

УДК 519.6

А.С.Аскарова, С.А.Болегенова, В.Ю., Максимов, А.А.Туякбаев,
А.С. Сагинаева

Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан;

ПРОЦЕССЫ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ И ХИМИЧЕСКИ РЕАГИРУЮЩИХ ПОТОКАХ

Аннотация. Методом трехмерного компьютерного моделирования высокотемпературных и химически реагирующих потоков в камерах сгорания исследованы зависимости распределения концентрации твердых частиц, углерода, кислорода, угарного и углекислого газов по высоте камеры сгорания.

Ключевые слова: теплообмен, факел, камера сгорания, котел.

Введение

Важность процесса горения в технических устройствах вместе с дороговизной натуральных экспериментов способствует быстрому развитию трехмерного моделирования концентрационных характеристик вредных веществ, образующихся при традиционном сжигании Крагандинского рядового угля в топочной камере БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ.

Модели процессов горения основаны на законах сохранения массы, импульса и энергии в многокомпонентной реагирующей смеси. Уравнения теории горения – это уравнения непрерывности для смеси в целом и всех отдельных компонентов, уравнение Навье-Стокса для сжимаемой среды и уравнение переноса тепла с химическими источниками. С подробными кинетическими схемами эта система дифференциальных уравнений в частных производных чрезвычайно сложна, и до настоящего времени не существует универсальных численных схем, которые могли бы применяться во всех режимах горения и температурных диапазонах [1]. Поэтому такие схемы строятся для частных случаев, позволяющих дополнительно упростить систему уравнений.

В одномерном случае для медленного горения (ламинарное пламя) разработаны эффективные методы решения системы уравнений, в том числе для подробных кинетических схем, и доступны пакеты программ, решающих эти задачи. В исследованиях чаще всего используются

коммерческие пакеты [CHEMKIN](#) и [Cosilab](#), а также свободное ПО [Cantera](#).

В двух- и трёхмерном случаях до сих пор чаще всего применяется глобальная кинетическая схема. Такой подход реализован, например, в пакетах [ANSYS FLUENT](#) и KIVA, однако вместе с увеличением мощности компьютеров появляются и расчёты с сокращёнными кинетическими схемами и подробными схемами. Для решения таких задач используются суперкомпьютеры.

Топочная камера БКЗ-75 и его физико-технические характеристики

В качестве объекта исследования была выбрана топочная камера котла БКЗ 75-39ФБ, установленного на Шахтинской ТЭЦ, Карагандинской области.

Паровой котел заводской марки БКЗ 75-39ФБ – вертикально-водотрубный, изготовлен Барнаульским котельным заводом, производительностью 75 т/час (51,45 Гкал/ч), температурой перегретого пара 440°C и давлением перегретого пара 39 кгс/см².

Котел БКЗ 75-39ФБ имеет конвективный пароперегреватель, вертикального типа, с коридорным расположением труб и выполнен из двух блоков, расположенных в поворотном газоходе между топкой и опускным газоходом [2-3]. Температура перегрева регулируется поверхностным пароохладителем, расположенным в рассечке пароперегревателя.

Для сжигания пылеугольного топлива топочная камера исследуемого котла

оборудуется четырьмя пылеугольными горелками, расположенными по две на каждой боковой стенке. Для такой конструкции предусмотрено прямое вдувание пыли и индивидуальная система пылеприготовления, состоящая из двух молотковых мельниц.

По производительности мельницы имеют двукратный запас (30,6 т/ч), одна мельница может обеспечить работу котла в номинальном режиме. В год на одном котле Шахтинской ТЭЦ сжигается примерно 44,256 тысяч тонн угля и 4,15 тыс. тонн мазута. В процессе сжигания угольной пыли на данном котле, величина механического недожога, полученная в результате эксплуатации котла, составляет 13,37%.

В котле БКЗ 75-39ФБ Шахтинской ТЭЦ сжигается пыль Карагандинского рядового угля марки КР-200, зольностью 35,1% выходом летучих 22%, влажностью 10,6% и теплотой сгорания 18550 кДж/кг.

Тонина помола угля составляет $R_{90}=20\%$.

Проведение вычислительного эксперимента

Для исследования основных технологий, используемых при сжигании пылеугольного топлива в камерах сгорания ТЭС, а также для исследования традиционного метода сжигания угля широкоприменяется вычислительный эксперимент, который состоит из следующих этапов, показанных на рисунке 1.



