

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-1-63-71>

УДК 628.8+697.1:697.35

Формирование микроклимата жилых помещений при отоплении лучисто-конвективным отопительным прибором

Канд. техн. наук Д. Г. Ливанский¹⁾, студ. Е. В. Голуб¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. В статье исследуются особенности формирования микроклимата при использовании лучисто-конвективного отопительного прибора – радиатора. Основная цель работы заключается в определении достоинств и недостатков радиаторного отопления в жилых помещениях, оценке влияния размеров окна, габаритов помещения и прибора на формирование микроклимата в помещении. Исследование включает анализ температурных и скоростных полей в трех характерных помещениях различного размера и конфигурации. Авторы выявляют недостатки текущих отопительных систем, связанные с неравномерным распределением температуры по высоте помещения и формированием зон пониженного комфорта у окон. В работе исследуются три типичных помещения, для которых проводится математическое моделирование тепловых процессов с использованием дифференциальных уравнений для описания процессов тепло- и массообмена. Основное внимание уделяется влиянию размеров окон, габаритов помещения и отопительных приборов на микроклимат. Авторы отмечают, что радиаторы не всегда перекрывают всю ширину окон, что приводит к образованию у их краев холодных зон, к проникновению холодного воздуха вглубь помещения и образованию зон дискомфорта внутри помещения. Результаты моделирования показывают, что параметры воздуха в помещениях соответствуют нормативам ГОСТ, однако субъективный комфорт жителей может снижаться из-за неравномерного распределения температуры. В заключение делается вывод о необходимости разработки новых типов отопительных приборов, которые будут эффективнее справляться с задачей поддержания комфортного микроклимата и исключат негативное влияние на комфорт проникновения холодного воздуха через оконные проемы.

Ключевые слова: радиаторное отопление, микроклимат, температурное поле, математическое моделирование, теплообмен

Для цитирования: Ливанский, Д. Г. Формирование микроклимата жилых помещений при отоплении лучисто-конвективным отопительным прибором / Д. Г. Ливанский, Е. В. Голуб // *Наука и техника*. 2025. Т. 24, № 1. С. 63–71. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-1-63-71>

Formation of the Microclimate of Residential Premises during Heating with a Radiant-Convective Heating Device

D. G. Livanskiy¹⁾, Y. V. Holub¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. This article examines the peculiarities of microclimate formation when using radiant-convective heating device - radiator. The main purpose of the work is to determine the advantages and disadvantages of radiator heating in residential premises, to assess the influence of window sizes, room dimensions and the device on the formation of the microclimate in the room. The study includes the analysis of temperature and velocity fields in three representative rooms of different sizes and configurations. The authors identify the disadvantages of current heating systems associated with the uneven temperature distribution across the height of the room and the formation of zones of reduced comfort near the windows. The work examines three typical rooms for which mathematical modeling of thermal processes is carried out using differential equations to describe the processes of heat and mass transfer. The main attention is paid to the influence of window sizes, room dimensions and heating devices on the microclimate. The authors note that radiators do not always cover the entire width of windows, which leads to the formation of cold zones at their edges, the penetration of cold air deeper into the room and the formation of discomfort zones inside the room. The simulation results show that the indoor air parameters comply with GOST standards, however, the subjective comfort of residents may decrease due to uneven temperature distribution. In conclusion, it is concluded that it is necessary to develop new types of heating devices that will more effectively cope with the task of maintaining a comfortable microclimate and will eliminate the negative impact of cold air penetration through window openings on comfort.

Keywords: radiator heating, microclimate, temperature field, mathematical modeling, heat exchange

For citation: Livanskiy D. G., Holub Y. V. (2025) Formation of the Microclimate of Residential Premises during Heating with a Radiant-Convective Heating Device. *Science and Technique*. 24 (1), 63–71. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-1-63-71> (in Russian)

Адрес для переписки

Ливанский Дмитрий Геннадьевич
Белорусский национальный технический университет
пр. Независимости, 67/18,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-30-13
fes@bntu.by

Address for correspondence

Livanskiy Dzmitry G.
Belarusian National Technical University
67/18, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Тел.: +375 17 292-30-13
fes@bntu.by

Введение

На сегодняшний день производителями отопительного оборудования представлено большое количество разнообразных по форме, размерам и мощности отопительных приборов. При выборе способа отопления помещения основным ориентиром для проектировщиков и застройщиков являются рекомендации производителей отопительных приборов и оборудования, указанные в технической документации и каталогах. Однако в данном случае не учитываются особенности отапливаемого помещения для применения отопительного прибора. Изучив темы исследований последних лет в области систем отопления и приняв во внимание вышеперечисленные факторы, авторы статьи пришли к выводу, что вопрос эффективного применения отопительных приборов изучен в недостаточной степени, что делает данную тему актуальной.

Цель статьи – определить особенности формирования микроклимата при отоплении лучисто-конвективным отопительным прибором – радиатором, выделить достоинства и недостат-

ки радиаторного отопления в жилом помещении, оценить степень влияния размеров окна, габаритов помещения и прибора на формирование микроклимата в помещении, исходя из анализа полученных данных уточнить границы применения радиаторного отопления.

Исследование работы лучисто-конвективного отопительного прибора

Для исследования работы лучисто-конвективного отопительного прибора системы отопления в жилом помещении и особенностей формирования в нем температурных и скоростных полей были выбраны три характерных помещения (рис. 1) со следующими габаритными размерами (Ш×Г×В): помещение 1 – 3×5×3 м; помещение 2 – 9×5×3 м; помещение 3 – 9×10×6 м.

