

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗБЫТКА ВОЗДУХА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОКИСЛОВ АЗОТА NO_x В ТОПОЧНОЙ КАМЕРЕ ПРИ ГОРЕНИИ

АННОТАЦИЯ

В работе проведено исследование процесса тепло-массопереноса, происходящего при сжигании угольного топлива в топочных камерах действующих котлоагрегатов, с применением методов 3D моделирования, применительно к проблемам, связанным с повышением эффективности работы ТЭЦ и уменьшением выбросов газовых загрязнителей в атмосферу. Проведено исследование влияния избытка воздуха в камере горения на процесс формирования вредных газовых выбросов при сжигании высокозольного пылеугольного топлива.

1. ВВЕДЕНИЕ

Современные темпы развития топливно-энергетической отрасли требуют более глубокого анализа процессов, связанных с использованием энергетического сырья. Для Казахстана, обладающего богатыми месторождениями низкосортного угля, проблемы, связанные с рациональным использованием этого вида топлива, выходят на первый план. Таким образом, исследования физических процессов, происходящих внутри топочного пространства камеры горения, являются сегодня очень актуальными.

За последние годы в защите атмосферы от выбросов твердых частиц достигнуты значительные успехи. Намного сложнее обстоит дело с газовыми загрязнителями и особенно с оксидами азота (NO и NO₂), оксидами углерода (CO и CO₂). С помощью современных методов трехмерного моделирования в работе проведено исследование влияния коэффициента избытка воздуха на концентрацию окислов азота в топочной камере реального энергетического объекта.

Численный эксперимент проводится в несколько этапов: описание физической модели явления; формирование математической модели для описываемого процесса; разработка численного метода и составление алгоритма решения задачи; проведение отладки программы и тестирование; решение физической задачи, анализ и обработка результатов; сравнение полученных результатов с данными физического эксперимента, полученными непосредственно на ГРЭС.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Для расчета многофазного течения с химическими реакциями будем исходить из обобщенного транспортного уравнения переноса в виде [1]:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho u_j \phi)}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right] + S_\phi. \quad (1)$$

Исходя из этого уравнения, получаем систему трехмерных дифференциальных уравнений конвективного тепло-массопереноса с учетом теплопередачи, теплового излучения, химических реакций и многофазности среды.

Закон сохранения массы:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j}, \quad (2)$$

где $\phi = 1$; $\Gamma_\phi = 0$; $S_\phi = 0$.

Закон сохранения импульса:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i. \quad (3)$$

Используя закон трения Стокса для компонент тензора напряжений:

$$\tau_{ij} = \mu \cdot \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right). \quad (4)$$

В уравнении (3) $\phi = u_i$; $\Gamma_\phi = \mu$;

$$S_\phi = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right).$$

Закон сохранения энергии:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho u_j h)}{\partial x_j} - \frac{\partial q_j^{res}}{\partial x_j} - \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} + \frac{\partial(u_i \tau_{ij})}{\partial x_j} + \rho u_i g_i + S_h, \quad (5)$$

$h = e + \frac{p}{\rho}$ — удельная энтальпия;

S_Q — поглощение/выделение энергии в результате химических преобразований или за счет энергии теплового излучения.

Здесь $\phi = h$; $\Gamma_\phi = \frac{\mu}{Pr}$; $S_\phi = S_h$.

Закон сохранения β компоненты вещества:

$$\frac{\partial \rho \beta}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho \beta u_i)}{\partial x_i} + \frac{\partial j_i}{\partial x_i} + S_\beta. \quad (6)$$

Здесь

$$\phi = c_{\beta}^*; \Gamma_{\phi} = \rho D_{c_{\beta}^*}; S_{\phi} = S_{\beta}.$$

Для удобства при проведении вычислительных экспериментов вместо парциальной плотности в работе вводится массовая концентрация $c_{\beta}^* = \frac{\rho_{\beta}}{\rho}$,

$$\text{при этом } \sum_{\beta=1}^n c_{\beta}^* = 1 \text{ и } \sum_{\beta=1}^n \rho_{\beta} = \rho.$$

В работе используется хорошо известная и наиболее часто используемая модель турбулентности, относящаяся к группе моделей с двумя уравнениями переноса турбулентных характеристик – k - ε -модель турбулентности.

Модель включает в себя:

- уравнение переноса турбулентной кинетической энергии k :

$$\frac{\partial(\bar{\rho}k)}{\partial t} = -\frac{\partial(\bar{\rho}\bar{u}_j k)}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P - \bar{\rho}\varepsilon. \quad (7)$$

Здесь P — производство кинетической энергии турбулентности.

