

УДК 536.33:536.244

**РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР ОБЪЕКТОВ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ПРИ НАГРЕВЕ ГАЗОВЫМИ ИНФРАКРАСНЫМИ ИЗЛУЧАТЕЛЯМИ****<sup>1</sup>Кузнецов Г.В., <sup>2</sup>Куриленко Н.И., <sup>2</sup>Мамонтов Г.Я., <sup>2</sup>Михайлова Л.Ю.**<sup>1</sup>*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, e-mail: elf@tpu.ru;*<sup>2</sup>*Тюменский государственный архитектурно-строительный университет, Тюмень, e-mail: ktgv@tgasu.ru, mamontov@tsuab.ru*

Приведены результаты экспериментальных исследований распределений температур по высоте помещения, представляющего модель типичного объекта теплоснабжения, при нагреве размещенными у верхней границы воздушной полости газовыми инфракрасными излучателями (ГИИ). Измерения температур проводились термодатчиками, расположенными на расстоянии 1 м между ними. Проведена статистическая обработка результатов измерений (определены коэффициенты корреляции, регрессии, стандартные ошибки оценок этих коэффициентов) и получены аппроксимационные выражения, связывающие температуру с высотой области. Доказано выполнение второго условия Гаусса – Маркова о постоянной дисперсии отклонений при помощи теста ранговой корреляции Спирмена. Выделены особенности теплопереноса в рассматриваемых достаточно типичных для многих практических приложений условиях. Установлено, что формирование температурных полей в области измерений осуществляется за счет совместно протекающих процессов свободной конвекции и теплопроводности.

**Ключевые слова:** газовые инфракрасные излучатели, теплоперенос, температурное поле, статистическая обработка результатов, коэффициенты корреляции

**THE TEMPERATURE DISTRIBUTION OF HEAT SUPPLY OBJECTS DURING HEATING BY THE GAS INFRARED RADIATORS****<sup>1</sup>Kuznetsov G.V., <sup>2</sup>Kurilenko N.I., <sup>2</sup>Mamontov G.Y., <sup>2</sup>Mikhaylova L.Y.**<sup>1</sup>*National research Tomsk polytechnic university, Tomsk, e-mail: elf@tpu.ru;*<sup>2</sup>*Tyumen state architectural and construction university, Tyumen, e-mail: ktgv@tgasu.ru, mamontov@tsuab.ru*

Are given the results of experimental studies of the temperature distributions along the height of the room, representing a model of a typical heat supply object, with the heating by the gas infrared emitters (GIE) placed at upper boundary of air cavity. The temperature was measured by thermocouples located at a distance of 1 m between them. Is carried out statistical processing of the measurement results (the coefficients of correlation, regression, standard errors of the coefficients) and obtained approximate expressions relating the temperature with altitude area. Is proven satisfaction of second condition of the Gauss-Markov about the constant dispersion deviations using Spearman's rank correlation test. Are detailed the features of heat transfer in these fairly typical for many practical applications conditions. It is established the formation of temperature fields in the measurement is carried out by co-occurring processes of natural convection and thermal conductivity.

**Keywords:** gas infrared heaters, heat transfer, temperature field, statistical treatment of the results, correlation coefficients

Процессы теплопереноса в замкнутых областях с локально сосредоточенными источниками нагрева интенсивно исследуются в последние годы (например, [4–7]) теоретически. Экспериментальных данных по основным характеристикам теплопереноса в таких достаточно типичных для многих практических приложений условиях опубликовано мало (достаточно типичны статьи [1, 3]). Кроме того, эксперименты типа [1, 3] проводились на моделях с характерными размерами много меньше аналогичных размеров практически значимых объектов (например, теплоснабжения). Обоснование же теоретических следствий анализа таких процессов необходимо проводить с использованием результатов экс-

периментов, полученных на моделях, размеры которых максимально приближены к реальным.