Каждое рассматриваемое помещение имеет одну наружную стену с одним или несколькими окнами. Внутри помещений 1 и 2 у наружной стены под окнами с размерами 1,8×0,4×1,8 м и помещения 3 с размером окон 1,8×0,4×4,8 м установлены лучисто-конвективные отопительные приборы (1×0,12×0,65 м).

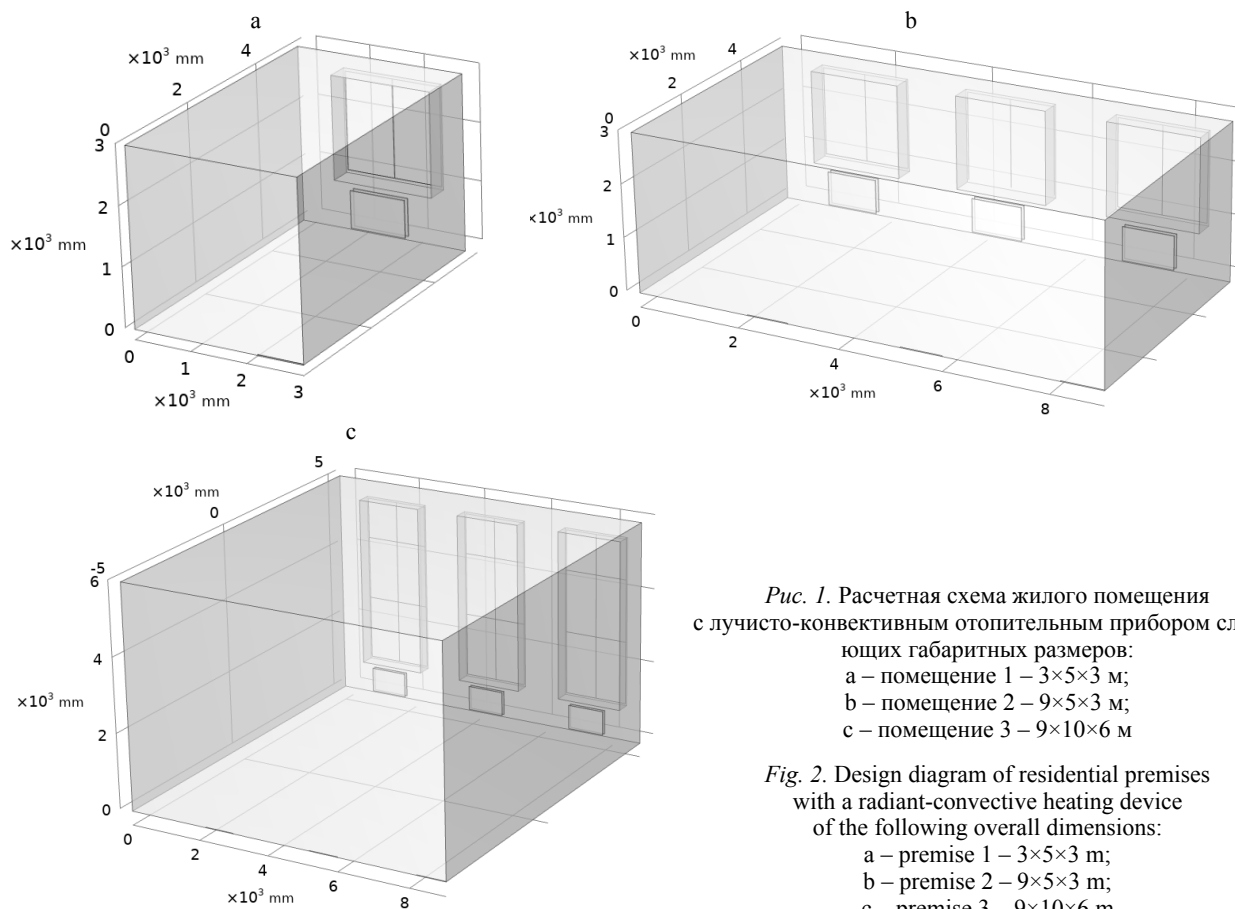


Рис. 1. Расчетная схема жилого помещения с лучисто-конвективным отопительным прибором следующих габаритных размеров:
а – помещение 1 – 3×5×3 м;
б – помещение 2 – 9×5×3 м;
с – помещение 3 – 9×10×6 м

Fig. 2. Design diagram of residential premises with a radiant-convective heating device of the following overall dimensions:
а – premise 1 – 3×5×3 м;
б – premise 2 – 9×5×3 м;
с – premise 3 – 9×10×6 м

Предполагается, что по бокам и над помещением располагаются аналогичные жилые помещения с расчетной температурой воздуха внутри, равной $+18\text{ }^{\circ}\text{C}$, а под помещением находится подвал с температурой $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Расчетная температура наружного воздуха для исследования принята $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$. Приведенное сопротивление теплопередаче наружных и внутренних ограждающих конструкций принято в соответствии с действующими нормативными требованиями. Мощность лучисто-конвективных отопительных приборов принята на основании расчета тепловой нагрузки каждого рассматриваемого помещения. Объем инфильтрующегося через оконные неплотности воздуха принят равным объему данного помещения.

Метод исследования

Указанные особенности каждого рассматриваемого жилого помещения обуславливают необходимость использования математического моделирования физических процессов тепло- и массообмена путем решения трехмерных дифференциальных уравнений [9].

