УДК 697.7

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРУБЧАТЫХ ГАЗОВЫХ НАГРЕВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ЛУЧИСТОГО ОТОПЛЕНИЯ

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

ГВУЗ «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры»

Постановка проблемы. При использовании инфракрасных газовых нагревателей весомую часть, тем не менее, занимает конвективный способ передачи теплоты за счет нагревания окружающего воздуха, в то время как для решения многих задач необходимо получать именно лучистую тепловую энергию. Поэтому, актуальной задачей является повышение эффективности работы инфракрасных газовых нагревателей за счет рационального использования конвективной теплоты и повышения лучистой составляющей процесса теплообмена. Повышение лучистой составляющей позволит сократить металлоемкость лучистого нагревателя, снизить его себестоимость и рационально использовать топливные ресурсы.

Анализ последних исследований. В техническом решении [1] представлены некоторые способы повышения эффективности работы газового лучистого нагревателя за счет рационального использования конвективной теплоты. Основное внимание обращается на усовершенствование отражателя установки, повышение качества использования конвективной теплоты при направлении ее в рабочую зону. В техническом решении [2] авторами предлагается повышение эффективности газового лучистого нагревателя за счет использования теплоты конвективно нагретого воздуха в процессе горения топлива. Данное техническое решение представляет собой трубчатый газовый нагреватель повышенного лучеиспускания, принцип работы которого приведен на рис.1.

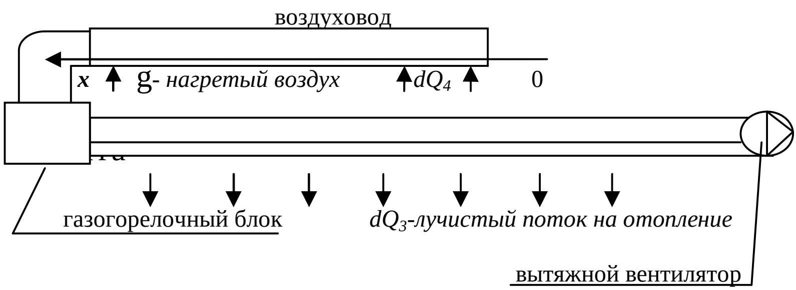

Рис.1. Принципиальная схема работы лучистого газового нагревателя с повышенным лучеиспусканием.

Лучистый газовый нагреватель с повышенным лучеиспусканием помимо газогорелочного блока, трубы-излучателя, отражателя, вытяжного вентилятора, имеет в конструкции воздуховод, через который происходит забор и транспортировка конвективно нагретого воздуха на горение. За счет подачи горячего воздуха на горение увеличивается температура внутри излучающей трубы, при этом ее энергия излучения растет пропорционально четвертой степени абсолютной температуры. В связи с этим резко возрастает радиационная теплопередача по сравнению с конвективной, интенсивность которой пропорциональна разности температур только в первой степени. Смесеобразование в нагревателе происходит за счет кинетической энергии газовой струи и разряжения, которое создает вытяжной вентилятор.

Постановка задачи. Задачей данной работы является разработка математической модели газового лучистого нагревателя с повышенным лучеиспусканием для дальнейших расчетов параметров его эффективной работы.

Характерной особенностью математической модели нагревателя с повышенным лучеиспусканием является наличие взаимной связи теплового и гидравлического режима основного участка нагревателя с режимом участка подогрева воздуха, использующегося для горения.

Математическая модель теплового и гидравлического режима основного участка нагревателя. Рассматривается стационарное одномерное движение однородной газо-воздушной смеси, начиная от сечения полного сгорания горючего газа до входа в вытяжной вентилятор. Имеют место следующие уравнения сохранения.

Уравнение сохранения массы:

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

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:

$$\mathrm{P} = \rho \mathrm{RT} \quad , \qquad (2)$$

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

Уравнение движения газо-воздушной смеси внутри воздуховода:

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

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*.

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

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

Интегрируя (4), получаем значение *T* в новой точке $T(x+\Delta x)$; 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.

Продифференцируем (1):

$$\begin{cases} wFdP + \rho F dw = 0 \\ dP + \lambda \dfrac{dx}{D} \rho \dfrac{w^2}{2} = 0 \\ dP - RTd\rho - \rho R dT = 0 \end{cases} \qquad (5)$$

Система (5) содержит неизвестные *dρ*, *dw*, *dP* и известные *dx, dT*.

Расчет для однорядного течения.