Возможны различные варианты расположения источников нагрева на внутренних поверхностях моделей [1, 3–6]. Наименее изучен процесс теплопереноса в прямоугольной замкнутой области с источником лучистого нагрева, расположенным на верхней границе области или вблизи ее. Таким источником, например, может быть газовый инфракрасный излучатель (ГИИ) [2].

**Целью работы** является экспериментальное изучение температурных полей в заполненном воздухом крупногабаритном объеме с расположенными на его верхней поверхности излучателями.

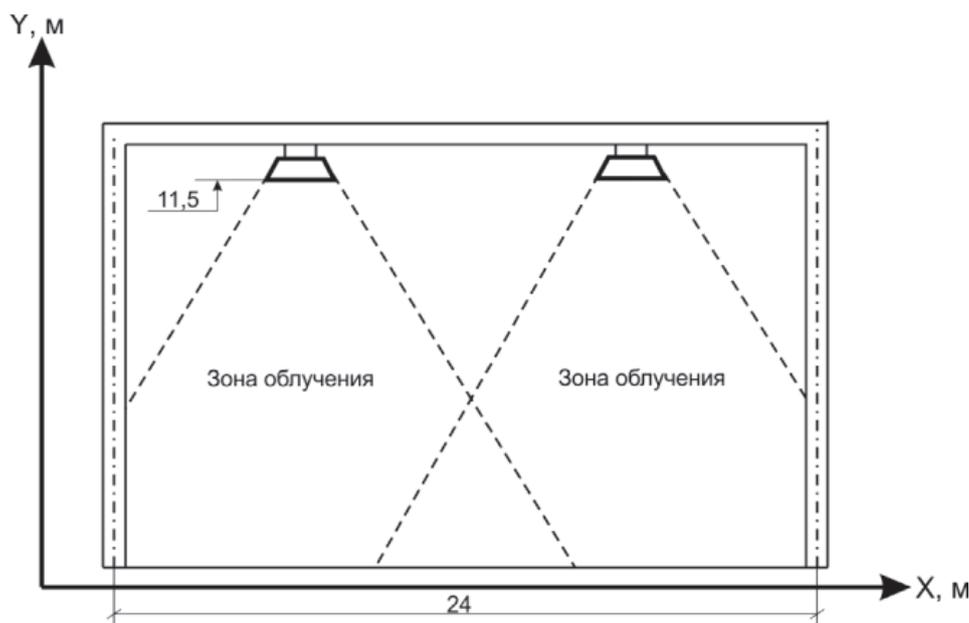


Рис. 1. Схема области проведения экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования выполнялись в зимний период времени при температурах наружного воздуха от  $-5$  до  $-42^{\circ}\text{C}$  на крупногабаритных моделях больших характерных размеров (от 11 до 24 м). Исследовались температурные поля, формирующиеся при работе ГИИ, расположенных в верхней части (рис. 1) области регистрации температур. Относительная влажность внутреннего воздуха составляла  $< 65\%$ .

Система нагрева включала десять излучателей K 8430 RN, производства фирмы «GoGas» (Германия) тепловой мощностью 30 кВт каждый. Средняя плотность лучистого теплового потока составляла на уровне нижней границы области (рис. 1)  $\sim 25 \text{ Вт/м}^2$ , на высоте  $\sim 1,7 \text{ м}$  –  $100 \text{ Вт/м}^2$ .

Излучатели располагались параллельно нижней границе на высоте 11,5 м. Измерения температур выполнялись термопарами в характерных сечениях между излучате-

лями на одинаковом расстоянии от них. По результатам измерений установлены распределения температур по координате  $y$ . Типичное распределение приведено на рис. 2.

Первичная статистическая обработка результатов экспериментов показала, что выборочное среднее равно  $t = 19,05^{\circ}\text{C}$  при несмещённой оценке среднего квадратического отклонения  $S = 2,01$ . Можно сделать вывод о том, что 95% экспериментальных значений температуры находятся в интервале (15,03–23,07).

Коэффициент корреляции усреднённых результатов измерений равен 0,65, что свидетельствует о наличии связи  $t(y)$ , а зависимость рис. 2 иллюстрирует нелинейность этой связи.