Перенос теплоты в воздушном пространстве помещений описывается уравнением [1, 7–11]

$$\rho_i c_i \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + \vec{w} \nabla T \right) = \lambda_i \nabla^2 T. \quad (1)$$

Здесь ρ_i, c_i, λ_i – соответственно объемная масса ($\text{кг}/\text{м}^3$), удельная теплоемкость ($\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$) и коэффициент теплопроводности ($\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$) i -го слоя элементарного объема расчетного массива при температуре T , К; τ – время, с; $\vec{w}$ – вектор скорости прохода воздуха через элементарный объем (в воздушном пространстве помещения), м/с [10].

Уравнение движения [10]

$$\rho_v \frac{d\vec{w}}{d\tau} = \rho_v \vec{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{w}. \quad (2)$$

Уравнение сохранения массы (неразрывности) в элементарном объеме $dx \cdot dy \cdot dz$ воздушного пространства при $j_v = 0$ [10]

$$\frac{\partial \rho_v}{\partial \tau} + \nabla(\rho_v \vec{w}) = 0, \quad (3)$$

где ρ_v – плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$; g – гравитационное ускорение, $\text{м}^2/\text{с}$; p – давление, Па; μ – динамическая вязкость воздуха, Па/с [10].

Уравнение радиационного теплового потока [3–6, 9]

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (I(r, s)s) + (a + \sigma_s)I(r, s) = \\ = a \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(r, s') \Phi(s \cdot s') d\Omega', \end{aligned} \quad (4)$$

где r – радиус-вектор; s – вектор направления излучения; s' – то же рассеяния; a – коэффициент поглощения; σ_s – то же рассеяния; I – полная интенсивность излучения, зависящая от радиус-вектора и направления излучения; Φ – фазовая функция, определяющая диаграмму рассеяния; Ω' – телесный угол; σ – постоянная Стефана – Больцмана ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$) [3–6, 9].

Граничные условия для системы вентиляции помещения задаются на основании нормативных данных о величине инфильтрующегося наружного воздуха и расчетной его температуры в холодный период года [9]

$$T|_{\text{инф}} = t_{\text{инф}} \quad w|_{\text{инф}} = w_{\text{инф}}. \quad (5)$$

Теплопоступления от отопительного прибора учитываются как равномерно распределенные источники теплоты по поверхности $q_{\text{пр}}$.

Результаты моделирования

Распределения температуры воздуха в центральном продольном сечении помещений 1 и 2, представленные на рис. 2, показывают наличие положительного градиента температуры по высоте помещения от пола к потолку. Изменение температуры по высоте составляет приблизительно $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{м}$. Можно обратить внимание на ярко выраженную слоистость воздушной массы по температуре, однако это связано с дискретностью отображения диапазонов, и в действительности изменение температуры по высоте происходит плавно, что представлено на графике (рис. 3). Также стоит отметить, что характеры изменения температур по сечению у помещений 1 и 2 подобны между собой с небольшим отличием в нижней части помещений. Этот факт можно объяснить одинаковыми характеристиками помещений: высота 3 м, габариты окна $1,8 \times 0,4 \times 1,8$ м и отопительного прибо-

ра $1 \times 0,12 \times 0,65$ м. Характер изменения температуры по высоте для помещения 3 (рис. 2с) имеет отличительные особенности, вызванные его принятой высотой, равной 6 м, и высотой окон 4,8 м.

В левой части рис. 2 можно увидеть зону синего цвета – холодный воздух, инфильтрующийся через неплотности оконного заполнения, и зону красного цвета – теплый воздух, поднимающийся от радиатора отопления и препятствующий распространению холодного воздуха вглубь помещения. Как видно на рис. 2а и 2б, теплый воздушный поток отсекает проникновение более холодного воздуха вглубь помещения. На рис. 2с видно, что холодный воздушный поток, сформированный на значительной по площади холодной поверхности окна и поступающий через неплотности в оконных проемах, отклоняет теплый воздушный поток, сформированный отопительным прибором, тем самым проникая вглубь помещения. В результате этого в нижней части помеще-

ния формируется зона более низких температур (рис. 3б) и характер изменения температур по высоте помещения 3 существенно отличается от характера изменения температур помещений 1 и 2 (рис. 3а).

Приведенный на рис. 3 график отображает изменение температуры по высоте в геометрическом центре помещения. Как видно из рис. 3а, для принятых граничных условий сформированный тепловой режим обеспечивает некоторый перегрев воздуха относительно оптимальных значений температур согласно ГОСТ 30494. Но при этом значения температур в обслуживаемой зоне помещения находятся в пределах допустимых значений. Однако стоит отметить, что характер распределения температуры по высоте полностью не соответствует оптимальному, при котором наибольший комфорт для человека обеспечивается при постепенном охлаждении воздуха от пола к потолку, как, например, при напольном отоплении.

