

УДК 62-6

## ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОНФИГУРАЦИИ СИСТЕМЫ ВОЗДУХООБМЕНА НА ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ЛОКАЛЬНЫХ РАБОЧИХ ЗОН В ПОМЕЩЕНИИ С ГАЗОВЫМ ИНФРАКРАСНЫМ ИЗЛУЧАТЕЛЕМ

Борисов Борис Владимирович<sup>1</sup>,  
bvborisov@tpu.ru

Вяткин Александр Витальевич<sup>1</sup>,  
avv47@tpu.ru

Кузнецов Гений Владимирович<sup>1</sup>,  
kuznetsovgv@tpu.ru

Максимов Вячеслав Иванович<sup>1</sup>,  
elf@tpu.ru

Нагорнова Татьяна Александровна<sup>1</sup>,  
tania@tpu.ru

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность.** Наиболее перспективным вариантом энергоэффективной системы обеспечения регламентного теплового режима локальных рабочих мест, занимающих малую долю площадей больших по размерам цехов, являются системы так называемого «лучистого» отопления, основной частью которых являются газовые инфракрасные излучатели. Основную роль в формировании теплового режима локальной рабочей зоны играет процесс смешанной конвекции (движение воздуха вследствие его нагрева ограждающими конструкциями и потоками, которые формирует система воздухообмена). До настоящего времени анализ влияния месторасположения каналов системы воздухообмена на тепловой режим локальной рабочей зоны с использованием газового инфракрасного излучателя не выполнялся.

**Цель:** анализ по результатам математического моделирования с использованием модели влияния положения отверстий каналов системы воздухообмена на температурные поля локальных рабочих зон вблизи макета оборудования.

**Объект:** система отопления с использованием газового инфракрасного излучателя светлого типа и системы воздухообмена.

**Методы.** Математическое моделирование проведено в рамках двумерной модели сопряженного теплопереноса с применением метода конечных элементов. Для численного анализа процессов теплопереноса использовались модули «The Heat Transfer in Fluids Interface», «Surface-to-Surface Radiation» и «The Turbulent Flow, k-ε Interface» программной среды COMSOL Multiphysics.

**Результаты.** Приводятся результаты теоретических исследований, выполненных с целью определения влияния положения отверстий каналов системы воздухообмена на температурные поля и возможности управления процессом формирования регламентного теплового режима в локальных рабочих зонах при использовании газового инфракрасного излучателя. Представлены поля температур и скоростей, а также распределения температуры воздуха по высоте локальной рабочей зоны для различных вариантов расположения областей ввода и вывода системы воздухообмена. По результатам исследований выявлены основные закономерности процессов теплопереноса в рассматриваемых условиях, а также выявлена возможность управления процессами формирования теплового режима локальных рабочих зон, варьируя положения отверстий каналов системы воздухообмена, систем отопления на основе газового инфракрасного излучателя.

### Ключевые слова:

газовый инфракрасный излучатель, объект теплоснабжения,  
локальная рабочая зона, тепловые условия, конвективный теплообмен.

### Введение

Энерго- и ресурсосбережение становятся с каждым годом все более и более актуальными задачами [1, 2]. Энергосбережение актуально во всех отраслях промышленности и в социальной сфере [3, 4]. Наибольшие, скорее всего, резервы энергосбережения реальны в работе систем теплоснабжения промышленных предприятий в связи с тем, что площади и объёмы производственных помещений, занятые рабочими местами, как правило, много меньше (в десятки раз) общих площадей и объёмов цехов предприятий [5, 6]. По этим причинам многие производственные крупногабаритные помещения, построенные в прошлом, просто не используются.

В этой связи наиболее перспективным вариантом системы обеспечения регламентного теплового режима локальных рабочих мест, занимающих малую долю площадей больших по размерам цехов, являются системы так называемого «лучистого» отопления [7, 8], основной частью которых являются газовые инфракрасные излучатели (ГИИ) «тёмного» [9] или «светлого» [10] типа.

Но физические процессы, протекающие в локальной рабочей зоне при работе ГИИ, очень сложны [11, 12]. В связи с чем трудно, в отличие от традиционных систем «конвективного» отопления [13, 14], прогнозировать температурные поля локальных рабочих зон, в которых, как правило, находится не

только работающий человек, но и оборудование [15]. Кроме того, в подавляющем большинстве реальных производственных процессов необходим принудительный воздухообмен, влияние которого, как показал анализ [16], на температуру воздуха локальной рабочей зоны значительно.

Совокупность полученных ранее при проведении экспериментальных и теоретических исследований [15–18] результатов иллюстрирует не только самостоятельное влияние большой группы факторов (присутствие или отсутствие оборудования, работа системы воздухообмена, влияние ограждающих вертикальных и горизонтальных конструкций и др.). Результаты [15–18] дают основания для гипотезы о возможном совместном влиянии группы двух (или даже трёх) факторов на температуры воздуха в локальной рабочей зоне. Пока анализ такого совместного влияния нескольких факторов не выполнялся.

Проблема заключается в том, что в реальном варианте работы систем лучистого нагрева основную роль в формировании теплового режима локальной рабочей зоны играет процесс смешанной конвекции (движение воздуха вследствие его нагрева ограждающими конструкциями и потоками, которые формирует система воздухообмена). На движение же масс воздуха значимо влияют не только ограждающие конструкции, но также и сам ГИИ, оборудование и система воздухообмена.

Ранее установлено [15, 16], что при определённой схеме движения поступающего из системы воздухообмена воздуха последний увлекает за собой нагретый вблизи ГИИ воздух и переносит его в локальную рабочую зону. В результате температура в этой зоне снижается много меньше по сравнению с вариантом поступления только холодного воздуха из системы воздухообмена. Обоснованной в этой связи является гипотеза о том, что расположение входного и выходного отверстий каналов системы воздухообмена может заметно влиять на тепловой режим локальной рабочей зоны. Если такое влияние имеет место, то возможно управление процессом формирования регламентного теплового режима локальной рабочей зоны в результате выбора мест расположения входного и выходного отверстий каналов системы воздухообмена относительно ГИИ и оборудования.

Цель работы – анализ по результатам математического моделирования с использованием разработанной ранее [15, 16] модели влияния положения отверстий каналов системы воздухообмена на температурные поля локальных рабочих зон вблизи макета оборудования.

#### Численные исследования

Математическое моделирование проводилось в рамках двумерного приближения. Рассматривалась прямоугольная область размерами  $L_x=10 \times L_y=4,4$  м, ограниченная полом, стенами и потолком (ограждающие конструкции) с толщиной стен  $L_{wall}=0,1$  м и двумя горизонтальными конструктивными элементами (рис. 1), соответствующими ГИИ (размеры  $L_{x_{GII}}=0,4$  м,  $L_{y_{GII}}=0,05$  м) и панели (размеры  $L_{x_{tb}}=0,6$  м,  $L_{y_{tb}}=0,04$  м).

