

УДК 62-6
DOI: 10.18799/24131830/2024/12/4865
Шифр специальности ВАК: 2.4.6

Инженерный метод оценки температуры и динамики ее изменения при отоплении помещения системой на основе газового инфракрасного излучателя

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

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉bvborisov@tpu.ru

Аннотация. Актуальность. Работа любых систем отопления обусловлена взаимосвязью множества различных физических процессов. В последнее время для отопления помещений значительного объема все чаще предлагается использовать системы отопления на основе газовых инфракрасных излучателей различной конструкции. Подобные системы наиболее актуальны для больших промышленных помещений, так как они способны создавать благоприятные условия жизнедеятельности и труда в локальной рабочей зоне без серьезных затрат на обогрев остальной части помещения. При проектировании сложных систем важным фактором является использование простых соотношений для оценки тенденций средних величин параметров, направленных на достижение необходимого результата. Появляется необходимость задания основных безразмерных критериев, определяющих в рамках теории подобия тот или иной процесс. **Цель:** формулирование основных соотношений и безразмерных критериев для аналитической инженерной оценки осредненных по объему помещения температуры и динамики ее изменения при отоплении помещения системой на основе газовых инфракрасных излучателей. **Объект:** система отопления с использованием газового инфракрасного излучателя. **Методы:** математическое моделирование проведено в рамках 0D математической постановки. **Результаты.** На основе 0D-подхода формулируются основные соотношения и безразмерные критерии для аналитической оценки температуры и динамики ее изменения при отоплении помещения системой на основе газового инфракрасного излучателя. Приводятся результаты расчетов по полученным соотношениям в сравнении с результатами расчетов по полной 0D-модели, которые верифицированы на результатах 2D-моделирования и экспериментальных измерений.

Ключевые слова: математическое моделирование, тепловой режим, газовый инфракрасный излучатель, объект теплоснабжения, тепломассообмен, модифицированное число Био

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

Для цитирования: Инженерный метод оценки температуры и динамики ее изменения при отоплении помещения системой на основе газового инфракрасного излучателя / Б.В. Борисов, А.В. Вяткин, В.И. Максимов, Т.А. Нагорнова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 12. – С. 99–106. DOI: 10.18799/24131830/2024/12/4865

UDC 62-6
DOI: 10.18799/24131830/2024/12/4865

Engineering method of assessing temperature and the dynamics of temperature change in the premise heated by a system based on a gas infrared heater

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

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉bvborisov@tpu.ru

Abstract. Relevance. The operation of any heating systems is determined by the interrelationship of many physical processes. Recently, for heating large premises, it has been increasingly proposed to use heating systems based on gas infrared heaters of various designs. Such systems are most relevant for large industrial premises, as they are capable of creating favorable living and working conditions in a local work area without significant costs for heating the rest of the premise. When designing complex systems, an important factor is the use of simple relationships to assess the trends of average values of parameters aimed at achieving the desired result. There is a need to set the main dimensionless criteria that determine a particular process within the framework of similarity theory. **Aim.** To state the basic relationships and dimensionless criteria for analytical engineering assessment of the average temperature over the volume of a premise and the dynamics of its change during heating the premise by a system based on the gas infrared heaters. **Objects.** Heating system with gas infrared heaters. **Methods.** Mathematical modeling was carried out within the framework of a 0D mathematical formulation. **Results.** The authors have stated the main relationships and dimensionless criteria for the analytical assessment of temperature and the dynamics of its change during heating of the premise by a system based on a gas infrared heater on the basis of the approach averaged over the entire volume of the premise. The results of calculations according to the obtained relationships are presented in comparison with the results of calculations according to the full 0D model, which are verified on the results of 2D modeling and experimental measurements.

Keywords: mathematical modeling, thermal regime, gas infrared heater, heat supply object, heat and mass transfer, modified Bio number

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Science Foundation (grant number 20-19-00226).

