

К ВОПРОСУ О МОДЕЛИРОВАНИИ КИНЕТИКИ ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ВОДОГРЕЙНЫХ КОТЛАХ

В статті наведено результати експериментів та проведених розрахунків, використано методи теоретичного моделювання газозфазних хімічних реакцій. Запропонований метод дозволяє прогнозувати процеси, що відбуваються в паливних камерах водогрійних котлів.

В статье приводятся результаты экспериментов и проведенных расчётов, использованы методы теоретического моделирования газозфазных химических реакций. Предлагаемый метод позволяет прогнозировать процессы, протекающие в топочных камерах водогрейных котлов.

The results of experiments and the carried out calculations are resulted the opportunity of modeling gas – phase chemical reactions is theoretically proved in given article. The offered method allows forecast with a high accuracy processes proceeding in combustion chambers of water-heating boilers.

c – концентрация горючих веществ;
 D – диаметр турбулизатора;
 D_m – коэффициент молекулярной диффузии;
 d – диаметр отверстия для выхода газа;
 l – путь смешения;
 r – радиус факела;
 x – осевая длина факела;

δ – толщина турбулентного слоя;
 τ – характерное время.

Индексы нижние:

0 – нулевая точка отсчёта от среза сопла;
0,5 – начало установки автотемпературного течения;
 m – относящийся к молекулам на оси;
 n – относящийся к полюсу.

Одним из способов повышения эффективности работы котлов является эффективное использование топлива и полнота его сжигания. Численные расчёты показывают, что только повышение температуры реагентов на 100% приводит к повышению КПД топки на 9,5%. [1, 2].

Аэродинамические расчёты процессов, происходящих в топке и конвективной части котла, подтверждают возможность дополнительного регулирования химических реакций за счёт стабилизации процесса горения. Эти исследования направлены на сокращение выбросов NO_x , SO_2 и CO_2 , продление сроков эксплуатации и увеличение КПД котлов. На скорость реакции оказывают противоположное влияние два фактора: рост температуры, приводящий к её увеличению, и уменьшение концентрации реагентов, снижающее скорость реакции. При этом важное значение имеет скорость химической реакции и значение температуры в топке.

Исследование процесса турбулентного горения гомогенной смеси осложнено серьёзными

методическими трудностями, обусловленными, прежде всего подготовкой гомогенно перемешанной смеси. Под гомогенно перемешанной подразумевают такую смесь, для сколь угодно малого (но достаточного для статистического описания) объёма которой отношение средних чисел молекул реагентов равно отношению исходных количеств реагентов, взятых для приготовления смеси.

Условно полагают процесс смешения, происходящим в два этапа: а) турбулентное макроперемешивание, б) турбулентное дробление молекул и перемешивание реагентов внутри последних до молекулярно-атомарного уровня.

Котлы малой и средней мощности, как правило, оборудуются одним горелочным устройством, которое расположено по центру топочного объёма. По классической схеме в смесителе имеется центральное сопло активной струи (в нашем случае природный газ). Воздух подаётся дутьевым вентилятором через турбулизатор.

Передача теплоты от продуктов сгорания осуществляется излучением и конвекцией, темпера-

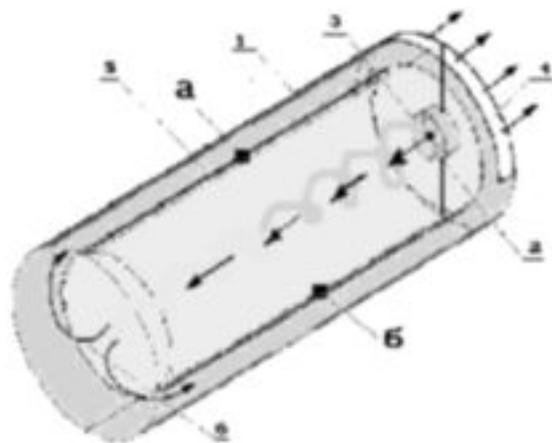


Рис. 1. Топочная камера с дополнительным цилиндрическим элементом. 1 – камера, 2 – вход воздуха, 3 – вход метана, 4 – выход, 5 – цилиндр из просечной стали, б – тыльная часть топки; а) – верхняя мишень, б) – нижняя мишень.

