

Д. Е. Осетянская, асс., В. Ф. Иродов, д. т. н., проф.

Ключевые слова: *повышенное лучеиспускание, тепловой поток, трубчатый газовый нагреватель, математическая модель, гидравлическая цепь, метод эволюционного поиска наиболее предпочтительных решений*

Введение. Лучистое отопление в настоящее время является альтернативой водяному и воздушному отоплению как экологически чистое, комфортное, энергоэффективное отопление производственных помещений (цеха, мастерские, склады, ангары, гаражи, теплицы, птицефермы, животноводческие фермы и т. д.). Главное отличие инфракрасного обогрева от традиционных систем отопления заключается в обогреве площади, а не объема помещения. Отопление высоких и больших по площади помещений традиционным тепловоздушным способом является неэкономичным, поскольку большая часть нагретого воздуха поднимается вверх, что приводит к дополнительной потере теплоты через верхние перекрытия, стены, световые проемы и фонари. Лучистые тепловые потоки передают теплоту поверхностям в зоне обогрева, что значительно уменьшает перепад температуры по высоте помещения. Помимо этого, в сравнении с конвективным обогревом, системы лучистого отопления позволяют избежать потерь, имеющих место при нагревании и транспортировке теплоносителя. Однако, при использовании инфракрасных газовых нагревателей не весь тепловой поток передается лучистым способом. Весомая часть теплоты участвует в конвективном нагревании окружающего воздуха. Актуальной задачей является увеличение лучистой составляющей газовых инфракрасных нагревателей для повышения эффективности отопительных и технологических процессов, связанных с тепловым излучением.

Анализ публикаций. В техническом решении [1] представлены некоторые способы повышения эффективности работы лучистого газового нагревателя. Основное внимание уделяется усовершенствованию конструкции отражателя установки, а также технологии подачи конвективно нагретого воздуха в отапливаемую зону помещения. В техническом решении [2] авторами предлагается повышение эффективности работы газового лучистого нагревателя за счет использования теплоты конвективно нагретого воздуха в процессе горения топлива. Данное техническое решение представляет собой трубчатый газовый нагреватель повышенного лучеиспускания.

Цель статьи. Целью является разработка математической модели газового лучистого нагревателя с повышенным лучеиспусканием [2].

Характерной особенностью математической модели нагревателя с повышенным лучеиспусканием является наличие взаимной связи теплового и гидравлического режима основного участка нагревателя с режимом участка подогрева приточного воздуха. С учетом этого факта моделируемую гидравлическую цепь следует рассматривать как гидравлическую цепь с распределенными и регулируемым параметрами.

Математическая модель теплового и гидравлического режима основного участка нагревателя. На основном участке нагревателя (вдоль трубы излучателя) рассматривается стационарное одномерное движение однородной газо-воздушной смеси, начиная от сечения полного сгорания горючего газа до входа в вытяжной вентилятор. Математическая модель основного участка основывается на следующих уравнениях[3; 5]:

- уравнение сохранения массы:

$$\rho w F = M = \text{const} , \quad (1)$$

где ρ – плотность газа; w – средняя линейная скорость движения газа по трубе-излучателю; F – площадь поперечного сечения излучателя.

- уравнение состояния газо-воздушной смеси в виде уравнения состояния идеального газа:

$$P = \rho R T , \quad (2)$$

где P – абсолютное давление в сечении воздуховода; T – абсолютная температура газа в данном сечении воздуховода; R – газовая постоянная, зависящая от состава газо-воздушной смеси после полного сгорания горючего газа.

- уравнение движения газо-воздушной смеси внутри трубы-излучателя:

$$\frac{dP}{\rho} + \frac{\lambda}{d} \frac{w^2}{2} dx = 0 \quad (3)$$

где dP – перепад давления при течении газа в воздуховоде-излучателе на участке длиной dx , λ – коэффициент трения, D – внутренний диаметр излучателя.