For citation: Borisov B.V., Vyatkin A.V., Maksimov V.I., Nagornova T.A. Engineering method of assessing temperature and the dynamics of temperature change in the premise heated by a system based on a gas infrared heater. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 12, pp. 99–106. DOI: 10.18799/24131830/2024/12/4865

Введение

Процесс создания инженерных систем сопровождается требованиями достижения высокой эффективности их работы по соотношению между получаемыми результатами и понесенными затратами с учетом наименьшего возможного вреда окружающей среде [1–4]. В последнее время для отопления помещений значительного объема все чаще предлагается использовать системы отопления на основе газовых инфракрасных излучателей (ГИИ) [5–8]. Последние обладают преимуществами быстрого создания комфортных температур для жизнедеятельности человека в рабочих локальных зонах без серьезных затрат на обогрев остальной части помещения [9, 10]. Подобные системы наиболее актуальны для промышленных помещений [11–15]. Помимо этого, системы лучистого отопления на основе газовых инфракрасных излучателей можно использовать для обогрева рабочих зон на открытом воздухе [16]. Для оценки формирования таких комфортных рабочих зон привлекаются как экспериментальные [7], так и сложные численные исследования [17–20]. Однако при проектировании любой системы, работа которой обуславливается многими взаимовлияющими процессами, важен первый шаг с использованием простых соотношений, оценивающих (может быть не так точно) основные тенденции изменения средних величин параметров, направленных на достижение необходимого результата. Появляется необходимость задания основных безразмерных критериев, определяющих в рамках теории подобия тот или иной процесс. Так, число Био (Bi) и число Фурье (Fo) необходимы для анализа процесса нестационарного

нагрева объекта при наличии в нем только процесса теплопроводности с наличием теплообмена с окружающей средой [17].

Математическая модель

Рассматриваемый процесс нагрева помещения системой на основе ГИИ с учетом работающей системы воздухообмена намного сложнее процесса нестационарной теплопроводности благодаря большому количеству процессов, определяющих распространение теплоты и формирующих температурное поле. Используется подход в 0D математической постановке [18]. Обозначим мощность тепловыделения ГИИ, лучистый КПД и долю от лучистого потока, идущего на нагрев воздушной массы [17], соответственно, Q , η_R , η_z .

Используем нижний индекс «g» для обозначения параметров, относящихся к массе воздуха, «s» – для массы ограждающих конструкций (пол, потолок, стены). Верхний индекс «V» означает, теплоемкость определяется по всему объему воздуха или ограждающих конструкций:

$$C_g^V = (c\rho V)_g, C_s^V = (c\rho V)_s, C_{Ven} = c_g G_{Ven},$$

где c , ρ , V , G_{Ven} – соответственно, удельная теплоемкость ($\text{Дж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), плотность ($\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$), объем (м^3), массовый расход системы воздухообмена ($\text{кг}/\text{с}$).

Тепловые потоки, поступающие непосредственно от ГИИ к воздуху и ограждающим конструкциям, определяются, соответственно, следующими соотношениями:

$$Q_g = (1 - \eta_R)Q + \eta_R\eta_z Q, Q_z = (1 - \eta_z)\eta_R Q.$$

Считается, что коэффициенты теплоотдачи между воздухом внутри помещения и ограждающими конструкциями равны $\alpha_g = \alpha = \text{const}$, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$, а коэффициент теплоотдачи между ограждающими конструкциями и окружающей средой $\alpha_{out} = k\alpha = \text{const}$, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$. Полагается, что поверхности теплообмена ограждающих конструкций внутри (F_s) и снаружи (F_{out}) помещения равны: $F_s = F_{out} = F$, м^2 . Обозначим: $\Phi = \alpha F$, $\text{Вт} \cdot \text{К}^{-1}$. В рамках сделанных допущений система, описанная в работе [19], для определения осредненных температур воздуха (t_g , $^{\circ}\text{C}$), ограждающих конструкций (t_s , $^{\circ}\text{C}$) с учетом температуры вне помещения (t_{out} , $^{\circ}\text{C}$) в терминах перегрева ($\theta = t - t_{out}$) записывается следующим образом:

$$\begin{cases} C_g \frac{d\theta_g}{d\tau} = Q_g - (\Phi + C_{ven})\theta_g + \Phi\theta_s; \\ C_s \frac{d\theta_s}{d\tau} = Q_s + \Phi\theta_g - (1+k)\Phi\theta_s. \end{cases}$$