Панель располагалась на оси симметрии ГИИ на высоте 755 мм от пола ( $X_{tb}=6415$  мм,  $Y_{tb}=755$  мм). Координаты расположения источника лучистой энергии (ГИИ) и горизонтальной панели в области соответствовали наиболее типичному варианту их размещения в реальном производственном помещении, схема которого представлена на рис. 1. Воздух считался диатермичной средой, а все поверхности (стен, пола, потолка, ГИИ и оборудования) – непрозрачными серыми. Основные характеристики материалов элементов (объектов) конструкции приведены в табл. 1.

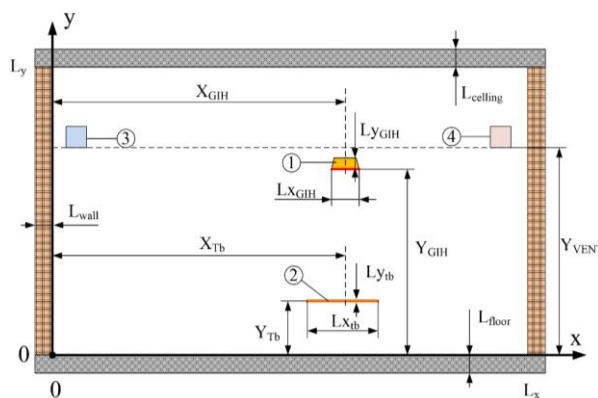


Рис. 1. Область решения задачи: 1 – ГИИ, 2 – панель, 3 – зона притока воздуха, 4 – зона оттока воздуха

Fig. 1. Problem solution area: 1 – gas infrared heater (GIH), 2 – panel, 3 – air inflow area, 4 – air outflow area

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

Таблица 1. Теплофизические свойства материалов ограждающих конструкций и панели, использовавшихся в экспериментах [19]

Table 1. Thermophysical properties of building envelope materials and panels used in experiments [19]

Объект Object	Толщина $l$ , м Thickness, m	Материал Material	Плотность $\rho$ , кг м <sup>-3</sup> Density $\rho$ , kg m <sup>-3</sup>	Удельная теплоёмкость $c$ , Дж кг <sup>-1</sup> К <sup>-1</sup> Specific heat $c$ , J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт К <sup>-1</sup> м <sup>-1</sup> Thermal conductivity coefficient $\lambda$ , W K <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup>	Степень черноты $\epsilon$ Emissivity $\epsilon$
Пол, потолок и стены Floor, ceiling and walls	0,1	бетон concrete	2500	2400	1,55	0,95
Горизонтальная панель Horizontal panel	0,02	сосна pine	520	2300	0,15	0,4

Для численного анализа процессов теплопереноса использовались модули «The Heat Transfer in Fluids Interface» и «The Turbulent Flow, k- $\epsilon$  Interface» программной среды COMSOL Multiphysics. Моделирование проводилось в двухмерной постановке в области, схематично представленной на рис. 1. Для интегриро-

вания уравнений применялся метод конечных элементов. 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.

На границах «воздух – ограждающие конструкции» для уравнений движения воздуха задавалось условие прилипания. На участке ввода воздуха задавались расход и температура, на выходе – постоянное давление, равное атмосферному. В качестве начальной температуры всех объектов расчета принималось значение  $7^\circ\text{C}$ , считалось, что поступающий воздух приточной вентиляции обладает температурой  $10^\circ\text{C}$ .

Перед проведением математического моделирования тепломассопереноса физическая адекватность постановки задачи расчета проверялась в процессе сравнительного анализа результатов численного моделирования с результатами проведенных экспериментальных исследований [15–17]. Удовлетворительное согласование результатов физического и математического моделирования позволило использовать выбранную математическую модель для оценки влияния воздухообмена на температуры в локальной рабочей зоне (области влияния ГИИ).

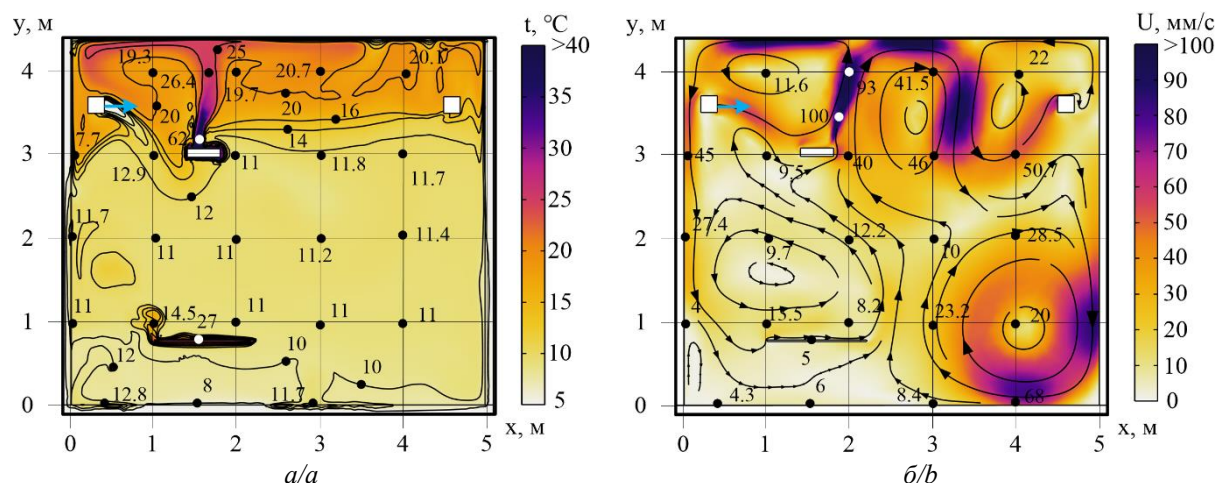
**Таблица 2.** Варианты расположения отверстий входного и выходного каналов системы воздухообмена и расходов воздуха

**Table 2.** Options for the location of the inlet and outlet channels openings of the air exchange system and air flow rates

Номер варианта Variant number	Расход воздуха, кг/(с·м³) Air flow kg/(s·m³)	Координаты расположения отверстий входного и выходного каналов системы воздухообмена, мм Coordinates of the inlet and outlet channels openings of the air exchange system, mm		Номер рисунка Figure number
		Вход/Inlet	Выход/Outlet	
1	$2 \cdot 10^{-4}$	X=200, Y <sub>VENT</sub> =2950	X=4500, Y <sub>VENT</sub> =2950	2
2		X=200, Y <sub>VENT</sub> =2950	X=4500, Y <sub>VENT</sub> =2500	3
3		X=200, Y <sub>VENT</sub> =2950	X=4500, Y <sub>VENT</sub> =500	4
4		X=4500, Y <sub>VENT</sub> =2950	X=200, Y <sub>VENT</sub> =2950	5
5		X=4500, Y <sub>VENT</sub> =4000	X=200, Y <sub>VENT</sub> =2950	6
6		X=4500, Y <sub>VENT</sub> =2500	X=4500, Y <sub>VENT</sub> =2950	7
7		X=4500, Y <sub>VENT</sub> =500	X=200, Y <sub>VENT</sub> =2950	8
8		X=200, Y <sub>VENT</sub> =500	X=200, Y <sub>VENT</sub> =2950	9
9	$11 \cdot 10^{-4}$	X=4500, Y <sub>VENT</sub> =2950	X=200, Y <sub>VENT</sub> =2950	10

При моделировании рассматривались типичные варианты расположения отверстий каналов системы воздухообмена (табл. 2).