- уравнение диссипации турбулентной кинетической энергии ε :

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\varepsilon)}{\partial t} = -\frac{\partial(\bar{\rho}\bar{u}_j \varepsilon)}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_{eff}}{\sigma_{\varepsilon}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] +$$

$$+ C_{\varepsilon,1} \frac{\varepsilon}{k} P - C_{\varepsilon,2} \frac{\varepsilon^2}{k} \bar{\rho}.$$

Эффективная вязкость: $\mu_{eff} = \mu_{lam} + \mu_{turb}$, где турбулентная вязкость μ_{turb} определяется с помощью соотношения Прандтля-Колмогорова [4]:

$$\mu_{turb} = c_{\mu} \rho \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (9)$$

Эмпирические константы k - ε -модели турбулентности предложены в работе [5].

Модель химических реакций определяет для реагирующих потоков источник член S_{β} , связанный со скоростью химической реакции $\dot{\omega}_{\beta}$, в уравнении (6). Использование в работе модели интегральной реакции основано на том, что большинство химических реакций протекает в несколько этапов, причем самый медленный этап реакции определяет скорость всей реакции. Модель сжигания угольной пыли, используемая в работе, учитывает интегральные реакции окисления компонентов топлива до стабильных конечных продуктов реакции. При этом промежуточные реакции, а также образование и изменение неустойчивых промежуточных продуктов не учитываются.

Образование вредных веществ и уменьшение их выброса можно моделировать лишь с помощью

реакционно-кинетических моделей, справедливых для широкого интервала температур и концентраций. Основой реакционно-кинетической модели является соответствующий механизм реакции, включающий в себя описание молекулярного протекания реакции между компонентами с учетом неустойчивых промежуточных продуктов.

Образование оксидов азота из азотсодержащих веществ топлива можно приближенно рассчитать по упрощенной схеме процесса. Согласно этой схеме в основном происходит разложение этих веществ во время сгорания летучих до активного атомарного азота, который затем частично рекомбинирует в молекулярный азот ($N+N \rightarrow N_2$) и частично окисляется до смеси оксидов азота ($mN+O_2 \rightarrow mNO_x$). Ниже приведена схема преобразования содержащих азот соединений (рис.1).

Концентрация образующихся молекулярного азота и смеси оксидов азота в дымовых газах находится решением уравнений гомогенной кинетики [7]. Разные комбинации возможных путей реакций являются основой различных моделей. Выбор какой-то из них связан, прежде всего, с возможностями имеющейся ЭВМ. При этом критериями выбора модели являются минимальное число реакций и компонентов, участвующих при одновременной точности проведенных расчетов, и удовлетворительное совпадение их с экспериментальными данными.

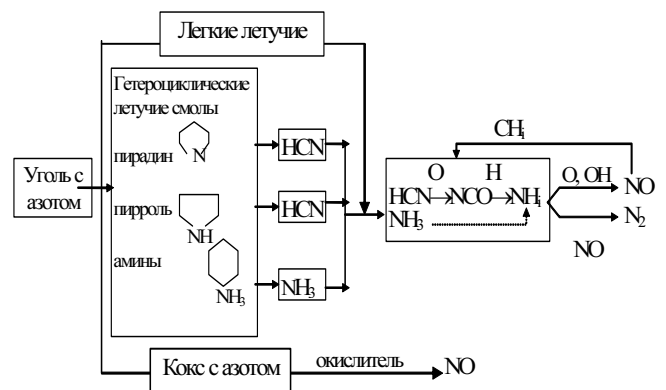


Рис. 1. Схема преобразования содержащих азот соединений [6]

В работе используется модель работы [8], требующая незначительных вычислительных затрат, которая была детально проверена на большом числе экспериментов в лабораторных условиях и в крупных топках. Эта модель учитывает 31 элементарную реакцию для NO_x -модели с участием 15 веществ, реакции выхода летучих с образованием воды, водорода, оксида и диоксида углерода, метана, а также реакции превращения первичных летучих, выделившихся из угля, в газовой фазе до конечных продуктов (CO , CO_2 , H_2O , H_2 , O , H). Реакции и их кинетические данные приведены в [1,8]. Для проведения вычислительного эксперимента в данной работе использован компьютерный пакет программ трех-

мерного моделирования сжигания угля в камерах сгорания паровых котлов FLOREAN [1,9]. Этот пакет базируется на решении консервативных уравнений для газотопливной смеси методом конечного объема.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Численные эксперименты проведены для котла ПК-39. На рис. 2 представлена общая схема камеры сгорания этого котла.