Нахождение решения и формирование основных критериев процесса

Считается, что начальные температуры воздуха и стен одинаковы и $\theta_{g0} = \theta_{s0} = \theta_0$.

При бесконечном процессе нагрева наступает стационарный режим, который характеризуется следующими соотношениями для максимальных значений θ_g^* , θ_s^* :

$$\begin{cases} 0 = Q_g - (\Phi + C_{ven})\theta_g^* + \Phi\theta_s^*; \\ 0 = Q_s + \Phi\theta_g^* - (1+k)\Phi\theta_s^*. \end{cases}$$

Далее исключается θ_s^* и определяется θ_g^* , а исключив θ_g^* , определяется θ_s^* :

$$\begin{aligned} \theta_g^* &= \frac{1}{\Phi} \cdot \frac{(1+k)Q_g + Q_s}{k + (1+k)\frac{C_{ven}}{\Phi}}, \\ \theta_s^* &= \frac{1}{\Phi} \cdot \frac{Q_g + Q_s \cdot \left(1 + \frac{C_{ven}}{\Phi}\right)}{k + (1+k)\frac{C_{ven}}{\Phi}}. \end{aligned} \quad (1)$$

Полагается, что решение для температур имеет вид:

$$\begin{aligned} \theta_g &= \theta_g^* + (\theta_0 - \theta_g^*) \cdot \exp(-\mu_g \cdot \tau), \\ \theta_s &= \theta_s^* + (\theta_0 - \theta_s^*) \cdot \exp(-\mu_s \cdot \tau). \end{aligned} \quad (2)$$

Коэффициенты μ_g и μ_s имеют смысл обратных величин масштабов времени для, соответственно,

объема газа и ограждающих конструкций. Их значения находятся при решении системы уравнений при $\tau=0$ с, когда экспоненты имеют значения единицы:

$$\begin{cases} -(\theta_0 - \theta_g^*) \cdot \mu_g \cdot C_g = Q_g - (\Phi + C_{ven})\theta_g + \Phi\theta_s; \\ -(\theta_0 - \theta_s^*) \cdot \mu_s \cdot C_s = Q_s + \Phi\theta_g - (1+k)\Phi\theta_s, \end{cases} \quad (3)$$

$$\mu_g = \frac{1}{C_g} \cdot \frac{Q_g - C_{ven} \cdot \theta_0}{\theta_g^* - \theta_0}, \quad \mu_s = \frac{1}{C_s} \cdot \frac{Q_s - k \cdot \Phi \cdot \theta_0}{\theta_s^* - \theta_0}. \quad (4)$$

Преобразуем выражения (3), (4) с учетом (1) и дополнительных обозначений:

$$\begin{aligned} \frac{V}{F} &= L, \quad \frac{\alpha L}{\lambda} \cdot \frac{a\tau}{L^2} = \text{Bi} \cdot \text{Fo}, \quad \xi = \frac{C_{ven}}{\Phi}, \\ Q_{g0} &= Q_g - C_{ven} \cdot \theta_0, \quad Q_{s0} = Q_s - \Phi \cdot \theta_0. \end{aligned} \quad (5)$$