На рис. 2 приведены результаты численного моделирования для сочетания приведенных в таблице факторов, которое можно условно назвать базовым вариантом.



**Рис. 2.** Поля температур (а) и скоростей (б) через 1 час работы ГИИ.  $G=2 \cdot 10^{-4}$  кг/(с·м³). Область притока воздуха расположена слева на высоте 2950 мм, область оттока воздуха расположена справа на высоте 2950 мм

**Fig. 2.** Fields of temperatures (a) and velocities (b) after 1 hour of GII operation.  $G=2 \cdot 10^{-4}$  kg/(s·m³). The air inflow area is located on the left at a height of 2950 mm, the air outflow area is located on the right at a height of 2950 mm

Линии тока (рис. 2, б) иллюстрируют образование в рассматриваемой области (достаточно реальный для практики вариант) нескольких циркуляционных течений, обусловленных влиянием потока воздуха, втекающего через систему воздухообмена. Этот рисунок также иллюстрирует влияние газового инфракрасного излучателя и макета оборудования на характер течения воздуха в такой сложной для анализа области. Можно сделать вывод, что для условий движения воздуха, соответствующих рис. 2, характерно снижение температуры в локальной рабочей зоне до значений, близких к температуре поступающего из системы «вентиляции» воздуха. При «высоком» (условно) положении выходного канала

этой системы (рис. 2) значительная часть воздуха, поступающего из внешней среды, не успевает перенести теплоту из зоны вокруг ГИИ в локальную рабочую зону.

Смещение положения выходного канала вниз (рис. 3) на 0,5 м изменяет режим течения воздуха, но эти изменения практически не влияют на температуры локальных рабочих зон слева и справа от панели, имитирующей оборудование.

Дальнейшее смещение выходного канала системы воздухообмена (рис. 4) на 2 м вниз приводит к достаточно значимому (на  $4\text{--}5^\circ\text{C}$ ) изменению температур воздуха в локальных рабочих зонах. Такой результат обусловлен тем, что воздух из системы вентиляции в



большей степени увлекает «горячий» воздух, окружающий ГИИ.

Следующая группа иллюстраций (рис. 5–8) показывает влияние теплоты, поступающей в систему от

нагретого корпуса ГИИ, на температуры воздуха в локальных рабочих зонах при изменении, по сравнению с базовым вариантом, положения входного и выходного каналов системы воздухообмена.

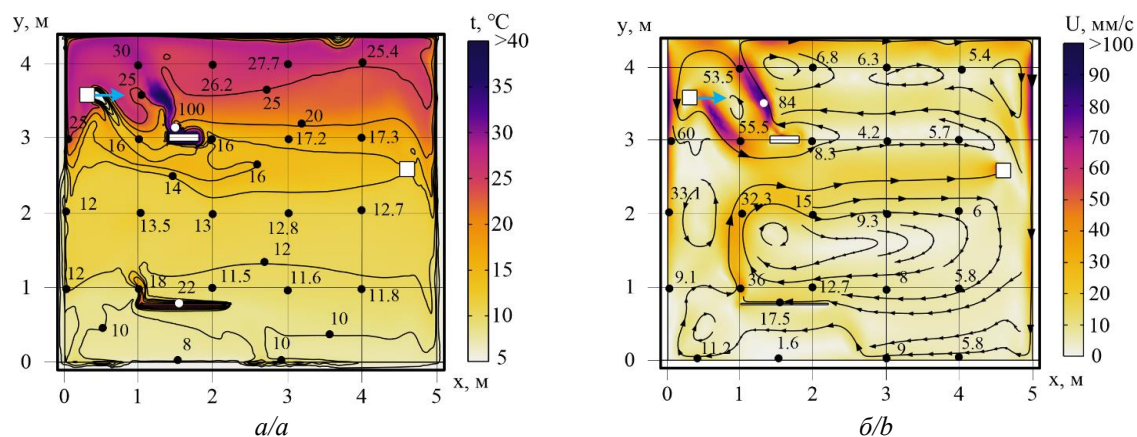


Рис. 3. Поля температур (а) и скоростей (б) через 1 час работы ГИИ.  $G=2 \cdot 10^{-4} \text{ кг/(с} \cdot \text{м}^3)$ . Область притока воздуха расположена слева на высоте 2950 мм, область оттока воздуха расположена справа на высоте 2500 мм

Fig. 3. Fields of temperatures (a) and velocities (b) after 1 hour of GIH operation.  $G=2 \cdot 10^{-4} \text{ kg/(s} \cdot \text{m}^3)$ . The air inflow area is located on the left at a height of 2950 mm, the air outflow area is located on the right at a height of 2500 mm

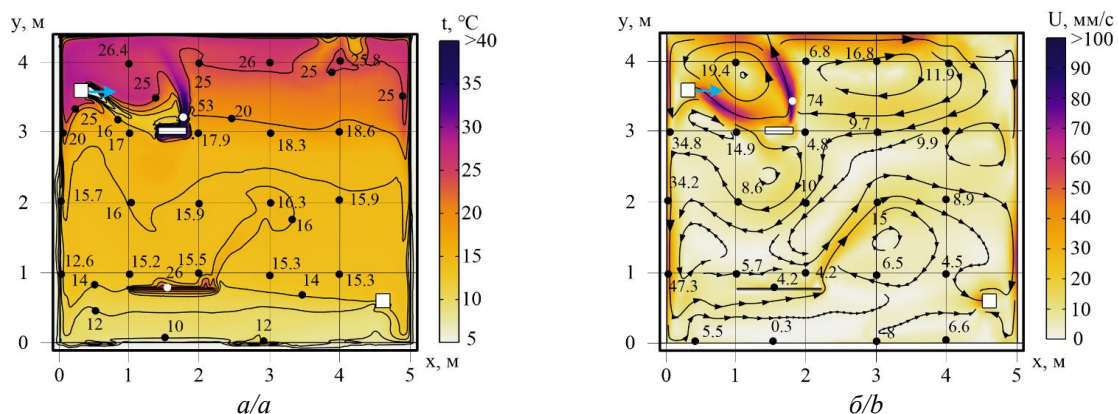


Рис. 4. Поля температур (а) и скоростей (б) через 1 час работы ГИИ.  $G=2 \cdot 10^{-4} \text{ кг/(с} \cdot \text{м}^3)$ . Область притока воздуха расположена слева на высоте 2950 мм, область оттока воздуха расположена справа на высоте 500 мм

