

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА ИНФРАКРАСНЫХ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОДЯНЫХ ПОТОЛОЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ

*Харьковский национальный университет
строительства и архитектуры, Україна*

Приведены результаты численного исследования процессов лучистого теплообмена водяных потолочных панелей систем отопления производственных помещений. Изучалось влияние конструктивных параметров панелей, условия их размещения и режимные параметры эксплуатации. Определены энергетические показатели эффективности систем.

Постановка проблемы. Водяные (паровые) инфракрасные потолочные панели широко применяются в системах отопления производственных, административных и общественных, спортивных и торгово-развлекательных помещениях. Отопление складов, производственных цехов и мастерских заводов, вокзалов, бассейнов и концертных залов, где высота помещений более 3 м не позволяет использовать классические (традиционные) системы водяного отопления.

Данные системы более экономичны (до 35–40%), по сравнению с системами воздушного отопления, могут использоваться как для отопления, так и для кондиционирования помещений характеризуются высокой комфортностью и гигиеничностью из-за отсутствия принудительной циркуляции воздуха, и более низкой температурой воздуха в рабочей зоне [1, 2]

Анализ основных исследований и публикаций. Лучистые панели широко применяются в системах охлаждения энергетических установок космических аппаратов [4 – 8]. Разработаны методики их расчёта и определены оптимальные параметры. В работе [4] кондуктивно-радиационный теплообмен моделируется на базе двухмерного уравнения теплопроводности ребра в диатермической среде. Изучались различные профили рёбер (прямоугольные, трапециевидные и треугольные), степень черноты поверхности. Выполнена оптимизация параметров системы (скорость теплоносителя, диаметр труб и количество панелей). Температура окружающей среды (космического пространства), принимается равной нулю ($T = 0\text{K}$).

В работах [5 – 8] исследовались следующие параметры излучателей: диаметр труб, материал, толщина и высота рёбер, различные теплоносители.

Теплоносители: водород, неон, сплав Na-K. Температурный диапазон (624-345K). Материал рёбер и трубы: алюминий-сталь; алюминий-титан;

углерод-углерод. Конструктивные параметры: диаметр трубы: от 10/12 до 18/20, высота ребра: от 0,02 до 0,1м, толщина ребра: 0,001м.

Основную излучающую поверхность панели составляет поверхность плоских продольных ребер, через которые излучается основная доля радиационного теплового потока (рис. 1).

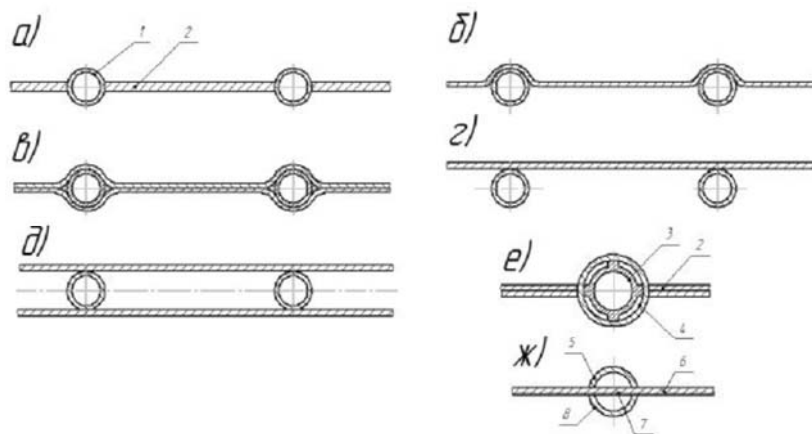


Рис 1. Конструктивные формы плоской излучающей панели: 1 – труба, 2 – ребро, 3 – внутренняя труба, 4- внешняя труба (защитная оболочка), 5 – верхняя полу-трубка, 6 – излучающая часть ребра, 7 – конвективная часть ребра, 8 – нижняя полутруба.

