

УДК 621.18

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ ЖАРОТРУБНОЙ ТОПКИ С РЕВЕРСИВНЫМ ФАКЕЛОМ

С.А. Хаустов, А.С. Загорин

Томский политехнический университет

E-mail: khaustovSA@tpu.ru

С применением пакета прикладных программ ANSYS Fluent 12.1.4 смоделировано турбулентное горение природного газа в реверсивном факеле жаротрубного котла. К рассмотрению принята полная геометрическая модель тупиковой топки, построенная средствами ANSYS Workbench на основании чертежей котла. Методом конечных элементов моделировались следующие процессы и явления: горение метана в кислороде воздуха, конвективный и лучистый теплообмен, турбулентность в реагирующей среде. Для вариантов с различной степенью закрутки топливовоздушной струи определена аэродинамическая структура факела и получены расчётные поля статического и полного давления. Изучено влияние параметра закрутки на коэффициент аэродинамического сопротивления тупиковой жаровой трубы. Определены граничные значения параметра закрутки, при которых происходит срыв потока от центральной оси горелки и образование зоны обратных токов в приосевой области. Результаты расчетов представлены в графическом виде.

Ключевые слова:

Численное моделирование, жаротрубный котел, тупиковая жаровая труба, аэродинамика, аэродинамическое сопротивление, параметр закрутки.

Введение

Оптимальная организация топочной аэродинамики обеспечивает устойчивость горения, позволяет поддерживать требуемые скорости и температуры в топочном объеме, снизить уровень выбросов токсичных веществ в окружающую среду. Неравномерное и неустойчивое движение газов в топке, напротив, ведет к противоположным результатам и может вызвать превышение допустимых локальных тепловых нагрузок, что приводит к снижению надежности работы котла по условиям накипеобразования. Поэтому улучшение аэродинамических характеристик жаровой трубы является одной из главных задач при проектировании жаротрубных котлов. Особенно это относится к их разновидностям с тупиковой жаровой трубой, где аэродинамика реверсивного факела имеет более сложную структуру по сравнению с прямоходной (одноходовой) организацией и включает в себя взаимодействие прямого хода топливовоздушной струи и обратного хода продуктов сгорания.

Предметом исследования аэродинамической структуры в жаровой трубе является, как правило,

комплекс параметров, среди которых пространственные скоростные поля топочной среды, дальность и угол раскрытия факела, распределение давления, аэродинамическое сопротивление топки в зависимости от типа горелочных устройств, интенсивности закрутки потока и целого ряда прочих конструктивных и режимных факторов. Для наработки методики проектирования жаротрубных котлов требуется установить количественную зависимость аэродинамических параметров топочной среды от конструктивных особенностей и режимных условий работы топочного устройства, что и является целью данной работы. Натурные многофакторные исследования такого рода, связанные с экспериментальным изучением трехмерной аэродинамики горящего факела, в том числе с вихревыми течениями, являются очень трудозатратными. Поэтому в настоящее время для решения комплексных задач конструирования топков на основе оптимизации их аэродинамики признанным эффективным инструментом является численное моделирование с использованием как оригинальных, так и широко апробированных пакетов прикладных программ.

Методы и объект исследования

Поставленная цель достигалась путем численного моделирования турбулентного горения природного газа в реверсивном факеле жаротрубного котла с помощью пакета прикладных программ ANSYS Fluent 12.1.4.

Аэродинамические расчеты выполнялись на основе законов неразрывности струй и сохранения энергии. Расчёт лучистого теплообмена проведен методом сферических гармоник в 1 приближении (P_1 – модель).

Для моделирования турбулентности использована модификация RNG k - ε модели, хорошо зарекомендовавшая себя в задачах с сильной кривизной линий тока и доказавшая свою справедливость для полностью развитого турбулентного течения, когда при высоких числах Рейнольдса прямое влияние вязкости на структуру турбулентности пренебрежимо мало.

Для численного исследования протекания химической реакции в турбулентном реагирующем потоке совместно использовались модель Сполдинга (Eddy-Break-Up), согласно которой скорость химической реакции пропорциональна интенсивности турбулентного перемешивания, и кинетическая модель, где скорость реакции определяется уравнением Аррениуса. Такой подход позволяет моделировать течения с переходными режимами горения, определяющими условия существования пламени. Полагалось, что окисление горючего протекает необратимо и в две стадии: $2\text{CH}_4 + 3\text{O}_2 = 2\text{CO} + 4\text{H}_2\text{O}$; $2\text{CO} + \text{O}_2 = 2\text{CO}_2$.

