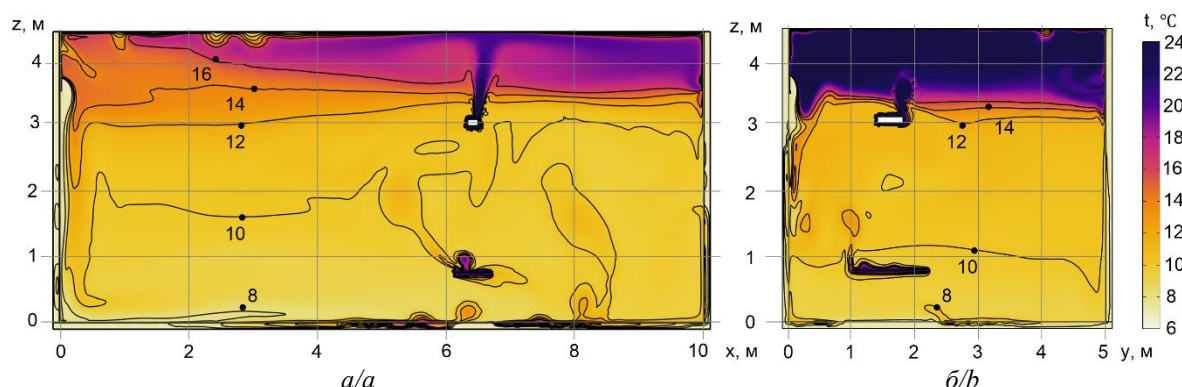


Рис. 7. Поля температур в сечениях XZ (а) и YZ (а), полученные в результате двухмерного моделирования, через 60 минут работы газового инфракрасного нагревателя и системы воздухообмена

Fig. 7. Temperature fields for XZ section (a) and YZ section (b), obtained as a result of two-dimensional modeling, after 60 minutes of gas infrared heater and supply and exhaust ventilation operation