На рис. 1 показаны конструктивные формы излучающих панелей: рис 1а – цилиндрическая труба с присоединенными (пайка, сварка) ребрами; рис.1г – коллективное ребро (плоская пластина) с односторонне присоединенными к ней цилиндрическими или овальными трубами; рис. 1б – коллективное ребро с цилиндрическими выштамповками, в которые уложены и припаяны цилиндрические трубы; рис. 1в – коллективное двухслойное ребро, в цилиндрические выштамповки которого уложены и припаяны цилиндрические трубы; рис. 1д – пара параллельных плоских коллективных ребер, между которыми уложены и припаяны к ним цилиндрические (или овально-сплюснутые) трубы; рис. 1е – цилиндрическая труба к присоединенным к ней пайкой или сваркой ребрами и внешним цилиндрическим экраном, предназначенном для лучшей защиты от метеорной опасности.

Лучистые водяные панели, которые используются в системах отопления, отличаются от космических конструктивно и материалами, температурным уровнем теплоносителей и условиями теплообмена (одностороннее излучение), гидравлическими и эксплуатационными режимами [3]. Однако, имеющийся опыт создания космических систем охлаждения, может быть при этом использован.

Проблемы неравномерности температурного режима панели и обогрева рабочей зоны, выбора оптимальной высоты размещения панели, и их площади поверхности, требуют изучения.

Формулирование целей и задания статьи. Целью создания математической модели панели является определение ее тепловой мощности, а также распределения интенсивности облучения объекта в любой заданной точке. При создании математической модели предполагалось учесть изменение

температуры поперек панели, т.е. перпендикулярно осям труб. Изменением температуры вдоль панели за счет охлаждения воды в трубах можно пренебречь ввиду его незначительности.

Основная часть. Учет поперечного изменения температуры панели приводит к тому, что угловой коэффициент излучения зависит не только от координат облучаемого объекта, но и от отклонения участка панели с заданной температурой от оси панели.

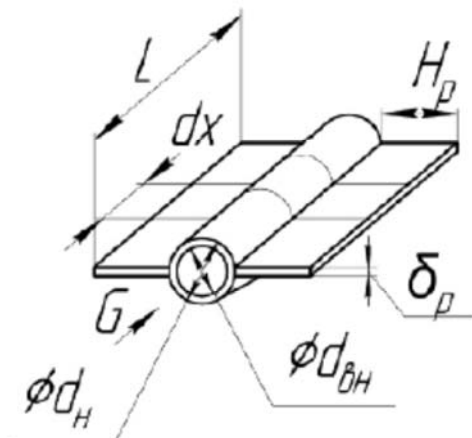


Рис. 2. Конструкция модуля излучающей поверхности

Интенсивность облучения панелью в заданной точке определяется путем численного интегрирования по всем участкам панели с разными температурами (рис. 2).

Важным элементом данного расчета является определение распределения температур поперек панели, которое в свою очередь зависит от распределения температур в ребре панели.

Поскольку распределение температур в ребре симметрично относительно его середины, достаточно определить распределение температур в полу-ребре.

Данное распределение, получается, посредством решения дифференциального уравнения теплопроводности второго порядка.

$$\lambda \delta \frac{d^2 t}{dx^2} = c_0 \varepsilon \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right] + \alpha (t - t_0) \quad (1)$$

где: t_0 – температура воздуха и облучаемого объекта; δ - толщина ребра, м; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К), c_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела ($c_0=5,67$ Вт/(м² К⁴)), ε – степень черноты панели, α - коэффициент конвективной теплоотдачи от горизонтальной поверхности панели (обращенной вниз) к воздуху, Вт/(м² К).

Данная задача является краевой, т.е. заданы граничные условия на концах интервала (границах ребра).

$$t(0) = t_b, t'(l) = 0 \quad (2)$$

Распределение температур во всей панели с числом труб 4 при температуре воды 90°C показаны на рис. 3.

