

лоснабжения тепла, а также долю затрат компрессорной установки на получение сжатого воздуха и тепла.

1.Берман А.Я., Маньковский О.Н., Марр Ю.Н., Рафалович А.П. Системы охлаждения компрессорных установок. – Л.: Машиностроение, 1984. – 228 с.

2.Калинин Н.В., Мареев А.А. Определение эффективности утилизации теплоты сжатия в системах компримирования газов // Промышленная энергетика. – 1988. №4. – С.5-11.

3.Бродянский В.М., Фратшер В., Михалец К. Эксергетический метод и его приложения. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 250 с.

4.Скрыпников В.Б., Савицкий Н.В., Бузунов Н.В., Салимов Э.З., Зайченко О.В., Скрыпников Ю.В. // Система отопления и горячего водоснабжения общественных и промышленных зданий. Декларационный патент (11) №55178А, (51)F24D11/00, 2002 г.

5.Скрыпников В.Б., Савицкий Н.В., Скрыпников Ю.В., Ляховецкая М.М., Зайченко О.В., Салимов Э.З // Система отопления и горячего водоснабжения общественных и промышленных зданий. Декларационный патент (11) №10340, (51)F24D11/00, 2006 г.

Получено 31.05.2009

УДК 697.7

Н.Н.БОЛОТСКИХ

Харьковский государственный технический университет строительства и архитектуры

ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ МИКРОКЛИМАТА В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ С ЛУЧИСТО-ВОЗДУШНЫМ ОТОПЛЕНИЕМ

Приведены результаты и анализ замеров параметров микроклимата в производственных помещениях с лучисто-воздушным отоплением. Кроме того, даны сведения о разработанных в ХГТУСА методике и компьютерных программах для расчета и графического представления интенсивности облучения в любой точке рабочей зоны помещения, отапливаемого темными газовыми инфракрасными нагревателями.

Наведено результати та аналіз вимірів параметрів мікроклімату у виробничих приміщеннях з променисто-повітряним опаленням. Крім того, дані відомості про розроблені в ХДТУБА методику і комп'ютерні програми для розрахунку і графічного подання інтенсивності опромінення в будь-якій точці робочої зони приміщення, опалювального темними газовими інфрачервоними нагрівачами.

The results and analyse of investigations of microclimate factors within of workshop, heated with forced-air radiant heating are described. Moreover, information of working out in KSTUCA methods and computer programmes for calculation and graphical presentation of radiation intensity treatment in different points of workshop, heated with dark gas infra-red radiators are given.

Ключевые слова: лучисто-воздушное отопление, инфракрасные нагреватели, излучающая труба, интенсивность облучения, комфортные тепловые условия.

В качестве показателей, характеризующих микроклимат в производственных помещениях, ГОСТом [1] утверждены следующие пара-

метры: температура воздуха, относительная влажность воздуха, скорость движения воздуха и интенсивность теплового излучения (облучения). Этим ГОСТом также регламентированы оптимальные и допустимые нормы температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха в рабочей зоне производственных помещений. Кроме того, в нем указаны предельно допустимые значения интенсивностей теплового облучения людей, находящихся в рабочей зоне, т.е. в пространстве ограниченном по высоте 2 м над уровнем пола, на котором находятся места постоянного или временного пребывания работающих.

Для лучисто-воздушного отопления производственных помещений в настоящее время применяются газовые инфракрасные нагреватели двух типов: «светлые» и «темные». В светлых нагревателях газ сгорает на поверхности излучающей пористой керамической плитки, защищенной стальной решеткой. Инфракрасное излучение раскаленных плитки и решетки с помощью отражателя направляется в отапливаемое пространство, а продукты сгорания отводятся за пределы помещения. В серийно выпускаемых светлых инфракрасных излучателях температура на поверхности керамических плиток составляет 850-1200°С.