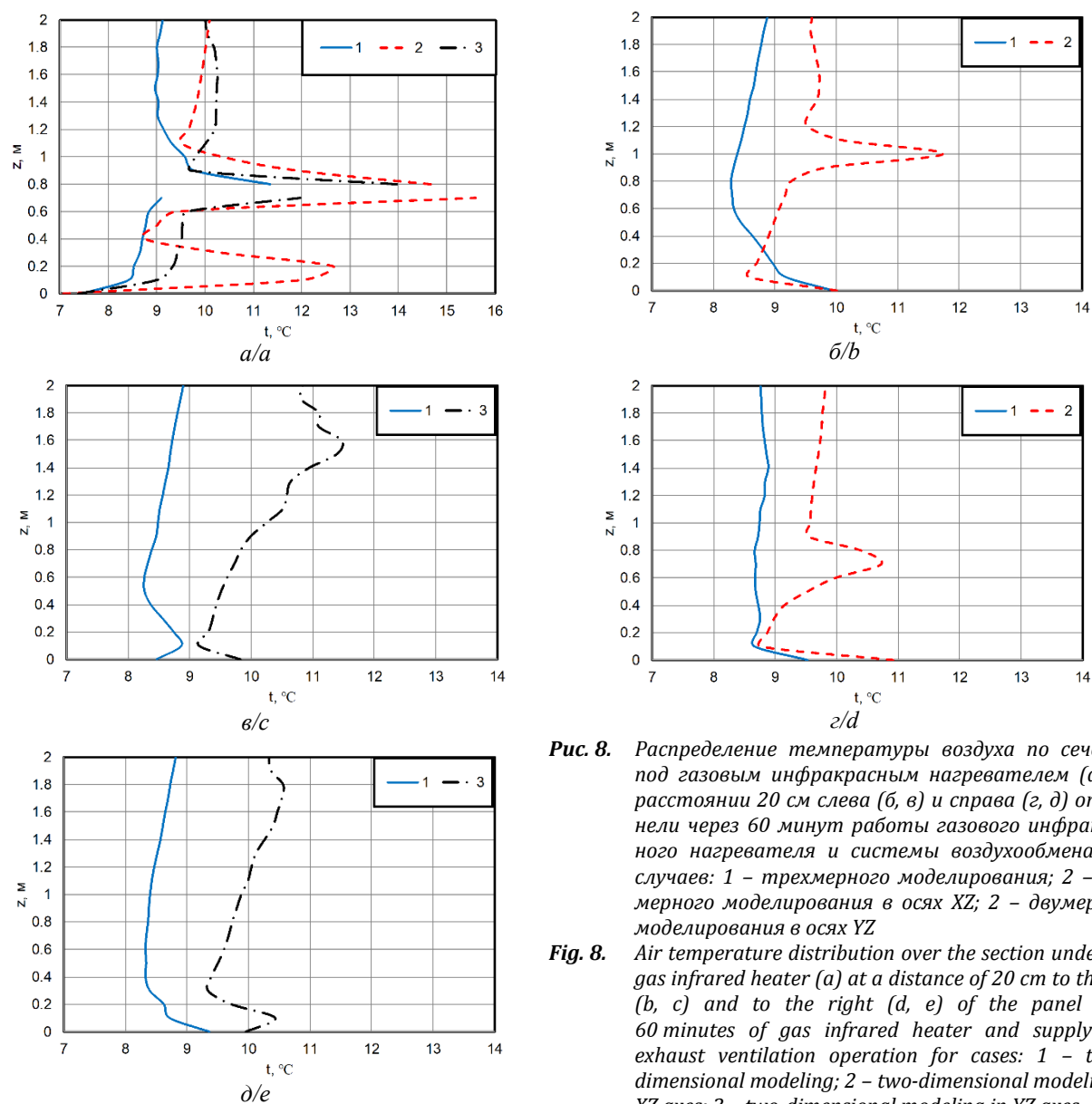


Рис. 8. Распределение температуры воздуха по сечению под газовым инфракрасным нагревателем (а) на расстоянии 20 см слева (б, в) и справа (г, д) от панели через 60 минут работы газового инфракрасного нагревателя и системы воздухообмена для случаев: 1 – трехмерного моделирования; 2 – двумерного моделирования в осях XZ; 3 – двумерного моделирования в осях YZ

Fig. 8. Air temperature distribution over the section under the gas infrared heater (a) at a distance of 20 cm to the left (b, c) and to the right (d, e) of the panel after 60 minutes of gas infrared heater and supply and exhaust ventilation operation for cases: 1 – three-dimensional modeling; 2 – two-dimensional modeling in XZ axes; 3 – two-dimensional modeling in YZ axes

Отмечается согласие в получаемой тенденции формирования нисходящих холодных и восходящих нагретых потоков воздуха, возникающих при теплообмене с поверхностями разных температур (холодных ограждающих конструкций и более нагретой горизонтальной панели). Значительное согласие наблюдается как в номинальных значениях, так и в градиентах скоростей.

Отмеченное согласие результатов 3D- и 2D-расчетов полей скоростей сопровождается согласием и полей температур (рис. 6, 7). Полученные температурные поля представлены в диапазоне температур от 6 до 24 °С для более наглядной демонстрации нагрева большего объема отапливаемого помещения. Результаты, представленные на анализируемых рисунках, свидетельствуют об удовлетворительном согласии температурных полей, полученных при 3D- и 2D-моделировании. Удовлетворительное согласие трехмерных и двухмерных расчетов демонстрируют и распределения температур по высоте в характерных зонах – на расстоянии 0,2 м со всех сторон от горизонтальной панели (рис. 8). Именно в этой зоне предполагается размещение работающих в помещении сотрудников.

Анализ полученных распределений показывает, что температура в рабочей зоне в среднем не отличается более чем на 2 °С при разных подходах моделирования. Таким образом, можно сделать вывод о том, что рассматриваемые модели имеют удовлетворительную сходимость результатов и могут быть применены для расчетов. Данное согласие получено с учетом применения масштабного коэффициента согласия $k_m = l_n / L_n$, на который при 2D-

моделировании умножаются плотности тепловых потоков на поверхностях ограниченных размеров по направлению n , нормальному к рассматриваемым плоскостям. В данном соотношении l_n – размер плоскости теплообмена в направлении n , а L_n – размер помещения в направлении n (ширина помещения 5 м для XZ плоскости или длина помещения 10 м для YZ соответственно).

