

УДК 621.18

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ЖАРОТРУБНОЙ ТОПКЕ С РЕВЕРСИВНЫМ ФАКЕЛОМ

С.А. Хаустов, А.С. Заворин, Р.Н. Фисенко

Томский политехнический университет

E-mail: khaustovSA@tpu.ru

Продemonстрировано применение пакета прикладных программ ANSYS Fluent 12.1.4 для численного моделирования турбулентного горения природного газа в реверсивном факеле жаротрубного котла в режимах с вихревой и прямоточной подачей топливовоздушной смеси. Для вариантов с различными параметрами крутки получены расчётные поля средних скоростей, температур и концентраций компонентов, определены структура факела и положение максимума тепловыделения. Достоверность математической модели подтверждена натурными испытаниями.

Ключевые слова:

Численное моделирование, жаротрубный котел, горелка, тупиковая жаровая труба, параметр крутки.

Key words:

Numerical simulation, fire-tube boiler, burner, dead-end furnace, twist parameter.

Введение

В настоящее время широкое применение находят системы автономного теплоснабжения на базе жаротрубных котлов малой мощности. Коэффициент полезного действия таких котлов, как правило, достигает 90...95 %, при этом они обладают лучшей ремонтпригодностью и стоят значительно дешевле своих водотрубных аналогов. Применение автоматизированных горелочных устройств, оснащенных встроенными дутьевыми вентиляторами, делает возможным функционирование котла с регулированием параметров горения при переменных нагрузках.

Однако практика конструирования жаротрубных котлов не имеет четкой нормативно-расчетной базы. Попытки расчета жаротрубных котлов малой мощности по нормативному методу [1] дают недопустимо большую погрешность, поскольку метод разрабатывался для расчетов крупных (энергетических) котельных агрегатов и требует задания ряда эмпирических поправок, известных только для отработанных типов котлов.

Ввиду отсутствия единой методики расчета для решения задач конструирования жаротрубных котлов все чаще применяется математическое моделирование.

Объект и методы исследования

Рассматриваемый отечественный жаротрубный котел Турботерм-500 (ТТ-500) спроектирован ООО «Рэмэкс» на номинальную мощность 500 кВт. Конструктивная схема с газовоздушным трактом котла приведена на рис. 1.

Котел имеет тупиковую жаровую топку 1, в тыльной части которой происходит разворот факела на 180 градусов по направлению к передней крышке котла 8. Далее, двигаясь по периферии топочной камеры, продукты сгорания поступают в поворотную камеру 3, где вновь разворачиваются на 180° и направляются в дымогарные трубы 4, погруженные в водяной объем 7. Двигаясь внутри

труб, продукты сгорания поступают в сборный дымовой короб 5, оттуда в газоход и дымовую трубу.

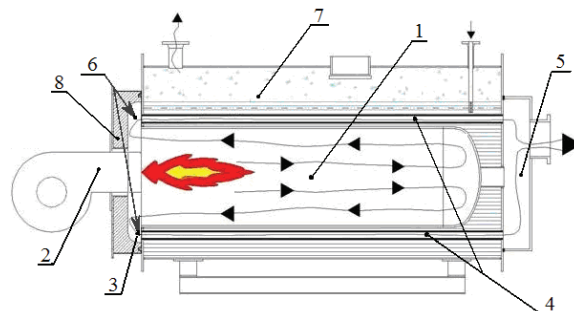


Рис. 1. Конструктивная схема жаротрубного котла: 1 – жаровая топка; 2 – горелка; 3 – поворотная камера; 4 – конвективный пучок дымогарных труб; 5 – сборный дымовой короб; 6 – точки замера температуры (места установки терпар); 7 – водяной объем; 8 – крышка

Объем топочной камеры составляет 1,03 м³, поверхность стен 5,7 м², внутренний диаметр жаровой трубы составляет 0,884 м. Топка оснащена горелкой 2, смесительное устройство которой представляет собой аксиальный лопаточный завихритель (рис. 2), позволяющий регулировать параметр крутки потока при подаче топливовоздушной смеси. Параметр крутки для данного типа завихрителя может быть определен по формуле:

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

где d , D – внутренний и наружный диаметры канала горелки соответственно, а $\beta_{\text{л}}$ – угол наклона выходной части лопатки относительно продольной оси канала.