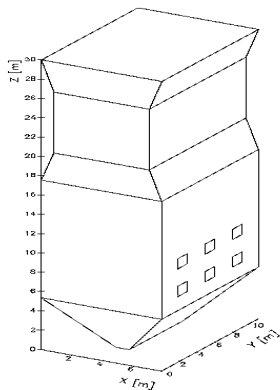


Рис. 2. Общий вид камеры сгорания

Топка котла оборудована 12 вихревыми трехканальными горелками. Горелки расположены встречно в два яруса по шесть горелок в каждом и имеют два размера, которые обеспечивают разные коэффициенты избытка воздуха в них. Топливо по ярусам распределено поровну.

Для камеры горения с индивидуальной системой пылеприготовления воздушный баланс на 1 кг топлива выражается следующим уравнением:

$$V_1 + V_2 + \Delta V_T = V_T. \quad (10)$$

Здесь V_1 и V_2 — количество первичного и вторичного воздуха, м³/кг; ΔV_T — количество воздуха, поступающего в топочную камеру в виде присосов, м³/кг.

В общем виде воздушный баланс при выражении составляющих потоков в долях от теоретически необходимого количества воздуха для сгорания 1 кг топлива с учетом распределения топлива между горелками имеет вид:

$$\alpha_1 g + \alpha_2 g + \Delta \alpha_T = \alpha_T. \quad (11)$$

а в процентах от всего количества воздуха, поступающего в топку:

$$\alpha_1 g + \alpha_2 g + \Delta \alpha_T = 100\%. \quad (12)$$

$$\alpha_1 = \frac{V_1}{V^0 g}; \quad \alpha_2 = \frac{V_2}{V^0 g}. \quad (13)$$

Здесь: α_1 , α_2 — соответственно количество первичного и вторичного воздуха в долях от теоретически необходимого количества в формуле (11) и в процентах от всего воздуха в формуле (12) при расходе топлива через горелки g , в расчете на 1 кг сырого топлива, кг/кг; $\Delta \alpha_T$ — количество воздуха, поступающего в топку в виде присосов в долях от теоретически необходимого количества в (11) и в

процентах от общего количества воздуха для сжигания 1 кг топлива в (12); α_T — коэффициент избытка воздуха на выходе из топки; V^0 — теоретически необходимое количество воздуха для сгорания пыли, м³/кг. Сумма $\alpha_1 + \alpha_2 = \alpha_T$ является коэффициентом избытка воздуха в грелках.

Изменение коэффициента избытка воздуха заметно влияет на процесс горения в объеме топки. Уровень окислов азота на выходе из топки в основном зависит от коэффициента избытка воздуха на выходе из работающей горелки α_T и в топке α_T в целом.

На рис. 3 представлены зависимости концентраций O_2 и NO_x на выходе из котельной установки от коэффициента избытка воздуха в топке α_T , полученные в результате численного моделирования (линия 1 и треугольники) и измерений, сделанных непосредственно на Аксуйской электростанции (линия 2 и звездочки) [10]. Уровень и зависимость концентрации NO_x от α_T имеют обычный вид.