Данный масштабный коэффициент предназначен согласовать трехмерные объекты теплообмена, существующие в реальности, с двухмерным представлением, при котором в расчетах предполагается рассмотрение слоя глубиной по нормали к рассматриваемой плоскости в 1 м.

Заключение

По результатам сравнительного анализа расчетов, проведенных с применением 3D- и 2D-подходов, получено удовлетворительное согласие расчетных полей основных параметров нагрева помещения системой отопления на основе газового инфракрасного излучателя. В статье приводятся типичные результаты из значительного количества проведенных вариативных расчетов. Предлагается для большинства предварительных оценок тепловых режимов нагрева использовать более экономные по временным затратам расчеты в двумерной постановке. В тех случаях, когда в помещении наличествуют существенно трехмерные геометрические объекты, необходимо предварительно использовать трехмерную постановку. И далее оценить возможность 2D-моделирования процессов

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Evaluation of the energy efficiency class of an industrial facility: a rating system and a scale of sustainable development / N. Verstina, N. Solopova, N. Taskaeva, T. Meshcheryakova, N. Shchepkina // Sustainability. – 2023. – Vol. 15. – 15799.
2. Stanchev P., Vacheva G., Hinov N. Evaluation and measures for improving the energy efficiency of medium-sized enterprises // 2023 Eight Junior Conference on Lighting (Lighting). – Sozopol, Bulgaria, 23–25 September 2023. – P. 1–4.
3. Toward integrated redevelopment of industrial buildings: a general intervention protocol and a case study / N. Banti, C. Ciacci, V. Di Naso, F. Bazzocchi // Colloqui.AT.e 2023 – In Transizione: sfide e opportunità per l'ambiente costruito. – Bari, Italy, 14–17 July 2023. – P. 595–611.
4. Shen P., Wang Z., Ji Y. Exploring potential for residential energy saving in New York using developed lightweight prototypical building models based on survey data in the past decades // Sustainable Cities and Society. – 2021. – Vol. 66. – 102659.
5. Gourlis G., Kovacic I. Building Information Modelling for analysis of energy efficient industrial buildings – a case study // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – Vol. 68. – Pt. 2. – P. 953–963.
6. Трифонов А.П., Тарасова Е.В., Савенков Ф.И. Отопление промышленных помещений. Котельное оборудование и его экологичность // Молодежь и системная модернизация страны: сборник научных статей 5-й Международной научной конференции студентов и молодых ученых. – Курск, 19–20 мая 2020. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2020. – С. 379–382.
7. Бамбетова К.В., Кабжихов А.А. Отопление промышленных помещений и зданий // Вопросы науки и образования. – 2021. – № 7 (132). – С. 29–31.
8. Протасова А.Е. и др. Организация отопления промышленных помещений // Вестник Современных Исследований. – 2018. – № 12.10 (27). – С. 322–328.
9. Редько А.Ф., Болотских Н.Н. Совершенствование систем отопления производственных помещений газовыми трубчатыми инфракрасными нагревателями // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2010. – Т. 74. – № 4. – С. 36–47.
10. Повышение коэффициента полезного действия лучистой системы отопления с применением в качестве отопительных приборов «светлых» газовых инфракрасных излучателей / Н.И. Куриленко, М.Н. Чекардовский, Л.Ю. Михайлова, А.Н. Ермолаев // Инженерный вестник Дона. – 2015. – Т. 38. – № 4. – С. 73–82.