Физический смысл безразмерной величины ξ – соотношение между теплообменом системы и теплопотерями в окружающую среду; Q_{s0} – тепловой поток в начальный момент времени, изменяющий температуру ограждающих конструкций с учетом теплообмена с воздухом помещения, Вт, а Q_{g0} – суммарный тепловой поток в начальный момент времени, изменяющий температуру воздуха, Вт. Данное выражение для Q_{g0} учитывает то, что из-за $\theta_{s0} = \theta_{g0}$ теплопотери воздуха в ограждающие конструкции отсутствуют. Учитывая это $\mu_g \tau$ записывается следующим образом:

$$\mu_g \cdot \tau = \text{Bi}_g \cdot \frac{k + (1+k)\xi}{1 + k + \frac{Q_{s0}}{Q_{g0}}} \cdot \text{Fo}_g = \text{Bi}_g^* \cdot \text{Fo}_g.$$

Следуя вышеприведенной логике (5), обозначая тепловой поток в начальный момент времени, изменяющий температуру ограждающих конструкций с учетом теплообмена с окружающей средой как $Q_{s0}^k = Q_s - k\Phi\theta_0$, окончательно получим:

$$\mu_s \cdot \tau = \text{Bi}_s \cdot \frac{k + (1+k)\xi}{1 + \xi + \frac{Q_{g0}}{Q_{s0}^k}} \cdot \text{Fo}_s = \text{Bi}_s^* \cdot \text{Fo}_s.$$

Приведем (2) к безразмерному виду:

$$\begin{aligned} \Theta_g &= \frac{\theta_g - \theta_g^*}{\theta_0 - \theta_g^*} = e^{-\mu_g \cdot \tau} = e^{-\text{Bi}_g^* \cdot \text{Fo}_g}, \\ \Theta_s &= \frac{\theta_s - \theta_s^*}{\theta_0 - \theta_s^*} = e^{-\mu_s \cdot \tau} = e^{-\text{Bi}_s^* \cdot \text{Fo}_s}. \end{aligned} \quad (6)$$

В данных соотношениях используются модифицированные числа Био для массы воздуха помещения Bi_g^* и для массы ограждающих конструкций Bi_s^* .

Анализ полученного решения

Анализ процесса теплопереноса проводится для помещения с системой воздухообмена и ГИИ, параметры которых соответствуют используемым в работах [10–12, 17–19]. Помещение имеет размеры: ширина×длина×высота=5×10×4,4 м ($V_g=220 \text{ м}^3$, $V_s=24,8 \text{ м}^3$, $F=232 \text{ м}^2$). Ограждающие конструкции – пол, потолок и стены – имеют одинаковую толщину 0,1 м, изготовлены из одного и того же материала (бетон) с теплофизическими параметрами, представленными в табл. 1.

Таблица 1. Теплофизические свойства материалов ограждающих конструкций

Table 1. Thermophysical properties of building enclosing structures

Материал Material	Плотность, кг м ⁻³ Density, kg m ⁻³	Теплоемкость, Дж кг ⁻¹ К ⁻¹ Heat capacity, J kg ⁻¹ K ⁻¹
Бетон Concrete	2500	880

Описанные выше характеристики поступление теплоты от ГИИ, лучистый КПД, массовый поток системы воздухообмена и использующиеся в расчетах начальные значения температур воздуха и ограждающих конструкций полагаются равными, соответственно: $Q=5 \text{ кВт}$, $\eta_R=0,57$, $G_{ven}=0,01 \text{ кг/с}$, $t_0=t_{out}=t_{ven}=10 \text{ °C}$. Значение коэффициента конвективной теплоотдачи для внутренних поверхностей помещения полагается равным $\alpha_g=3,0 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$, что соответствует его среднему по времени значению для процесса прогрева, рассмотренного в работе [19]. Для внешних поверхностей полагается $\alpha_{out}=10 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$, то есть параметр, показывающий разницу α_g и α_{out} , полагается равным $k=3,3$. Для воздуха используются теплофизические параметры, представленные в табл. 2.

Таблица 2. Теплофизические свойства воздуха

Table 2. Thermophysical properties of air

ρ_g , кг м ⁻³ kg m ⁻³	c_{pg} , Дж кг ⁻¹ К ⁻¹ J kg ⁻¹ K ⁻¹	λ_g , Вт К ⁻¹ м ⁻¹ W K ⁻¹ m ⁻¹
1,244	1010	0,026

Для сравнительного анализа динамики осредненной температуры во времени использовались результаты, подтвержденные термопарными измерениями и результатами 2D-моделирования [18].