Достоверность выбранной математической модели подтверждена натурными испытаниями [1].

Для численного исследования к рассмотрению принята полная геометрическая модель топки отечественного жаротрубного котла типа «Турбо-терм», включая канал горелки и поворотную камеру на входе в конвективный пучок котла. Расчётная сетка, построенная средствами ANSYS Workbench на основании чертежей котла, содержит около $8 \cdot 10^5$ контрольных объемов, что обеспечило достаточно низкую чувствительность результатов к дальнейшему измельчению сетки [1]. Схема газовоздушного тракта котла приведена на рис. 1.

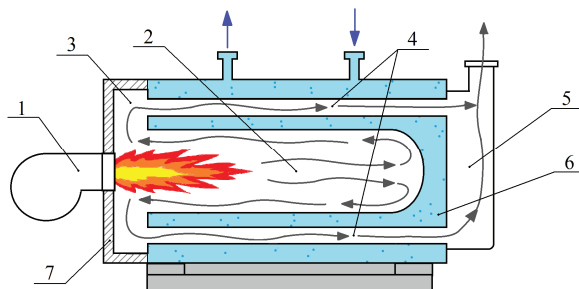


Рис. 1. Схема газовоздушного тракта котла с тупиковой жаровой трубой: 1 – горелка; 2 – жаровая труба; 3 – поворотная камера; 4 – конвективный пучок дымогарных труб; 5 – сборный дымовой короб; 6 – водяной объем; 7 – передняя крышка

Топливоздушная смесь в топку поступает за счет дутья, создаваемого вентилятором, встроенным в горелочное устройство – 1. Топка представляет собой тупиковую жаровую трубу – 2, в тыльной части которой происходит разворот факела на 180 градусов по направлению к передней крышке котла – 7. Далее, двигаясь по периферии жаровой трубы, продукты сгорания поступают в поворотную камеру – 3, где вновь разворачиваются на 180° и направляются в дымогарные трубы – 4, погруженные в водяной объем – 6. Двигаясь внутри труб, продукты сгорания поступают в сборный дымовой короб – 5, оттуда в газоход и дымовую трубу. Топка исследуемого жаротрубного котла находится под наддувом с расчетным давлением 200 Па, которое позволяет преодолеть аэродинамическое сопротивление газового тракта внутри котла.

Аэродинамическое сопротивление жаровой трубы с реверсивным факелом $\Delta p_{\text{жт}}$ может быть определено расчетом согласно нормативной методике [2] через среднюю скорость закрученной струи $\varpi_{\text{вк}}$:

$$\Delta p_{\text{жт}} = \zeta \frac{\varpi_{\text{вк}}^2 \rho}{2}; \quad \varpi_{\text{вк}} = \frac{V}{F} \sqrt{1 + \text{tg}^2 \beta_{\text{л}}},$$

где $\varpi_{\text{вк}}$ – средняя скорость топливоздушной смеси на выходе из горелки; ρ – её плотность, а ζ – коэффициент аэродинамического сопротивления (определяется для заданной конструкции экспериментально и характеризует экономичность устройства по затратам на дутье); V – объемный расход топливоздушной смеси через горелку; F – площадь сечения канала горелки; $\beta_{\text{л}}$ – угол наклона выходной части лопатки относительно продольной оси канала.

Результаты расчетов

Результаты численного эксперимента показывают, что протекающие в топке процессы осесимметричны. Линии тока топочной среды (рис. 2) демонстрируют, что она дважды меняет направление своего движения. Свежая топливоздушная смесь, двигаясь по направлению к тыльной части топки, разогревается, воспламеняется и сгорает; затем продукты сгорания направляются от центра топочной камеры к её периферии, и, наконец, дымовые газы вдоль стенки жаровой трубы возвращаются к фронту котла, где покидают топочную камеру.

На входе в топку образуются зоны с отрицательным давлением, что приводит к образованию вихрей раскаленных топочных газов, рециркулирующих к устью горелки (рис. 2). Часть дымовых газов после разворота не покидает топку, а возвращается к горелке и перемешивается со свежей, поступающей в топку топливоздушной смесью. Таким образом, в топках с реверсивным факелом с наружной образующей топливоздушной струи создается зона рециркуляции части продуктов сгорания к корню факела. В плоскости осевого сече-

ния жаровой трубы эта зона представлена эллиптическими вихрями по обе стороны от факела (рис. 2), а в пространстве она представляет собой единый вихрь тороидальной формы, ось вращения которого совпадает с центральной осью горелки.