Fig. 4. Fields of temperatures (a) and velocities (b) after 1 hour of GIH operation.  $G=2 \cdot 10^{-4} \text{ kg/(s} \cdot \text{m}^3)$ . The air inflow area is located on the left at a height of 2950 mm, the air outflow area is located on the right at a height of 500 mm

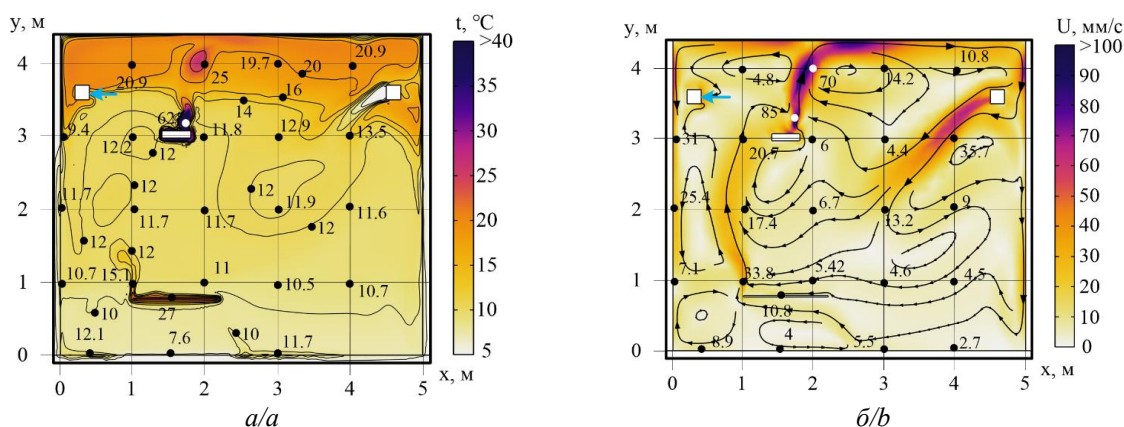
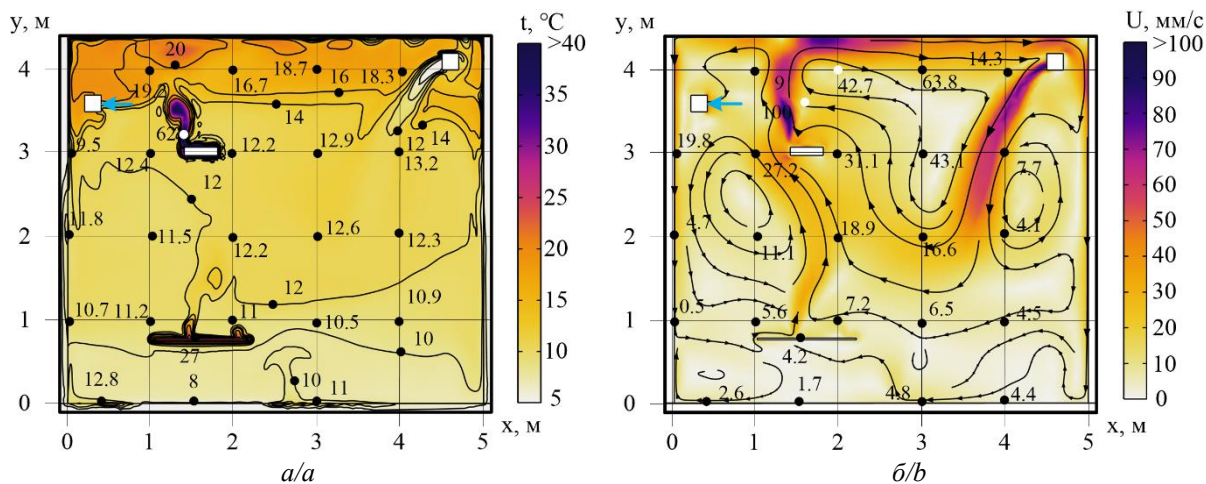


Рис. 5. Поля температур (а) и скоростей (б) через 1 час работы ГИИ.  $G=2 \cdot 10^{-4} \text{ кг/(с} \cdot \text{м}^3)$ . Область ввода воздуха расположена справа на высоте 2950 мм

Fig. 5. Fields of temperatures (a) and velocities (b) after 1 hour of GIH operation.  $G=2 \cdot 10^{-4} \text{ kg/(s} \cdot \text{m}^3)$ . The air inflow area is located on the right at a height of 2950 mm

Сравнение рис. 2, 3 и 5, 6 показывает, что изменения относительно локальной рабочей зоны положения входного и выходного отверстий каналов системы воз-

духообмена практически не влияют на температуры воздуха в локальных рабочих зонах при расположении на достаточно большой высоте этих отверстий.

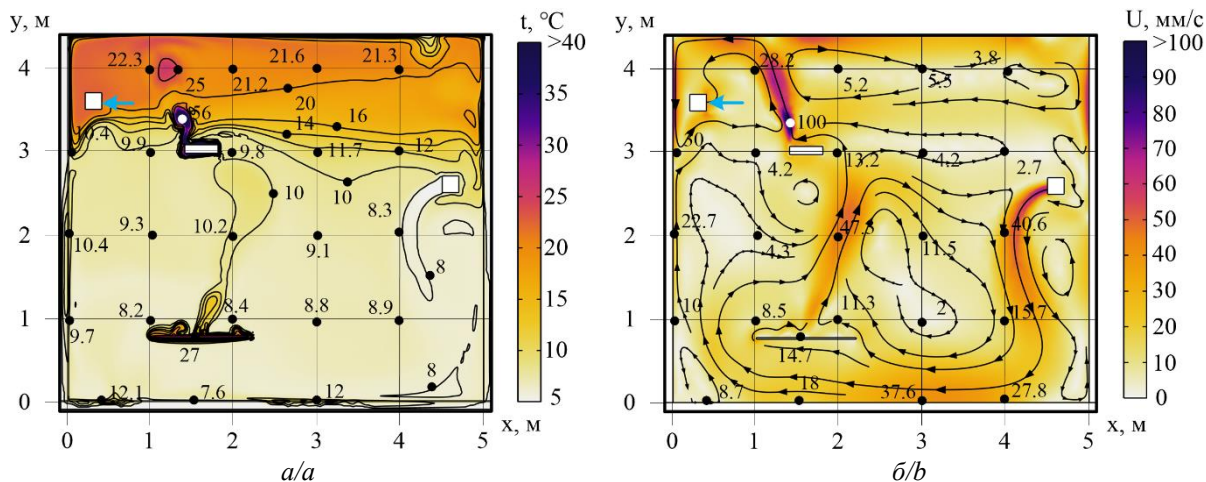


**Рис. 6.** Поля температур (а) и скоростей (б) через 1 час работы ГИИ.  $G=2 \cdot 10^{-4}$  кг/(с·м<sup>3</sup>). Область ввода воздуха расположена справа на высоте 4000 мм