В темных нагревателях сжигание газа происходит в горелке и частично в начале трубы, являющейся излучателем тепла. С помощью рефлектора, расположенного над трубой, тепло направляется в отапливаемое пространство. Длина таких серийно выпускаемых линейных трубчатых инфракрасных нагревателей лежит в пределах от 5 до 24 м, а иногда и более. Средняя температура поверхности их излучающих труб лежит в пределах 300-500°С.

При работе как светлых, так и темных инфракрасных нагревателей теплоотдача в помещении имеет две составляющие: лучистую и конвективную. Поток теплового излучения попадает на пол помещения, а также на оборудование, конструкции и материалы, находящиеся на нем в зоне облучения, и нагревает их до температуры выше окружающей температуры воздуха. Нагретый пол, оборудование, конструкции и материалы полученное тепло трансформируют в конвективный тепловой поток, в результате чего нагревается воздух, находящийся в помещении.

С целью выявления характера распределения температуры воздуха в пределах рабочей зоны отапливаемого пространства нами проведены сравнительные экспериментальные исследования в производственных помещениях, отапливаемых как светлыми, так и темными инфракрасными нагревателями. В частности, в помещении участка по-

краски слесарно-сборочного цеха Харьковского машиностроительного завода «Свет шахтера», отапливаемом светлыми газовыми инфракрасными обогревателями ГИИ мощностью 30 кВт, произведены замеры температуры воздуха по линии подвески излучателей в местах, находящихся на расстоянии 1 м друг от друга. В каждом из намеченных мест температура воздуха измерялась на высотах 0; 0,5; 1,5; 2,0 и 3,5 м.

Для измерения температуры воздуха использовался термометр технический жидкостный ТТЖ-М, изготовленный ОАО «Стеклоприбор» (г.Червонозаводское, Полтавская область).

Результаты замеров в различных упомянутых выше точках пространства цеха представлены на рис.1.

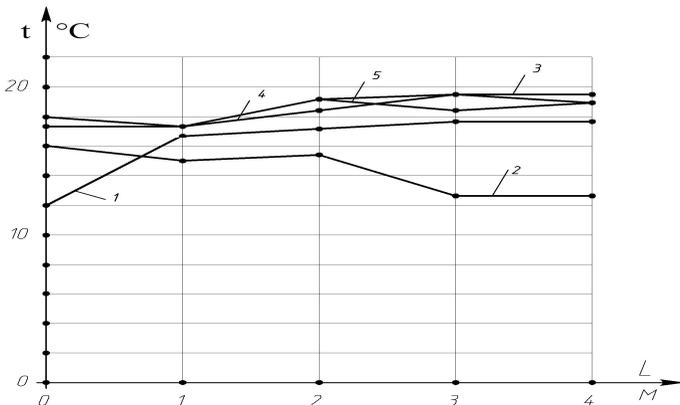


Рис.1 – Графики изменения температуры воздуха в различных точках пространства цеха по линии подвески светлых излучателей и расстояниях от пола:
1 – 0 м; 2 – 0,5 м; 3 – 1,5 м; 4 – 2 м; 5 – 3,5 м.

На рис.2 приведены графики изменения температуры воздуха по высоте помещения, построенные по данным упомянутых выше замеров.

Аналогичные замеры температуры воздуха, для сравнения, были проведены в первом механосборочном цехе машиностроительного завода «Турбоатом». Для отопления помещения цеха здесь используются темные газовые инфракрасные нагреватели АМБИ-РАД ER-50 фирмы «Кюблер» (Германия) мощностью 50 кВт и длиной 8 м каждый. Высота их подвески – 9 м от пола.

Температуру воздуха измеряли по оси излучателя в точках, находящихся друг от друга на расстоянии 1,5 м, и по высоте в точках, расположенных на расстояниях от пола равных: 0; 0,5; 1,5; 2 и 3,5 м. Результаты замеров представлены на рис.3.