Получено уравнение регрессии. Спецификация по графическому изображению показала, что наилучшей является нелинейная регрессионная модель в виде полинома 4-й степени:

$$t = 0,006y^4 - 1,162y^3 + 1,611y^2 - 4,29y + 21,325.$$

Для вычисления оценок коэффициентов регрессии на первом этапе проводилась линеаризация уравнения с помощью замены:  $z_1 = y$ ;  $z_2 = y^2$ ;  $z_3 = y^3$ ;  $z_4 = y^4$ , в результате которой была получена линейная модель множественной регрессии вида

$$t = b_0 + b_1z_1 + b_2z_2 + b_3z_3 + b_4z_4 + \varepsilon.$$

Оценки коэффициентов  $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4$  проведены методом наименьших квадратов для множественной регрессии.

При доказательстве статистической значимости коэффициентов полученного уравнения регрессии определены стандартные ошибки оценок его коэффициентов. Критическое значение распределения Стьюдента установлено по соответствующим таблицам критических точек при уровне значимости 5%. Сделан вывод, что все коэффициенты полученного уравнения регрессии являются статистически значимыми.

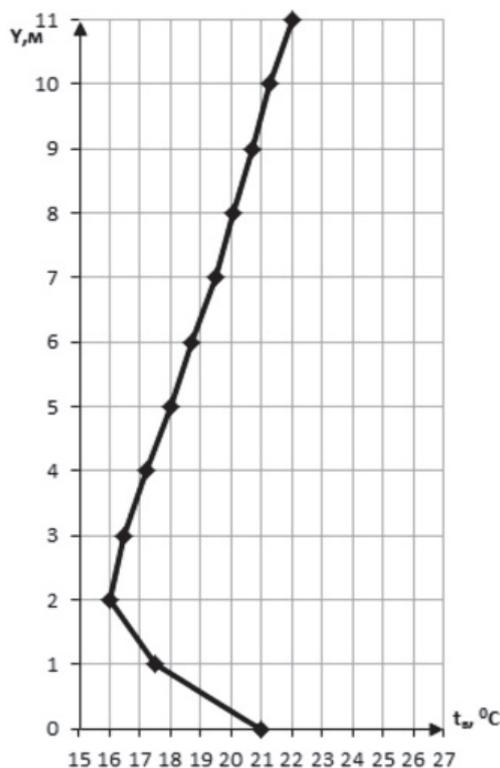


Рис. 2. Распределение температуры воздуха по  $y$  в сечении  $x = 12$  между двумя излучателями

О высоком качестве математической модели, полученной по результатам экспериментов, свидетельствует и коэффициент детерминации  $R^2 = 0,989$ . Его статистическая значимость также установлена при 5% уровне с применением статистики распределения Фишера.

Ниже приведена таблица опытных значений температуры, вычисленных по формуле регрессии (1). Сумма погрешностей результата незначительно отличается от нуля. Таким образом, установлено, что одно

из условий Гаусса – Маркова, которые определяют предпосылки использования метода наименьших квадратов, выполнено.

С помощью теста ранговой корреляции Спирмена было доказано выполнение второго условия Гаусса – Маркова о постоянной дисперсии отклонений  $\varepsilon_i$  для любых наблюдений  $i$  и  $j$ :

$$D(\varepsilon_i) = D(\varepsilon_j) = \sigma^2.$$

На основании статистического анализа показано, что выводы, сделанные выше на основе F-статистики, являются надежными.

Полученные результаты экспериментальных исследований являются базой для описания механизма теплопереноса в рассматриваемых типичных для многих практических приложений условиях.