**Fig. 6.** Fields of temperatures (a) and velocities (b) after 1 hour of GII operation.  $G=2 \cdot 10^{-4}$  kg/(s·m<sup>3</sup>). The air inflow area is located on the right at a height of 4000 mm

Увеличение высоты положения выходного отверстия системы вентиляции при снижении высоты выходного отверстия приводит к достаточно значимому (рис. 7) снижению температур воздуха в локальных рабочих зонах. Последнее обусловлено тем, что поступающий в об-

ласть влияния ГИИ воздух из системы воздухообмена не может вызвать перемещение нагретого от корпуса ГИИ воздуха в рабочую зону. Соответственно, этот фактор не может оказать позитивного влияния на тепловой режим локальных рабочих зон (справа и слева от панели).



**Рис. 7.** Поля температур (а) и скоростей (б) через 1 час работы ГИИ.  $G=2 \cdot 10^{-4}$  кг/(с·м<sup>3</sup>). Область ввода воздуха расположена справа на высоте 2500 мм

**Fig. 7.** Fields of temperatures (a) and velocities (b) after 1 hour of GII operation.  $G=2 \cdot 10^{-4}$  kg/(s·m<sup>3</sup>). The air inflow area is located on the right at a height of 2500 mm

Аналогичные результаты (рис. 8) получены и для условий притока относительно холодного воздуха из расположенного на высоте 0,5 м входного отверстия системы воздухообмена. И в этом случае геометрия течения такова, что воздух, нагретый корпусом ГИИ, не может попасть в локальные рабочие зоны.

Неблагоприятной для создания регламентного теплового режима локальной рабочей зоны является и схема расположения каналов приточно-вытяжной

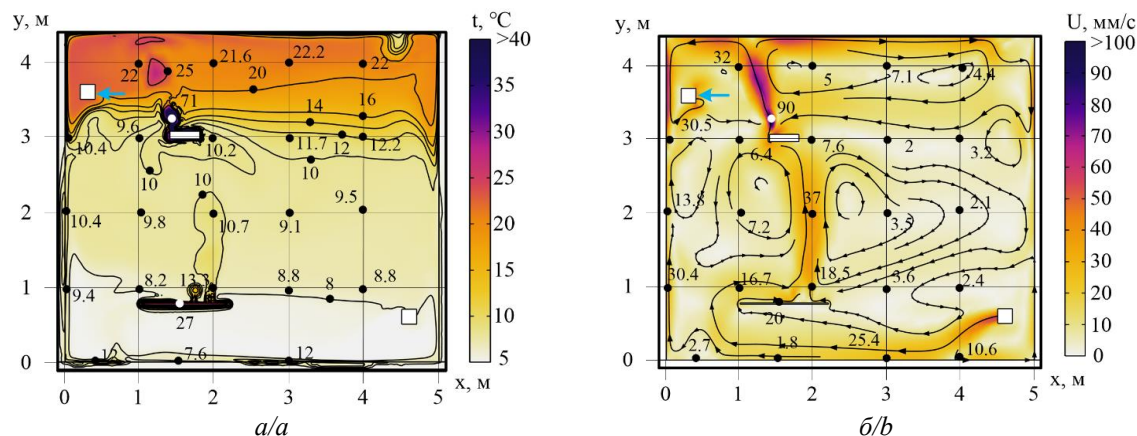
вентиляции, приведенная на рис. 9. Ввод «свежего» воздуха в нижней части помещения также не даёт возможности вовлечь в процесс формирования регламентного теплового режима локальной рабочей зоны теплоты, отводимой от корпуса газового инфракрасного излучателя.

В дополнение к проведённому анализу выполнена оценка влияния увеличения интенсивности притока воздуха на поле температур локальной рабочей зоны



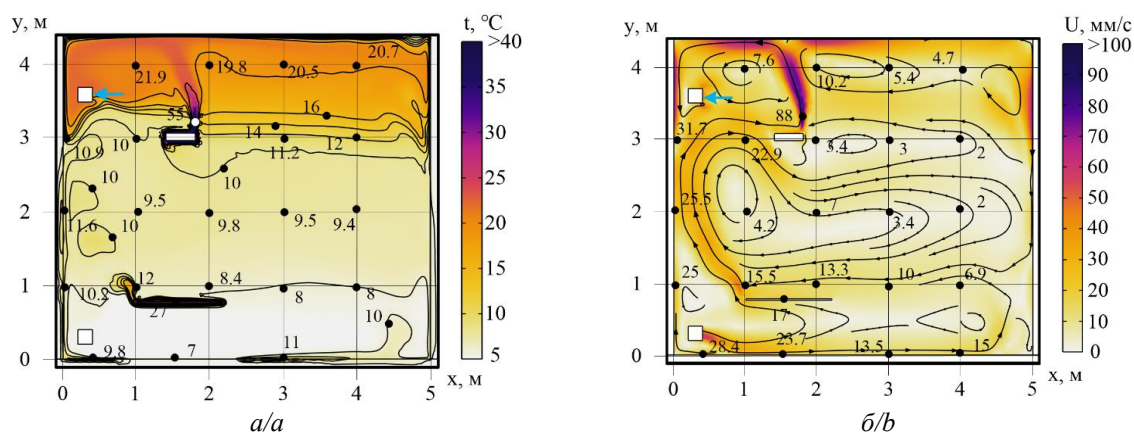
(рис. 10). Сравнение рис. 5 и 10 приводит к достаточно очевидному выводу: увеличение интенсивности притока относительно холодного воздуха при одинаковом

положении входного и выходного отверстий каналов системы воздухообмена приводит к небольшому, но снижению температур в локальной рабочей зоне.