тура уходящих газов на выходе из топки гораздо ниже, чем в котлах большой мощности. В связи с этим нами были проведены замеры температур по длине топочного пространства в процессе набора температуры и на номинальном режиме работы трёхходового отопительного котла “Виктор-100”, установленного на экспериментальном стенде ИТТФ НАН Украины.

В топочную камеру котла, образованную жаровой трубой, был введен дополнительный цилиндрический элемент, изготовленный из просечной стали (рис. 1). На нём для измерения температуры предварительно были установлены проволочные мишени. Расстояние между стенкой цилиндра и жаровой трубой составляло 10 мм. Цилиндр в процессе эксперимента несколько раз перемещался по оси топки, что позволило измерить температуру в разных зонах по её длине. Наблюдение за процессом горения и замеры температур осуществлялись через кварцевое стекло толщиной 4,0 мм.

Измерения проводились оптическим пирометром IrtecP1600, №82757, предназначенным для измерения температуры поверхности бесконтактным способом в диапазоне температур от 600 до 16000С, границы абсолютной допустимой ошибки $\pm 2,5$ °С. Свидетельство о государственной метрологической аттестации № 24.403.06 от 06.2006 г. Температура объекта определяется пу-

тём измерения излучаемой им энергии (интенсивности инфракрасного излучения). Датчик выдаёт сигнал напряжения, который прямо пропорционален количеству полученной энергии и, следовательно, температуре объекта. Выбирая и обрабатывая сигнал датчика, микропроцессор прибора определяет значения температуры и связанные с ней величины – максимальную, среднюю, минимальную и перепад температур.

Измерения проводились через каждые 5 °С, по мере повышения температуры котловой воды. Серия проведенных измерений, на разных режимах, позволила получить значения распределения температур по длине и высоте топочной камеры в реперных точках (рис. 2). В лабораторных условиях производились также измерения температуры, состава дымовых газов и визуальные наблюдения за процессом горения.

С изменением температурного поля изменяется и концентрация частиц сажистого углерода в пламени, изменяется распределение излучательной способности пламени по зонам и полнота заполнения топки реагирующей смесью.

Как видно из экспериментов, стабилизация работы котла наступает уже через 5...10 минут после начала работы при условии, что соблюдены условия нормального раскрытия факела и правильной подачи реагентов. Дополнительный цилиндрический элемент также существенно способствует стабилизации процесса горения в топке.

С целью более полного представления о кинетике химических процессов горения было проведено компьютерное моделирование и проведен численный CFD расчет тепломассопереноса. Задача решалась при следующих граничных условиях: на выходе из сопла горелки принимался равномерный профиль продольной скорости для метана и воздуха, массовый расход 0,004 и 0,044 кг/с – соответственно. Начальная кинетическая энергия турбулентности принималась равной 1,0 м²/с. Стенки – абсолютно гладкие, нормальная компонента скорости на них равна нулю, температура 95 °С. На выходе из топки – давление атмосферное. Задача решалась в трехмерной стационарной постановке. Для описания движения топочных газов использовалась система уравнений Навье-Стокса [3].