Как показывает анализ полученных максимальных значений осредненных по объему помещения температур газа t_g и ограждающих конструкций t_s , на их значение существенное влияние оказывает доля радиационного теплового потока, идущего непосредственно в газ η_g .

Значения t_g^* , t_s^* незначительно (<2,5 °C) отличаются от значений t_g , t_s , поскольку для определения и тех и других используется практически совпадающие балансные соотношения для тепловых потоков. Разница внутри соответствующих пар температур (t_g^* , t_g) и (t_s^* , t_s) возникает вследствие того, что при определении t_g , t_s используется переменное, зависящее от величины $\text{abs}(t_g - t_s)$ значение коэффициента теплоотдачи α_g и небольшое различие между внутренней и наружной поверхностями теплообмена. Проведенные оценки для различных геометрий помещения подтверждают для одинаковых величин η_g соотношения: $\max|t_g^* - t_g| < 2,5 \text{ °C}$ и $\max|t_s^* - t_s| < 2,5 \text{ °C}$.

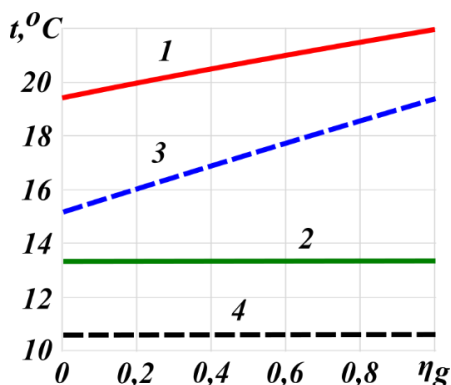


Рис. 1. Стационарные (максимальные) значения осредненных по объему помещения температур газа t_g и ограждающих конструкций t_s от доли радиационного теплового потока, идущего непосредственно в газ η_g : 1 – t_g ; 2 – t_s ; 3 – t_g^* ; 4 – t_s^* . t_g , t_s – температуры, полученные в результате численного решения системы уравнений в соответствии с работой [18]; t_g^* , t_s^* – температуры, полученные в соответствии с соотношениями (1)

Fig. 1. Stationary (maximum) values of the averaged temperatures of the gas t_g and enclosing structures t_s over the volume of the premise from the share of the radiative heat flow going directly into the gas η_g : 1 – t_g ; 2 – t_s ; 3 – t_g^* ; 4 – t_s^* . t_g , t_s – temperatures obtained as a result of the numerical solution of the system of equations in accordance with work [18]; t_g^* , t_s^* – temperatures obtained in accordance with relations (1)

На уровне достигаемых стационарных (максимальных) значений температур, как и следовало ожидать, сказываются величина теплового потока Q , величины, определяющие его распределение между воздухом и ограждающими конструкциями (η_R и η_z),

характеристики тепловых потерь теплоотдачей (Φ) и ($k\Phi$), а также в крайне незначительной мере тепловыми потерями за счет воздухообмена (C_{ven}).

На рис. 2 представлены результаты расчета изменения во времени осредненных по объемам температур газа t_g и ограждающих конструкций t_s на начальном периоде нагрева помещения. Значительная тепловая инерционность вследствие существенных массы и удельной теплоемкости ограждающих конструкций сказывается на незначительном изменении температуры потолка, пола и стен (t_s). Серьезные изменения во времени претерпевают температуры воздуха (t_g). При этом вследствие зависимости от температур t_g и t_s коэффициента теплоотдачи α_g изменение t_{g1} проходит значительно более медленно, чем при постоянном α_g у t_{g2} .

