

функции цели от множества независимых переменных. Данные программы создаются за более короткий срок и дают меньшую погрешность при анализе, но они не могут учитывать одновременного влияния на функцию цели нескольких переменных [32]. Базу знаний данной ЭС можно представить в виде системы уравнений:

$$\begin{aligned} Y_1 &= f(x_1), \text{ где } x_2, x_3, x_4, \dots, x_n \rightarrow \text{const} \\ Y_2 &= f(x_2), \text{ где } x_1, x_3, x_4, \dots, x_n \rightarrow \text{const} \\ &\dots\dots\dots \\ Y_m &= f(x_n), \text{ где } x_1, x_2, x_3, \dots, x_n \rightarrow \text{const} \end{aligned}$$

3) Многопараметрическая ЭС – это программа, у которой базой знаний выступают зависимости функции цели от множества независимых друг от друга факторов, т. е. создаётся многомерная модель зависимости переменных. Данная система может создаваться за относительно небольшие сроки и даёт более качественный анализ, но она требует глубоких знаний специалистов. Базу знаний многопараметрической ЭС можно представить в виде системы уравнений:

$$\begin{aligned} Y_1 &= f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \\ Y_2 &= f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \\ &\dots\dots\dots \\ Y_m &= f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \end{aligned}$$

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Эйнштейн А. О методе теоретической физики // Сб. науч. тр. – М., 1967. – Т. 4. – 184 с.
2. Heisenberg W. Der Teil und das Ganze. Munchen, 1969. – 212 p.
3. Шредингер Э. Что такое жизнь с точки зрения физики. – М., Изд-во иностр. лит., 1947. – С. 50.
4. Нгуен Тхук Лоан. О некоторых методах синтеза самонастраивающихся систем управления с эталонной моделью // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – 1971. – № 2. – С. 206 – 215.
5. Вулдридж Д. Механизмы мозга. – М. : Мир, 1965. – 465 с.
6. Растринин Л. А. Статистические методы поиска. – М. : Наука, 1968. – 387 с.
7. Растринин Л. А. Случайный поиск в задачах оптимизации многопараметрических систем – Рига : Знание, 1965. – 279 с.
8. Brooks S. H. A Discussion of Random Methods for Seeking Maxims, Operations Rresearch, March – April, 1958. – 245 с.
9. Дубров Ю. И., Ковальчук Д. С. К вопросу об автоматической адаптационной оптимизации объектов со стохастическим дрейфом функции цели // Кибернетика, АН УССР. – 1971. – № 4. – С. 112 – 119.
10. Фихтенгольц Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. – Т. III. – М. : Физматгиз, 1963. – С. 393.
11. Федотов В. В. Теория оптимального эксперимента. – М. : Наука. 1971. – 437 с.
12. Нейлор К. Как построить свою экспертную систему. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 280 с.
13. Паск Г. Модель эволюции // Принципы самоорганизации. – М. : Мир, 1966. – С. 284 – 314.
14. Ивахненко А. Г. Свободу выбора вычислительной машине! Эргатические системы управления. – К. : Наукова думка, 1974. – С. 17 – 22.

УДК 697.7

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРУБЧАТОГО ГАЗОВОГО НАГРЕВАТЕЛЯ ПОВЫШЕННОГО ЛУЧЕИСПУСКАНИЯ

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

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 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 – 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 газозвушной 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:

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

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

- уравнение состояния газозвушной смеси в виде уравнения состояния идеального газа:

$$P = cRT, \quad (2)$$

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

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

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

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 газозвушной 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 отопляемого помещения на участке dx ; dQ_4 – тепловой поток от наружной стенки трубы-излучателя в окружающее пространство отопляемого помещения, 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.

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

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

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

Расчет для однофазного течения.

В начальной точке $x = 0$ известны начальные условия: $P(0)$; $w(0)$; $\rho(0)$; $T(0)$; $T_{cm}(0)$.

Преобразуем (5) и получим соответственно уравнения (5.1), (5.2) и (5.3):

$$\begin{cases} wFdP + \rho Fdw = 0 & (5.1) \\ dP = -\lambda \frac{dx}{D} \rho \frac{w^2}{2} & (5.2) \end{cases}$$

$$dP - RTd\rho = \rho R dT \frac{wF}{RT} \quad (5.3)$$

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

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:

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

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

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

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 , в 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 $d(\rho w F) = F g(x) dx$, (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, поступающего 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):

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

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

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

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

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

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

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

Вычитая (14) из (13), получим:

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

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

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

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 $T_{конв}(x)$, 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 $g(x)$, $T_{конв}(x)$ 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 регулируемые 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 Придніпр. держ. акад. будівн. та архітект. – Д. : ПДАБА, 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 теплогоснабжения. – 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. Променевий 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 624. 04

ПОСЛЕАВАРИЙНОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ ФУНДАМЕНТА ДЫМОСОСА

Г. К. Демин, к. т. н., доц., Ю. Г. Креймер, к. т. н., доц., Е. Н. Белая, студ.

Ключевые слова: *дымосос, анализ ситуации, нестабильная вибрация, фундамент, работоспособность*

Постановка задачи. На тепловых электростанциях для отсоса дымовых газов из производственных помещений служат дымососы – установки, состоящие из мощного электродвигателя, вентилятора, установленного на массивном бетонном фундаменте, и высокой трубы. Фундамент имеет размеры в плане $2,5 \times 1,8 \text{ м}^2$ (см. рис.).

После аварии, произошедшей с дымососом, в теле фундамента появились трещины, величина которых превышала нормативы для такого типа фундаментов. Были проведены ремонтные работы, заключающиеся в том, что были замоноличены трещины, а по контуру фундамента был установлен железобетонный пояс толщиной 30 см. Также был заменен привод дымососа.