Рисунок 1 – Этапы проведения вычислительного эксперимента

При проведении вычислительных экспериментов, на начальном этапе необходимо построить геометрию исследуемого объекта, а также получить его

конечно-разностную сетку с использованием программного комплекса PREPROZ (рисунок 2).

При создании геометрической модели, каждая стенка топочной камеры описывается отдельно в виде численных кодов. Сначала вводятся стенки с их угловыми точками. Входы и выход задаются, прежде всего, в виде типа отверстий и потом устанавливаются координаты пространственного положения горелочных устройств на определенных стенках. Отверстие горелки (вход) описывается в виде концентрических окружностей (для круглых горелок), выход – в виде прямоугольника с соответствующими координатами в пространстве. В соответствии с заданной геометрией создается решетка для численного моделирования.

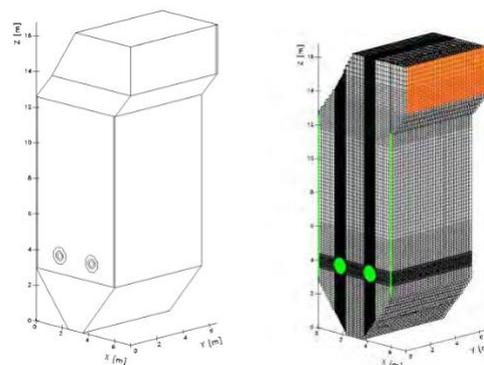


Рисунок 2 – Геометрия и конечно-разностная сетка топочной камеры котла БКЗ 75-39ФБ Шахтинской ТЭЦ

Кроме того, в используемом программном комплексе нужно создать исходные файлы, в которых содержатся физические и геометрические данные исследуемого процесса, а также начальные и граничные условия для моделирования процесса тепломассопереноса в турбулентных высокотемпературных потоках.

Основные уравнения, описываемые процесс горения твердого топлива в топочной камере. При сгорании пылеугольного топлива в камере сгорания происходят турбулентные процессы переноса тепла, массы реагирующих компонентов и продуктов их

взаимодействия [4]. Такие процессы описываются уравнениями, основанные на законах сохранения массы и импульса.

а) Уравнение сохранения массы, или уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} = - \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i), \quad (1)$$

б) Закон сохранения импульса:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho u_i) = - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij}) - \frac{\partial p}{\partial x_j} + \rho f_i, \quad (2)$$

здесь: f_i - объемные силы; τ_{ij} - тензор вязких напряжений.

Для реагирующих потоков, в которых происходят процессы теплопередачи и химические реакции необходимо дополнительно решать уравнение сохранения энергии и добавлять уравнение концентраций отдельных компонентов.

в) Уравнение энергии:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho h) = - \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i h) - \frac{\partial q_{i,res}}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial t} + u_i \frac{\partial p}{\partial x_i} + \tau_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + S_q, \quad (3)$$

здесь: h - энтальпия; $q_{i,res}$ - плотность потока энергии за счет молекулярного переноса тепла, S_q - источник энергии.

Источниковый член S_q учитывает:

- поток тепла за счет конвективного обмена между частицами и газовой фазой - $S_{h,p}$;

- теплоту сгорания, в которой учитывается наличие твердых частиц пылеугольного топлива в общем потоке аэросмеси - S_{abr} ;

- теплоту за счет излучения - S_{str} , вклад которой, в зоне пламени, составляет порядка 90% и более в полный теплообмен.

г) Закон сохранения для компоненты вещества:

Концентрации компонент смеси в элементе объема записываются через соответствующее балансовое соотношение, которое учитывает физико-химические процессы, оказывающие влияние на изменение концентрации данных веществ.

В элементе объема общая масса определяется суммой масс всех компонентов, участвующих в химической реакции горения угольной частицы:

$$m = \sum_n m_n. \quad (4)$$

Уравнение, описывающее концентрации компонент смеси в общем виде записывается следующим образом:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c_n) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i c_n) = - \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\mu_{eff}}{\sigma_{n,eff}} \frac{\partial c_n}{\partial x_i} \right] + S_{cn}, \quad (5)$$

где S_{cn} - источниковый член, учитывающий вклад химических реакций в изменение концентрации компонентов.