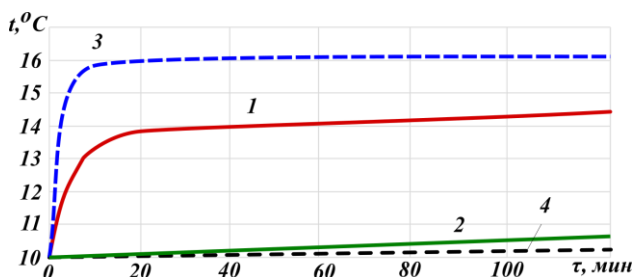


Рис. 2. Динамика изменения во времени осредненных по объемам температур газа t_g и ограждающих конструкций t_s на начальном периоде нагрева помещения: 1 – t_{g1} ; 2 – t_{s1} ; 3 – t_{g2} ; 4 – t_{s2} ; t_{g1} , t_{s1} – температуры, полученные в результате численного интегрирования системы уравнений в соответствии с работой [19]; t_{g2} , t_{s2} – температуры, полученные в соответствии с соотношениями (3)

Fig. 2. Dynamics of changes in time of the volume-averaged gas temperatures t_g and enclosing structures t_s during the initial period of premise heating: 1 – t_{g1} ; 2 – t_{s1} ; 3 – t_{g2} ; 4 – t_{s2} ; t_{g1} , t_{s1} – temperatures obtained as a result of numerical integration of the system of equations in accordance with work [19]; t_{g2} , t_{s2} – temperatures obtained in accordance with relations (3)

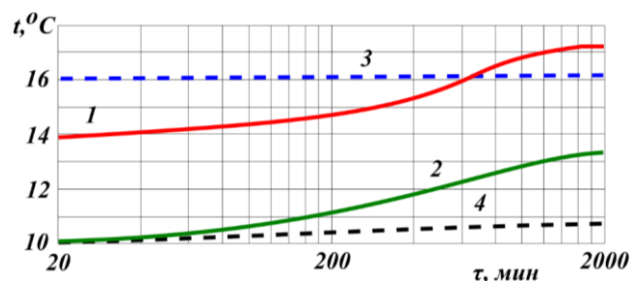


Рис. 3. Динамика изменения во времени осредненных по объемам температур газа t_g и ограждающих конструкций t_s . 1 – t_{g1} ; 2 – t_{s1} ; 3 – t_{g2} ; 4 – t_{s2} ; t_{g1} , t_{s1} – температуры, полученные в результате численного интегрирования системы уравнений в соответствии с работой [19], t_{g2} , t_{s2} – темпе-

ратуры, полученные в соответствии с соотношениями (3)

Fig. 3. Dynamics of changes in the volume-averaged temperatures of gas t_g and enclosing structures t_s over time. 1 – t_{g1} ; 2 – t_{s1} ; 3 – t_{g2} ; 4 – t_{s2} ; t_{g1} , t_{s1} – temperatures obtained as a result of numerical integration of the system of equations in accordance with [19]; t_{g2} , t_{s2} – temperatures obtained in accordance with relations (3)

В дальнейшем (рис. 3) при практически неизменном значении t_{g2} наблюдается медленное стремление t_{s1} , t_{g1} и t_{s2} к своим стационарным (максимальным) значениям.

Логарифмированием из соотношений (6) извлекаются значения времени достижения заданной температуры (θ). Обозначим $\theta = \beta \cdot \theta^*$. На рис. 4 представлены расчетные значения времен достижения $\beta \cdot \theta_g^*$ ($\tau_{g\beta}$) и $\beta \cdot \theta_s^*$ ($\tau_{s\beta}$).

$$\tau_{g\beta} = \frac{1}{\mu_g} \ln \left(\frac{\beta \cdot \theta_g^* - \theta_g^*}{\theta_0 - \theta_g^*} \right), \quad \tau_{s\beta} = \frac{1}{\mu_s} \ln \left(\frac{\beta \cdot \theta_s^* - \theta_s^*}{\theta_0 - \theta_s^*} \right). \quad (7)$$