Автоматизация регулирования котлоагрегата «Турботерм» обеспечивается работой щита автоматики управления котла, оснащенного набором первичных датчиков, и системы управления работой автоматической горелки, которая включает соб-

ственный блок управления розжигом. Управление мощностью горелки осуществляется по температуре теплоносителя на выходе из котла. При регулировании происходит включение–выключение котла вместе с циркуляционным насосом, что ведет к уменьшению эксплуатационных затрат. Таким образом, данный котел работает в режиме: 7 минут рабочего цикла, как правило, сменяются 20 минутами паузы.

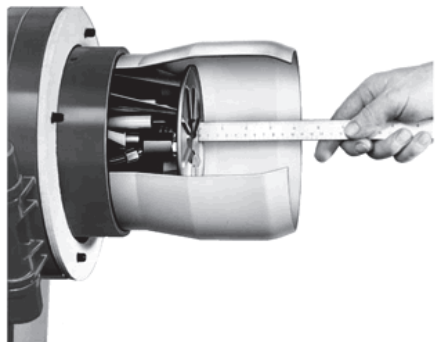


Рис. 2. Смесительное устройство горелки с завихрителем топливовоздушной смеси

При натурных испытаниях котла посредством установленных в газовом тракте котла термопар на действующем котле определена температура дымовых газов на выходе из топки. Всего в эксперименте задействованы 4 термопары, установленные в разных местах поворотной камеры 3 (рис. 1) таким образом, чтобы избежать прямого излучения на горячий спай от ядра горения.

В результате испытаний установлено, что в стационарном режиме температура дымовых газов на выходе из топки составляет 870...910 °С. Разброс значений (40 °С) обоснован прогревом изоляции котла с течением времени и неоднородностью температурного поля в исследуемой области.

График изменения температуры в одной из контролируемых точек за период одного рабочего цикла котла (рис. 3) показывает, что температура то-

почной среды во время паузы котла составляет 60 °С и в течение 20 с после запуска горелки снижается до 40 °С, что вызвано производимой при запуске холодной продувкой топки и газоходов. В промежутке времени с 20 по 143 с происходит подъем температуры газов на выходе из топки до 840 °С с дальнейшим плавным повышением до 910 °С, объясняемым прогревом изоляции котла. По достижении 374 с рабочий цикл котла заканчивается и происходит выключение горелки. Из рис. 4 следует, что в промежутке времени с 200 по 374 с котел работает в стационарном режиме.

Для численного исследования к рассмотрению принята полная геометрическая модель топки, включая канал горелки и поворотную камеру на входе в конвективный пучок котла. Построение расчётной сетки (рис. 4) выполнено средствами ANSYS Workbench: на основании чертежей котла была построена геометрическая модель внутренней полости топки, затем средствами сеточного генератора произведено разбиение объема на элементы типа «тетраэдр». Все геометрические преобразования выполнялись в программном модуле DesignModeler, входящем в среду ANSYS Workbench.

Пробные расчёты с использованием сеток с разной топологией и числом ячеек показали, что принятая в данной работе сетка, содержащая около 800000 контрольных объёмов, обеспечивает приемлемо низкую чувствительность результатов к дальнейшему измельчению сетки.

Методом конечных элементов моделировались следующие процессы и явления: горение метана в кислороде воздуха, турбулентность в реагирующей среде, конвективный и лучистый теплообмен. Моделирование газовой фазы проводилось в приближении Эйлера. Расчёт лучистого теплообмена выполнялся методом сферических гармоник в 1 приближении (т. н. P_1 -модель). Дифференциальные уравнения, используемые данной моделью радиационного теплопереноса, приведены в [2].