Результаты вычислительного эксперимента

В итоге проведения вычислительного эксперимента, методом трехмерного компьютерного моделирования были построены зависимости распределения концентрации твердых частиц, углерода, кислорода, угарного и углекислого газов по высоте топочной камеры сгорания.

Энергия, выделяемая вследствие химических реакций, напрямую зависит от содержания горючего углерода (рисунок 3) и концентрации кислорода (рисунок 4) в топочной камере котла.



Рисунок 3 – Зависимость концентрации углерода по высоте камеры сгорания

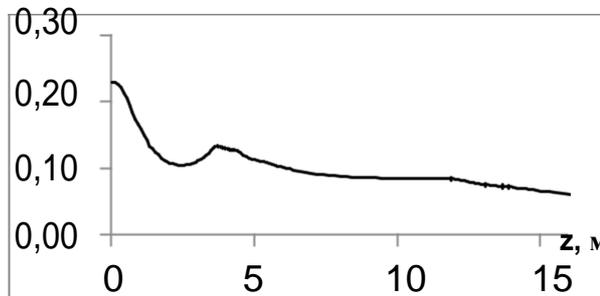


Рисунок 4 – Зависимость концентрации кислорода по высоте камеры сгорания

На рисунке 5 представлена зависимость концентрации твердых частиц по высоте камеры сгорания. Из рисунка

видно, что максимальная концентрация твердых частиц наблюдается в области подачи угольной пыли, которая из себя представляет смесь твердых частиц и воздуха [5-6]. По мере выгорания пылеугольного факела, концентрация твердых частиц с высотой камеры сгорания уменьшается. Однако, на выходе из камеры сгорания, мы наблюдаем не нулевое значение концентрации, поскольку существует такое понятие, как механический недожог топлива и унос золы.

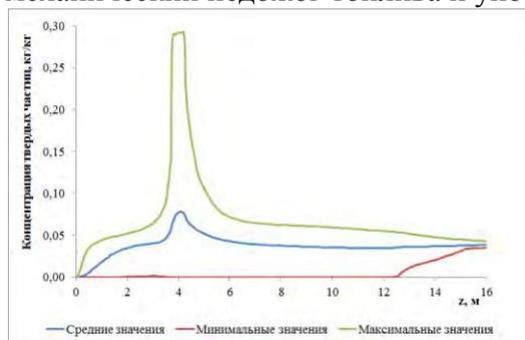


Рисунок 5 – Зависимость концентрации твердых частиц по высоте камеры сгорания

Основным итогом процесса горения углерода при высоких температурах является соединение кислорода с углеродом пылеугольного топлива, с образованием окиси углерода CO. Анализ рисунков 6-7 показывает, что максимальные значения концентрации окиси углерода принимает в центральном сечении области расположения горелочных устройств, поскольку здесь наблюдается область высоких температур и имеется большая концентрация углерода топлива и кислорода окислителя. По мере продвижения к выходу из камеры сгорания, концентрация CO падает, в виду того, что уменьшается концентрация кислорода и углерода.

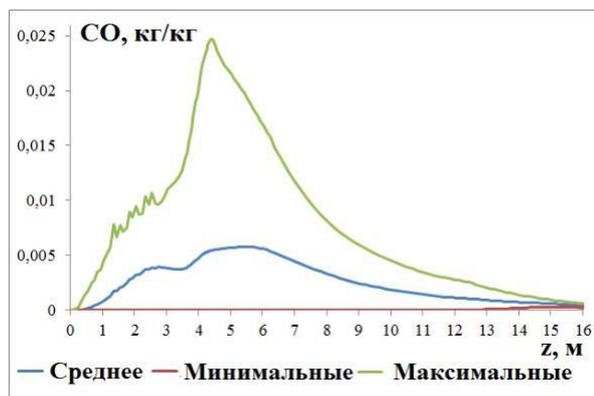


Рисунок 6 - Распределение концентрации оксида углерода CO по высоте камеры сгорания

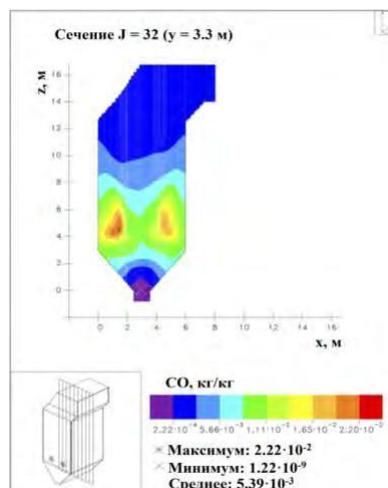


Рисунок 7 - Распределение концентрации оксида углерода CO в продольном сечении камеры сгорания (y=3.3м)

