

УДК 62-69

В. В. Бухмиров, А. В. Гусенков, Ю. С. Солнышкова
Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНФРАКРАСНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

В статье представлены результаты экспериментального исследования влияния шероховатости поверхности инфракрасных излучателей на интенсивность теплового облучения и приведен расчет температуры отражателя и лучистого КПД излучателя в зависимости от степени черноты и толщины тепловой изоляции отражателя.

Инфракрасный нагреватель, зональный метод, радиационные характеристики, интенсивность теплового облучения.

The article presents the results of an experimental study of the effect of surface roughness of infra-red source on the intensity of the thermal exposure. The temperature of the reflector and the radiant efficiency of the radiator depending on the degree of blackness and thickness of heat insulation of the reflector is calculated.

Infra-red heater, zonal approach, radiation characteristics, intensity of the thermal radiation.

Введение.

Системы отопления, вентиляции и кондиционирования устанавливаются в рабочих зонах промышленных предприятий для обеспечения комфортных условий работы персонала и оборудования. По экспертным оценкам [4] в настоящее время большинство предприятий оснащены системами водяного (парового) и воздушного отопления, т. е. системами, работа которых основана на законах конвективного переноса. Однако подобные системы нельзя считать эффективными для промышленных зданий большой высоты. В этом случае целесообразным и экономически эффективным является использование систем лучистого (радиационного) отопления.

Системы лучистого отопления имеют ряд преимуществ перед традиционными системами отопления [4], основными из которых являются: отсутствие протяженных распределительных трубопроводов, малая инерционность, создание комфортных условий непосредственно в отдельных рабочих местах или помещении в целом.

Основная часть.

При отоплении помещения инфракрасными излучателями (ИКИ) существенное влияние на плотность падающих тепловых потоков оказывают радиационные характеристики излучателей (степень черноты излучающей поверхности, ее шероховатость, степень черноты отражателя) и конструктивные параметры (толщина слоя тепловой изоляции) отражателя излучателя. В статье приведены результаты исследования влияния указанных величин на величину плотности падающего радиационного потока (облученности поверхности) и

на показатель эффективности работы инфракрасного обогревателя – величину лучистого КПД.

Оценка влияния искусственной шероховатости (степени черноты) излучающей поверхности на величину падающего теплового потока выполнена на экспериментальном стенде, состоящем из электрического инфракрасного излучателя и облучаемой поверхности, расположенной под излучателем на заданном расстоянии.

Плотность падающего теплового потока находили в нескольких точках в плоскости XOY на разных высотах с шагом по координатам $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0,05$ м при помощи измерителя плотности теплового потока ИТП – МГ4.03 «ПОТОК». Погрешность измерения тепловых потоков в эксперименте оценивалась, исходя из погрешности измерительного комплекса, включающего термопару и измерительный прибор, и составила 6 %.

В эксперименте использовали специально изготовленный инфракрасный излучатель с плоской излучающей поверхностью, которую покрывали различными материалами: фольгой светлой и зачерненной, сетками с разными размерами ячеек и различной толщиной проволоки. При этом сетки с разными размерами ячеек устанавливали на поверхность из светлой алюминиевой фольги. Степень черноты поверхности излучателя без искусственной шероховатости была установлена экспериментально по результатам измерения температуры этой поверхности пирометром и контактным термометром. Степень черноты поверхности, покрытой сеткой, находили по методике С. Г. Агабабова и Л. И. Экслера [1], согласно которой:

$$\varepsilon_{\text{ш}} = \left[1 + \left(\frac{1}{\varepsilon_o} - 1 \right) \cdot F \right]^{-1},$$

где $\varepsilon_{\text{ш}}$ – степень черноты шероховатой поверхности; ε_o – степень черноты алюминиевой фольги; F – фактор шероховатости, представляющий собой отношение площади гладкой поверхности к площади шероховатой поверхности.

Например, для сетки с размером ячеек 63 мкм ($s = 63$ мкм, $h = 90$ мкм, $N = 5851207$ ячеек) фактор шероховатости равен:

$$F = \frac{F_o}{F_{\text{ш}}} = \frac{\pi D^2/4}{\pi D^2/4 + 2s \cdot h \cdot N} = 0,2593,$$

где F_o – площадь поверхности излучателя без сетки (гладкая поверхность); $F_{\text{ш}}$ – площадь поверхности излучателя с учетом сетки (шероховатая поверхность); $D = 0,172$ – диаметр излучателя, м; s – размер сетки (длина или ширина); h – толщина сетки; N – количество ячеек сетки на площади поверхности излучателя.

Тогда степень черноты излучающей поверхности, покрытой сеткой с размером ячеек 63 мкм, будет равна:

$$\varepsilon_{\text{ш}} = \left[1 + \left(\frac{1}{\varepsilon_o} - 1 \right) F \right]^{-1} = 0,3.$$

В результате расчета установлено, что сетки, использованные в эксперименте, имеют приблизительно одинаковую степень черноты ($\sim 0,3$) при разном размере ячеек: 63 мкм, 140 мкм и 200 мкм.