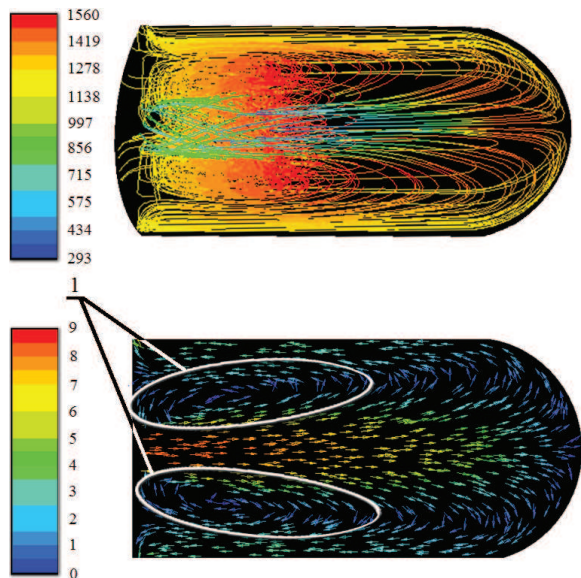


Рис. 2. Линии тока с цветовой индексацией по температуре топочной среды (К) и векторное поле скоростей топочной среды с цветовой индексацией по значениям скорости (м/с). 1 – зона рециркуляции части продуктов сгорания

Использование вихревых горелочных устройств интенсифицирует горение и позволяет вести процесс при меньших избытках воздуха, однако увеличивает аэродинамическое сопротивление топки в сравнении с прямоточной организацией топливоподачи. Количественно интенсивность завихрения потока оценивается параметром крутки n , который определяется по полям скоростей и давлений топочной среды. Для аксиального лопаточного завихрителя, используемого в исследуемом котле, параметр крутки является функцией его геометрических параметров [2]

$$n = \frac{\sqrt{2(d^2 + D^2)}}{D} \operatorname{tg} \beta_{\text{л}},$$

где d , D – внутренний и наружный диаметры канала горелки соответственно.

Расчёты и компьютерное моделирование показали, что при прямоточной и слабо закрученной подаче топливовоздушной смеси ($n \leq 0,9$) коэффициент аэродинамического сопротивления топки является функцией, мало зависящей от степени крутки, и с приемлемой точностью может приниматься равным 1,35 в широком диапазоне конструктивных характеристик.

Изменение избытка воздуха в интервале значений, близких к единице, на коэффициент аэродинамического сопротивления топки влияния не оказывает.

С увеличением крутки ($n > 0,9$) наблюдается повышение коэффициента аэродинамического сопротивления жаровой трубы с различной в зависимости от конструктивных характеристик интенсивностью (рис. 3). Это вызвано усилением рециркуляции газов в реверсивном факеле: между смежными встречными потоками прямого и обратного движения топочной среды, как показано выше, образуется тороидальный вихрь продуктов горения (рис. 2). Подобным образом влияет и уменьшение диаметра жаровой трубы относительно диаметра горелки.

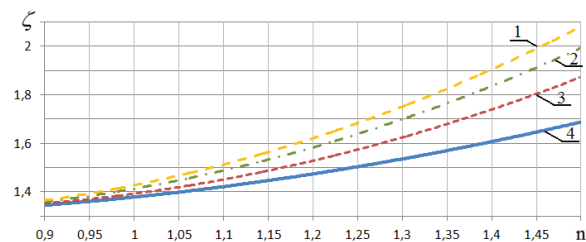


Рис. 3. Зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления тупиковой топки от конструктивных параметров: $F_{\text{эк}}/F_t$ – отношение площади сечения канала к площади сечения жаровой трубы (1 – 0,1; 2 – 0,075; 3 – 0,055; 4 – 0,035)

На выходе из вихревой горелки профиль аксиальной скорости имеет М-образную форму с провалом в приосевой зоне. Увеличение интенсивности крутки сопровождается увеличением провала аксиальных скоростей в осевой зоне топки и смещением максимума скорости к периферии факела, откуда газы увлекаются в зону рециркуляции. Эта картина полностью соответствует известным [3] закономерностям аэродинамики закрученных струй. Таким образом, с ростом параметра крутки возрастают скорости и усложняются траектории движения рециркулирующих продуктов сгорания, что является очевидной причиной увеличения коэффициента аэродинамического сопротивления тракта топочной среды (рис. 3).