Далее составим уравнения теплового баланса для элементарного участка воздуховода длиной dx .

$$dQ_{\text{вн}} = c_p dT = dQ_1 = dQ_2 = dQ_3 + dQ_4 \quad (4)$$

где $dQ_{\text{вн}}$ – теплота, выделяющаяся при горении топлива; c_p – изобарная теплоемкость газо-воздушной смеси; dQ_1 – тепловой поток от газа к стенке трубы-излучателя, передаваемый конвекцией, в данном сечении на элементарном участке длиной dx ; dQ_2 – тепловой поток от внутренней поверхности стенки излучателя к наружной поверхности, передаваемый теплопроводностью на участке dx ; dQ_3 – тепловой поток излучением от поверхности трубы-излучателя в окружающую среду отапливаемого помещения на участке dx ; dQ_4 – тепловой поток от наружной стенки трубы-излучателя в окружающее пространство отапливаемого помещения, передаваемый конвекцией на участке dx .

Интегрируя (4), получаем значение T в новой точке $T(x+dx)$; уравнение (3) содержит неизвестные P, ρ ; уравнение (2) – неизвестные P, ρ, w ; уравнение (1) – неизвестные ρ, w .

В совокупности уравнения (2) – (3) содержат неизвестные P, ρ, w , т.е. система разрешима.

Продифференцируя (1, 2, 3), получим систему уравнений (5):

$$\begin{cases} wFdP + \rho Fdw = 0 \\ dP + \lambda \frac{dx}{D} \rho \frac{w^2}{2} = 0 \\ dP - RTd\rho - \rho RdT = 0 \end{cases} \quad (5)$$

Система (5) содержит неизвестные $d\rho, dw, dP$ и известные dx, dT .

Расчет для однофазного течения.

В начальной точке $x=0$ известны начальные условия: $P(0); w(0); \rho(0); T(0); T_{\text{см}}(0)$. Преобразуем (5) и получим соответственно уравнения (5.1), (5.2) и (5.3).

$$\begin{cases} wFdP + \rho Fdw = 0 \end{cases} \quad (5.1)$$

$$\begin{cases} dP = -\lambda \frac{dx}{D} \rho \frac{w^2}{2} \end{cases} \quad (5.2)$$

$$\begin{cases} dP - RTd\rho = \rho RdT \frac{wF}{RT} \end{cases} \quad (5.3)$$

$$\text{или } \frac{wF}{RT} dP - wFd\rho = \frac{\rho wF}{T} dT \quad (5.3')$$

Складывая (5.1) и (5.3'), получим:

$$\frac{wF}{RT} dP + \rho Fdw = \frac{\rho wF}{T} dT \left(-\frac{RT}{wF} \right) \quad (5.4)$$

$$\text{или } -dP - \frac{\rho F}{wF} dw = -\frac{\rho wF}{T} \frac{RT}{wF} dT \quad (5.4')$$

Складывая (5.4') и (5.2), получим:

$$\begin{aligned} -\frac{\rho RT}{w} dw &= -\lambda \frac{dx}{D} \rho \frac{w^2}{2} - \rho dT \\ \text{или } \rho RT \frac{dw}{w} &= +\lambda \frac{dx}{D} \rho \frac{w^2}{2} + \rho RdT \frac{T}{T} \\ \text{или } P \frac{dw}{w} &= \lambda \frac{dx}{D} \rho \frac{w^2}{2} + P \frac{dT}{T} \end{aligned} \quad (5.5)$$

Откуда легко вычислить относительное (и абсолютное) приращение скорости:

$$\frac{dw}{w} = \lambda \frac{dx}{D} \rho \frac{w^2}{2} / P + \frac{dT}{T}$$

Можно преобразовать (5.1) к виду:

$$wF\rho\frac{d\rho}{\rho} + \rho wF\frac{dw}{w} = 0$$

$$\text{или } \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dw}{w} = 0, \text{ т.е. } \frac{d\rho}{\rho} = -\frac{dw}{w}$$

Несколько преобразуя (5.2), можно получить следующие итоговые для интегрирования в виде:

$$\frac{dP}{P} = -\lambda \frac{dx}{D} \rho \frac{w^2}{2} / P \quad (6)$$

$$\frac{dw}{w} = \lambda \frac{dx}{D} \rho \frac{w^2}{2} / P + \frac{dT}{T} \quad (7)$$

$$\frac{d\rho}{\rho} = -\lambda \frac{dx}{D} \rho \frac{w^2}{2} / P + \frac{dT}{T} \quad (8)$$

С помощью формул (6) – (8) можно вычислить значения P , ρ , w вдоль трубы-излучателя при известных начальных условиях.

Коэффициент гидравлического сопротивления для турбулентного режима течения в трубах при $Re > 4000$ определяется по формуле:

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{k_s}{D} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25},$$

где k_s – эквивалентная абсолютная шероховатость.