11. Vösa K.-V., Ferrantelli A., Kurnitskia J. A combined analytical model for increasing the accuracy of heat emission predictions in rooms heated by radiators // *Journal of Building Engineering*. – 2019. – Vol. 23. – P. 291–300.
12. Ghasemi M., Toghraie D., Abdollahi A. An experimental study on airborne particles dispersion in a residential room heated by radiator and floor heating systems // *Journal of Building Engineering*. – 2020. – Vol. 32. – 101677.
13. Dudkiewicz E., Jezowiecki J. The influence of orientation of a gas-fired direct radiant heater on radiant temperature distribution at a work station // *Energy Build.* – 2011. – Vol. 43. – № 6. – P. 1222–1230.
14. Dudkiewicz E., Jezowiecki J. Measured radiant thermal fields in industrial spaces served by high intensity infrared heater // *Energy Build.* – 2009. – Vol. 41. – № 1. – P. 27–35.
15. Analysis of the influence of the gas infrared heater and equipment element relative positions on industrial premises thermal conditions / B.V. Borisov, A.V. Vyatkin, G.V. Kuznetsov, V.I. Maksimov, T.A. Nagornova // *Energies*. – 2022. – Vol. 15. – № 22. – 8749. – P. 1–20. DOI: 10.3390/en15228749
16. Анализ диапазонов повышения энергоэффективности газового инфракрасного излучателя / Б.В. Борисов, А.В. Вяткин, В.И. Максимов, Т.А. Нагорнова, С.О. Салагаев // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2023. – Т. 334. – № 2. – С. 70–80. DOI: 10.18799/24131830/2023/2/3930
17. Численный анализ влияния конфигурации системы воздухообмена на температурный режим локальных рабочих зон в помещении с газовым инфракрасным / Б.В. Борисов, А.В. Вяткин, Г.В. Кузнецов, В.И. Максимов, Т.А. Нагорнова // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2023. – Т. 334. – № 3. – С. 7–16. DOI: 10.18799/24131830/2023/3/3962
18. Математическое моделирование теплопереноса в помещении с газовым инфракрасным излучателем, системой воздухообмена и локальным ограждением рабочей зоны / Б.В. Борисов, А.В. Вяткин, Г.В. Кузнецов, В.И. Максимов, Т.А. Нагорнова // *Сибирский журнал индустриальной математики*. – 2023. – Т. 26. – № 1. – С. 20–32.
19. DOE fundamentals handbook. Thermodynamics, heat transfer and fluid flow. – Washington: US Department of Energy, 1992. – Vol. 2. – P. 4–57.
20. Hesarakı A., Huda N. A comparative review on the application of radiant low-temperature heating and high-temperature cooling for energy, thermal comfort, indoor air quality, design and control // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. – 2022. – Vol. 49. – 101661.

Информация об авторах

Борис Владимирович Борисов, доктор физико-математических наук, профессор НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. bvborisov@tpu.ru

Александр Витальевич Вяткин, аспирант НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. avv47@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2238-7974>

Вячеслав Иванович Максимов, кандидат технических наук, доцент НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. elf@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0908-8358>

Татьяна Александровна Нагорнова, кандидат технических наук, доцент НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. tania@tpu.ru

Поступила в редакцию: 18.12.2023

Поступила после рецензирования: 15.01.2024

Принята к публикации: 21.02.2024

REFERENCES

1. Verstina N., Solopova N., Taskaeva N., Meshcheryakova T., Shchepkina N. Evaluation of the energy efficiency class of an industrial facility: a rating system and a scale of sustainable development. *Sustainability*, 2023, vol. 15, 15799.
2. Stanchev P., Vacheva G., Hinov N. Evaluation and measures for improving the energy efficiency of medium-sized enterprises. *2023 Eight Junior Conference on Lighting (Lighting)*. Sozopol, Bulgaria, September 23–25, 2023. Bulgaria, IEEE Publ., 2023. pp. 1–4.
3. Banti N. Toward integrated redevelopment of industrial buildings: a general intervention protocol and a case study. *Colloqui. AT. e 2023-In Transizione: sfide e opportunità per l'ambiente costruito*. Bari, Italy, July 14–17, 2023. Italy, FLORE Publ., 2023. pp. 595–611.
4. Shen P., Wang Z., Ji Y. Exploring potential for residential energy saving in New York using developed lightweight prototypical building models based on survey data in the past decades. *Sustainable Cities and Society*, 2021, vol. 66, 102659.
5. Gourlis G., Kovacic I. Building Information Modelling for analysis of energy efficient industrial buildings – a case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 68, pp. 953–963.
6. Trifonov A.P., Tarasova E.V., Savenkov F.I. Industrial space heating. Boiler equipment and its environmental friendliness. Youth and system modernization of the country. *Proc. of the 5th International scientific conference of students and young scientists*. Kursk, May 19–20 2020. Kursk, The Southwest State University Publ., 2023, pp. 379–382. (In Russ.)
7. Bambetova K.V., Kabzhikhov A.A. Heating of industrial space and buildings. *Voprosy nauki i obrazovaniya*, 2021, vol. 132, no. 7, pp. 29–31. (In Russ.)

