

## Тепловые режимы локальных рабочих зон крупногабаритных производственных помещений при нагреве газовыми инфракрасными излучателями\*

Кузнецов Г. В., доктор физ.-мат. наук,  
Максимов В. И., Нагорнова Т. А., кандидаты техн. наук

**Национальный исследовательский Томский политехнический университет**

Куриленко Н. И., канд. физ.-мат. наук

**Тюменский государственный архитектурно-строительный университет**

Мамонтов Г. Я., доктор физ.-мат. наук

**Томский государственный архитектурно-строительный университет**

Представлены результаты математического моделирования процессов теплопереноса в режиме свободной конвекции с использованием модели сопряженного теплообмена. В качестве источника нагрева рассмотрены газовые инфракрасные излучатели, расположенные горизонтально в верхней части области моделирования. Установлены существенные неоднородность и нестационарность температурных полей в рабочей зоне, обусловленные в значительной мере теплоотводом в ограждающие вертикальные конструкции. Проведена оценка влияния материала ограждающих конструкций на энергозатраты при отоплении помещений.

**Ключевые слова:** инфракрасные излучатели, температурные поля, сопряженный теплоперенос, радиационный источник нагрева, численное моделирование, турбулентная естественная конвекция.

Перспективность использования газовых инфракрасных излучателей (ГИИ) для обеспечения тепловых режимов локальных рабочих участков крупногабаритных цехов и других производственных помещений достаточно очевидна [1, 2]. Но пока нет оснований для выводов о широком применении таких систем отопления. Одной из возможных причин ограниченного использования ГИИ в промышленности является, вероятно, отсутствие методов расчета таких систем теплоснабжения, опирающихся на учитывающие все основные значимые факторы математические модели теплопереноса в системе “ГИИ — ограждающие конструкции — воздух”. До настоящего времени не опубликованы результаты экспериментальных или теоретических исследований температурных полей в зонах нагрева ГИИ. Среди многих вопросов, возникающих у перспективных пользователей таких систем теплоснабжения, вероятно, одними из наиболее острых представляются вопросы об энергоэффективности ГИИ, однородности и стационарности температурных полей в зонах подвода теплоты при работе излучателей.

Специфика отопления локальных участков территорий цехов газовыми инфракрасными излучателями заключается в следующем. Энергия излучения, поступающая от ГИИ, поглощается приповерхностными слоями ограждающих конструкций, и температура их растет. Наиболее целесообразна аккумуляция энергии материалом пола помещения. Тогда естественная (или смешанная) конвекция в дальнейшем обеспечивает необходимый режим зоны нагрева. При этом возникает вопрос о целесообразности решения задачи конвективного теплопереноса с учетом теплоотвода в ограждающие конструкции. Как правило, локальные рабочие зоны выбирают таким образом, чтобы избежать больших потерь теплоты вследствие ее отвода из зоны нагрева, т. е. вблизи вертикальных ограждающих конструкций (стен).

Кроме того, практически значимым является вопрос о целесообразности моделирования температурных полей в зоне нагрева с использованием сложных моделей на базе нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных. В строительной теплофизике многие задачи анализа тепловых режимов объектов теплоснабжения решаются с использованием простых балансных моде-

\* Работа выполнена в рамках Госзадания “Наука” (шифр федеральной целевой научно-технической программы 7.3073.2011).

лей в виде систем обыкновенных дифференциальных уравнений, не учитывающих возможную пространственную неоднородность температурных полей области нагрева.

Цель данной статьи — анализ тепловых режимов области, нагреваемой газовыми инфракрасными излучателями, и оценка влияния ограждающих конструкций на энергозатраты.

Процесс теплопереноса рассчитывали в области, схема которой приведена на рис. 1. Для упрощения анализа предполагали, что ГИИ расположены на верхней границе области нагрева. На практике они могут быть смещены по вертикали вниз на расстояние, минимизирующее потери теплоты при отводе в чердачные перекрытия или, например, через крышу. Рассматривали два варианта постановки задачи: 1) ограждающие конструкции (2 и 3) изготовлены из железобетона (наиболее распространенный вариант); 2) горизонтальные ограждающие конструкции 2 выполнены из железобетона, а вертикальные 3 — из материала с существенно более низкой по сравнению с железобетоном теплопроводностью и меньшей объемной теплоемкостью (пенобетон). Принимали, что вся поступающая от ГИИ энергия аккумулируется в приповерхностном слое напольного покрытия, а воздух — абсолютно прозрачная среда, не поглощающая и не рассеивающая излучение.