При больших числах Re :

$$\lambda \approx 0,11 \left(\frac{h_s}{D} \right)^{0,25}$$

Математическая модель участка нагревателя с подогревом воздуха для горения основывается на трех основных уравнениях сохранения в виде:

- уравнение сохранения массы $d(\rho wF) = Fg(x)dx$, (9)

- движения $\rho w dw = -dP - g(x)w dx$, (10)

- энергии $\rho w d \left(i + \frac{w^2}{2} \right) = g(x) \left[\Delta i(x) - \frac{w^2}{2} \right] dx$, (11)

где g – величина, которая характеризует количество конвективно-нагретого воздуха, который поступает в воздуховод, $g=g(x)$ – количество воздуха, забираемого вдоль оси трубы-излучателя x . При конструировании установки нагревателя с повышенным лучеиспусканием величина g задается.

Нужно выразить приращения дифференциалов dw , $d\rho$, dP , dT через параметры течения P , ρ , w , T и $g(x)$. Следует учитывать уравнение состояния:

$$P = \rho RT \quad (12)$$

Продифференцируем (9):

$$wF d\rho + \rho F dw + \rho w dF = Fg(x)dx \quad (9')$$

$$\rho w dw = -dP - g(x)w dx$$

Учитывая, что рассматриваемые скорости невелики, уравнение (11) можно упростить:

$$\rho w c_p dT = g(x) \left[c_p \Delta T - \frac{w^2}{2} \right] \quad (11')$$

$$dP = \rho R dT + RT d\rho \quad (12')$$

При этом $\Delta T = T_{\text{конв}}(x) - T$, где $T_{\text{конв}}(x)$ – температура конвективно нагретого воздуха, которую полагаем известной, т.к. она может быть определена так же как и $g(x)$; T – температура газозвушной смеси, которая будет изменяться в зависимости от $T_{\text{конв}}(x)$. Тогда из уравнения (11') вычислим dT :

$$dT = \frac{g(x)}{\rho w c_p} \left\{ c_p [T_{\text{конв}}(x) - T] - \frac{w^2}{2} \right\}$$

Из уравнений (9') и (10) получим зависимость между dP и $d\rho$. Для этого запишем выражения для ρdw из (9') и (10), получим:

$$\rho dw = g(x)dx - wd\rho - \rho w \frac{dF}{F} \quad (13)$$

$$\rho dw = -\frac{dP}{w} - g(x)dx \quad (14)$$

Вычитая (14) из (15), получим:

$$2g(x)dx - wd\rho - \rho w \frac{dF}{F} + \frac{dP}{w} = 0$$

Подставляя (12') вместо dP в последнее уравнение, получим:

$$wd\rho = \frac{(\rho R dT + RT d\rho)}{w} - \rho w \frac{dF}{F} + 2g(x)dx$$

Объединяя члены с $d\rho$, получим:

$$d\rho \left[w - \frac{RT}{w} \right] = \frac{RT}{w} dT - \rho w \frac{dF}{F} + 2g(x)dx$$

Из последнего уравнения можно вычислить дифференциал $d\rho$, из (12') – dP , из (10) – dw .

Результаты и их обсуждение. Если при выполнении расчетов конструирования установки принять количество нагретого воздуха $g(x)$, поступающего на горение известной величиной и определить температуру нагретого воздуха $T_{\text{конв}}(x)$, а также температуру излучающей среды T , то математическая модель установки рассчитывается по предложенным уравнениям с помощью метода эволюционного поиска предпочтительных решений [4]. Для проведения расчетов параметров существующей установки необходимо произвести дополнительные расчеты для определения величин $g(x)$ и температур. Целесообразно, по мнению авторов, определить величины $g(x)$, $T_{\text{конв}}(x)$ и T с помощью физического эксперимента.