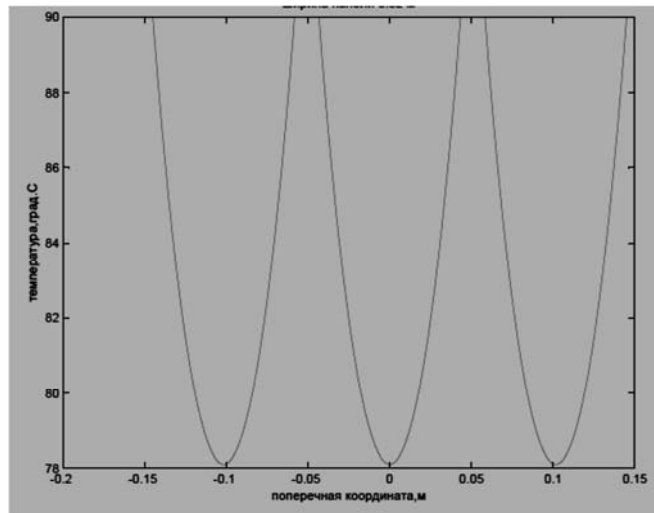


Рис. 3. Распределение температуры по поверхности панели при температуре воды 90°C

Линейная плотность теплового потока, отводимого от идеально-проводящего полу-ребра, т.е. когда его температура всюду равна температуре воды в трубах t_B определяется по формуле:

$$q_{id} = l \left[c_0 \varepsilon \left[\left(\frac{T_B}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 + \alpha (t_B - t_0) \right] \right] \quad (3)$$

Эффективность ребра - это отношение реально отводимого потока тепла к потоку, отводимому идеально проводящим ребром, т.е.

$$\eta = \frac{q_p}{q_{id}} \quad (4)$$

Полный тепловой поток с ребер панели, Вт:

$$Q_p = n_p L_1 q_p \quad (5)$$

Полный тепловой поток с труб, Вт:

$$Q_{тр} = N \cdot \frac{\pi}{2} D L_1 \left\{ c_0 \varepsilon \left[\left(\frac{T_B}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right] + \alpha (t_B - t_0) \right\} \quad (6)$$

Полный тепловой поток с панели в целом, Вт:

$$Q = Q_p + Q_{тр} \quad (7)$$

Радиационный тепловой поток панели рассчитывается, как и полный, для ребер и для труб в отдельности. Плотность радиационного теплового потока на единицу ширины ребра определяется по формуле:

$$q_{рад.р.} = n_p L_1 c_0 \varepsilon \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right] \quad (8)$$

Для определения радиационного теплового потока с ребер $Q_{рад.р.}$ данную плотность необходимо проинтегрировать по ширине ребер панели или, что то же самое, по текущей температуре ребер.

Соответствующее интегрирование было реализовано по программе trapz программного комплекса MATLAB. Радиационный тепловой поток с труб определяем по формуле:

$$Q_{рад.тр.} = N L_1 D \frac{\pi}{2} c_0 \varepsilon \left[\left(\frac{T_B}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right] \quad (9)$$

Радиационный поток с панели, Вт

$$Q_{рад} = Q_{рад.р.} + Q_{рад.тр.} \quad (10)$$

Эффективностью панели называется отношение радиационного к полному тепловому потоку панели.

$$\eta_{\text{пан}} = \frac{Q_{\text{рад}}}{Q} \cdot 100\% \quad (11)$$

Эффективность панели зависит, в основном, от количества труб, температуры воды в них и толщины ребра.

На математической модели панели был проведен вычислительный эксперимент, в котором варьировались указанные выше факторы.

x_1 – количество труб панели, x_2 – температура воды, °С, x_3 – толщина ребра, мм.

Каждый из факторов варьировался на 3-х уровнях по плану Хартли 2-го порядка (15 опытов). В кодированной форме уровни факторов были равны -1, 0, +1. Кодированные значения факторов связаны с натуральными значениями формулами.

$$x_1 = x_1 - 3, \quad x_2 = \frac{x_2 - 70}{20}, \quad x_3 = \frac{x_3 - 1,5}{0,5} \quad (12)$$

Регрессионное уравнение, полученное с помощью соответствующей программы статистического пакета Statgraphics, имеет вид:

$$\eta_{\text{пан}} = 64,42 + 0,28x_1 + 2,09x_2 + 0,11x_3 - 0,14x_1^2 + 0,1125x_1x_2 - 0,0625x_1x_3 \quad (13)$$

Коэффициент детерминации данного уравнения $R^2 = 0,999$.