Экспериментальные данные облученности поверхности в зависимости от материала поверхности излучателя графически представлены на рис. 1.

В соответствии с физикой радиационного теплообмена интенсивность теплового облучения (плотность падающего теплового потока) или облученность поверхности увеличивается с ростом степени черноты излучателя и уменьшается с увеличением расстояния между излучателем и приемником излучения.

Создание искусственной шероховатости на поверхности излучателя путем установки сеток с разными размерами ячеек приводит к увеличению падающего теплового потока. На рис. 2 показана относительная облученность поверхности, равная отношению падающего теплового потока от шероховатой поверхности ($\varepsilon = 0,3$) к падающему тепловому потоку от гладкой поверхности из фольги ($\varepsilon = 0,1$).

Анализ графиков на рис. 2 позволяет сделать однозначный вывод о том, что создание искусственной шероховатости на поверхности инфракрасного излучателя приводит к существенному (в 2–4 раза) увеличению плотности падающего теплового потока.

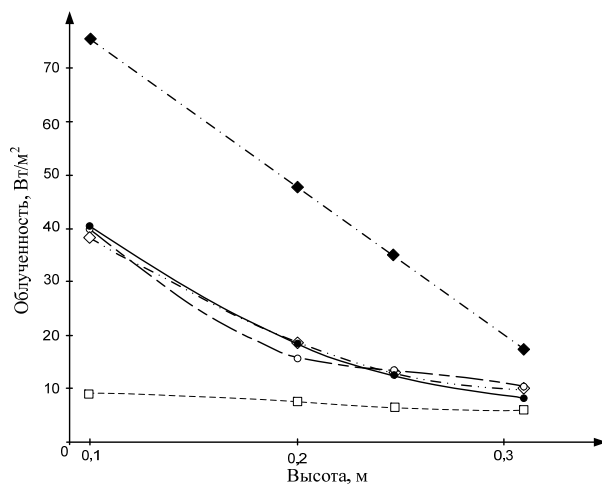


Рис. 1. Облученность поверхности в зависимости от высоты подвеса ИКИ:
—◆— зачерненная поверхность; —□— фольга;
—○— сетка 63 мкм; —●— сетка 140 мкм;
—◇— сетка 200 мкм

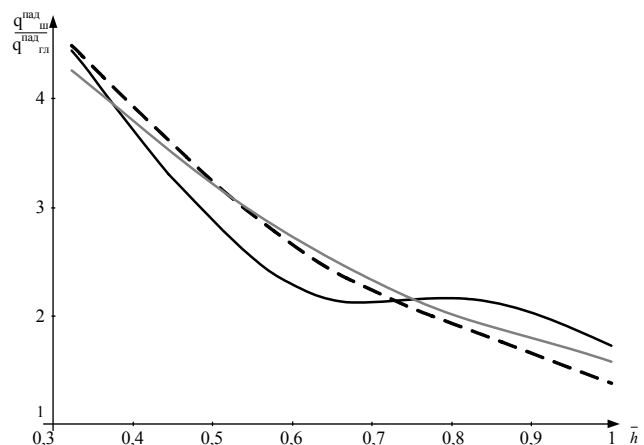


Рис. 2. Относительная облученность поверхности в зависимости от высоты подвеса ИКИ:
— — сетка 63 мкм; — — сетка 140 мкм;
— — сетка 200 мкм

В условиях эксплуатации ИКИ наложение сеток на гладкую поверхность обогревателя позволит получить заданные значения тепловой облученности отапливаемых поверхностей при меньшей мощности излучателя.

На наружную поверхность отражателя накладывают слой тепловой изоляции для уменьшения тепловых потерь в пространство над излучателями. Наложение тепловой изоляции приводит к увеличению температуры внутренней поверхности отражателя и увеличению потока собственного излучения отражателя, а следовательно, и падающего теплового потока от инфракрасного излучателя. С другой стороны при изготовлении ИКИ стремятся выполнить отражатель с низкой степенью черноты ($\varepsilon \approx 0,04$), что приводит к снижению температуры отражателя, а следовательно, и уменьшению потока собственного излучения отражателя и росту отраженного теплового потока. Заметим, что увеличение отраженного

теплового потока приводит к увеличению падающего теплового потока. Изменение геометрии отражателя также влияет на величину облученности окружающих поверхностей. Оценка влияния указанных факторов на величину падающего теплового потока от ИКИ выполнена методом математического моделирования на основе зонального метода расчета [2], [3].

Оценка влияния степени черноты отражателя и толщины тепловой изоляции отражателя на температуру отражателя и на лучистый КПД инфракрасного излучателя выполнена для излучателей модельного ряда Panrad итальянской фирмы "Frassaro" с тупиковой и U-образной трубами.

Система зональных нелинейных уравнений решена методом Ньютона при известных радиационных свойствах излучателя ($\varepsilon_1 = 0,8$ [5]). Температура излучателя варьировалась в интервале 250–450 °C с шагом 50 °C.