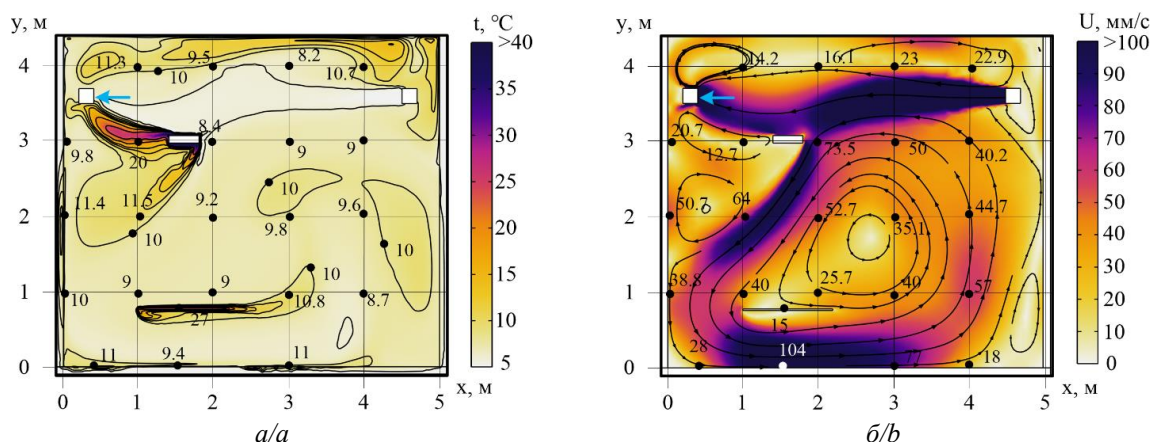
**Рис. 8.** Поля температур (а) и скоростей (б) через 1 час работы ГИИ.  $G=2 \cdot 10^{-4}$  кг/(с·м<sup>3</sup>). Область ввода воздуха расположена справа на высоте 500 мм

**Fig. 8.** Fields of temperatures (a) and velocities (b) after 1 hour of GIH operation.  $G=2 \cdot 10^{-4}$  kg/(s·m<sup>3</sup>). The air inflow area is located on the right at a height of 500 mm



**Рис. 9.** Поля температур (а) и скоростей (б) через 1 час работы ГИИ.  $G=2 \cdot 10^{-4}$  кг/(с·м<sup>3</sup>). Область ввода воздуха расположена слева на высоте 500 мм

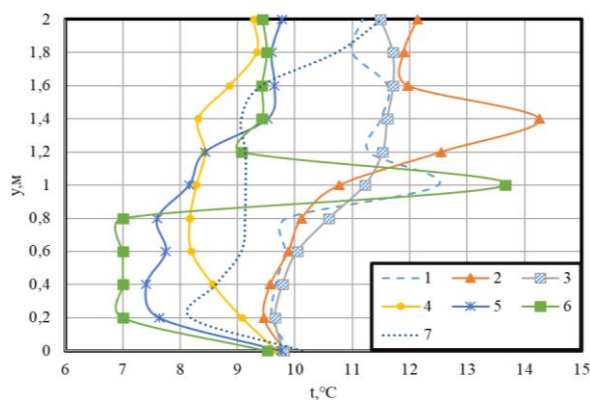
**Fig. 9.** Fields of temperatures (a) and velocities (b) after 1 hour of GIH operation.  $G=2 \cdot 10^{-4}$  kg/(s·m<sup>3</sup>). The air inflow area is located on the left at a height of 500 mm



**Рис. 10.** Поля температур (а) и скоростей (б) через 1 час работы ГИИ.  $G=11 \cdot 10^{-4}$  кг/(с·м<sup>3</sup>). Область ввода воздуха расположена справа на высоте 2950 мм

**Fig. 10.** Fields of temperatures (a) and velocities (b) after 1 hour of GIH operation.  $G=11 \cdot 10^{-4}$  kg/(s·m<sup>3</sup>). The air inflow area is located on the right at a height of 2950 mm

На рис. 11–13 приведены распределения температур в локальных рабочих зонах справа и слева от макета оборудования для нескольких вариантов расположения отверстий входного и выходного каналов системы воздухообмена.

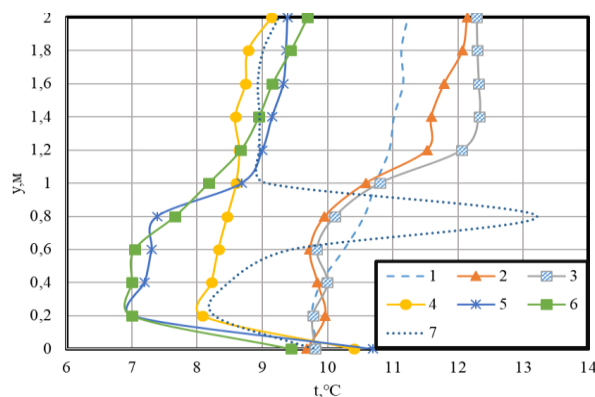


**Рис. 11.** Распределение температуры воздуха по сечению на расстоянии 20 см слева от панели через 1 час работы ГИИ для различных вариантов расположения отверстий системы воздухообмена: 1 – вариант 3; 2 – вариант 4; 3 – вариант 5; 4 – вариант 6; 5 – вариант 7; 6 – вариант 8; 7 – вариант 9

**Fig. 11.** Air temperature distribution over the section at a distance of 20 cm to the left of the panel after 1 hour of GIH operation for various options of the location of the air exchange system channels: 1 – variant 3; 2 – variant 4; 3 – variant 5; 4 – variant 6; 5 – variant 7; 6 – variant 8; 7 – variant 9

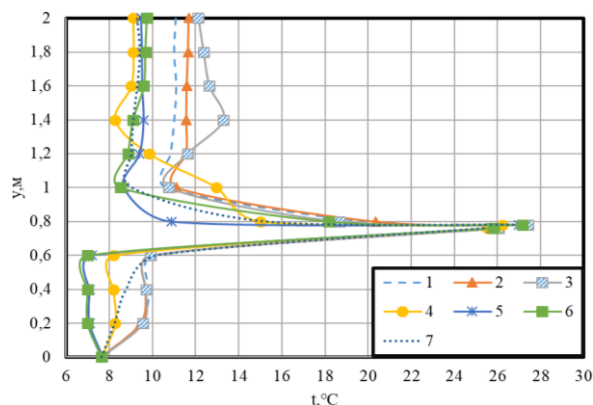
Хорошо видно (рис. 11), что, изменяя расположение отверстий каналов системы воздухообмена относительно локальной рабочей зоны, можно изменять температуру воздуха в зоне между оборудованием и левой вертикальной ограждающей конструкцией на 3–4 °С. Анализ результатов численного моделирования показывает, что положительный эффект (рост температуры) достигается вследствие использования теплоты газов, нагретых корпусом газового инфракрасного излучателя. Аналогичный вывод можно сделать и после анализа температур воздуха в локальной рабочей зоне справа от макета оборудования (рис. 12). Для всех вариантов расположения отверстий каналов системы воздухообмена температуры в характерных сечениях левой и правой рабочих зон различаются незначительно (не более 1 °С). Последнее иллюстрирует умеренное влияние левой вертикальной ограждающей конструкции (кирпичной стены) на температуры в прилегающей к этой конструкции локальной рабочей зоне.