Для описания процесса сопряженного теплопереноса в области решения задачи в качестве базовой использовали математическую модель [3–5], разработанную для описания теплопереноса в замкнутой воздушной области с ограждающими стенками и локальным источником энергии. Отличие рассматриваемой задачи от модели [3–5] заключалось в использовании граничных условий  $Y = H_n$  (см. рис. 1), учитывающих лучистый поток от ГИИ.

Система уравнений, описывающих процесс теплопереноса в рассматриваемых условиях, включает в себя уравнения Навье — Стокса, записанные в преобразованных переменных (“функция тока” — “вихрь скорости”) [3–5], и уравнения энергии для каждого элемента области решения задачи (см. рис. 1). На внутренних границах области моделирования записывали граничные условия четвертого рода для уравнения энергии, на внешних — условия теплоизоляции [3–5]. Для переменных “функция тока”  $\psi$  и “вихрь скорости”  $\omega$

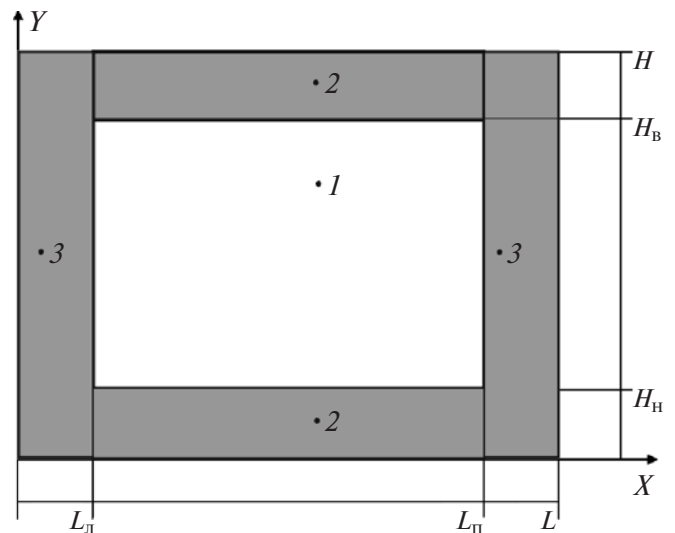


Рис. 1. Область решения рассматриваемой задачи:

1 — воздух; 2 — ограждающие конструкции из бетона; 3 — ограждающие конструкции из современного строительного материала с малым коэффициентом теплопроводности;  $H$  — высота области решения;  $L$  — ширина области решения;  $H_n$ ,  $H_v$  и  $L_l$ ,  $L_p$  — нижняя, верхняя, левая и правая границы раздела воздуха и ограждающих конструкций

на границах раздела сред записывали аналогичные [5] граничные условия. Моделировали турбулентную конвекцию воздуха в рамках приближения алгебраической модели турбулентности [6].

Система дифференциальных уравнений в частных производных решена методом конечных разностей [7] с использованием алгоритма [3–5], разработанного для решения задач естественной конвекции в замкнутых областях с локальными источниками энергии и развитого в дальнейшем при решении задач естественной и смешанной конвекции смеси горючего вещества и окислителя при зажигании жидких топлив в условиях локального нагрева [8–10]. Задача решена в безразмерной постановке.

На рис. 2 и 3 представлены результаты численного моделирования (соответственно для первого и второго вариантов), иллюстрирующие основные закономерности теплопереноса в рассматриваемой системе отопления с использованием газовых инфракрасных излучателей, в переменных: “безразмерная температура” ( $a$ ,  $\vartheta$ ) и “функция тока” ( $b$ ,  $z$ ) при различных значениях безразмерного времени  $\tau$ . В качестве масштабных значений температуры и времени использовали  $T_m = 323$  К и  $\tau = 0,1$  с.