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

$$\begin{cases} wFdP + \rho F dw = 0 \\ dP = -\lambda \dfrac{dx}{D} \rho \dfrac{w^2}{2} \\ dP - RTd\rho = \rho R dT \quad \dfrac{wF}{RT} \end{cases}$$

$$\frac{wF}{RT} dP - wFd\rho = \frac{\rho w F}{T} dT \qquad (5.3')$$

Складывая (5.1) и (5.3'), получим:

$$\frac{wF}{RT} dP + \rho F dw = \frac{\rho w F}{T} dT \; (-\frac{RT}{wF}) \qquad (5.4)$$

$$-dP - \frac{\rho F}{wF} dw = -\frac{\rho w F}{T} \frac{RT}{wF} dT \qquad (5.4')$$

Складывая (5.4') и (5.2), получим:

$$-\frac{\rho RT}{w} dw = -\lambda \frac{dx}{D} \rho \frac{w^2}{2} - \rho dT$$

или $$\rho RT\ \frac{dw}{w} = +\lambda\frac{dx}{D}\rho\frac{w^2}{2} + \rho RdT\ \frac{T}{T}$$

или $$P\frac{dw}{w} = \lambda\frac{dx}{D}\rho\frac{w^2}{2} + P\frac{dT}{T} \qquad (5.5)$$

Откуда легко вычислить относительное (и абсолютное) приращение скорости:

$$\frac{dw}{w} = \lambda\frac{dx}{D}\rho\frac{w^2}{2}/P + \frac{dT}{T} \qquad (6)$$

С учетом $\frac{dP}{P} = -\lambda\frac{dx}{D}\rho\frac{w^2}{2}/P$ из (5.2), а также из (5.1):

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

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

Итоговые формулы:

$$\frac{d\rho}{\rho} = -\lambda\frac{dx}{D}\rho\frac{w^2}{2}/P \qquad (7)$$

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

$$\frac{d\rho}{\rho} = -\lambda\frac{dx}{D}\rho\frac{w^2}{2}/P + \frac{dT}{T} \qquad (9)$$

С помощью формул (7)-(9), очевидно 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:

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

где $k_э$ – эквивалентная абсолютная шероховатость.

При больших числах Re:

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

Математическая модель участка нагревателя с подогревом воздуха для горения. Рассматриваются три основных уравнения сохранения в виде:

уравнение сохранения массы $d(\rho wF) = Fg(x)dx$, (10)

движения $\rho wdw = -dP - g(x)wdx$, (11) энергии $\rho wd\ (i + \frac{w^2}{2}) = g(x)\left[\Delta i(x) - \frac{w^2}{2}\right],$ (12)

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:

$$P = \rho RT \qquad (13)$$

Продифференцируем (10):

$$wFd\rho + \rho Fdw + \rho wdF = Fg(x)dx \qquad (10')$$

$$\rho wdw = -dP - g(x)wdx$$

Учитывая, что рассматриваемые скорости невелики, уравнение (12) можно упростить:

$$\rho wc_p dT = g(x)\left[c_p \Delta T - \frac{w^2}{2}\right] \qquad (12')$$

$$dP = \rho RdT + RTd\rho \qquad (13')$$

При этом $\Delta T = T_{конв}(x) - T$,где $T_{конв}(x)$ – температура конвективно нагретого воздуха, которую полагаем известной, т.к. она может быть определена так же как и $g(x)$; T - температура газовоздушной смеси, которая будет изменяться в зависимости от $T_{конв}(x)$. Тогда из уравнения (12') вычислим dT :

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

Из уравнений (10') и (11) получим зависимость между dP и $d\rho$. Для этого запишем выражения для ρdw из (10') и (11), получим:

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

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

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

Подставляя (13') вместо dP в последнее уравнение, получим:

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

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 (13') – dP , из (11) – dw.

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

Выводы. 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.

ИСПОЛЬЗОВАНННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Патент України № 87028, F24D 10/00. Газовий трубчастий променевий нагрівач/ А.О. Редько, М.М. Болотських; Дата подання 25.02.2009; Дата ріш. 10.06.2009, бюл. № 11.
2. Рішення про видачу деклараційного патенту на корисну модель «Променевий нагрівач» №2229/ЗУ/11 від 02.02.2011// Іродов В.Ф., Осетянська Д.Є., Хацкевич Ю.В.//МПК(2011.01),F24D 15/00,F24C 15/00.
3. Иродов В.Ф., Солод Л.В., Кобыща А.В. Математическое моделирование элементарного участка системы воздушно-лучистого отопления// Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури.- Дніпропетровськ: ПДАБтаА, 2001.- №4.- С.41-46.
4. Меренков А.П., Хасилев В.Я. Теория гидравлических цепей.- М.: Наука, 1985.- 279с.