

УДК 31.05.2001

СЕМЕРНИН А.М., СЕМЕРНИНА С.Д., ЛЕВЧЕНКО А.А.

Институт газа НАН Украины

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОМЕЩЕНИИ, ОБОГРЕВАЕМОМ ГАЗОВЫМИ ТРУБЧАТЫМИ НАГРЕВАТЕЛЯМИ

Розроблена методика моделювання теплових процесів, яка враховує променево – конвективний теплообмін в приміщенні, яке обігрівается газowymi трубчатими нагрівачами.

Разработана методика моделирования тепловых процессов, которая учитывает лучисто – конвективный теплообмен в помещении, обогреваемом газowymi трубчатыми нагревателями.

Method of modeling of thermal processes which take account of radiantly – convection heat exchange in building heated by gas tube heaters is developed.

C – теплоемкость, Дж/кг·°С;

F – площадь, м²;

G – расход, м³/с;

N – количество зон в модели, ед.;

Q – тепловой поток, Вт;

q – плотность теплового потока, Вт/м²;

R – сопротивление теплопередачи, м²·°С/Вт;

r – количество зон с заданной температурой, ед.;

t – температура, °С;

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·К;

ε – степень черноты;

σ – коэффициент излучения, Вт/м²·К⁴;

τ – температура элемента;

φ – коэффициент облученности.

Индексы:

L – воздух,

R – радиационный,

Π – помещение.

Введение

Институт газа НАНУ разработал энергосберегающую экологически чистую систему лучистого обогрева промышленных помещений [1], которая предусматривает использование газовых трубчатых низкотемпературных (“темных”) радиационных нагревателей нового поколения конструкции Института газа НАНУ [2].

В настоящее время энергосберегающая экологически чистая система лучистого обогрева является единственной системой, позволяющей с высокой эффективностью обогревать производственные помещения, высота которых превышает 6 м.

По сравнению с традиционными конвективными системами отопления (водяными, воздушными и др.) с энергетической точки зрения созданная система имеет многочисленные преимущества: лучистая энергия концентрируется в нижней (технологической) зоне помещения, уменьшается расход теплоты на бесполезный нагрев верхней зоны

помещения, обеспечивается тепловой и физиологический комфорт в рабочей зоне при снижении средней температуры воздуха в помещении на 5...6 °С.

Цели исследования

При отоплении излучением тепловая обстановка в помещении определяется с одной стороны параметрами воздуха – его температурой t_L , подвижностью ν , относительной влажностью, а с другой – радиационной температурой t_R , зависящей от размещения и температуры окружающих поверхностей. Для систем обогрева излучением основным показателем комфорта является температура помещения

$$t_{\Pi} = (t_L + t_R) / 2. \quad (1)$$

Радиационная температура определяется как средняя температура внутренних поверхностей помещения, вычисленная относительно человека, находящегося в центре помещения:

$$t_R = \sum \varphi_{R-i} \cdot \tau_i \quad (2)$$

где φ_{R-i} – угловой коэффициент, облученности от окружающих поверхностей, имеющих температуру τ_i .

При проектировании системы радиационного обогрева требуется определить общее теплотребление системы, количество нагревателей, высоту их подвеса над полом и координаты размещения в плоскости подвеса таким образом, чтобы обеспечить требуемую температуру восприятия, равномерность ее распределения, не допуская превышения физиологически допустимого уровня облученности на рабочих местах.

Для обеспечения комфортного уровня облученности на рабочих местах при проектировании необходимо учитывать много факторов, в частности, мощность и размеры нагревателей, распределение плотности тепловых потоков на их рабочей поверхности, а также характеристики помещения – его размеры, теплоизоляционные свойства ограждений и распределение температуры на их внутренних поверхностях, расположение технологических зон, интенсивность воздухообмена и конструктивные возможности помещения для выбора высоты подвеса нагревателей и др.