Представленные на рис. 2 и 3 поля температур и изолинии “функции тока” довольно типичны для основных диапазонов изме-

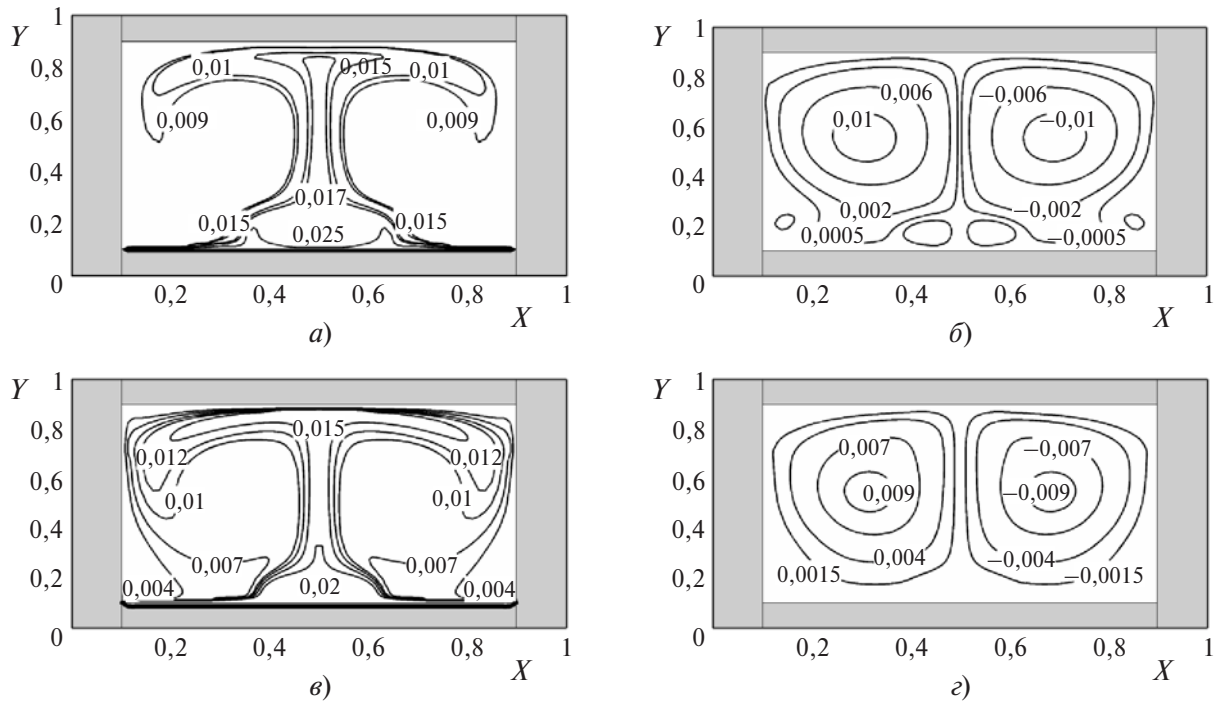


Рис. 2. Поля температур (а, в) и изолинии “функции тока” (б, г) для модели естественной конвекции в замкнутой области, ограниченной конструкциями из железобетона при  $\tau = 10\,000$  (а, б) и  $\tau = 40\,000$  (в, г)