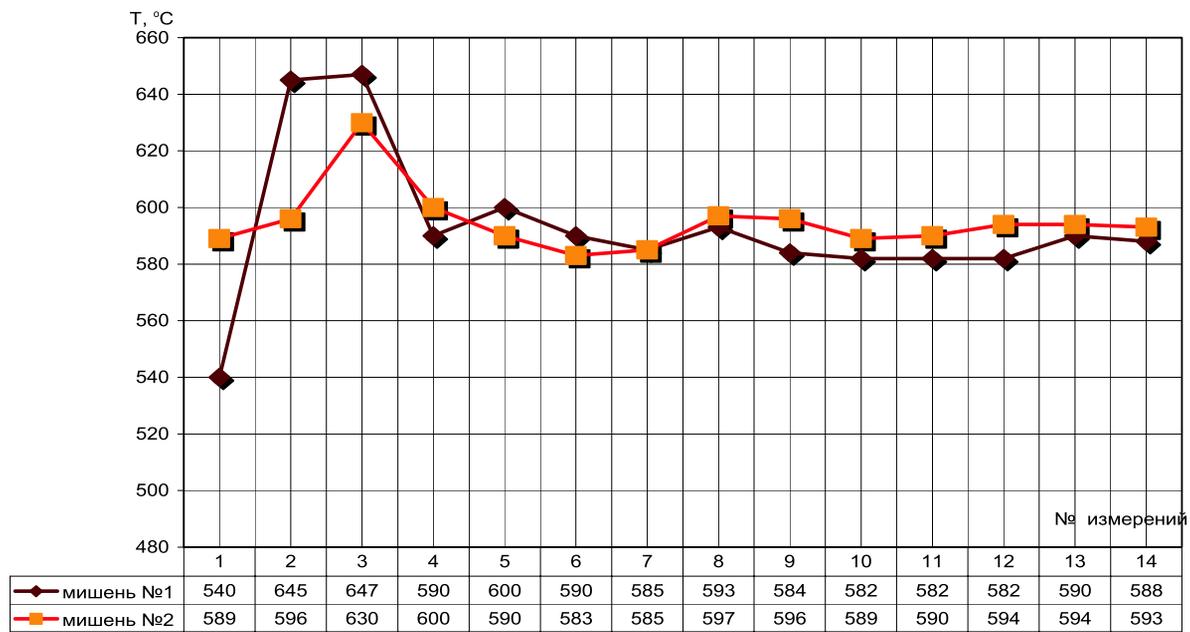


Рис. 2. Значения температур в среднем сечении топки, полученные в ходе эксперимента. Мишень №1 – верхняя, мишень №2 – нижняя.

Результаты численного решения

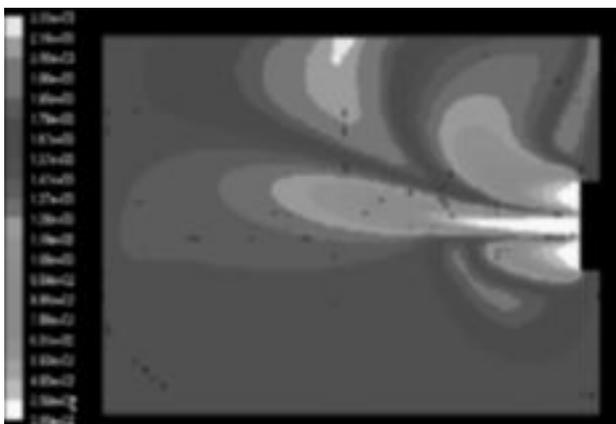
Эффективность работы котла определяется такими гидродинамическими параметрами как скорость, количество воздуха, прошедшее рециркуляцию (повторное вовлечение потока в ядро горения), и увеличение турбулентности потока.

На рис. 3 приведены графики температуры и скорости топочных газов в топке котла мощностью 100 кВт, полученные при помощи программного CFD пакета.

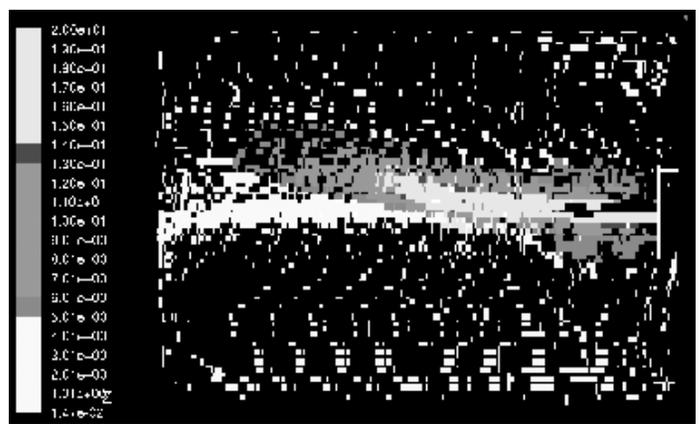
Использовались выражения для расчёта осевой скорости w_m и осевой массовой концентрации c_m . Для основного участка свободной струи в сечении, отстоящем от среза сопла на расстоянии x [4]:

$$\frac{w_m}{w_0} = 6,4 \frac{d}{x + x_n}, \quad \frac{c_m}{c_0} = 5,27 \frac{d}{x + x_{n1}}, \quad (1)$$

где w_0, c_0 – соответственно скорость и массовая концентрация на срезе сопла, $x_n = 0,6 d, x_{n1} = 0,8 d$ – полюсные расстояния струи.



а



б

Рис. 3. Результаты компьютерного расчёта:

а) Значения градиентов температур в продольном сечении топки, в К, б) Скорость потока, м/с.