Учитывая сложный характер теплообмена в помещении при лучистом обогреве, зависимость показателей комфорта от большого количества геометрических и физических параметров, зависимость от температуры коэффициентов теплообмена качественное проектирование систем лучистого обогрева производственных помещений газовыми трубчатыми нагревателями может выполняться на основе математического моделирования тепловых процессов в системе.

Методы исследования

Рассматривается методика и результаты математического моделирования системы лучистого обогрева помещений с использованием газовых трубчатых нагревателей. Методика основана на учете основных механизмов теплообмена внутри помещения, на наружных поверхностях его ограждений, а также между излучающим корпусом и рефлектором нагревателя и средой в помещении.

Моделирование теплообмена в нагревателе позволяет определить плотность теплового потока от нагревателя в зависимости от расхода газа,

геометрических размеров его излучающих поверхностей, конструктивных и физических характеристик отражательного экрана, температуры и подвижности окружающего воздуха и др. При определении теплового потока от нагревателя в качестве расчетной излучающей поверхности принимается условная поверхность, «закрывающая» конструкцию нагревателя снизу.

Теплообмен внутри помещения является лучистоконвективным со значительным преобладанием лучистой составляющей, а потери теплоты помещением в окружающую среду определяются теплопередачей через ограждения и уносом теплоты при воздухообмене. Теплообмен описывается системой уравнений теплового баланса для ограждений, радиационных нагревателей и приточного воздуха.

Для каждой внутренней поверхности ограждения тепловой баланс в установившемся режиме представляется соотношениями:

$$Q_{Hi} = Q_{Ri} + Q_{Ki} \quad (3)$$

$$Q_{Hi} = \int_{F_i} (\tau_{dFi} - t_H) / R_{oi} dF_i, \quad I = 1, \dots, N, \quad (4)$$

$$Q_{Ki} = \int_{F_i} \alpha_{KdFi} (t_L - \tau_{dFi}) dF_i, \quad (5)$$

$$Q_{Ei} = \int_{F_i} \sigma_0 \varepsilon_{dFi} (T_{dFi})^4 dF_i + \sum_j \int_{F_j} \int_{F_i} (1 - \varepsilon_{dFi}) \varphi_{dFji} - dF_i Q_{EdFj} dF_j dF_i \quad (6)$$

$$Q_{Ri} = \sum_j \int_{F_j} \int_{F_i} \varphi_{dFji} - dF_i \varepsilon_{dFi} Q_{EdFj} dF_j dF_i - \int_{F_i} \sigma_0 \varepsilon_{dFi} (T_{dFi})^4 dF_i \quad (7)$$

Здесь Q_{Hi} – тепловой поток от внутренней поверхности ограждения к наружному воздуху, который имеет температуру t_N ; Q_{Ki} , Q_{Ri} , Q_{Ei} – соответственно конвективный, результирующий и эффективный лучистый поток на i -й поверхности; F_i – площадь i -ой поверхности, τ_{dFi} – температура элемента i -ой поверхности; R_{oi} – неполное сопротивление теплопередаче ограждения (без сопротивления на внутренней поверхности).

Тепловой баланс для приточного воздуха:

$$G_{\text{Прс}} (t_L - t_{\text{Пр}}) = \sum_{i=1} \int_{F_i} \alpha_{KdFi} (\tau_{dFi} - t_{\text{Пр}}) dF_i,$$

$$(t_{\text{Пр}} < t_L). \quad (8)$$

$G_{\text{Пр}}$ – расход приточного воздуха, кг/с; $t_{\text{Пр}}$ – температура приточного воздуха.

Для расчета теплообмена в помещении использован зональный метод при следующих допущениях:

- поверхности, участвующие в теплообмене, диффузно серые;
- воздух в помещении прозрачен для инфракрасного излучения нагревателей;
- лучистая и конвективная компоненты теплообмена на поверхностях определяются независимо друг от друга;
- каждая из поверхностей ограждений может быть разделена на изотермические зоны.

На основе принятых допущений создается зональная модель помещения и система интегральных уравнений (3-8) ограждения заменяется системой алгебраических уравнений относительно плотностей тепловых потоков для каждой зоны.