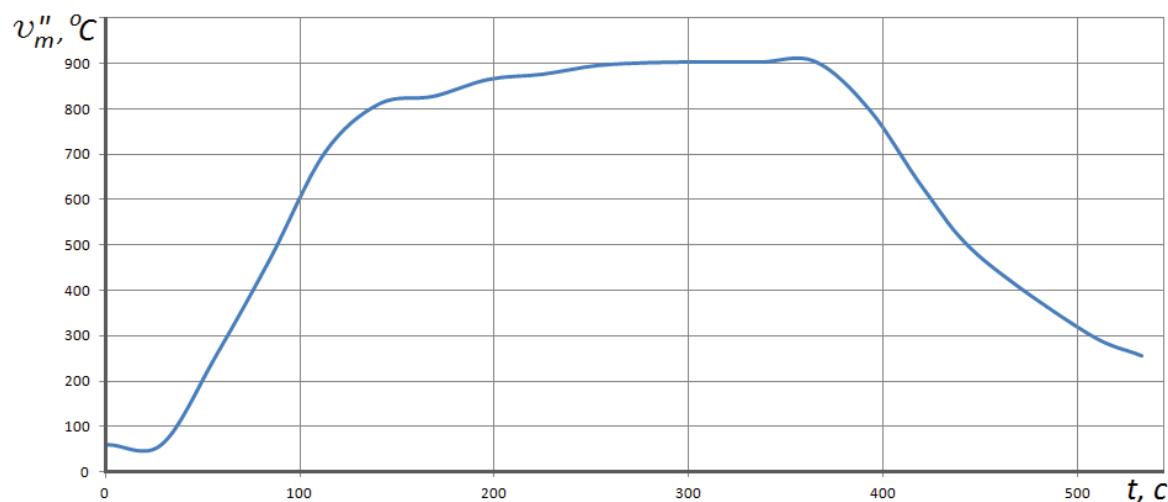


Рис. 3. Изменение температуры на выходе из топки котла ТТ-500

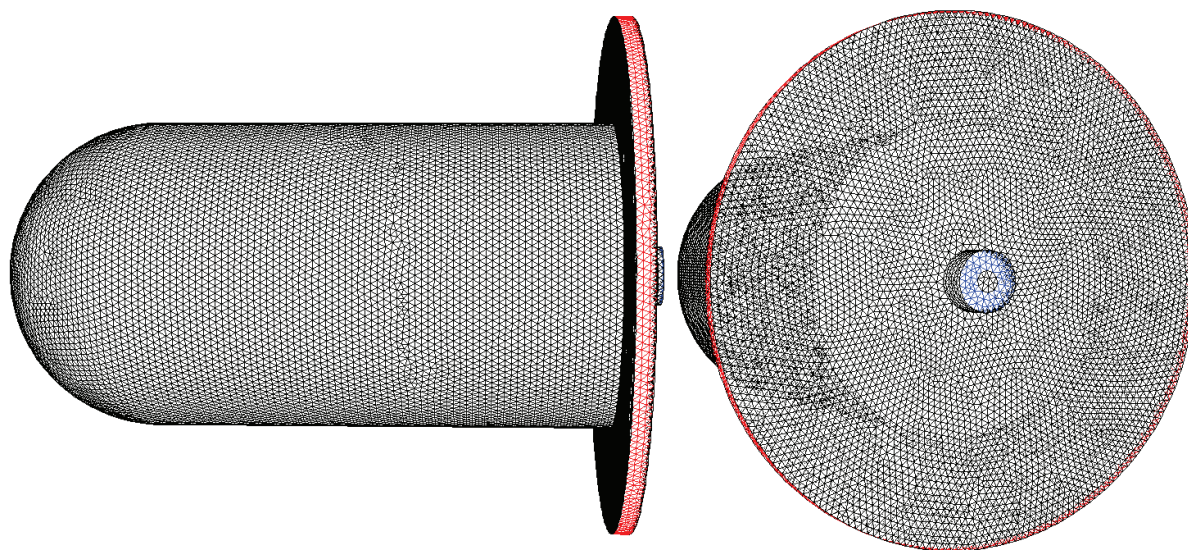


Рис. 4. Расчетная сетка моделируемой топки

Полагалось, что окисление горючего (чистый метан) протекает необратимо и в две стадии: $2\text{CH}_4 + 3\text{O}_2 = 2\text{CO} + 4\text{H}_2\text{O}$; $2\text{CO} + \text{O}_2 = 2\text{CO}_2$.

Использовалась модификация RNG k- ϵ модели турбулентности, хорошо зарекомендовавшая себя в задачах с сильной кривизной линий тока. Данная модель справедлива для полностью развитого турбулентного течения, т. е. для высоких чисел Рейнольдса, когда прямое влияние вязкости на структуру турбулентности пренебрежимо мало.

В качестве исходных данных для расчета принималось: топливо – метан (100 %); окислитель – кислород воздуха; теоретически необходимый объем воздуха для полного сгорания $9,52 \text{ м}^3/\text{м}^3$; коэффициент избытка воздуха 1,11; температура топливоздушной смеси 20°C (равна температуре воздуха в помещении котельной); средняя температура теплоносителя $92,5^\circ\text{C}$.

Результаты расчетов

Серия численных расчётов, выполненных для определения влияния угла наклона выходной части лопатки горелки на положение ядра горения и температуру топочной среды, смоделировала условия сжигания газа с параметрами крутки потока n от 0 до 1,2. При этом уровень расположения максимума температуры пламени относительно протяженности топки рассчитывался как отношение расстояния от днища топки до ядра горения к общей длине топочной камеры.