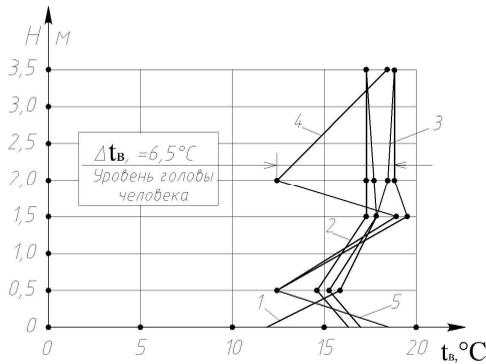


Рис.2 – Экспериментальные графики изменения температуры воздуха по высоте рабочей зоны помещения, отапливаемого светлыми инфракрасными излучателями, в точках замеров, находящихся от места подвески излучателя на расстоянии: 1 – 0 м; 2 – 1 м; 3 – 3 м; 4 – 4 м; 5 – 3,5 м.

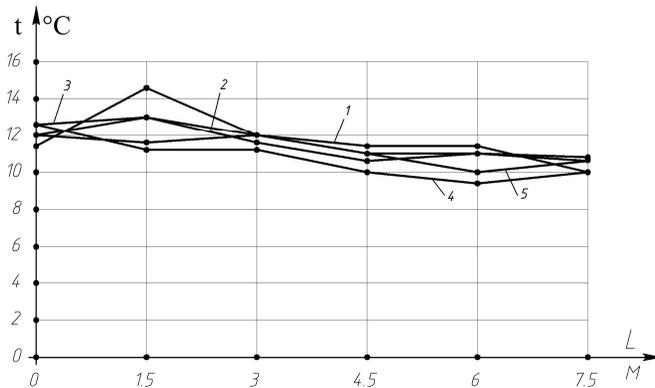


Рис.3 – Графики изменения температуры воздуха вдоль оси темного излучателя при расстояниях от пола: 1 – 0 м; 2 – 0,5 м; 3 – 1,5 м; 4 – 2 м; 5 – 3,5 м.

Кроме того, на основании полученных экспериментальных данных построены графики изменения температуры воздуха по высоте цеха (от пола) для различных точек, расположенных по оси излучателя (рис.4).

Анализ данных, полученных на заводе «Свет шахтера», показывает, что температура воздуха в различных точках отапливаемого помещения находится в пределах от 12 до 19,5°C. На уровне головы человека на участке длиной 4 м по оси подвески излучателей разница в

температуре воздуха составляет $6,5^{\circ}\text{C}$. Градиент температуры воздуха по высоте помещения при этом лежит в пределах от $1,5$ до $2^{\circ}\text{C}/\text{м}$.

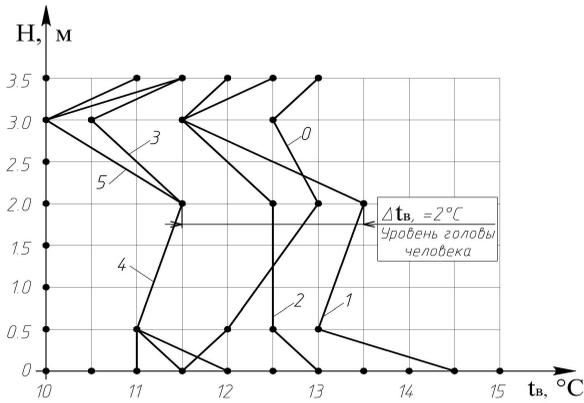


Рис.4 – Экспериментальные графики изменения температуры воздуха в отопляемой зоне цеха по его высоте в точках, расположенных вдоль оси излучателя на расстоянии от горелки: 1 – 1,5 м; 2 – 3 м; 3 – 4,5 м; 4 – 6 м; 5 – 7,5 м.

Анализ данных, полученных на заводе «Турбоатом», показывает, что на уровне головы человека вдоль оси излучателя разница температур воздуха составляет 2°C , а градиент температуры воздуха по высоте помещения лежит в пределах от $0,42$ до $0,57^{\circ}\text{C}/\text{м}$.

ГОСТом 12.1.005-88 [1] перепад температуры воздуха по высоте рабочей зоны допускается до 3°C , а колебания температуры воздуха по горизонтали в рабочей зоне до 4°C при легких работах и до 6°C при тяжелых работах.