В ходе серии численных расчетов установлено, что для всех рассмотренных вариантов сочетания конструктивных и режимных факторов увеличение угла наклона выходной части лопатки завихрителя более чем на 45° ($n \geq 1,4$) сопровождается отрывом потока от центральной оси горелки и появлением обширной зоны обратных токов, что приводит к преждевременному развороту факела с последующим его набросом на стены жаровой трубы. При этом вследствие прерывания реакции горения на стенках имеет место недожог горючих газов, унос их в конвективную часть котла и в атмосферу. В итоге функционирование жаротрубного котла с реверсивным факелом, имеющим такую степень закрутки, приводит к снижению его эффективности, надежности и экологичности.

Изолинии полного избыточного давления (рис. 4) количественно демонстрируют его снижение в продольном сечении топки. Общее падение давления по длине факела составляет 34 Па (с 200 до 166 Па), при этом более 70 % от этой ве-

личины теряется на начальном участке за горелкой вследствие местного сопротивления. На периферии факела, в свою очередь, давление снижается со 166 до 156 Па (около 23 % от общего аэродинамического сопротивления топки).

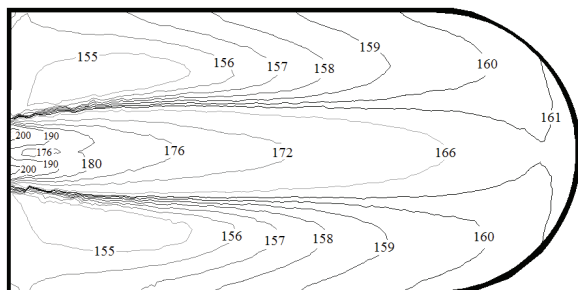


Рис. 4. Изолинии полного избыточного давления (Па) в топке при использовании вихревой горелки с параметром крутки $n=1$

Таким образом, можно заключить, что сопротивление жаровой трубы с реверсивным факелом определяется в основном местным сопротивлением на выходе из горелки и сопротивлением, создаваемым вихрем зоны рециркуляции. Сопротивления разворота и трения по длине жаровой трубы несущественны.

Полученные результаты изменения статического давления по оси тупиковой жаровой трубы (рис. 5) хорошо согласуются с приведенным в [3] распределением статического давления закрученной струи в цилиндрическом канале.

Статическое давление топочной среды в продольном сечении жаровой трубы возрастает от фронта к тылу котла. По поперечному сечению при этом наблюдается его постоянство.

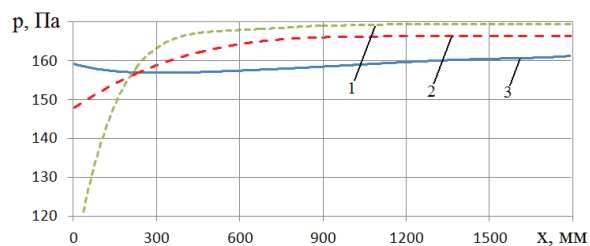


Рис. 5. Значения статического давления по центральной оси жаровой трубы для различных параметров крутки: 1) $n=1,5$; 2) $n=1,0$; 3) $n=0$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Хаустов С.А., Заворин А.С., Фисенко Р.Н. Численное исследование процессов в жаротрубной топке с реверсивным факелом // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 4. – С. 43–47.

При использовании вихревых горелок на входе в топку наблюдается статическое разряжение. Чем больше наблюдаемое статическое разряжение на начальном участке за горелкой, тем меньше длина этого участка и тем выше статическое давление за его пределами.

Выводы

1. Численным методом получены аэродинамические характеристики жаровых труб котлов с реверсивным факелом.
2. Изучено влияние параметра крутки потока n на структуру факела и коэффициент аэродинамического сопротивления жаровой трубы. Установлено, что при $n \leq 0,9$ коэффициент аэродинамического сопротивления тупиковой топки с приемлемой точностью может приниматься равным 1,35 в широком диапазоне конструктивных характеристик.
3. Определены граничные значения параметра крутки ($n \geq 1,4$), при которых происходит срыв потока от центральной оси горелки и образование зоны обратных токов в приосевой области, что приводит к затягиванию пламени в конвективный пучок.
4. В топках с реверсивным факелом горелки с прямоточной подачей топлива создают наиболее благоприятные условия для равномерного выгорания топлива при минимальном аэродинамическом сопротивлении.
5. Для вариантов с различным параметром крутки получено распределение статического и полного давления в плоскости продольного разреза жаровой трубы, позволяющее качественно оценить составляющие потерь давления по жаровой трубе и установить причины их возникновения. Установлено, что сопротивление жаровой трубы с реверсивным факелом определяется в основном местным сопротивлением на выходе из горелки и сопротивлением вихря зоны рециркуляции. Сопротивления разворота и трения по длине жаровой трубы несущественны.