Рис. 5 и 6 иллюстрируют типичные примеры стационарных полей осреднённых характеристик течения – скорости, температуры, концентраций реагирующих компонентов, – полученные по результатам численного моделирования. Линии тока, окрашенные согласно величине скорости движения среды (рис. 5, а), и контурный график температур в продольном сечении расчётной области (рис. 5, б) позволяют выделить основные особенности формирования топочной среды в ходе исследуемых процессов.

При прямоточном истечении горелочной струи (рис. 5, 1) в факеле наблюдается высокая степень заполнения объема жаровой трубы движущейся средой, равномерное распределение тепловыделения по длине топки, результатом чего является сравнительно сниженный уровень локальных тепловых потоков. Эти условия благоприятствуют надежной работе котла, в частности, по условиям накипеобразования, и поэтому допускают эксплуатацию котла при меньших затратах на водоподготовку.

Использование завихрителя горелки (рис. 5, 2) приближает зону максимального тепловыделения к фронту котла. Это позволяет интенсифицировать воспламенение и уменьшить длину факела, но влечет за собой увеличение локальных тепловых потоков, что, в свою очередь, является фактором роста генерации оксидов азота [3]. При значениях параметра крутки $n < 1$ средняя температура дымовых газов на выходе из топки согласно математической модели лежит в диапазоне $842...929^\circ\text{C}$, что не противоречит данным физического эксперимента.

Наряду с этим установлено, что увеличение угла наклона выходной части лопатки горелки более чем на 45° ($n > 1,4$) приводит к затягиванию пламени в конвективный пучок (рис. 5, 3), а также влечет за собой превышение допустимого значения локальных тепловых потоков в непосредственной близости от устья горелки.

С целью исключения наброса факела на днище топочной камеры была проанализирована интенсивность выгорания метана в продольном сечении расчётной области как для вихревой (рис. 6, а), так и для прямоточной горелки (рис. 6, б).