Таким образом, приведенное сопоставление фактических экспериментальных данных показывает, что наилучшие температурные показатели имеют темные инфракрасные нагреватели. Они позволяют создать в помещении лучший тепловой комфорт для работающих.

Что касается использования светлых инфракрасных нагревателей, то в условиях завода «Свет шахтера» они, при принятой схеме отопления, не обеспечили фактическую разницу температуры воздуха в пределах, допустимых ГОСТом [1]. Все это дает основание утверждать, что отоплять производственные помещения большой кубатуры для создания комфортных тепловых условий целесообразно темными газовыми инфракрасными нагревателями.

Для анализа изменений относительной влажности воздуха в про-

изводственных помещениях, отапливаемых светлыми и темными инфракрасными нагревателями, также были проведены в производственных условиях специальные эксперименты. Для измерения относительной влажности воздуха в помещениях использовался переносной психрометр механический МВ-4-2 м с диапазоном измерений 10-100%. В частности, на заводе «Турбоатом» в период проведения экспериментов относительная влажность воздуха составляла около 72%. В период рабочей смены существенных изменений влажности не наблюдалось. В цехе по производству печенья Харьковской кондитерской фабрики при проведении экспериментов она составляла 52%, а в цехе машиностроительного предприятия ЧП «Спецкран» – 65%. На всех этих трех предприятиях отопление помещений осуществлялось с использованием темных инфракрасных нагревателей. И, наконец, на заводе «Свет шахтера», где отопление цеха осуществлялось светлыми инфракрасными нагревателями, относительная влажность воздуха составляла около 68%. Согласно ГОСТ [1], оптимальная относительная влажность лежит в пределах 40-60%, а допустимая – не более 75%. Таким образом, при использовании как светлых, так и темных инфракрасных нагревателей в течение смены относительная влажность воздуха меняется незначительно. Данные замеров показывают, что на упомянутых предприятиях относительная влажность воздуха находилась в период проведения замеров в пределах допустимых значений.

При проведении экспериментов на упомянутых выше предприятиях проводились также замеры скорости движения воздуха в рабочей зоне производственных помещений с использованием переносного кататермометра АГП-01 с диапазоном измерений 0÷1,5 м/с. По данным замеров величина скорости движения воздуха в рабочей зоне составляла:

- на заводе «Турбоатом» – 0,07-0,08 м/с;
- в помещении цеха по производству печенья Харьковской кондитерской фабрики – 0,12 м/с;
- в помещении цеха машиностроительного предприятия ЧП «Спецкран» – 0,06-0,75 м/с;
- в помещении цеха завода «Свет шахтера» – 0,05-0,06 м/с.

Существенных изменений этих показателей в течение смен, в которых проводились эксперименты, не наблюдалось. Как в случае использования светлых, так и темных инфракрасных нагревателей величины этого параметра находились ниже допустимых значений по ГОСТу [1].

Экспериментальные исследования интенсивности облучения при отоплении светлыми и темными инфракрасными излучателями прово-

дильсь на предприятиях «Свет шахтера» и Харьковской кондитерской фабрике. Замеры этого параметра производились с помощью переносного радиометра РАТ-2П-Кварц-41, выпускаемого научно-производственной фирмой «Тензор» (г.Черновцы). Диапазон измерений интенсивности облучения этого прибора лежит в пределах от 10 до 20000 Вт/м².

На заводе «Свет шахтера» интенсивность облучения измерялась в тех же местах, где проводились замеры температуры, только на двух высотах: 0,25 и 2 м. Данные этих замеров представлены на графиках (рис.5).