Работа выполнена в рамках госзадания на НИР (тема 2.59.2012) и ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы» по мероприятию 1.3.1, номер соглашения 14.V37.21.1496.

2. Аэродинамический расчет котлов (Нормативный метод). – СПб.: Изд-во «Энергия», 1977. – 256 с.
3. Ахмедов Р.Б., Балагула Т.Б., Рашидов Ф.К., Сакаев А.Ю. Аэродинамика закрученной струи. – М.: Изд-во «Энергия», 1977. – 240 с.

Поступила 05.08.2013 г.

UDC 621.18

NUMERICAL STUDY OF AERODYNAMICS IN DEAD-END FURNACE WITH REVERSE FLAME

S.A. Khaustov, A.S. Zavorin

Tomsk Polytechnic University

The authors have modeled turbulent combustion of natural gas in the reverse flame of fire-tube boiler using the ANSYS Fluent 12.1.4. The complete geometric model of the dead-end furnace based on boiler drawings was considered. Finite element model was used for the following processes and phenomena: the combustion of methane in air oxygen, radiant and convective heat transfer, turbulence. Aerodynamic structure and volumetric pressure fields of the flame were calculated for different degrees of spin-fuel jet. The effect of the twist parameter on a drag coefficient of dead-end furnace was estimated. The authors calculated critical twist parameter values when the disruption of the flow and reversal currents zone in the axial region occurs. The results are presented in graphical form.

Key words:

Numerical simulation, fire-tube boiler, dead-end furnace, aerodynamics, aerodynamic resistance, twist parameter.

REFERENCES

1. Khaustov S.A., Zavorin A.S., Fisenko R.N. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013. 322, 4, pp.43–47.
2. *Aerodinamicheskiy raschet kotlov* (Aerodynamic boiler design) (Normativnyy metod). Saint-Petersburg, Energiya, 1977. 256 p.
3. Akhmedov R.B., Balagula T.B., Rashidov F.K., Sakaev A.Ju. *Aerodinamika zakruchennoj strui* (Aerodynamics of a swirl jet). Moscow, Energiya, 1977. 240 p.

УДК 536.24

ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ТЕПЛОВОГО ЦЕНТРА ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОМ НАГРЕВЕ ПЛОСКОГО ТЕЛА

Ю.В. Видин, Д.И. Иванов

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

E-mail: idi86@inbox.ru

С использованием аналитических зависимостей разработан приближенный метод расчета пространственной координаты перемещения теплового центра в случае несимметричного нагрева плоского тела конвективными потоками тепла. В таком случае тепловой центр в ходе процесса нагрева плоского тела конвективными потоками тепла начинает перемещаться, т. е. пространственная координата, соответствующая экстремуму производной температуры по координате, оказывается некоторой функцией времени. Установлен характер зависимости пространственной координаты от времени, что имеет важное теоретическое и практическое значение. С использованием предложенных зависимостей возможен также расчет момента времени, при котором прогрев плоского тела становится односторонним и преобразуется в нестационарный режим теплопередачи через плоскую стенку.

Ключевые слова:

Плоская стенка, несимметричный прогрев, конвективный теплообмен, аналитические методы расчета температурных полей.

Несимметричный нагрев плоского тела конвективными потоками можно записать в виде следующей системы математических зависимостей [1]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \right), \quad (1)$$

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial x} = \alpha_1 (t_{ж1} - t) \quad \text{при } x = 0, \quad (2)$$

$$\lambda \frac{\partial t}{\partial x} = \alpha_2 (t_{ж2} - t) \quad \text{при } x = \delta, \quad (3)$$

$$t = t_0 \quad \text{при } \tau = 0. \quad (4)$$

Целесообразно задачу (1)–(4) представить в безразмерном виде

$$\frac{\partial \theta}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2}, \quad (5)$$

$$-\frac{\partial \theta}{\partial X} = Bi_1 (1 - \theta) \quad \text{при } X = 0, \quad (6)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial X} = Bi_2 (\theta_{ж} - \theta) \quad \text{при } X = 1, \quad (7)$$

$$\theta = \theta_0 \quad \text{при } Fo = 0, \quad (8)$$

где $Bi_1 = \frac{\alpha_1 \delta}{\lambda}$; $Bi_2 = \frac{\alpha_2 \delta}{\lambda}$ – числа Био; $X = \frac{x}{\delta}$ – без-

размерная координата; $Fo = \frac{a\tau}{\delta^2}$ – безразмерное