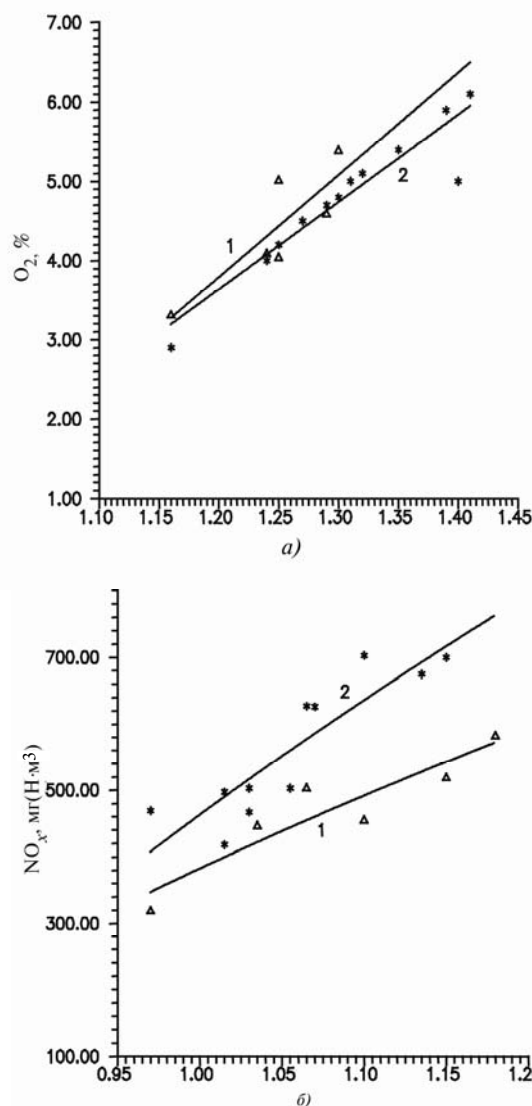


Рис.3. Зависимости концентраций O_2 (а) и NO_x (б) на выходе из топки от коэффициента избытка воздуха в топке α_T : 1(Δ) — моделирование; 2(*) — эксперимент [10]

Анализ представленных графиков показывает, что результаты моделирования и эксперимента находятся в неплохом соответствии, а распределение окислов азота по длине факела и уровень выброса окислов в нем близки к промышленным условиям. Распределение концентрации на рис. 3, б наглядно говорит о том, что увеличение коэффициента воздуха в топке приводит к увеличению концентрации NO_x на выходе из камеры сгорания. В связи с этим можно сделать вывод, что при организации топочного процесса необходимо следить за объемом воздуха, поставляемого в камеру сгорания и выбирать наиболее оптимальные значения данного параметра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были представлены результаты численного моделирования реакции горения для котла ПК-39 Аксуйской ГРЭС при различных коэффициентах избытка воздуха в топочной камере. Проведено сопоставление с экспериментальными данными. Показано, что выбранная математическая модель позволяет удовлетворительно рассчитывать параметры процесса горения. Моделирование образования вредных веществ (NO_x) с помощью используемой в работе модели и пакета программ вполне возможно. Полученные результаты вычислительного эксперимента позволяют оптимизировать процесс сжигания высокозольного пылеугольного топлива и выбирать наиболее оптимальные значения коэффициента избытка воздуха в камере сгорания в целях уменьшения выбросов вредных веществ (NO_x) и улучшения процесса горения. Метод, предложенный в данной работе, может использоваться на любых теплоэлектростанциях Республики Казахстан, использующих в качестве основного топлива низкосортную угольную пыль, обладающую высокой зольностью и влажностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Müller H. Numerische Berechnung dreidimensionaler turbulenter Strömungen in Dampferzeugern mit Wärmeübergang und chemischen Reactionen am Beispiel des SNCR-Verfahrens und der Kohleverbrennung // Fortschritt-Berichte VDI-Verlag. Reihe 6. Nr.268. 1992. 158 s.
2. Görner K. Technische Verbrennungssysteme – Grundlagen, Modellbildung, Simulation // Springer Verlag Berlin Heidelberg. 1991. 198 s.
3. De Marco A., Lockwood F.C. New flux model for the calculation of radiation in furnaces // La rivista dei combustibili Giornate Italiane delle Filamme. 1975. P.184—196.
4. Колмогоров А. Уравнения турбулентного движения несжимаемой жидкости // Изв. АН СССР. 1942. №6 (1). С. 56.
5. Launder B., Spalding D. The numerical computation of turbulent flows // Comp.Met.Appl.Mech.Eng. Vol.3. 1974. P. 269—289
6. Smart J.P., Weber R. Reduction of NO_x and optimization of burnout with an aerodynamically airstaged burner and airstaged precombustor burner // J. Inst.Energy. 1989. P. 237—345
7. Зельдович Я.Б., Садовников П.Я., Франк-Каменецкий Д.А. Окисление азота при горении. М., 1947.
8. Dean A. M., Hardy J.E, Lyon R.K. Kinetics and Mechanism of NH_3 Oxidation //19th Symp. Comb. // The Combustion Institute, 1982. P. 97.
9. Vockrodt S. 3-Dimensionale Simulation der Kohleverbrennung in zirkulierenden atmosphärischen Wirbelschichtfeuerungen // Fortschritt-Berichte VDI-Verlag. Reihe 6. Düsseldorf. 1995. 334 s.
10. Алияров Б.К. Освоение сжигания экибастузского угля на тепловых электростанциях. Алматы: Гылым, 1996. 272 с.