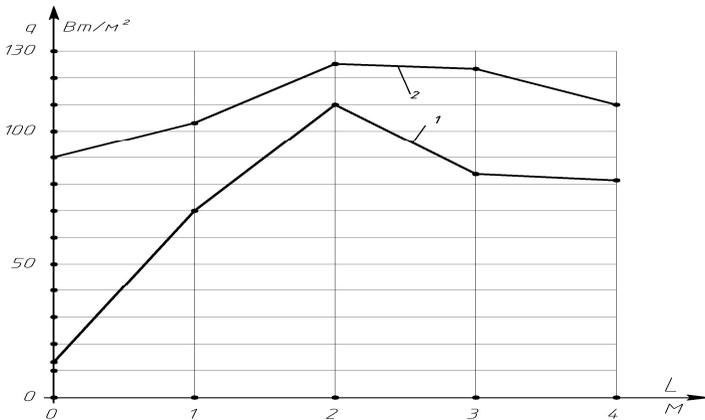


Рис.5 – Графики изменения интенсивности облучения в различных точках пространства цеха по оси подвески излучателей и на высотах: 1 – 0,25 и 2 – 2 м.

Аналогичные замеры были проведены 6 марта 2009 г. в помещении цеха по производству печенья Харьковской кондитерской фабрики. Замеры интенсивности облучения проводились вдоль оси темного инфракрасного излучателя в точках, находящихся друг от друга на расстоянии 1 м, на двух высотах: 0,25 м и 2 м от пола. Параллельно были проведены замеры температуры поверхности излучающей трубы вдоль ее оси с помощью переносного фотопирометра RAU MX6 «Photo Temp», выпускаемого в Германии. Результаты замеров представлены на графиках (рис.6).

Сопоставление экспериментальных кривых, представленных на рис.5, 6 (кривая 2), показывает, что величины интенсивности облучения как в случае использования светлых, так и темных инфракрасных излучателей существенно изменяются в пределах рабочей зоны отоп-

ливаемых помещений. Например, при использовании светлых излучателей на участке рабочего пространства длиной 4 м на высоте 2 м интенсивность облучения колеблется в пределах от 90 до 125 Вт/м², а в случае использования темных излучателей на участке длиной 9 м – от 57 до 140 Вт/м². Наибольшее значение интенсивности облучения в обоих случаях соответствует точкам, расположенным ближе к самим инфракрасным излучателям. Сопоставление полученных практических данных показывает также и то, что в отдельных точках рабочего пространства интенсивность облучения превышает нормативные значения, обусловленные ГОСТом [1] и длительное нахождение работающих в этих местах с точки зрения сохранения здоровья нежелательно. Для приведения в соответствие этого показателя с нормативным необходимо снизить температуру излучателей, например, за счет сокращения количества подаваемого в горелки газа либо принять другие дополнительные защитные меры.

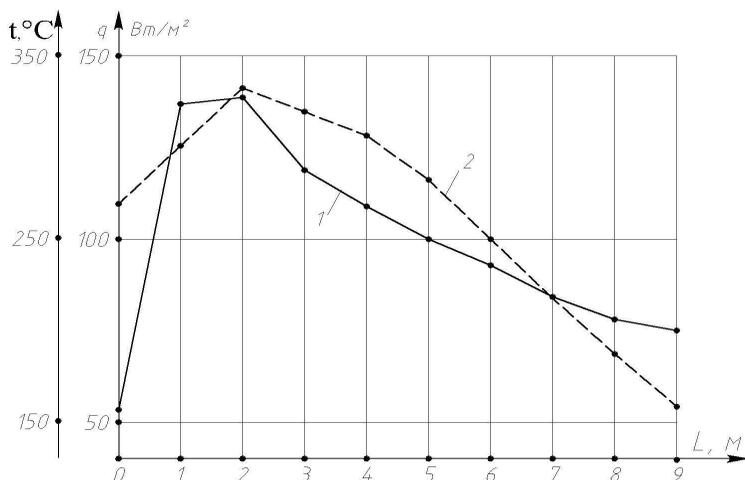


Рис.6 – Графики изменения температуры поверхности излучающей трубы вдоль ее оси (1) и интенсивности теплового облучения на уровне головы человека вдоль оси излучателя (2)

Это обстоятельство указывает на необходимость строгого контроля этого параметра как на стадии проектирования, так и на стадии эксплуатации системы лучисто-воздушного отопления производственных помещений.