Поля концентрации метана (рис. 6) свидетельствуют, что закрутка потока ускоряет его выгорание, благодаря существенной интенсификации смешения горючего с воздухом. Анализ полученных данных по выгоранию метана позволяет заключить, что даже в случае применения прямоточ-

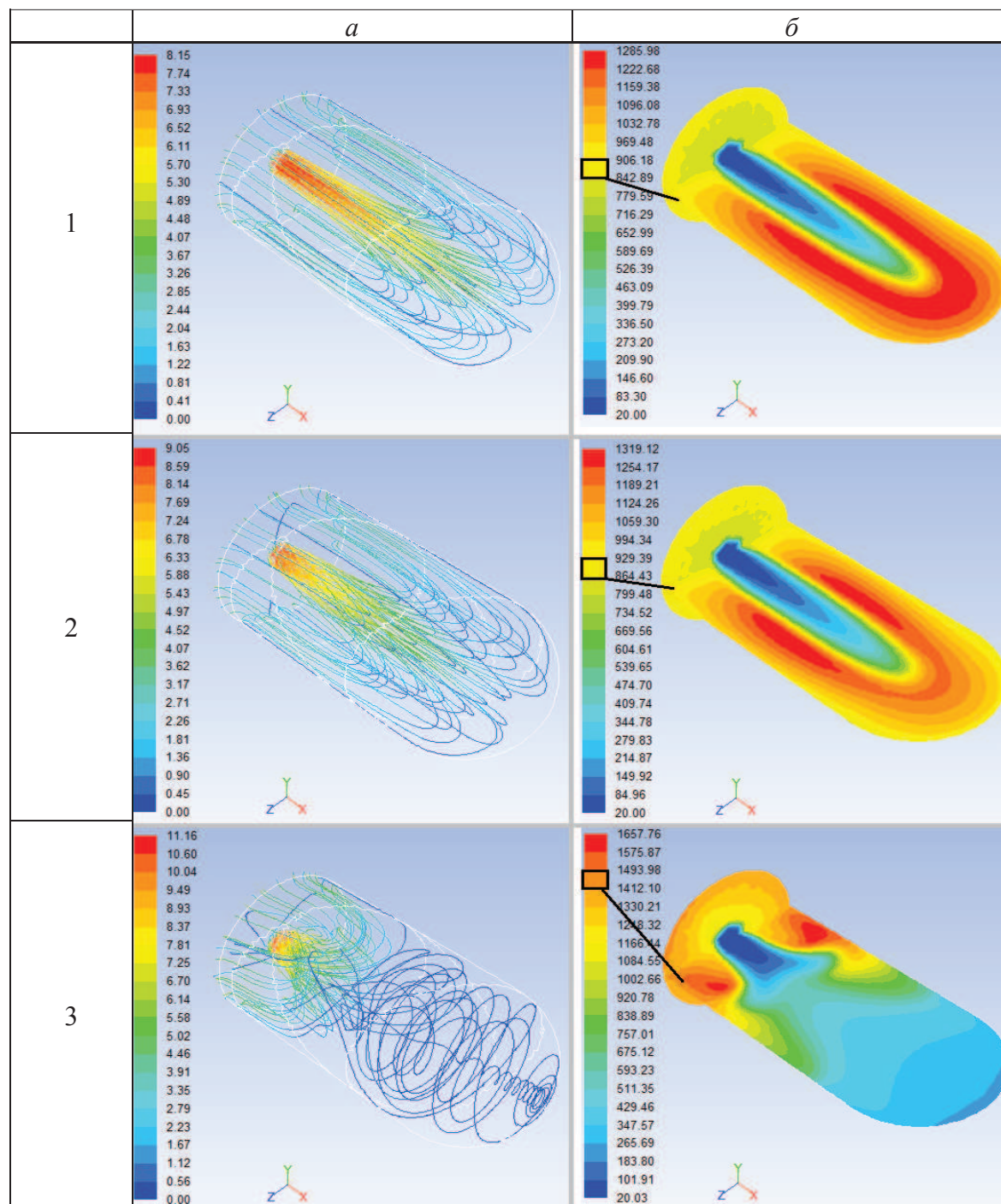


Рис. 5. Траектории и скорости движения дымовых газов (а) и температурные поля (б) топочной среды: 1) $n=0$; 2) $n=1$; 3) $n=2$