На рис. 4 приведены расчетные кривые зависимости интенсивности облучения объекта под центром панели от высоты панели под объектом и соответствующие экспериментальные значения. Приведены графики для 3-х температур: 50, 70, 90°С.

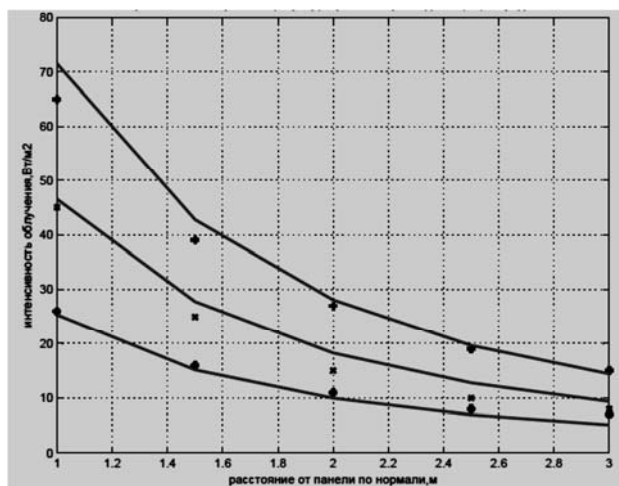


Рис. 4. Зависимость интенсивности облучения от высоты размещения панели при различной температуре воды.

Выводы и перспективы дальнейших исследований. Разработанная математическая модель оптимизации параметров лучистых водяных панелей может быть использована при проектировании систем отопления производственных, административных и жилых помещений.

Литература

1. Официальный сайт компании Zehnder. Режим доступа: <http://www.zehnder-systems.com>
2. Официальный сайт компании Fraccaro. Режим доступа: <http://www.fraccaro.it>
3. Миссенар Ф. А. Лучистое отопление и охлаждение / Ф. А. Миссенар // пер с французс. – М. 1961. – 472 с.
4. Основы теории, конструкции и эксплуатации космических ЯЭУ / А. А. Куландин, С. В. Тимашев, В. Д. Атамасов и др. – Л. : Энергоатомиздат, 1987. – 328 с.
5. Лукашевич А. Г. Математическое моделирование теплообмена в трубчатом холодильнике-излучателе / А. Г. Лукашевич // Автореф. дисс... к.т.н. – Минск, 1993. – 24 с.
6. Иванов В. Л. и др. Теплообменник-излучатель отвода теплоты в космическое пространство / В. Л. Иванов и др // Наука и образование. – М. : Электр. изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 77-30569/253502, 2011, №10 // <http://technomag.edu.ru>
7. Касилов П. В. Теплообменник радиационного типа энергоустановки космического базирования / П. В. Касилов // Наука и образование. – М. : электр. изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 77-30569/253502, 2011, №13 // <http://technomag.edu.ru>
8. Азаренков Н. А. и др. Ядерная энергетика. – Харьков, ХНУ им. В.Н. Каразина, 2012. – с. 535.

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ТЕПЛООБМІНУ ІНФРАЧЕРВОНИХ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ ВОДЯНИХ СТЕЛЬОВИХ ПАНЕЛЕЙ

Редько А. О., Череднік А. Д., Ланцберг Н. Г., Кулікова Н. В., Редько О. Ф.

Наведено результати чисельного дослідження процесів променистого теплообміну водяних стельових панелей систем опалення виробничих приміщень. Вивчався вплив конструктивних параметрів панелей, умови їх розміщення і режимні параметри експлуатації. Визначено енергетичні показники ефективності систем.

MODELLING AND OPTIMIZATION OF PROCESS PARAMETERS OF INFRARED HEAT THE LOW-TEMPERATURE WATER CEILING PANELS

A. Redko, A. Cherednik, N. Lantsberh, N. Kulikova, A. Redko

The results of a numerical study of the processes of water radiant ceiling panels industrial space heating systems. The influence of the design parameters of the panels, the conditions of their accommodation and regime of operation parameters. The energy performance indicators systems.