Выводы. Разработана математическая модель газового лучистого нагревателя повышенного лучеиспускания. Характерной особенностью математической модели нагревателя с повышенным лучеиспусканием является наличие взаимной связи теплового и гидравлического режима основного участка нагревателя с режимом участка подогрева приточного воздуха. С учетом этого факта моделируемую гидравлическую цепь следует рассматривать как гидравлическую цепь с распределенными и регулируемыми параметрами. Приведен алгоритм расчета параметров работы нагревателя. При известной зависимости $g(x)$ можно решать прямую задачу расчета параметров теплового и гидравлического режима путем численного интегрирования системы обыкновенных дифференциальных уравнений для основного и дополнительного участков нагревателя с применением метода эволюционного поиска наиболее предпочтительных решений.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. **Иродов В. Ф.** Математическое моделирование элементарного участка системы воздушно-лучистого отопления / В.Ф. Иродов, Л. В. Солод, А. В. Кобыща // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – Д., 2001. – № 4. – С. 41 - 46.
2. **Иродов В. Ф.** Эволюционные алгоритмы поиска оптимальных решений / Ф. И. Стратан, В. Ф. Иродов // Методы оптимизации при проектировании систем теплогазоснабжения. – Кишинев, 1984. – С. 16 – 30.
3. **Припотень Ю.К.** Особенности расчета локального отопления с помощью источников инфракрасного излучения // Науковий вісник будівництва / Х., 2001 – Вип. 12. – С. 61 – 65.
4. Пат. 87028 України, МПК (2011.01), F24D 10/00, F24D 15/00, F24C 15/00. Пристрій для променевого опалювання / Редько А. О., Болотських М. М.; власник ХДТУБА. — № а200709448; заявл. 25.02.2009; опубл. 10.06.2009, Бюл. № 4.
5. Пат. 59891 України, МПК (2011.01), F24D 15/00, F24C 15/00. Променивий нагрівач / Іродов В. Ф., Осетянська Д. Є., Хацкевич Ю. В.; власник Державний ВНЗ «ПДАБА». — № u201010626; заявл. 02.09.10; опубл. 10.06.11, Бюл. № 11.

УДК 697.7

Моделирование трубчатого газового нагревателя повышенного лучеиспускания / Д. Е. Осетянская, В. Ф. Иродов // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – Д.: ПГАСА, 2011. – № . – С. – Библиогр.: (5 назв.).

Актуальной задачей при использовании инфракрасных газовых нагревателей является увеличение интенсивности лучеиспускания для повышения эффективности отопительных и технологических процессов, связанных с тепловым излучением. Разработана математическая модель газового лучистого нагревателя повышенного лучеиспускания, которая представляет собой гидравлическую цепь с распределенными и регулируемыми параметрами. Приведен алгоритм расчета параметров работы нагревателя, основанный на интегрировании с применением метода эволюционного поиска наиболее предпочтительных решений.

Ключевые слова: *повышенное лучеиспускание, тепловой поток, трубчатый газовый нагреватель, математическая модель, гидравлическая цепь, метод эволюционного поиска наиболее предпочтительных решений*

Моделювання трубчастого газового нагрівача підвищеного випромінювання / Д. Є. Осетянська, В. Ф. Іродов // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – Д.: ПДАБА, 2011. – № . – С. – Бібліогр.: (5 назв.).

Актуальним завданням при використанні інфрачервоних газових нагрівачів є збільшення інтенсивності випромінювання для підвищення ефективності опалювальних і технологічних процесів, пов'язаних з тепловим випромінюванням. Розроблена математична модель газового променевого нагрівача з підвищеною променевою складовою, який являє собою гідравлічний ланцюг з розподіленими та регулюючими параметрами. Приведений алгоритм розрахунку параметрів роботи нагрівача, заснований на інтегруванні з застосуванням методу еволюційного пошуку найбільш підходящих рішень/

Ключові слова: *підвищене випромінювання, тепловий потік, трубчастий газовий нагрівач, математична модель, гідравлічний ланцюг, метод еволюційного пошуку найбільш підходящих рішень*

Simulation of a tubular high-radiation of the gas heater / D. E. Osetjanskaja, V. F. Irodov // Visnyk of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture. – D.: PSACEA, 2011. – №. . – P.– Bibliogr.: (5 names).

Urgent task of using infrared gas heaters is to increase the intensity of the radiation of the efficiency for heating and technological processes related to thermal radiation. A mathematical model of gas radiant heater radiation of the high, which is a hydraulic circuit with distributed and adjustable parameters. The algorithm for calculating the parameters of the heater based on the integration using the method of evolutionary search for the most preferred solutions.

Keywords: *high radiation, heat flow, tubular gas heater, a mathematical model, the hydraulic circuit, the method of evolutionary search for the most preferred solutions*