При этом уравнения конвективного теплообмена и теплопередачи в зонах преобразуются к виду:

$$q_{Hi} = q_{Ri} + q_{Ki}, \quad (9)$$

$$q_{Hi} = (\tau_i - t_H)/R_{oi}, \quad (10)$$

$$q_{Ki} = \alpha_{Ki}(t_L - \tau_i), \quad (11)$$

$$G_{\text{Пр}}c(t_L - t_{\text{Пр}}) = \sum_{i=1}^N \alpha_{Ki}(\tau_i - t_{\text{Пр}})F_i, \quad (12)$$

а соотношения, связывающие плотности эффективных и результирующих лучистых тепловых потоков в зоне имеют вид:

$$q_{Ei} = \sigma_0 \varepsilon_i T_i^4 + (1 - \varepsilon_i) \sum_{j=1}^N \varphi_{ji} q_{Ej}, \quad i = 1, \dots, r, \quad (13)$$

$$q_{Ei} = q_{Ri} + \sum_{j=1}^N \varphi_{ji} q_{Ej}, \quad i = r + 1, r + 2, \dots, N \quad (14)$$

Здесь N – общее количество зон в зональной модели помещения; r – количество зон с заданной температурой.

При создании геометрической зональной модели помещения внутренние поверхности делятся на произвольное число зон, что позволяет включить в зональный расчет поверхности окон, ворот, излучающие поверхности нагревателей. При делении на зоны поверхности пола учитывается различие термического сопротивления его отдельных

участков и необходимость проверки условий комфортности

Условные излучающие поверхности нагревателей в зональной модели помещения выделяются в отдельные зоны. Определение средней плотности излучения на этих поверхностях осуществляется зональным методом в условно замкнутой системе: корпус – рефлектор нагревателя – условная излучающая поверхность.

Важным моментом при зональном расчете является вычисление коэффициентов облученности, которое в данном случае выполняется алгебраическими и численными методами.

Коэффициенты теплообмена в уравнениях теплового баланса определяются в зависимости от общей подвижности воздуха, расположения поверхностей (вертикальная, горизонтальная), температуры поверхностей и воздуха.

Модельные расчеты выполняются итерационным способом с использованием разработанного программного комплекса, содержащего базу данных, модули расчета по математическим моделям тепловых процессов и модули задействованных численных методов.

Основные этапы модельных расчетов состоят в следующем.

1. Определяется приближенная величина общих тепловых потерь помещением в окружающую среду при заданной нормативной температуре окружающей среды и воздуха в помещении.

2. На основе вычисленных тепловых потерь помещением, номинальной мощности и КПД нагревателей определяется первое приближение для количества нагревателей в системе обогрева.

3. Задается приближенное значение высоты подвеса нагревателей и определяются координаты расположения нагревателей в плоскости подвеса.

4. Определяется плотность теплового потока от излучающей поверхности нагревателей зональным методом.

5. Создается зональная модель помещения и определяется матрица угловых коэффициентов.

6. Рассчитывается зональным методом теплообмен в помещении.

Расчет теплообмена выполняется для определенного раньше количества и расположения нагревателей, расхода газа на нагреватель. Результаты расчета позволяют на каждом шаге итерации

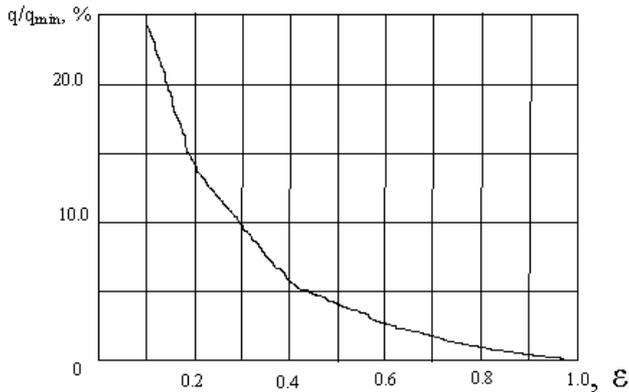


Рис. 1. Влияние степени черноты отражательного экрана нагревателя на плотность теплового потока от нагревателя.