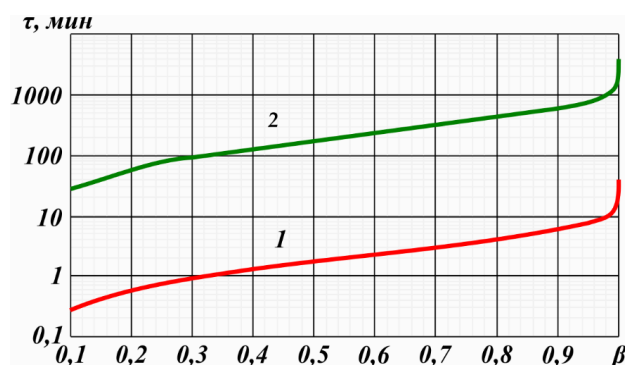


Рис. 4. Время достижения температуры $\beta \cdot \theta^*$. 1 – $\tau_{g\beta}$; 2 – $\tau_{s\beta}$

Fig. 4. Time required to reach temperature $\beta \cdot \theta^*$. 1 – $\tau_{g\beta}$; 2 – $\tau_{s\beta}$

Сопоставимое расчетами по [19] и 2D-моделированием время достижения температурой условий близких к стационарному режиму соответствует условиям: $0,999 < \beta < 0,9999$, практически не зависит от η_g , но существенным образом определяется мощностью тепловых источников по отношению к геометрическим размерам объекта анализа.

Заключение

В результате проведенных исследований сформулированная система 0D подхода к моделированию процесса нагрева помещения системой на основе ГИИ в соответствии с принятыми допущениями была скорректирована до вида, который позволяет получить экспоненциальные временные зави-

симости для безразмерных температур (6) воздуха помещения и ограждающих конструкций (пола, потолка и стен). Вид полученных временных зависимостей имеет аналогию с решением для задачи о нестационарной теплопроводности. В отличие от которых в полученных временных зависимостях (6) используются модифицированные числа Био, определяющие не только процесс теплопроводности внутри тела, но и сложные процессы, влияющие на теплоперенос: конвективный перенос, генерирующийся системой воздухообмена, разделение теплового потока от ГИИ (Q) на лучистый тепловой поток и тепловой поток, приходящий в воздух в виде

энтальпии продуктов сгорания. При моделировании учитывается доля от лучистого потока, идущего практически сразу на нагрев воздушной массы, а не попадающего на поверхности ограждающих конструкций [18].

Сравнение результатов расчетов по соотношениям (6) и методике [18] показывает удовлетворительное согласие.

Полученные соотношения по оценке максимальных значений осредненных температур (1) и времени достижения квазистационарного режима (7) можно рекомендовать для применения в практике проектирования на начальном этапе.

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. – Vol. 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. – Vol. 14. – Iss. 1. – Article number 14010056.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Николаев Н.А., Зиганшин Б.М. Эффективность систем инфракрасного отопления в промышленности и энергетике // *Труды Академэнерго*. – 2006. – № 3. – С. 38–48.
11. Хоботов Е.А. Совершенствование, оптимизация и повышение надежности систем отопления промышленного предприятия // *Дни науки студентов владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых: Сборник материалов научно-практических конференций*. – Владимир, 18 марта – 05 апреля 2019. – Владимир: ВлГУ, 2019 – С. 856–860.
12. Артемичева А.Н., Семикова Е.Н., Модернизация системы отопления склада готовой продукции в Нижнем Новгороде. Сравнительный анализ эффективности конвективной и лучистой систем отопления // *Международный студенческий научный вестник*. – 2016. – № 2. – С. 138–138.
13. Трифонов А.П., Тарасова Е.В., Савенкова 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.
14. Enhancing energetic and economic efficiency of heating coal mines by infrared heaters / O. Voznyak, N. Spodyniuk, O. Savchenko, I. Sukholova, M. Kasynets // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. – 2021. – № 2. – P. 104–109.
15. Dudkiewicz E., Szałański P. Overview of exhaust gas heat recovery technologies for radiant heating systems in large halls // *Thermal Science and Engineering Progress*. – 2018. – Vol. 18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100522>
16. Системы отопления и обогрева с газовыми инфракрасными излучателями. URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=6445%20 (дата обращения 01.10.2024).
17. Теория теплообмена / С.И. Исаев, И.А. Кожин, В.И. Кофанов и др. / под ред. Леонтьева А.И. – М.: Высшая Школа, 1979. – 462 с.
18. Численный анализ влияния конфигурации системы воздухообмена на температурный режим локальных рабочих зон в помещении с газовым инфракрасным излучателем / 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: <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/3/3962>.
19. Анализ диапазонов повышения энергоэффективности газового инфракрасного излучателя / Б.В. Борисов, А.В. Вяткин, Г.В. Кузнецов, В.И. Максимов, Т.А. Нагорнова, Салагаев С.О // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 2. – С. 70–80.
20. 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. – Article number 8749. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15228749>.