Распределение скоростей в поперечных сечениях струй в соответствии с изложенным выше может быть описано формулой Шлихтинга

$$\frac{\Delta w}{\Delta w_m} = \frac{w}{w_m} = \left[1 - \left(\frac{r}{r_u} \right)^{1,5} \right]^2,$$

а концентраций Тейлора:

$$\frac{\Delta c}{\Delta c_m} = \frac{c}{c_m} = \left(\frac{w}{w_m} \right)^{0,5}. \quad (2)$$

Или преобразованными зависимостями:

$$\frac{w}{w_m} = \left[1 + 9,62 \frac{w_m r^2}{w_0 d (x + x_n)} \right]^{-2}, \quad (3)$$

где w – скорость в текущем сечении на расстоянии r от оси; x – расстояние по длине струи.

Расчёт по формулам (2, 3) удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными.

Таким образом, в первом приближении процессы переноса в топке для высококалорийного газа удовлетворительно описываются закономерностями свободной турбулентной струи. Для оценки перемешивания необходимо сравнить τ_u – время пребывания смеси в топке и τ_m – время молекулярной диффузии в пределах турбулентного слоя размером δ . Если $\tau_u \geq \tau_m$, можно предположить, что достигнуто тонкое молекулярное перемешивание.

Будем исходить из оценок пути смешения Прандтля $l = cr_{0,5}$.

На основании эксперимента установлено, что $c = 0,21 \dots 0,225$, $r_{0,5}$ – величина радиуса струи на расстоянии, где устанавливается автомодельное течение.

Следующим шагом определим δ по формуле $\tau_m = \delta / D_m$ [6].

Здесь D_m – коэффициент взаимной молекулярной диффузии газов, для систем воздух – метан $D_m = 19,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ [5].

Под δ следует понимать масштаб дробления, который является величиной одного порядка с начальным масштабом турбулентности $\delta \approx c$, тогда:

$$\frac{\delta^2}{D_m} \leq \tau_m \leq \frac{324 \cdot 10^{-6} D^2}{D_m}. \quad (4)$$

где D – диаметр турбулизатора.

Это выражение показывает, что улучшение тонкого перемешивания может достигаться при увеличении турбулентности газовой струи, но на начальном участке струи эта формула не пригодна. Значение δ – крайне мало, причём с увеличением числа Re продольные значения δ возрастают, а поперечные ослабевают.

Результаты CFD моделирования полностью подтверждают и объясняют экспериментально полученные результаты. Пока пламя в топке нестабильно – горение происходит по пути наиболее быстрых реакций, но при этом не происходит полного сгорания всех составляющих компонентов топлива, так как не достигнуто их гомогенное смешение.

Выводы

- ◆ Полная гомогенизация смеси компонентов горения в обычных прямоточных смесителях не обеспечивается вследствие низких скоростей молекулярного перемешивания, а обеспечивается в турбулизованных.

- ◆ Расчёт макроперемешивания потоков природного газа и воздуха в первом приближении может быть выполнен на основе закономерностей свободной струи.

- ◆ При наборе жаровой трубой температуры, соответствующей приблизительно 55°C котловой воды, через 5...10 мин после инициации горения происходит выравнивание температур по длине и высоте топочного пространства, приводящее к стабилизации процессов горения.

- ◆ По найденным значениям профилей концентраций основных составляющих горячей смеси можно оптимизировать конструкторско-технологические параметры топков.

- ◆ На базе предложенной модели можно строить теоретические программы для усовершенствования базовых и создания новых типов котлов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Власюк А.В., Кучин Г.П., Скрипко В.Я. Повышение эффективности работы отопительных

котлов мощностью до 1 МВт // Энергетика и электрификация. – 2001. – №3. – С.38-41.

2. Демченко В.Г., Серебрянский Д.А. Анализ эффективности интенсификации топочного теплообмена при работе котлов на дизельном топливе // Промышленная теплотехника. – 2005. – Т.27, № 6. – С.60-65.

3. Басок Б.И., Демченко В.Г., Мартыненко М.П. Численное моделирование процессов аэродинамики в топке водогрейного котла с вторичным излучателем // Промышленная теплотехника. – 2006. – Т.28, №1. – С.17-22.

4. Абрамович Г.Н. Турбулентные струи. – В кн.: Турбулентные течения. – М.: – 1970. – С.120 – 132.

5. Варгафтик Н.К. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: 1972. – 720 с.

6. Чернавский С.Я. Исследование турбулентной диффузии в прямоточных и закрученных потоках. – В кн.: Кинетика и аэродинамика процессов горения топлив. – М.: 1969. – С. 26 – 46.