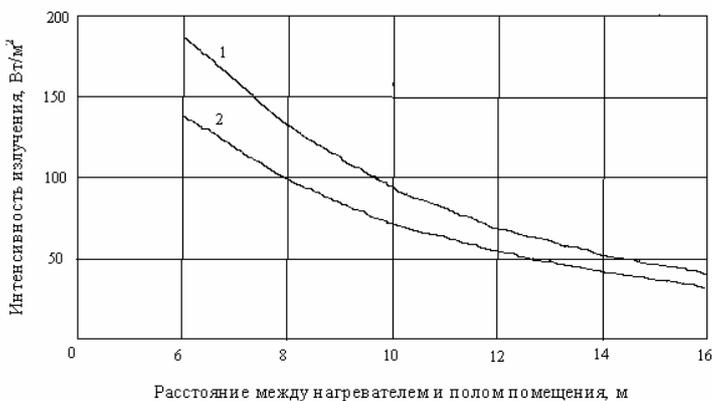


Рис. 2. Средняя интенсивность облученности участка (100 м^2) под нагревателем в зависимости от высоты размещения нагревателя: 1 - на уровне роста человека; 2 - на уровне пола помещения.

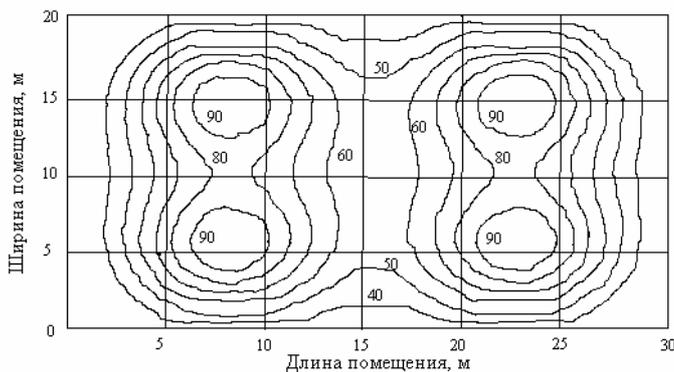


Рис. 3. Поле относительной (в процентах) облученности пола помещения четырьмя нагревателями.

проверять выполнение условий комфортности и принимать решение относительно количества и размещения нагревателей, исходя из вычисленных показателей облученности рабочих мест и температуры восприятия, а не на основании общих потерь теплоты помещением при заданной его температуре.

Если условия комфортности на текущем шаге расчета не удовлетворяются, то изменяются (в зависимости от ситуации) либо параметры установки нагревателей – высота подвеса или расстояния между ними, либо количество нагревателей или их рабочая тепловая мощность, и процесс расчета продолжается.

При выполнении условий комфортности формируется файл результатов расчета, содержащий рассчитанную установочную тепловую мощность системы лучистого обогрева, количество нагревателей и параметры их размещения, средний уровень и показатель равномерности облучения на уровне пола и высоты роста человека в помещении или на отдельных технологических участках, температуру воздуха и поверхностей ограждений и др.

Обсуждение результатов

Некоторые результаты моделирования теплообмена в помещении при лучистом обогреве с использованием газовых трубчатых нагревателей тепловой мощностью 35 кВт показаны на рис. 1-3.

Выводы

Разработанная методика и программное обеспечение могут быть использованы для теплового расчета и проектирования систем радиационного обогрева производственных помещений с применением газовых трубчатых нагревателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Семернин А.М., Семернина С.Д., Левченко А.А., Кузьмич А.М. Энергосберегающие технологии для отопления производственных помещений// Пром. теплотехника.- 2004.- Т. 26.- № 3.- С.76-79.
2. Патент Укр. №42065 М. кл. F23C 3/00, F23D 14/12, F24C 3/02 "Газовий радіаційний нагрівник для опалення приміщень" від 15.10.2001 р. Семернін О.М. та інші.

Получено 25.10.2004 г.