Распределения  $t(y)$  в сечении, проходящем через ось симметрии зоны влияния ГИИ (над панелью), иллюстрируют возможность влияния оборудования на формирование теплового режима локальных рабочих зон. Панель, по существу, играет роль теплообменника, трансформирующего поступающую от ГИИ энергию в теплоту, аккумулируемую воздухом над панелью и затем передаваемую в локальные рабочие зоны слева и справа от панели.



**Рис. 12.** Распределение температуры воздуха на расстоянии 20 см справа от панели через 1 час работы ГИИ для различных вариантов расположения отверстий системы воздухообмена: 1 – вариант 3; 2 – вариант 4; 3 – вариант 5; 4 – вариант 6; 5 – вариант 7; 6 – вариант 8; 7 – вариант 9

**Fig. 12.** Air temperature distribution over the section at a distance of 20 cm to the right of the panel after 1 hour of GIH operation for various options of the location of the air exchange system channels: 1 – variant 3; 2 – variant 4; 3 – variant 5; 4 – variant 6; 5 – variant 7; 6 – variant 8; 7 – variant 9



**Рис. 13.** Распределение температуры воздуха на оси симметрии зоны влияния ГИИ ( $0 < Y < 2$  м) через 1 час работы ГИИ для различных вариантов расположения отверстий системы воздухообмена: 1 – вариант 3; 2 – вариант 4; 3 – вариант 5; 4 – вариант 6; 5 – вариант 7; 6 – вариант 8; 7 – вариант 9

**Fig. 13.** Air temperature distribution on the symmetry axis of the GIH influence zone ( $0 < Y < 2$  m) after 1 hour of GIH operation for various options of the location of the air exchange system channels: 1 – variant 3; 2 – variant 4; 3 – variant 5; 4 – variant 6; 5 – variant 7; 6 – variant 8; 7 – variant 9

### Заключение

Результаты выполненного численного моделирования процессов теплопереноса в условиях «лучистого» нагрева локальной рабочей зоны производственного помещения показали возможность управления процессами формирования теплового режима локальных рабочих зон, варьируя положения отверстий каналов системы воздухообмена.

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Energy-saving solution in the heating system of buildings / N. Kobelev, S. Emelyanov, V. Kretova, A. Morzhavin, V. Amelin, V. Kobelev // *Procedia Engineering*. – 2015. – V. 117. – P. 186–190.
2. Jezierski W., Sadowska B., Pawłowski K. Impact of changes in the required thermal insulation of building envelope on energy demand, heating costs, emissions, and temperature in buildings // *Energies*. – 2021. – V. 14. – Iss. 1. – Article number 14010056.
3. Energy saving potential for space heating in Chinese airport terminals: the impact of air infiltration / X. Liu, T. Zhang, X. Liu, L. Li, L. Lin, Y. Jiang // *Energy*. – 2021. – V. 215. – P. B. – Article number 119175.
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. – V. 66. – Article number 102659.
5. Gourelis G., Kovacic I. Building Information Modelling for analysis of energy efficient industrial buildings – a case study // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2017. – V. 68. – Pt. 2. – P. 953–963.
6. A real industrial building: modeling, calibration and Pareto optimization of energy retrofit / F. Ascione, N. Bianco, T. Iovane, G.M. Mauro, D.F. Napolitano, A. Ruggiano, L. Viscido // *Journal of Building Engineering*. – 2020. – V. 29. – Iss. 1. – Article number 101186.
7. 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.
8. Экспериментальное исследование системы отопления с инфракрасными излучателями / В.В. Бухмиров, Ю.С. Солнышкова, М.В. Пророкова, Н.Н. Болотских // *Вестник Ивановского государственного энергетического университета*. – 2011. – № 3. – С. 12–16.
9. Смыков А.А. Тепловой режим наружных ограждающих конструкций в зданиях с лучистыми системами отопления на базе инфракрасных излучателей // *Наука. Мысль: электронный периодический журнал*. – 2017. – № 5. – С. 5–8.
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. Бухмиров В.В., Крупенников С.А., Солнышкова Ю.С. Алгоритм расчета систем лучистого отопления помещений // *Вестник Ивановского государственного энергетического университета*. – 2010. – № 4. – С. 1–3.
12. Kurilenko N.I., Kurilenko E.Yu., Mamontov G.Ya. New approach to microclimate parameter selection for the production area with heat supply systems based on gas infrared radiators // *EPJ Web of Conferences*. – 2016. – V. 110. – Article number 01033.
13. Vösa K.-V., Ferrantelli A., Kurnitskaja J. A combined analytical model for increasing the accuracy of heat emission predictions in rooms heated by radiators // *Journal of Building Engineering*. – 2019. – V. 23. – P. 291–300.
14. Ghasemi M., Toghraye 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. – V. 32. – Article number 101677.
15. Thermal conditions of the local working area heated by a gas infrared heater under the mixed convection state / B.V. Borisov, V.I. Maksimov, T.A. Nagornova, A.V. Vyatkin // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2022. – V. 2211. – Article number 012022.
16. Heat transfer under conditions of operation of a gas infrared emitter and an air exchange system / B.V. Borisov, G.V. Kuznetsov, V.I. Maksimov, T.A. Nagornova, A.V. Vyatkin // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – V. 2057. – Article number 012125.
17. Анализ преимуществ систем обеспечения теплового режима локальных рабочих зон на основе газовых инфракрасных излучателей по сравнению с традиционными конвективными системами отопления / В.И. Максимов, Т.А. Нагорнова, Н.И. Куриленко, И.В. Волошко // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 9. – С. 128–141.
18. Experimental determination of the worker's clothing surface temperature during the ceramic gas heater operation / G.V. Kuznetsov, V.I. Maksimov, T.A. Nagornova, I.V. Voloshko, N.Y. Gutareva, N.I. Kurilenko // *Thermal Science and Engineering Progress*. – 2021. – V. 22. – Article number 100851.
19. DOE Fundamentals handbook – thermodynamics, heat transfer and fluid flow. – USA: US Department of Energy, 2016. – V. 2. – 80 p.
20. Hesaraki 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. – V. 49. – Article number 101661.

Поступила: 25.11.2022 г.

Прошла рецензирование: 08.01.2023 г.

## Информация об авторах

**Борисов Б.В.**, доктор физико-математических наук, профессор НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Вяткин А.В.**, аспирант НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Кузнецов Г.В.**, доктор физико-математических наук, профессор НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Максимов В.И.**, кандидат технических наук, доцент НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Нагорнова Т.А.**, кандидат технических наук, доцент НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.