Характер распределения углекислого газа CO₂ полностью противоположен характеру распределения окиси углерода CO. Из рисунков 8, 9 видно, что в области пояса горелочных устройств на высоте 4 метров концентрация углекислого газа минимальна, тогда как концентрация CO в этой области максимальна [6]. В отличие от распределения окиси углерода, концентрация углекислого газа по мере продвижения к выходу из камеры сгорания растет.

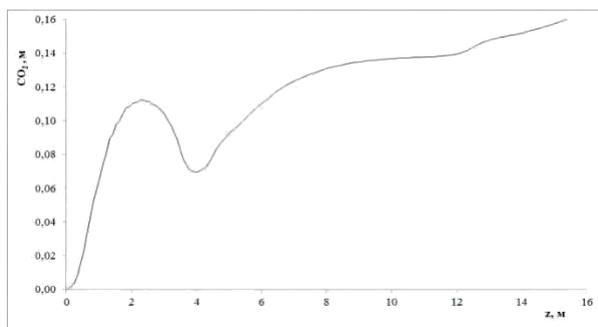


Рисунок 8 - Распределение концентрации диоксида углерода CO_2 по высоте камеры сгорания

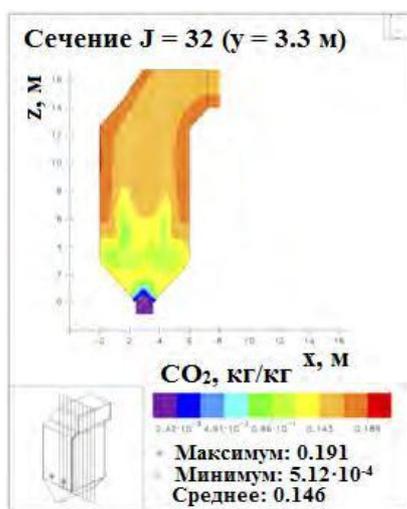


Рисунок 9 - Распределение концентрации диоксида углерода в поперечном сечении камеры сгорания при $y = 3.3$ м

Горение энергетического топлива сопровождается образованием вредных для окружающей среды пылегазовых выбросов, количество которых в каждом конкретном случае зависит от технологии и режимов сжигания угольной пыли, а также от ее состава [7-9]. К наиболее важным, поступающим в атмосферу при сжигании в топочных камерах пылеугольного топлива, загрязнителям относятся твердые частицы (зола, пыль, частицы сажи), а также газовые выбросы (оксиды азота, углерода, серы и др.).

Для решения проблемы загрязнения атмосферы пылегазовыми выбросами, необходимо разрабатывать технологии экологически «чистого» сжигания энергетического топлива. В этой связи исследование концентрационных характеристик вредных веществ в продуктах горения является актуальной задачей.

Вывод

По итогам вычислительного эксперимента можно заключить, что максимальная концентрация твердых частиц наблюдается в области подачи угольной пыли, которая из себя представляет смесь твердых частиц и воздуха. По мере выгорания пылеугольного факела, концентрация твердых частиц с высотой камеры сгорания уменьшается. Максимальные значения концентрации кислорода углерода принимает в центральном сечении области расположения горелочных устройств, поскольку здесь наблюдается область высоких температур и имеется большая концентрация углерода топлива и кислорода окислителя [10]. По мере продвижения к выходу из камеры сгорания, концентрация CO падает, в виду того, что уменьшается концентрация кислорода и углерода. Характер распределения углекислого газа CO_2 полностью противоположен характеру распределения кислорода углерода CO . В области пояса горелочных устройств на высоте 4 метров концентрация углекислого газа минимальна, тогда как концентрация CO в этой области максимальна. В отличие от распределения кислорода углерода, концентрация углекислого газа по мере продвижения к выходу из камеры сгорания растет.