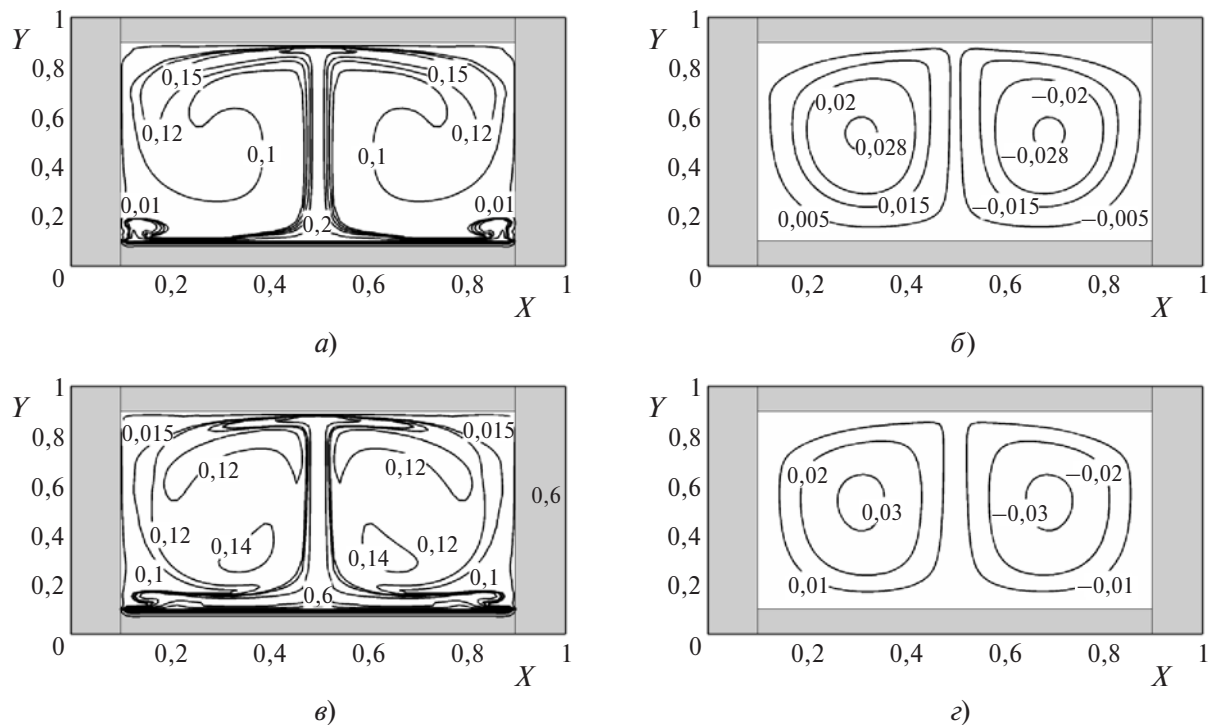


Рис. 3. Поля температур (а, в) и изолинии “функции тока” (б, г) для модели естественной конвекции в замкнутой области, ограниченной вертикальными конструкциями из пенобетона при  $\tau = 10\,000$  (а, б) и  $\tau = 40\,000$  (в, г)

нения условий и характерных размеров области нагрева. Анализ полученных теоретических результатов позволяет сделать ряд выводов об основных закономерностях рассматриваемого процесса. Например, следует

отметить существенную неоднородность полей температур в области анализа. Наибольшие значения  $T$  достигаются на поверхности нагреваемого пола. По мере удаления от этой границы температура воздуха

падает и снижается почти в 3 раза в зоне, прилегающей к вертикальной ограждающей конструкции. Сравнение рис. 2 (а, в) и рис. 3 (а, в) показывает, что теплопроводность вертикальных стенок оказывает значительное влияние как на абсолютные значения температур, так и на интенсивность конвекции в зоне нагрева. При вертикальных стенках из пенобетона интенсивность циркуляции воздуха возрастает более чем в 3 раза, соответственно перепады температур как по вертикальной, так и по горизонтальной координатам снижаются более чем в 2 раза по сравнению с железобетонными ограждающими конструкциями. Равномерность прогрева рабочей зоны при этом существенно увеличивается.

Можно сделать заключение о том, что снижение интенсивности теплоотвода из рабочей зоны в вертикальные ограждающие конструкции приводит не только к повышению абсолютных температур воздуха, но и к значимому снижению градиентов температуры по координатным направлениям  $X$  и  $Y$ .

С целью оценки влияния ограждающих конструкций на энергозатраты выполнен расчет количества теплоты, аккумулированной вертикальными ограждающими конструкциями из железобетона ( $Q_1$ ) и пенобетона ( $Q_2$ ), для двух рассматриваемых вариантов с использованием полученных при решении задачи температурных полей. Как видно из таблицы, тепловая энергия, аккумулированная в вертикальных ограждающих конструкциях из современного строительного материала с низкой теплопроводностью, значительно меньше. Следовательно, применение, например, пенобетона в качестве строительного материала позволит снизить мощность излучателя (ГИИ) и затраты на обогрев помещений. Можно сделать вывод и о существенной нестационарности рассматриваемого процесса. В интервале характерных значений времени от 1000 до 4000 с температура воздуха изменяется на 5,2 К.