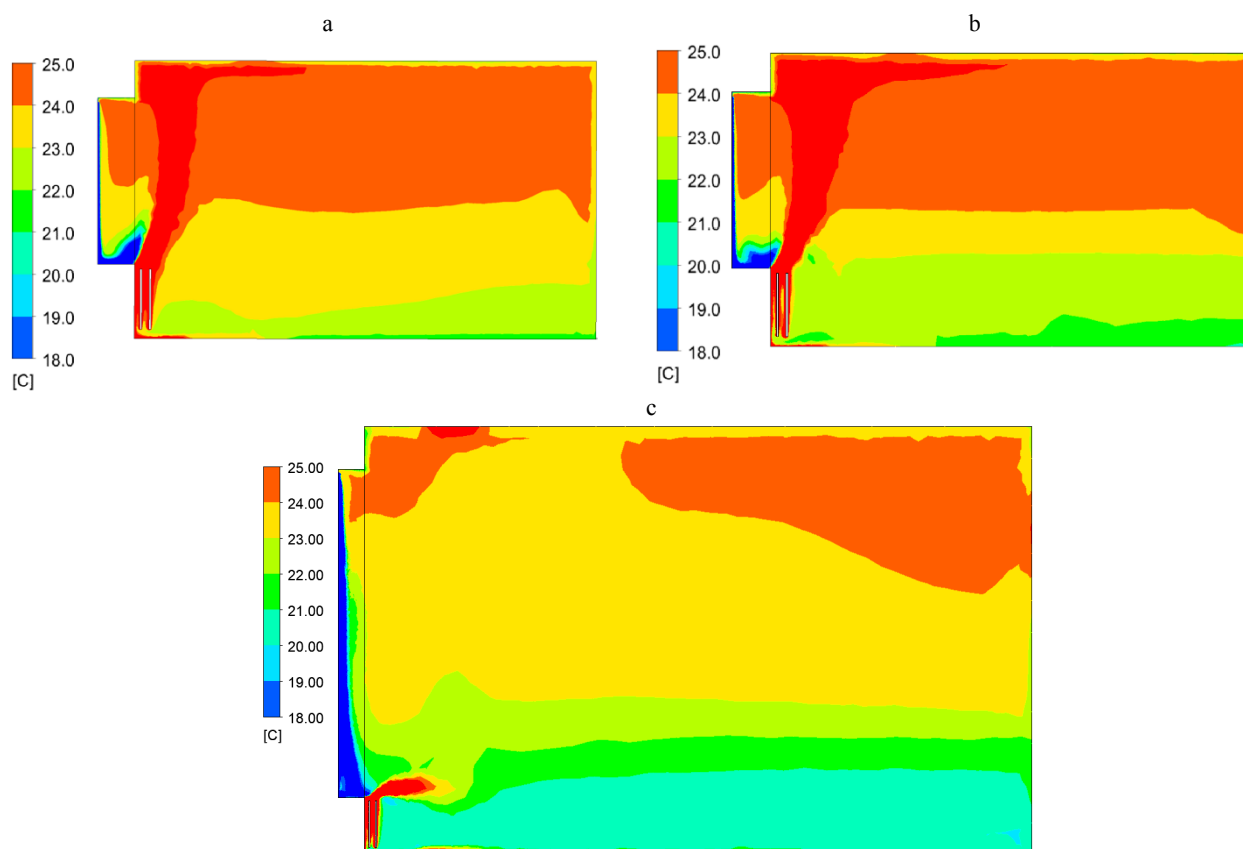


Рис. 3. Распределение температуры в центральном продольном сечении:
а – помещения 1; б – помещения 2; с – помещения 3

Fig. 4. Temperature distribution in the central longitudinal section:
а – premise 1; б – premise 2; с – premise 3

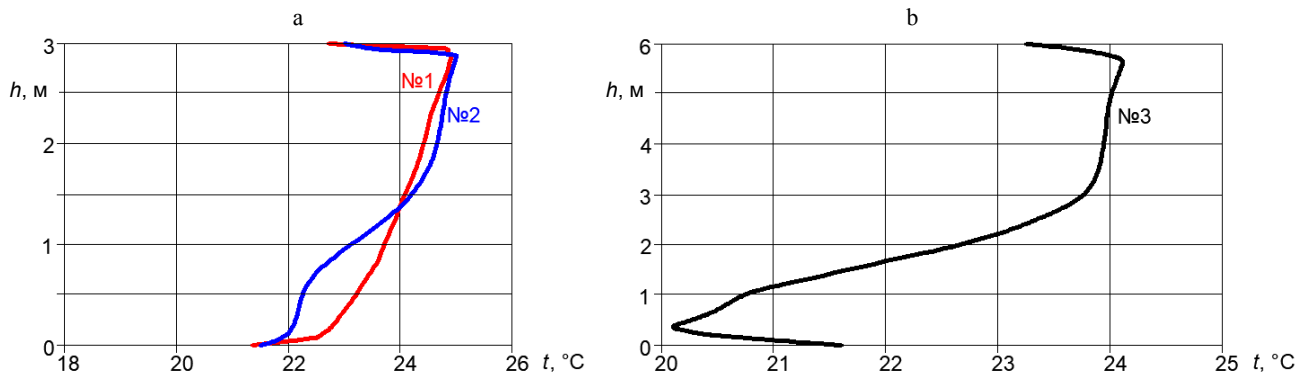


Рис. 3. График зависимости температуры от высоты помещения в геометрическом центре:
а – помещений 1 и 2; б – помещения 3

Fig. 3. Graphic temperature versus room height at the geometric center:
a – premises 1 and 2; b – premise 3

На рис. 4а видно расположение зоны повышенных скоростей, формируемой над отопительным прибором, которая подобно воздушной тепловой завесе создает барьер для поступления холодного воздуха со стороны окна в помещениях 1 и 2. На рис. 4б стоит отметить зону повышенных скоростей воздуха, сформированную на поверхности окна в помещении 3. Данный поток воздуха опускается сверху вниз с увеличением объема и

скорости, что приводит к отклонению восходящего воздушного потока, сформированного отопительным прибором, и как следствие проникновению холодного воздуха вглубь помещения. Несмотря на это, подвижность воздуха в рассматриваемых помещениях 1, 2 и 3 находится в пределах оптимальных значений, кроме зон над отопительным прибором, оконного проема и 0,1 м от пола и потолка, что допускается ГОСТ 30494.