UDC 62-6

## 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

**Boris V. Borisov<sup>1</sup>,**  
bvborisov@tpu.ru

**Alexander V. Vyatkin<sup>1</sup>,**  
avv47@tpu.ru

**Geniy V. Kuznetsov<sup>1</sup>,**  
kuznetsovgv@tpu.ru

**Vyacheslav I. Maksimov<sup>1</sup>,**  
elf@tpu.ru

**Tatiana A. Nagornova<sup>1</sup>,**  
tania@tpu.ru

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**The relevance.** The most promising option for an energy-efficient system for ensuring the scheduled thermal regime of local workplaces, which occupy a small area in large workshops, are the so-called «radiant» heating systems, the main part of which are gas infrared heaters. The main role in the formation of the thermal conditions of the local working area is played by the process of mixed convection (the air movement due to its heating by enclosing structures and flows that form the air exchange system). The analysis of the influence of the location of the air exchange system channels on the thermal regime of the local working area using a gas infrared emitter has not been performed so far.

**The main aim** of the research is to analyze the influence of the position of the air exchange system's openings channels on the temperature fields of local working areas near the equipment model based on the results of mathematical modeling.

**Objects:** heating system using high-intensity gas infrared heater and air exchange system.

**Methods.** Mathematical modeling was carried out within the framework of a two-dimensional model of conjugate heat transfer using the finite element method. The modules «The Heat Transfer in Fluids Interface», «Surface-to-Surface Radiation» and «The Turbulent Flow,  $k$ - $\epsilon$  Interface» of the COMSOL Multiphysics software environment were used for the numerical analysis of heat transfer processes.

**Results.** The paper introduces the results of mathematical modeling carried out to determine the influence of the position of the air exchange system's channels on the temperature fields and the possibility of controlling the process of a scheduled thermal regime formation in local working areas when using a gas infrared heater. The temperatures and velocities fields, as well as the air temperature distribution along the height of the local working area for various options of the air exchange system's inflow and outflow areas location are presented. Based on the results of the research, the main regularities of the processes of heat and mass transfer under the considered conditions were revealed. The possibility of controlling the processes of thermal regime formation of local working areas by varying the air exchange system channels position was also revealed.

### Key words:

gas infrared heater, heat supply object, local working area, thermal conditions, convective heat transfer.

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

### REFERENCES

1. Kobelev N., Emelyanov S., Kretova V., Morzhavin A., Amelin V., Kobelev V. Energy-saving solution in the heating system of buildings. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 117, pp. 186–190.
2. Jezierski W., Sadowska B., Pawłowski K. Impact of changes in the required thermal insulation of building envelope on energy demand, heating costs, emissions, and temperature in buildings. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 1, Article number 14010056.
3. Liu X., Zhang T., Liu X., Li L., Lin L., Jiang Y. Energy saving potential for space heating in Chinese airport terminals: The impact of air infiltration. *Energy*, 2021, vol. 215, P. B, Article number 119175.
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, Article number 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, P. 2, pp. 953–963.
6. Ascione F., Bianco N., Iovane T., Mauro G.M., Napolitano D.F., Ruggiano A., Viscido L. A real industrial building: modeling, calibration and Pareto optimization of energy retrofit. *Journal of Building Engineering*, 2020, vol. 29, Article number 101186.
7. Redko A.F., Bolotskikh N.N. Sovershenstvovanie sistem otopeniya proizvodstvennykh pomeshcheniy gazovymi trubchatymi infrakrasnymi nagrevatelyami [Improving heating systems for industrial premises with gas tubular infrared heaters]. *Energoberezhenie. Energetika. Energoaudit*, 2010, vol. 74, no. 4, pp. 36–47.
8. Bukhmirov V.V., Solnyshkova Yu.S., Prorokova M.V., Bolotskikh N.N. Experimental research of heating system with infrared emitters. *Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*, 2011, no. 3, pp. 12–16. In Rus.
9. Smykov A.A. Thermal regime of external enclosing constructions in buildings with lumid heating systems based on infrared radiators. *Science. Thought: electronic periodic journal*, 2017, no. 5, pp. 5–8. In Rus.
10. Kurilenko N.I., Chekardovskiy M.N., Mikhaylova L.Yu., Ermolaev A.N. Povyshenie koeffitsienta poleznogo deystviya luchistoy

- sistemy otopeniya s primeneniem v kachestve otopitelnykh priborov «svetlykh» gazovykh infrakrasnykh izluchateley [Increasing the efficiency of a radiant heating system using «light» gas infrared heaters as heating devices]. *Inzhenerny vestnik Dona*, 2015, vol. 38, no. 4, pp. 73–82.
11. Bukhmirov V.V., Krupennikov S.A., Solnyshkova Yu.S. Algorithm for solution of radiant heating premises systems. *Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*, 2010, no. 4, pp. 1–3. In Rus.
  12. Kurilenko N.I., Kurilenko E.Yu., Mamontov G.Ya. New approach to microclimate parameter selection for the production area with heat supply systems based on gas infrared radiators. *EPJ Web of Conferences*, 2016, vol. 110, Article number 01033.
  13. 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, pp. 291–300.
  14. 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, Article number 101677.
  15. Borisov B.V., Maksimov V.I., Nagornova T.A., Vyatkin A.V. Thermal conditions of the local working area heated by a gas infrared heater under the mixed convection state. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, vol. 2211, Article number 012022.
  16. Borisov B.V., Kuznetsov G.V., Maksimov V.I., Nagornova T.A., Vyatkin A.V. Heat transfer under conditions of operation of a gas infrared emitter and an air exchange system. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 2057, Article number 012125.
  17. Maksimov V.I., Nagornova T.A., Kurilenko N.I., Voloshko I.V. Advantage analysis of systems for ensuring local working zones thermal conditions based on gas infrared emitters in comparison with traditional convective heating systems. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 9, pp. 128–141. In Rus.
  18. Kuznetsov G.V., Maksimov V.I., Nagornova T.A., Voloshko I.V., Gutareva N.Y., Kurilenko N.I. Experimental determination of the worker's clothing surface temperature during the ceramic gas heater operation. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2021, vol. 22, Article number 100851.
  19. *DOE Fundamentals handbook – thermodynamics, heat transfer and fluid flow*. USA, US Department of Energy, 2016. Vol. 2, 80 p.
  20. Hesaraki 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, Article number 101661.

Received: 25 November 2022.

Reviewed: 8 January 2023.

#### Information about the authors

**Boris V. Borisov**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Alexander V. Vyatkin**, postgraduate, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Geniy V. Kuznetsov**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Vyacheslav I. Maksimov**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Tatiana A. Nagornova**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.