

## АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ТУПИКОВЫХ ЖАРОВЫХ ТРУБ С РЕВЕРСИВНЫМ ФАКЕЛОМ

Хаустов С.А., Захарушкин Н.А.

Научный руководитель: Заворин А.С., д. т. н., проф.

Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: khaustovsa@tpu.ru

### Введение

Так как топка жаротрубных котлов, как правило, имеет водяную рубашку, то по условиям накипеобразования становятся актуальными вопросы, связанные с оптимальным распределением температур в топочном объеме. Неравномерное и неустойчивое движение газов в топочной камере тоже может вызвать превышение допустимых локальных тепловых нагрузок, что приводит к снижению надежности работы котла.

Известно, что оптимальной организацией топочной аэродинамики можно повлиять на устойчивость горения, добиться требуемых скоростей и температур в топочном объеме, снизить уровень выбросов токсичных веществ в окружающую среду. Поэтому улучшение аэродинамических характеристик жаровой трубы является одной из главных задач при наработке методики конструирования жаротрубных котлов. Особенно это относится к их разновидностям с тупиковой жаровой трубой, где аэродинамика реверсивного факела имеет более сложную структуру по сравнению с прямоточной (одноходовой) организацией и включает в себя взаимодействие прямого хода топливоздушной 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, дальнобойность и угол раскрытия факела, распределение давления, аэродинамическое сопротивление топки в зависимости от типа горелочных устройств, интенсивности крутки 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. 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

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

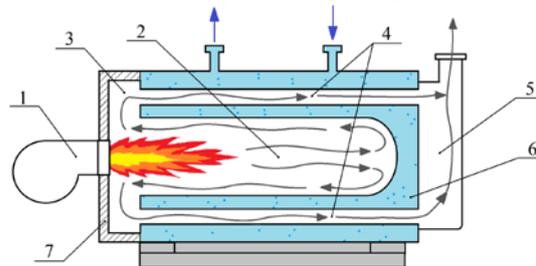


Рис.1. Схема газовоздушного тракта котла с тупиковой жаровой трубой

1 – горелка; 2 – жаровая трубу; 3 – поворотная камера; 4 – конвективный пучок дымогарных труб; 5 – сборный дымовой короб; 6 – водяной объем; 7 – передняя крышка

Турбулентное горение природного газа в реверсивном факеле жаротрубного котла смоделировано с применением пакета прикладных программ ANSYS Fluent 12.1.4.

Аэродинамические расчеты выполнялись на основе законов неразрывности струй и сохранения энергии. Расчет лучистого теплообмена проведен методом сферических гармоник в 1 приближении (P1 - модель). Для моделирования турбулентности использована модификация RNG k-ε модели. Для численного исследования протекания химической реакции в турбулентном реагирующем потоке совместно использовались модель Сполдинга (Eddy-Break-Up) и кинетическая модель. Полагалось, что окисление горючего протекает необратимо и в две стадии:



Достоверность выбранной математической модели подтверждена натурными испытаниями [1].

Аэродинамическое сопротивление жаровой трубы с реверсивным факелом может быть определено расчетом согласно нормативной

методике [2] через среднюю скорость закрученной струи  $\omega_{\text{ср}}$ :

$$\Delta p_{\text{жст}} = \zeta \frac{\omega_{\text{ср}}^2 \rho}{2}, \text{ Па,}$$

где  $\rho$  – плотность топливоздушной смеси на выходе из горелки, а  $\zeta$  – коэффициент аэродинамического сопротивления.

### Результаты расчетов

Результаты численного эксперимента показывают, что протекающие в топке процессы осесимметричны относительно оси горелки. 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 сечения 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.

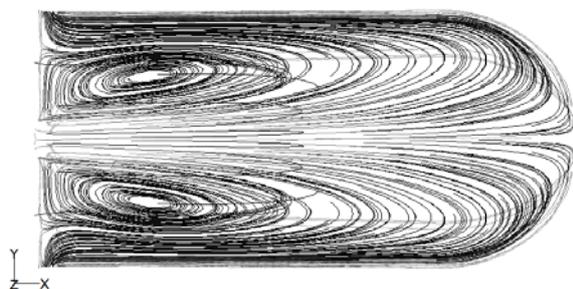


Рис.2. Линии тока топочной среды в реверсивном факеле

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. Расчёты и компьютерное моделирование показали, что при прямоточной и слабо закрученной подаче топливоздушной 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. С увеличением крутки  $n > 0,9$  наблюдается повышение коэффициента аэродинамического сопротивления жаровой трубы с различной в зависимости от конструктивных характеристик интенсивностью. Это вызвано усилением рециркуляции газов в реверсивном факеле.

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

Изолинии полного избыточного давления (рис. 3) количественно демонстрируют его снижение в продольном сечении топки. Общее падение давления по длине факела составляет 34 Па (с 200 Па до 166 Па), при этом более 70% от этой величины теряется на начальном участке за горелкой вследствие местного сопротивления. На периферии факела, в свою очередь, давление снижается со 166 Па до 156 Па (около 23% от общего аэродинамического сопротивления топки).

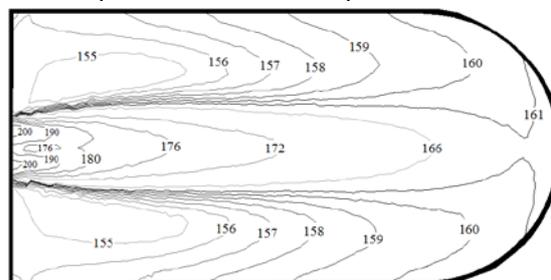


Рис.3. Изолинии полного избыточного давления (Па) в топке при использовании вихревой горелки с параметром крутки  $n = 1$

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.

### Список литературы

1. 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.
2. Аэродинамический расчет котлов (Нормативный метод). – СПб: Изд. «Энергия», 1977. – 256 с.