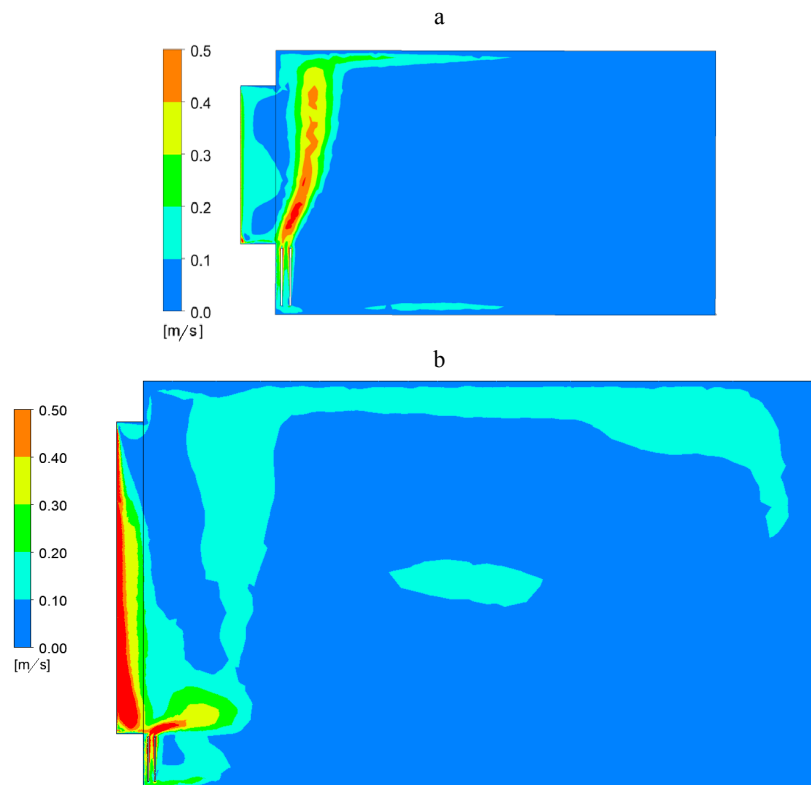


Рис. 4. Распределение скорости воздуха в центральном продольном сечении: а – помещений 1 и 2; б – помещения 3

Fig. 4. Air velocity distribution in the central longitudinal section: a – premises 1 and 2; b – premise 3

На рис. 5 видно, что значения скорости воздуха по высоте в геометрическом центре помещения 1 не превышают оптимальных значений. Резкие скачки сверху и снизу графика объясняются особенностями течения воздуха в непосредственной близости к поверхностям пола и потолка, однако параметры в этих зонах не нормируются.

На рис. 6 представлена трехмерная визуализация изоповерхностей воздушных потоков внутри помещений 1, 2 и 3.

Как видно из рис. 6, в помещении можно наблюдать восходящий поток воздуха от отопительного прибора к потолку помещения, который мы отмечали ранее на рис. 2 и 4. Однако здесь видны зоны проникновения более холодного воздуха, инфильтрирующегося через щели по периметру окна в наружной стене, которые

нельзя было заметить при рассмотрении распределения параметров только в центральном продольном сечении.

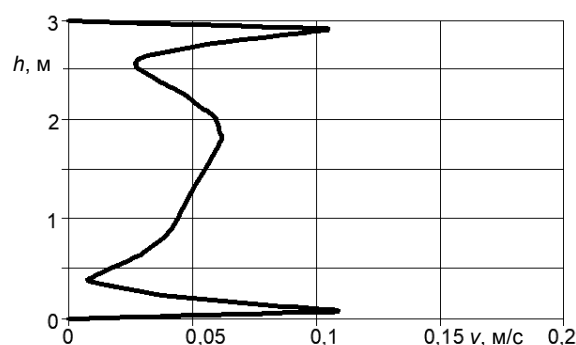


Рис. 5. График зависимости скорости воздуха от высоты помещения в геометрическом центре помещения 1

Fig. 5. Graph of air speed versus room height at the geometric center of the room 1