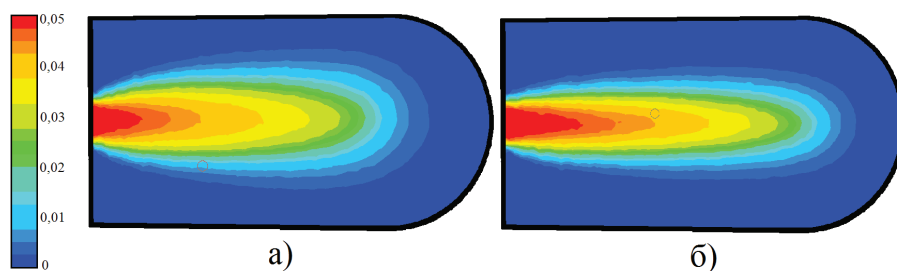


Рис. 6. Массовая концентрация метана в продольном сечении расчётной области: а) вихревой факел ($n=1$); б) прямоточный факел ($n=0$)

ных горелок в исследуемом котле при работе на номинальной мощности наброс факела на днище топki маловероятен.

Таблица. Влияние изменения угла наклона выходной части лопатки горелки на параметры горения в топке

Угол наклона выходной части лопатки горелки, β , градусы	Параметр крутки горелки, n	Относительное положение ядра горения	Максимальная температура в ядре факела, °С	Средняя температура дымовых газов на выходе из топочной камеры, °С
0	0	0,44	1286	874
10	0,25	0,46	1292	877
20	0,5	0,5	1300	882
25	0,65	0,53	1307	886
30	0,8	0,57	1312	890
35	1	0,6	1319	896
40	1,2	0,64	1327	907

Расчёт показывает, что по мере увеличения параметра крутки максимальная температура в ядре факела возрастает, а его положение смещается к фронту котла, что, в свою очередь, влечет за собой увеличение температуры уходящих из топki дымовых газов. Из таблицы видно, что вариант жаровой трубы с прямоточной горелкой характеризуется наименьшей температурой продуктов сгорания

на выходе из топki, и, следовательно, обладает наибольшим тепловосприятием.

Выводы

1. Установлено значение параметра крутки реверсивного факела, при котором происходит затягивание пламени в конвективный пучок и превышение допустимого значения локальных тепловых потоков в непосредственной близости от устья горелки. Для исследованной в данной работе конструкции котла это значение $n=1,4$.
2. Влияние завихрителей с параметром крутки $n<1,4$ на теплообмен в жаровой трубе незначительно по сравнению с прямоточной организацией факела, поскольку в топках такого типа уже имеет место интенсификация конвективного теплообмена за счет турбулизации потока при развороте факела.
3. В жаротрубных топках с реверсивным факелом предпочтительнее использовать прямоточные горелки, так как это способствует более надежному работе котла за счет равномерного распределения тепловыделения по длине топki.
4. Полученные результаты подтверждают применимость пакета прикладных программ ANSYS Fluent 12.1.4 для решения задач конструирования и оптимизации жаротрубных котлов.

Работа выполнена в рамках госзадания на НИР (тема 2.59.2012).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). – СПб: Изд-во НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с.
2. Тайлашева Т.С. Моделирование топочной среды в котле типа ДКВР при сжигании природного газа // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 314. – № 4. – С. 42–47.
3. Основы теории топочных процессов / Н.М. Кузнецов, Е.А. Блинов. – Л.: СЗПИ, 1990. – 70 с.

4. Герман М.Л., Бородуля В.А., Ноготов Е.Ф., Пальченко Г.И. Инженерный метод расчета температурного режима жаротрубных котлов с тупиковой топкой // Тепломассообмен ММФ-2000: Труды IV Минского Междунар. форума. – Минск, 2000. – Т. 2. – С. 21–30.

Поступила 29.01.2013 г.