8. Protasova A.E. Industrial space heating. *Vestnik Sovremennyh Issledovaniy*, 2018, vol. 27, no 12.10, pp. 322–328. (In Russ.)
9. Redko A.F., Bolotskikh N.N. Improvement of heating systems of industrial space with gas tube infrared heaters. *Energobezrezhenie. Energetika. Energoaudit*, 2010, vol. 74, no. 4, pp. 36–47. (In Russ.)
10. Kurilenko N.I., Chekardovskij M.N., Mikhaylova L.Yu., Ermolaev A.N. Increase of a radiant heating system efficiency when applying «light» gas infrared emitters as heating units. *Inzhenerny vestnik Dona*, 2015, vol. 38, no. 4, pp. 73–82. (In Russ.)
11. Vösa K.V., Ferrantelli A., Kurnitski J. A combined analytical model for increasing the accuracy of heat emission predictions in rooms heated by radiators. *Journal of Building Engineering*, 2019, vol. 23, pp. 291–300.
12. Ghasemi M., Toghraie D., Abdollahi A. An experimental study on airborne particles dispersion in a residential room heated by radiator and floor heating systems. *Journal of Building Engineering*, 2020, vol. 32, 101677.
13. Dudkiewicz E., Jezowiecki J. The influence of orientation of a gas-fired direct radiant heater on radiant temperature distribution at a work station. *Energy Build.*, 2011, vol. 43, no 6, pp. 1222–1230.
14. Dudkiewicz E., Jezowiecki J. Measured radiant thermal fields in industrial spaces served by high intensity infrared heater. *Energy Build.*, 2009, vol. 41, no 1, pp. 27–35.
15. Borisov B.V., Vyatkin A.V., Kuznetsov G.V., Maksimov V.I., Nagornova T.A. Analysis of the influence of the gas infrared heater and equipment element relative positions on industrial premises thermal conditions. *Energies*, 2023, vol. 15, no. 22, pp. 1–20, 8749. DOI: 10.3390/en15228749
16. Borisov B.V., Vyatkin A.V., Maksimov V.I., Nagornova T.A., Salagaev S.O. Analysis of energy efficiency increasing ranges for gas infrared heater. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 2, pp. 70–80. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2023/2/3930
17. Borisov B.V., Vyatkin A.V., Kuznetsov G.V., Maksimov V.I., Nagornova T.A. Numerical analysis of the influence of the air exchange system configuration on the temperature regime of local working areas in a room with a gas infrared heater. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 3, pp. 7–16. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2023/3/3962
18. Borisov B.V., Vyatkin A.V., Kuznetsov G.V., Maksimov V.I., Nagornova T.A. Mathematical modeling of heat transfer in a room with a gas infrared emitter, system of ventilation and local enclosure of the working area. *Sibirskiy zhurnal industrial'noy matematiki*, 2023, vol. 26, no. 1, pp. 20–32. (In Russ.)
19. DOE fundamentals handbook. *Thermodynamics, heat transfer and fluid flow*. Washington, US Department of Energy, DOE-HDBK-1012/2–92, 1992. Vol. 2, pp. 4–57.
20. Hesarakı A., Huda N. A comparative review on the application of radiant low-temperature heating and high-temperature cooling for energy, thermal comfort, indoor air quality, design and control. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2022, vol. 49, 101661.

Information about the authors

Boris V. Borisov, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. bvborisov@tpu.ru

Alexander V. Vyatkin, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. avv47@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2238-7974>

Vyacheslav I. Maksimov, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. elf@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0908-8358>

Tatiana A. Nagornova, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. tania@tpu.ru

Received: 18.12.2023

Revised: 15.01.2024

Accepted: 21.02.2024