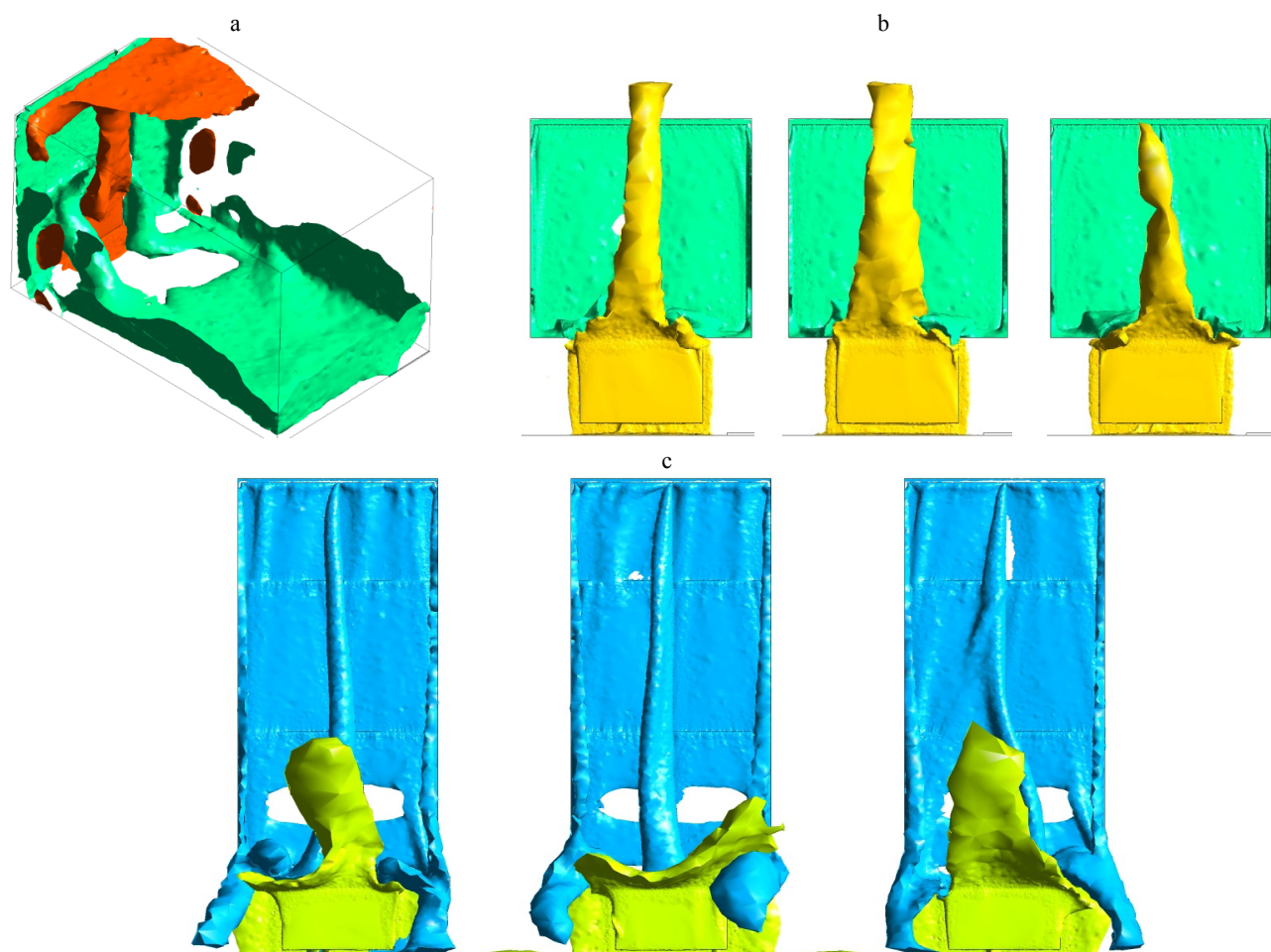


Рис. 6. Трехмерная визуализация изоповерхностей воздушных потоков внутри:
а – помещения 1; б – помещения 2; с – помещения 3

Fig. 6. 3D visualization of isosurfaces of air flows inside:
а – premise 1; б – premise 2; с – premise 3

Стоит отметить, что часть воздуха не проходит над отопительным прибором и не подхватывается горячим восходящим потоком вопреки предыдущим наблюдениям. Поток, проходящий мимо отопительного прибора, расстилается по поверхности пола, в то время как восходящий поток от радиатора поднимается к потолку. Этим можно объяснить не соответствие оптимальному для комфорта человека распределению температуры по высоте помещения, которое упоминалось в статье ранее.

На рис. 7 представлено распределение температуры по сечению на расстоянии 0,12 м от поверхности наружной стены для помещений 1, 2 и 3.

Сравнивая рис. 7а и 7б, можно отметить, что кратное увеличение ширины помещения при таком же кратном увеличении количества отопительных приборов не оказывает значительного влияния на распределение температуры по сечению относительно выбранного отопительного прибора.

Согласно СН 4.02.03–2019, ширина отопительного прибора должна быть не менее 50 % от ширины светового проема в общественных и жилых [12] помещениях. В нашей модели ширина прибора равна 55 % ширины окна. Явно видно на рис. 7, что теплый восходящий поток

воздуха с двух сторон отсечен потоками холодного воздуха и меньше по ширине, чем отопительный прибор и, тем сильнее, чем выше помещение. Можно сделать оценочный вывод, что в данном случае эффективная ширина отопительного прибора, равная ширине восходящего потока теплого воздуха, на $\approx 25\%$ меньше, чем фактическая ширина прибора. Данное обстоятельство приводит к образованию в помещении зон дискомфорта параметров.

На рис. 7с видно, что восходящий поток теплого воздуха от отопительного прибора не доходит даже по половины высоты окна, а следовательно, не может эффективно препятствовать проникновению холодного воздуха от оконного проема. Также видна деформация потока теплого воздуха от центрального радиатора по сравнению с потоками от соседних отопительных приборов. Поток теплого воздуха от левого радиатора полностью перекрыт синими зонами холодного воздуха, а поток от центрального отопительного прибора сильно деформирован под влиянием холодных масс воздуха, что показывает необоснованность использования радиаторного отопления в помещениях с большим объемом, большими габаритами, в частности высоты помещения, и большими оконными проемами.