Расчет интенсивности облучения на уровне головы человека при проектировании систем отопления с помощью светлых нагревателей

следует вести по формуле [2]

$$q = \frac{1,8\Delta x^2 \cdot F_1}{R^4} \left[\left(\frac{273+t_1}{100} \right)^4 - 92 \right], \quad (1)$$

q – интенсивность облучения (поверхностная плотность лучистого теплового потока), Вт/м²; Δx – расстояние от места нахождения человека по горизонтали до вертикальной оси подвески светлого нагревателя, м; F_1 – площадь поверхности излучения панели светлого инфракрасного нагревателя, м²; R – расстояние от головы человека до центра излучающей панели, м; t_1 – температура излучающей поверхности панели, °С.

У темных инфракрасных нагревателей температура излучающей трубы (t_1) является переменной величиной (рис.6, кривая 1). Она изменяется вдоль его оси.

С целью разработки методики расчета интенсивности облучения в помещениях, отапливаемых темными инфракрасными нагревателями, в ХГТУСА были проведены теоретические и экспериментальные исследования.

Рассматривая темный трубчатый инфракрасный излучатель как последовательность бесконечного числа излучающих элементов поверхности трубы [3], расположенных вдоль ее оси, интенсивность облучения (плотность потока) на уровне головы человека может быть записана в виде интеграла

$$q = \int_0^{x'} \frac{1,8S^* L \cdot \xi \left[\left(\frac{t(x') + 273}{100} \right)^4 - 92 \right]}{\left[h^2 + \Delta y^2 + (\Delta X - Lx')^2 \right]^2} h(h \cdot \cos \alpha + \Delta y \cdot \sin \alpha) dx', \quad (2)$$

где h – высота подвеса нагревателя, отсчитываемая от уровня головы человека, м; α – угол наклона плоскости нагревателя к горизонтали, град.; ΔX – продольное расстояние от головы человека до точки подсоединения горелки к излучателю, м; Δy – поперечное отклонение облучаемого объекта от оси излучателя, м; $x' = l/L$; l – текущая координата вдоль оси излучателя, м; L – длина трубы излучателя, м; S^* – ширина отражателя, м; ξ – степень черноты излучающей трубы ($\xi \approx 1$); $t(x')$ – текущая температура поверхности излучающей трубы, °С.

Формулы для определения величины температуры $t(x')$ можно получить с использованием классических зависимостей сложного теплообмена [4], а также закона Ньютона - Рихмана [5], записанного в виде дифференциального уравнения теплоотдачи

$$W \cdot dt = -K_T(t - t_B) \cdot dl, \quad (3)$$

где W – расходная теплоемкость продуктов сгорания, Вт/К

$$W = G_{nc} \cdot \bar{c},$$

G_{nc} – массовый расход продуктов сгорания, кг/с; \bar{c} – средняя теплоемкость продуктов сгорания, Дж/кг·К; K_T – местный коэффициент теплопередачи от потока газа к стенке на единицу длины, Вт/м; t – температура продуктов сгорания, °С; t_B – температура воздуха в помещении, °С.

Для решения этого уравнения, а также получения величин и характера распределения температуры по наружной поверхности излучающей трубы вдоль ее оси в системе MATLAB 7 [6] составлена компьютерная программа. На рис.7 с помощью этой программы построены графики изменения температуры вдоль оси темного инфракрасного излучателя длиной 8 м, диаметром 100 м при расходе газа 5 м³/ч.