Анализ результатов численного моделирования температурных полей рабочей зоны, нагреваемой ГИИ, показывает, что для обоснованного выбора параметров таких нагревательных приборов будет недостаточно простых балансных моделей [11], применяемых, например, в строительной теплофизике. Балансные модели на основе систем алгебраических уравнений или обыкновенных дифференциальных уравнений [11] не описывают

$\tau \cdot 10^{-3}$	$Q_1$ , Дж	$Q_2$ , Дж
10	345,71	72,87
20	635,83	194,45
30	969,8	332,42
40	1251,9	491,05
50	1670,3	674,74
60	2018,8	868,8
70	2366,5	1105,5

распределений температур и тепловых потоков в воздушном пространстве (см. рис. 2, 3) рабочей зоны в условиях сопряженного теплопереноса за счет конвекции и теплопроводности. Поэтому конструкторская проработка систем локального теплоснабжения рабочих зон крупногабаритных производственных помещений возможна только с использованием моделей [3 – 5] на базе систем нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных, учитывающих пространственный (или, как минимум, плоский) теплоперенос в области нагрева.

Таким образом, полученные на основе теоретического анализа основных закономерностей теплопереноса в рабочих зонах помещений с газовыми инфракрасными излучателями в качестве источников нагрева результаты не только иллюстрируют нестационарность и неоднородность температурных полей объекта анализа. Они также наглядно демонстрируют возможные направления развития моделей сопряженного теплопереноса в замкнутых областях [3 – 8] с целью создания инструмента анализа конструкторских и проектных решений при разработке систем локального теплоснабжения в крупногабаритных производственных помещениях на базе газовых инфракрасных излучателей.

#### Список литературы

1. Давлятчин Р. Р., Куриленко Н. И. Лучисто-конвективный теплообмен газовых инфракрасных излучателей с многослойной конструкцией кровли. — Приволжский научный журнал, 2009, № 2.
2. Куриленко Н. И., Давлятчин Р. Р. Теплообмен газовых инфракрасных излучателей с многослойной конструкцией кровли. — Вестник ТГАСУ, 2009, № 4.
3. Кузнецов Г. В., Шеремет М. А. Сопряженный теплоперенос в замкнутой области с локально сосре-

- доточенным источником тепловыделения. — Инженерно-физический журнал, т. 79, 2006, № 1.
4. **Кузнецов Г. В., Шеремет М. А.** Двумерная задача естественной конвекции в прямоугольной области при локальном нагреве и теплопроводных границах конечной толщины. — Известия РАН. Механика жидкости и газа, 2006, № 6.
  5. **Кузнецов Г. В., Шеремет М. А.** Об одном подходе к математическому моделированию тепловых режимов радиоэлектронной аппаратуры и электронной техники. — Микроэлектроника, т. 37, 2008, № 2.
  6. **Белов И. А., Исаев С. А.** Моделирование турбулентных течений: Учеб. пособие. — СПб.: Балтийский государственный технический университет, 2001.
  7. **Самарский А. А.** Теория разностных схем. — М.: Наука, 1977.
  8. **Кузнецов Г. В., Стрижак П. А.** Моделирование воспламенения жидкого вещества горячей частицей. — Химическая физика, т. 28, 2009, № 5.
  9. **Кузнецов Г. В., Стрижак П. А.** Зажигание накаленной одиночной частицей жидких углеводородных топлив. — Изв. Томского политехнического университета, т. 312, 2008, № 4.
  10. **Кузнецов Г. В., Стрижак П. А.** Нагретые до высоких температур частицы металлов как источники локальных возгораний жидких веществ. — Пожарная безопасность, 2008, № 4.
  11. **Табунщиков Ю. А., Бродач М. М.** Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий. — М.: АВОК-ПРЕСС, 2002.

[tania@tpu.ru](mailto:tania@tpu.ru)