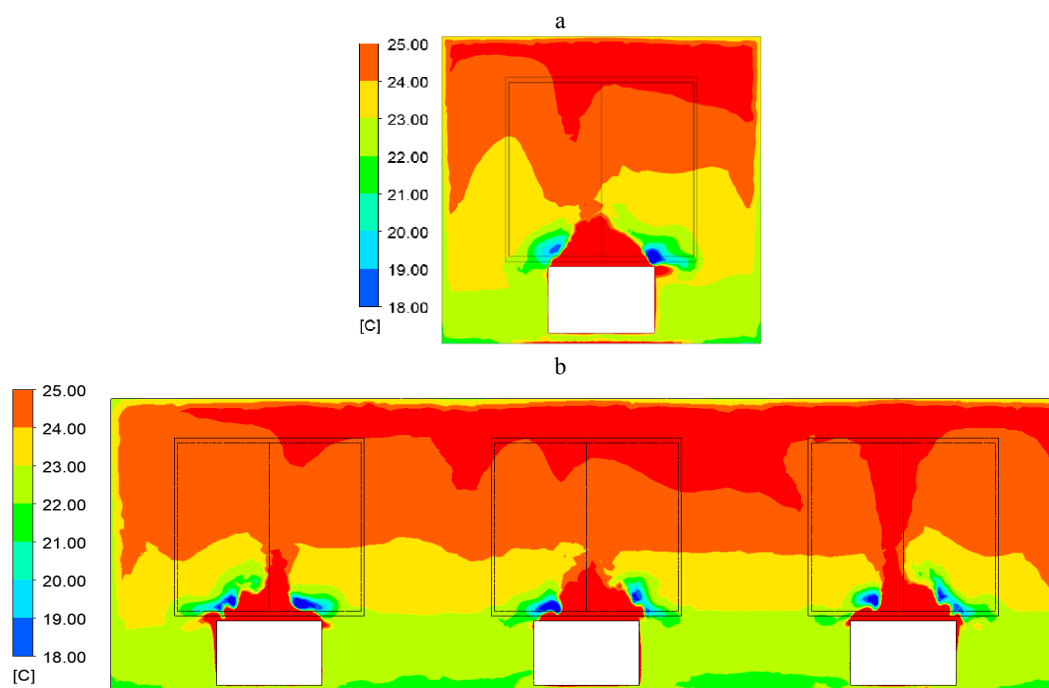
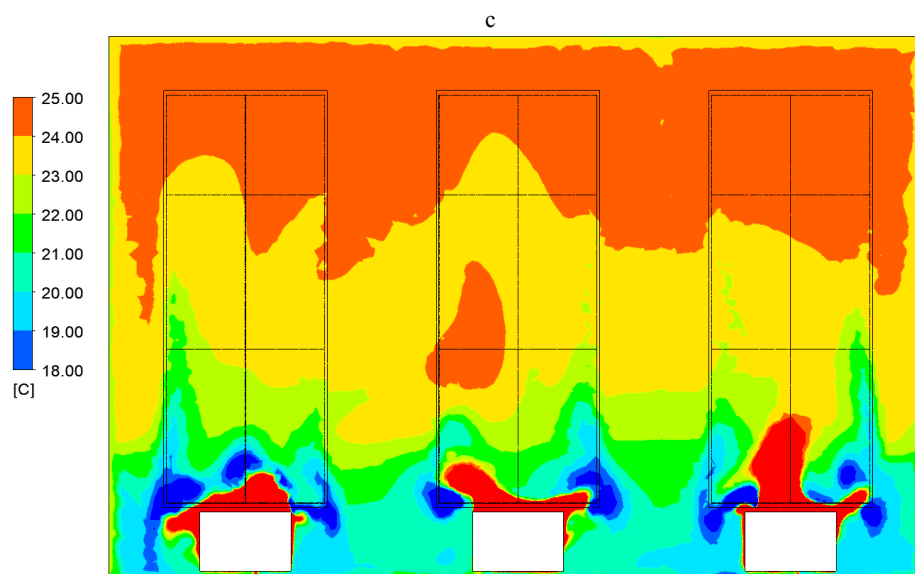


Рис. 7. Распределение температуры по сечению на расстоянии 0,12 м от поверхности наружной стены: а – помещения 1; б – помещения 2; с – помещения 3 (окончание рис. 7 на стр. 63)

Fig. 7. Temperature distribution along the cross section at a distance of 0.12 m from the surface of the outer wall: а – premise 1; б – premise 2; с – premise 3 (the end of Fig.7 on page 63)



Окончание рис. 7

The end of Fig. 7

ВЫВОДЫ

1. Лучисто-конвективные отопительные приборы, или радиаторы, в рассматриваемых помещениях 1 и 2 создают микроклимат, в котором параметры воздуха соответствуют допустимым, нормируемым ГОСТ 30494. Следовательно, такое отопление выполняет свои основные задачи по поддержанию значений показателей микроклимата, которые при длительном и систематическом воздействии на человека могут вызвать общее и локальное ощущение дискомфорта, но не допускают ухудшения состояния здоровья. Однако с точки зрения обеспечения наиболее комфортных параметров микроклимата для человека радиаторное отопление имеет свои недостатки.

2. Применение лучисто-конвективного отопительного прибора для отопления помещения 3 менее эффективно по причине проникновения большого объема холодного воздуха и формирования более низких температур в зоне нахождения человека.

3. К основным плюсам радиаторного отопления можно отнести относительную дешевизну и простоту монтажа и обслуживания системы при обеспечении ею всех необходимых параметров микроклимата. Из минусов можно выделить то, что даже при нахождении значений параметров микроклимата в пределах оптимальных значений по ГОСТ 30494 распреде-

ление температуры по высоте помещения таково, что уменьшает субъективное ощущение теплового комфорта у человека. Существенным минусом является формирование зон пониженного комфорта по краям окна, которые формируются из-за того, что поток теплого воздуха, восходящий от отопительного прибора, не перекрывает всю ширину окна. Для устранения этих зон ширина радиатора должна быть больше, чем ширина окна. При сохранении прочих габаритных размеров и параметров теплоносителя сильно возрастут затраты металла на отопительный прибор и его мощность. Следовательно, появляется необходимость в разработке новых конструкций отопительных приборов, которые будут эффективно препятствовать проникновению инфильтрующегося наружного холодного воздуха внутрь помещения, обеспечивая при этом тепловой режим с требуемыми параметрами микроклимата.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рекомендации по проектированию конструкций основания ледовых площадок многофункциональных сооружений: Р 03.02.178–2019 / Министерство архитектуры и строительства, Министерство спорта и туризма Республики Беларусь, Белорусский национальный технический университет, Многофункциональный культурно-спортивный комплекс «Минск-арена»; сост. П. И. Дячек, Д. Г. Ливанский. Минск: БНТУ, 2019. 81 с.

2. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях: ГОСТ 30494–2011. Взамен ГОСТ 30494–96; введ. 01.01.2013. М.: Стандартинформ, 2013. 15 с.
 3. Денисихина, Д. М. Особенности численного моделирования поведения воздушных потоков в объемах концертных и театральных залов / Д. М. Денисихина // Наукоедение. 2014. № 3 (22). URL: naukovedenie.ru/PDF/81TVN314.pdf.
 4. Денисихина, Д. М. Расчет коэффициента воздухообмена методами математического моделирования параметров микроклимата / Д. М. Денисихина // Изв. КГАСУ. 2023. № 4 (66). С. 337–345.
 5. Денисихина, Д. М. Численное исследование закономерностей распределения CO₂ в общественных зданиях / Д. М. Денисихина // Инновации и инвестиции. 2023. № 5. С. 368–372.
 6. Денисихина, Д. М. Изменение параметров микроклимата в течение хоккейного матча в зале крытой ледовой арены / Д. М. Денисихина, С. В. Русаков // АВОК. 2019. № 6. URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=7301.
 7. Дячек, П. И. Температурная неоднородность поверхности ледового поля крытых искусственных катков / П. И. Дячек, Д. Г. Ливанский // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2010. № 2. С. 41–47.
 8. Ливанский, Д. Г. Анализ методов расчета и процессов формирования температурного режима основания ледового поля / Д. Г. Ливанский // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2010. № 6. С. 74–80.
 9. Ливанский, Д. Г. Локальная система отопления для повышения комфорта зрителей на трибунах крытого ледового катка / Д. Г. Ливанский // Наука и техника. 2024. № 3. С. 225–234. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-3-225-234>.
 10. Ливанский, Д. Г. Температурно-влажностный режим ледовых площадок multifunctional сооружений: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.03 / Д. Г. Ливанский; Белорусский национальный технический университет. Минск, 2020.
 11. Ливанский, Д. Г. Физико-математическая модель процессов формирования ледового поля / Д. Г. Ливанский // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2011. № 1. С. 69–79.
 12. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха: СН 4.02.03–2019 = Ацяпленне, вентыляцыя і кандыцыянаванне паветра. Введ. 16.12.2019. Минск: Минстройархитектуры, 2020. 73 с.
 13. Поступила 17.09.2024
Подписана в печать 28.11.2024
Опубликована онлайн 31.01.2025
- REFERENCES
1. R 03.02.178–2019. *Recommendations for the Design of Base Structures for Ice Rinks of Multifunctional Structures*. Minsk, Belarusian National Technical University, 2019. 81 (in Russian).
 2. State Standard 30494–2011. Residential and Public Buildings. Indoor Microclimate Parameters. Moscow: Standardinform Publ., 2013. 15 (in Russian).
 3. Denisikhina D. M. (2014) Features of Numerical Modeling of the Behavior of Air Flows in the Volumes of Concert and Theater Halls. *Naukovedenie* [Science Studies], (3). Available at: naukovedenie.ru/PDF/81TVN314.pdf (in Russian).
 4. Denisikhina D. M. (2023) Calculation of the Air Exchange Coefficient by Methods of Mathematical Modeling of Microclimate Parameters. *Izvestiya KGASU = News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*, (4), 337–345 (in Russian).
 5. Denisikhina D. M. (2023) Numerical Study of the Patterns of CO₂ Distribution in Public Buildings. *Innovatsii i Investitsii = Innovation & Investment*, (5), 368–372 (in Russian).
 6. Denisikhina D. M., Rusakov S. V. (2019) Changing Microclimate Parameters during a Hockey Match in the Indoor Ice Arena. *AVOK = Ventilation, Heating, Air Conditioning, Heat Supply and Building Thermal Physics (ABOK)*, (6). URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=7301 (in Russian).
 7. Diachek P. I., Livansky D. G. (2010) Temperature Non-Uniformity of Ice-Field Surface at Covered Skating-Rinks. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (2), 41–47 (in Russian).
 8. Livansky D. G. (2010) Analysis of Methods for Calculation and Processes Pertaining to Formation of Temperature Regime of Ice Field Foundation. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (6), 74–80 (in Russian).
 9. Livansky D. G. (2024) Local Heating System to Increase the Comfort of Spectators in the Stands of the Indoor Ice Rink. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 23 (3), 225–234 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-3-225-234>.
 10. Livansky D. G. (2020) Temperature and Humidity Conditions of Ice Rinks of Multifunctional Structures [Dissertation]. Minsk, Belarusian National Technical University (in Russian).
 11. Livansky D. G. (2011) Physical and Mathematical Model of Ice-Field Formation Processes. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (1), 69–79 (in Russian).
 12. SN [SN – Building Regulation] 4.02.03–2019. *Heating, Ventilation and Air Conditioning*. Minsk, Ministry of Architecture (in Russian).

Received: 17.09.2024

Accepted: 28.11.2024

Published online: 31.01.2025