В работе также была выполнена серия вычислительных экспериментов при фиксированной степени черноты отражателя и изменяющейся толщине слоя тепловой изоляции. Толщина слоя тепловой изоляции изменялась в пределах от 0 до 50 мм с шагом 10 мм. Расчет лучистого КПД был проведен для излучателя без тепловой изоляции и при степени черноты отражателя в интервале от 0,03 до 0,43 с шагом 0,1.

Анализ результатов расчета показал, что температура отражателя практически линейно увеличивается с ростом степени черноты отражателя для инфракрасных излучателей с тупиковой и с U-образной трубами. При наложении тепловой изоляции на внешнюю поверхность отражателя температура отражателя увеличивается. Так, при толщине слоя тепловой изоляции 15 мм температура отражателя увеличивается в ~1,8 раза по сравнению с неизолированным отражателем. Дальнейшее увеличение слоя тепловой изоляции приводит к повышению температуры отражателя. Так при толщине слоя изоляции 50 мм температура отражателя увеличивается в 2 раза по сравнению с неизолированным отражателем и в 1,15 раза по сравнению с температурой отражателя при толщине слоя тепловой изоляции 15 мм. Таким образом, влияние толщины слоя тепловой изоляции на температуру отражателя проявляется сильнее (примерно в 2 раза) при толщине слоя тепловой изоляции $\delta_{\text{ти}} \leq 15$ мм для обоих типов труб излучателя. Заметим, что при прочих равных условиях для U – образной трубы при одинаковой температуре излучателя температура отражателя выше примерно в 1,4 раза.

На рис. 3 показан лучистый КПД инфракрасного излучателя в зависимости от степени черноты отражателя для U-образного излучателя. Аналогичные расчеты выполнены для излучателя с тупиковой трубой.

Лучистый КПД с ростом температуры для U-образного и тупикового излучателей уменьшается и растет с уменьшением степени черноты поверхности отражателя (см. рис. 3). В результате методических

расчетов было показано, что при одинаковой геометрии и радиационных характеристиках излучателей для ИКИ с тупиковой трубой лучистый КПД выше на ~ 15 % по сравнению с U-образным ИКИ.

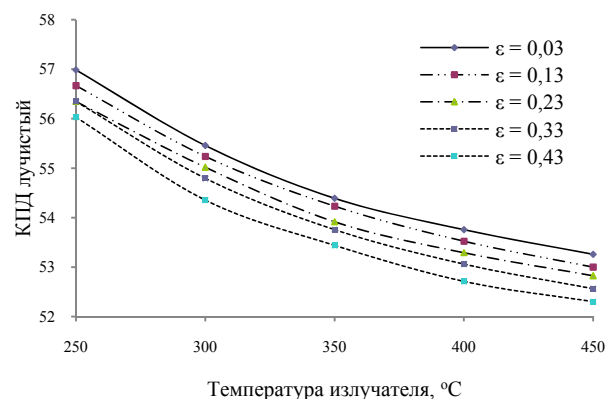


Рис. 3. Лучистый КПД в зависимости от температуры излучателя и от степени черноты отражателя для ИКИ с U-образной трубой

Выводы.

1. Экспериментально установлена величина изменения облученности рабочих поверхностей при создании искусственной шероховатости путем наложения сеток на гладкую поверхность радиационного излучателя.
2. На основе численного моделирования радиационного теплообмена в системе тел «ИКИ – тепловоспринимающая поверхность» показано, что увеличение толщины слоя тепловой изоляции за отражателем и уменьшение степени черноты поверхности отражателя приводит к росту лучистого КПД излучателя.
3. При одинаковой геометрии и радиационных характеристиках излучателей для ИКИ с тупиковой трубой лучистый КПД выше на ~ 15 %, чем для ИКИ с U-образной трубой.

Литература

1. Агабабов, С. Г. Влияние геометрических характеристик рельефа поверхности твердого тела на его радиационные свойства (к определению фактора шероховатости) / С. Г. Агабабов, Л. И. Экслер // Теплофизика высоких температур. – М., 1971. – Т. 9. – №3. – С. 522–524.
2. Арутюнов, В. А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей / В. А. Арутюнов, В. В. Бухмиров, С. А. Крупеников. – М., 1990.
3. Бухмиров, В. В. Зональные методы расчета радиационного и сложного теплообмена / В. В. Бухмиров, Ю. С. Солнышкова. – Иваново, 2012.
4. Бухмиров, В. В. Оценка эффективности применения систем лучистого отопления производственных зданий / В. В. Бухмиров, Ю. С. Солнышкова, А. К. Гасксов // Труды V Международной школы-семинара молодых ученых и специалистов «Энергосбережение – теория и практика». – М., 2010. – С. 36–39.
5. Латыев, Л. Н. Излучательные свойства материалов / [Л. Н. Латыев и др.]. – М., 1974.