Распределение температур по координате  $y$  (рис. 2.) в типичном сечении по  $x$  иллюстрирует особенности изучаемого процесса. Теплота, генерируемая газовыми инфракрасными излучателями, поступает к нижней границе области и аккумулируется тонким приповерхностным слоем горизонтальной стенки. Температура поверхности этой стенки растет, и создаются условия для прогрева нижних слоев воздуха, прилегающих к границе  $y = 0$ . В результате формируются свободноконвективные течения, за счет которых осуществляется охлаждение нижней стенки и нагрев выше лежащих слоев воздуха. Локальный минимум температур в зоне  $y \approx 2$  м обусловлен совместным влиянием процессов естественной конвекции и теплопроводности в воздухе. На основании результатов выполненных исследований можно сделать вывод о целесообразности моделирования процессов естественной конвекции и теплопроводности при анализе теплопереноса в замкнутых прямоугольных областях с лучистыми источниками нагрева на верхней границе.

Экспериментальные ( $t_3$ ) и вычисленные по формуле регрессии ( $t_p$ ) значения температуры

$y, \text{ м}$	$t_3, \text{ }^\circ\text{C}$	$t_p$	$\varepsilon_i = t_3 - t_p$
0,1	21,0	20,84699	0,153011
1	2	3	4
1,0	17,58	17,75078	-0,17078
2,0	16,02	16,30932	-0,28932
3,0	16,42	16,24349	0,176508
4,0	17,25	16,94095	0,309045
5,0	18,07	17,93416	0,135842
6,0	18,7	18,90032	-0,20032
7,0	19,4	19,66143	-0,26143
8,0	20,12	20,18425	-0,06425
9,0	20,72	20,5803	0,1397
10,0	21,32	21,1059	0,214102
11,0	22,02	22,16211	-0,14211

На основании результатов проведенных экспериментальных исследований температурных полей в замкнутой прямоугольной области с источником лучистого нагрева (газовые инфракрасные излучатели) вблизи верхней границы можно сделать вывод о механизме теплопереноса в рассматриваемых достаточно типичных для многих практических приложениях условиях. Теплоперенос в воздухе, заполняющем исследуемый объем, осуществляется за счет совместно протекающих процессов свободной конвекции и теплопроводности.

*Работа выполнена в рамках НИР Госзадания «Наука» (Шифр Федеральной целевой программы 2.1321.2014).*

#### Список литературы/References

1. An experimental study of natural and mixed convection over cooled vertical room wall / Samo Venko, Daniel Vidal de Ventós, Ciril Arkar, Sašo Medved // *Energy and Buildings*. – January 2014. – Vol. 68. – Part A. – P. 387–395.
2. Heat transfer under heating of a local region of a large production area by gas infrared radiators / Kuznetsov G.V., Kurilenko N.I., Maksimov V.I., Mamontov G.Ya., Nagornova T.A. // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2013. – Vol. 86. – № 3. – P. 519–524.

3. Kuznetsov G.V., Maksimov V.I., Sheremet M.A. Natural convection in a closed parallelepiped with a local energy source // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. – July 2013. – Vol. 54. – Is. 4. – P. 588–595.

4. Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. Conjugate natural convection in an enclosure with local heat sources // *Computational Thermal Sciences*. – 2009. – Vol. 1. – Is. 3. – P. 341–360.

5. Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. Mathematical modelling of complex heat transfer in a rectangular enclosure // *Thermophysics and Aeromechanics*. – March 2009. – Vol. 16. – Is. 1. – P. 119–128.

6. Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. New approach to the mathematical modeling of thermal regimes for electronic equipment // *Russian Microelectronics*. – March 2008. – Vol. 37. – Is. 2. – P. 131–138.

7. Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. Two-dimensional problem of natural convection in a rectangular domain with local heating and heat-conducting boundaries of finite thickness // *Fluid Dynamics*. – November 2006. – Vol. – 41. – Is. 6. – P. 881–890.

#### Рецензенты:

Заворин А.С., д.т.н., зав. кафедрой парогенераторостроения и парогенераторных установок, НИ ТПУ, г. Томск;

Логинов В.С., д.ф.-м.н., профессор кафедры теоретической и промышленной теплотехники, НИ ТПУ, г. Томск.

Работа поступила в редакцию 28.12.2014.