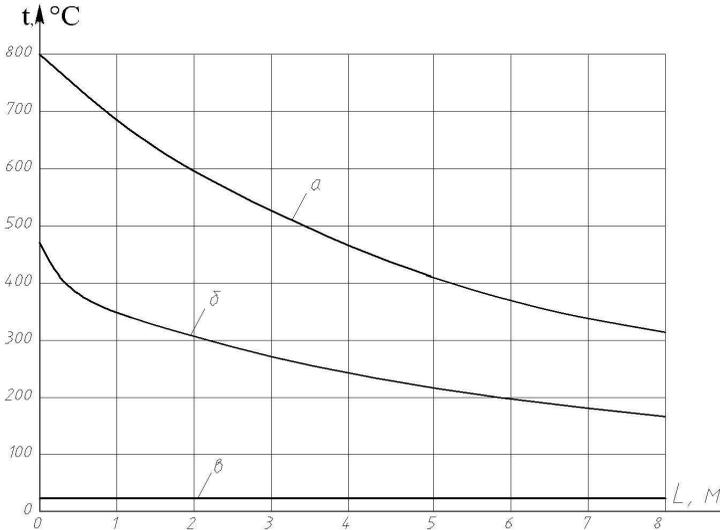


Рис.7 – Графики изменения температуры по длине излучающей трубы:
 а – продуктов сгорания (t); б – ее наружной поверхности $t(x')$; в – окружающего воздуха в отапливаемом помещении (t_B).

Кроме того, с использованием численного метода интегрирования Симпсона в системе MATLAB 7 [6] разработана компьютерная программа решения уравнения (2) для расчета величин интенсивности облучения в любой точке рабочей зоны отопляемого помещения и представления их в графическом виде. На рис.8 приведен график изменения интенсивности облучения вдоль оси нагревателя, построенный с помощью этой программы.

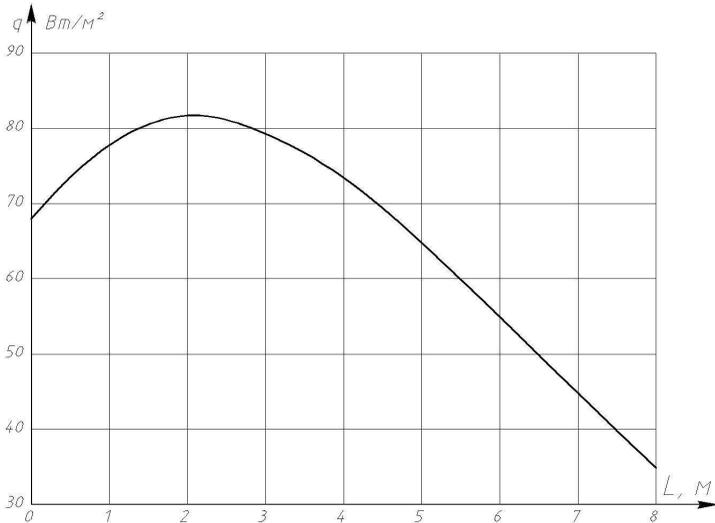


Рис.8 – График изменения интенсивности облучения на уровне головы человека вдоль оси нагревателя

В качестве примера с помощью этой программы построена поверхность распределения интенсивности облучения на уровне головы человека в рабочей зоне помещения вдоль оси нагревателя (рис.9).

Разработанная компьютерная программа с использованием метода суперпозиции позволяет также рассчитывать и строить эпюры облученности на уровне головы человека в помещении, отопляемом несколькими темными инфракрасными нагревателями.

Разработанные в ХГТУСА для расчета интенсивности облучения аналитические зависимости и компьютерные программы вполне удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, полученными на реальных системах отопления в производственных условиях.

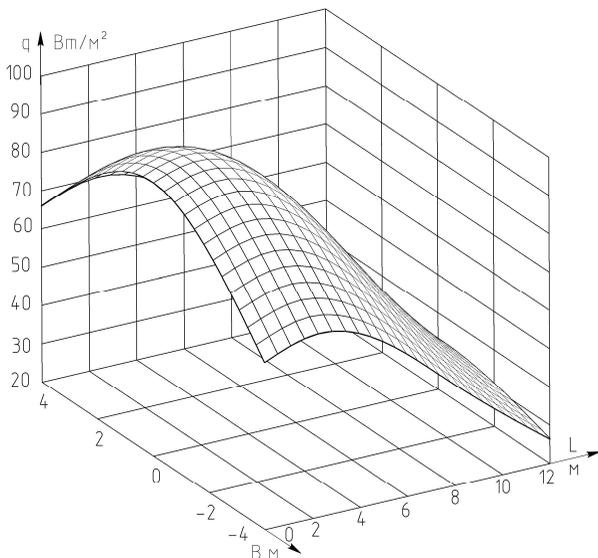


Рис.9 – Поверхность распределения интенсивностей облучения в рабочей зоне помещения на уровне головы человека вдоль оси нагревателя