Список литературы

- 1 Askarova A.S., Bolegenova S., V.Maximov, Bekmukhamet A. Mathematical simulation of pulverized coal in combustion chamber // Procedia Engineering.- ELSEVIER, Praha, Czech Republic, 2012.- p. 1259-1265.
- 2А.С. Аскарова,С.А. Болегенова, В.Ю. Максимов, М.Т. Бекетаева,А. Бекмухамет Получение температурных и аэродинамических характеристик камеры сгорания котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ методом моделирования топочных процессов // VIII Всероссийская конференция с международным участием «Горение твердого топлива», 13-16 ноября 2012 года.- Новосибирск, Россия.- с.8.1-8.8.
- 3 А.С. Аскарова,С.А. Болегенова, В.Ю. Максимов Исследование образования вредных веществ в камере сгорания БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ // VIII Всероссийская

конференция с международным участием «Горение твердого топлива», 13-16 ноября 2012 года.- Новосибирск, Россия.- с. 9.1-9.4.

4 A.S. Askarova, S.A. Bolegenova, R. Leithner, V. Ju. Maximov Numerical modeling of temperature and concentration characteristics in combustion chamber at power plant of Kazakhstan // International Journal of Mathematics and Physics, 2013.- p. 102-106.

5 A. Askarova, S. Bolegenova, V. Maximov, A. Bekmuhamet, M. Beketayeva Three-dimensional modeling of aerodynamic characteristics of combustion chamber BKZ-75 mining thermal power station // Recent Advances in Systems Science and Mathematical Modelling, Paris, France, 2012.-p. 276-279.

6 Алияров Б.К. Освоение сжигания экибастузского угля на тепловых

электростанциях. -Алматы: Гылым, 1996. – с. 272.

7 Omory J., Orning A. Effect of Pressure on the Combustion of pulverized coal // Transaction of the ASME, 1950, № 5, p. 591-599.

8 Кацнельсон Б.Д. Горение угольной пыли под давлением.- ЦКТИ, 1954, кн. 26, с. 35-43.

9 Кацнельсон Б.Д., Мароне И.Я. О воспламенении и горении угольной пыли.- Теплоэнергетика, 1961, № 1, с. 30-35.

10 Кацнельсон Б.Д. Исследование горения частиц и факела твердых топлив на лабораторных установках.- В кн.: Третье Всесоюзное совещание по теории горения, т. 2, М.: Изд-во АН СССР, 1960, с. 115-122.

Принято в печать 20.10.14

**А.С.Аскарова, С.А.Болегенова, В.Ю., Максимов, А.А.Туякбаев,
А.С. Сагинаева**

Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан;

ПРОЦЕССЫ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ И ХИМИЧЕСКИ РЕАГИРУЮЩИХ ПОТОКАХ

Аннотация. Методом трехмерного компьютерного моделирования высокотемпературных и химически реагирующих потоков в камерах сгорания исследованы зависимости распределения концентрации твердых частиц, углерода, кислорода, угарного и углекислого газов по высоте камеры сгорания.

Ключевые слова: тепломассообмен, факел, камера сгорания, котел.

**A.S.Askarova, S.A.Bulegenova, VY, Maksimov, A.A.Tuyakbaev,
AS Saginaeva**

Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan;

PROCESSES IN HIGH HEAT AND CHEMICALLY REACTING FLOWS

Abstract. The method of three-dimensional computer simulation of high-temperature and chemically reacting flows in combustion chambers depending investigated concentration distribution of solid particles, carbon, oxygen, carbon dioxide gas and adjustment of the combustion chamber.

Keywords: heat and mass transfer, a torch, a combustion chamber, the boiler.

**Ә.С.Асқарова, С.А. Бөлегенова, В.Ю.Максимов, А.А.Туякбаев,
А.С.Сағынаева**

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті

ЖОҒАРЫТЕМПЕРАТУРАЛЫ ЖӘНЕ ХИМИЯЛЫҚ ӘСЕРЛЕСУШІ АҒЫНДАРДАҒЫ ЖЫЛУ МАССА ТАСЫМАЛЫ ПРОЦЕСТЕРІ

Тғйін. Жану камераларындағы жоғарытемпературалы және химиялық әсерлесуші ағындарды үшәлшемді компьютерлік модельдеу әдістерімен қатты бәлшектердің, кәміртегінің, улы және кәміркышқыл газдарының концентрацияларының жану камерасының биіктігіне қатысты таралу тәуелділіктері зерттелінді.

Кілтті сәздер: жылу және масса, алау, іштен жану камерасы, қазандық