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, <https://orcid.org/0000-0002-1172-1431>

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: 14.10.2024

Поступила после рецензирования: 28.10.2024

Принята к публикации: 05.11.2024

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. 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.
4. 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.
5. Bukhmirov V.V., Solnyshkova Yu.S., Prorokova M.V., Bolotskih N. N. Experimental research of heating system with infrared emitters. *Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*, 2011, no. 3, pp. 12–16. (In Russ.)
6. 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 Russ.)
7. 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 Russ.)
8. 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, Article number 101661.
9. Kurilenko N.I., Chekardovskiy M.N., Mikhaylova L.Yu., Ermolaev A.N. 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. (In Russ.)
10. Nikolayev N.A., Ziganshin B.M. Efficiency of infrared heating systems in industry and energy. *Trudy Academenergo*, 2006, no. 3, pp. 38–48. (In Russ.)
11. Khobotov E.A. Improvement, optimization and increase of reliability of heating systems of industrial enterprise. *Days of Science of Students of Vladimir State University named after Alexander Grigorievich and Nikolai Grigorievich Stoletov. Collection of Materials of Scientific and Practical Conferences*. Vladimir, 18 March – 5 April 2019. Vladimir, VISU Publ., 2019. pp. 856–860. (In Russ.)
12. Artemicheva A.N., Semikova E.N. Modernization of the heating system of the finished goods warehouse in Nizhny Novgorod. Comparative analysis of the efficiency of convective and radiant heating systems. *International Student Scientific Bulletin*, 2016, no. 2, pp. 138–138. (In Russ.)
13. Trifonov A.P., Tarasova E.V., Savenkova F.I. Heating of industrial premises. Boiler equipment and its environmental friendliness. *Youth and systemic modernization of the country. Collection of scientific articles of the 5th International scientific conference of students and young scientists*. Kursk, 19–20 May 2020. Kursk, South-West State University Publ., 2020. pp. 379–382. (In Russ.)
14. Voznyak O., Spodyniuk N., Savchenko O., Sukholova I., Kasynets M., Enhancing energetic and economic efficiency of heating coal mines by infrared heaters. *Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2021, no 2, pp. 104–109.

15. Dudkiewicz E., Szałański P. Overview of exhaust gas heat recovery technologies for radiant heating systems in large halls. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2018, vol. 18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100522>
16. Heating and heating systems with gas infrared heaters. (In Russ.) available at: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=6445%20 (accessed 1 October 2024).
17. Isaev S.I., Kozhinov I.A., Kofanov V.I. *Heat transfer theory*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1979. 462 p. (In Russ.)
18. Borisov B.V., Kuznetsov G.V., Maksimov V.I., Nagornova T.A., Vyatkin A.V. 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: <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/3/3962>.
19. 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.)
20. 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*, 2022, vol. 15, Article number 8749. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15228749>.

Information about the authors

Boris V. Borisov, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. byborisov@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1172-1431>

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: 14.10.2024

Revised: 28.10.2024

Accepted: 05.11.2024