Выводы:

1. Для достижения наиболее комфортных тепловых условий в производственных помещениях целесообразно использовать для целей отопления темные газовые инфракрасные нагреватели. В сравнении со светлыми нагревателями они обеспечивают минимальные перепады температуры воздуха как по высоте, так и по всей площади отапливаемого пространства.

2. При эксплуатации систем лучисто-воздушного отопления производственных помещений необходимо проводить тщательный контроль не только температуры воздуха, но и особенно интенсивности облучения в пределах рабочей зоны, не допуская их значений выше допустимых ГОСТом [1].

3. Для расчета величин интенсивности облучения на уровне головы человека в различных точках рабочей зоны отапливаемого помещения с помощью темных инфракрасных нагревателей могут быть использованы разработанные в ХГТУСА аналитические зависимости и компьютерные программы. Они могут быть также использованы и для экспертизы принимаемых проектных решений лучисто-воздушного отопления производственных помещений с точки зрения допустимых норм интенсивности облучения.

1.ГОСТ 12.1.005-88. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. – М.: Система стандартов безопасности труда. Государственный стандарт СССР, 1988 (переиздан в мае 1991 г.).

2.Шумилов Р.Н., Толстова Ю.И., Поммер А.А.Совершенствование методики расчета лучистого отопления // Материалы междунар. науч.-техн. конф. «Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции». – М.: МГСУ, 2005. – С.107-112.

3.Иродов В.Ф., Солод Л.В., Кобыща А.В. Математическое моделирование элементарного участка системы воздушно-лучистого отопления // Вісн. Придніпров. держ. акад. буд-ва та архітектури. – 2001. – №4. – С.41-46.

4.Баскаков А.П., Берг В.В., Витт О.К. и др. Теплотехника. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 224 с.

5.Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергия, 1981. – 416 с.

6.Алексеев Е.Р., Чеснокова О.В. MATLAB 7. – М.: НТ Пресс, 2006. – 464 с.

Получено 08.05.2009

УДК 697.14

А.Я.БОМБА, д-р техн. наук, В.П.ВОСТРИКОВ, канд. техн. наук, Є.В.САВІЮК
Національний університет водного господарства та природокористування, м.Рівне

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ НАГРІВАННЯ РОДЮЧОГО ШАРУ ГРУНТУ ПАРАЛЕЛЬНО РОЗМІЩЕНИМИ ЛІНІЙНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ТЕПЛА

Одержано формули для розрахунку температурного поля горизонтальної смуги ґрунту, що обігривається паралельно розміщеними лінійними джерелами тепла, знайдено оптимальні відстань між ними і глибина залягання за умов встановлення необхідного температурного режиму ґрунту.

Получены формулы для расчета температурного поля горизонтальной полосы ґрунта, который обогревается параллельно размещенными линейными источниками тепла. Найдены оптимальное расстояние между источниками и глубина их залегания при условиях достижения необходимого температурного режима ґранта

The formulas for the calculation of the horizontal bar field temperature, which is heated with parallel placed linear sources of heat were received and the optimum distance between them and depth of bedding according to the establishment of necessary temperature condition of soil were found.

Ключові слова: лінійні джерела тепла, теплопровідність, питома теплова витрата, тепловий потік, комплексний потенціал, тепловий режим.

На даний час задачі прогнозування процесів нагрівання середовищ зокрема ґрунту, пластинами, трубами, точковими джерелами тепла тощо є досить актуальними в будівельному виробництві та сільськогосподарській практиці. Причому, з метою економії певних затрат, окрім традиційних постановок задач на розрахунок температурних полів, виникає необхідність оптимізації тих чи інших параметрів процесу. В даній роботі йдеться про розрахунок температурного поля у