

А. А. Аскарлова, С. А. Болегенова, В. Ю. Максимов, А. Н. Алдиярова
Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
Республика Казахстан, г. Алматы
E-mail: maximov.v@mail.ru

3D- МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СЖИГАНИЯ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ КОМПОНОВКИ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ТЭЦ ВИХРЕВЫМИ ГОРЕЛОЧНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ

Абстракт. Исследование направлено на изучение тепловых процессов, обусловленных сжиганием пылеугольного топлива в камере сгорания промышленного котла действующей ТЭЦ. На основе численного решения системы уравнений конвективного теплообмена, с учетом кинетики химических реакций, двухфазности течения, нелинейных эффектов конвективного и радиационного теплообмена и методов трехмерного моделирования, необходимо выявить аэродинамические характеристики по всему объему топочной камеры, в ее основных сечениях и на выходе из нее; определение влияния закрутки пылеугольного потока в топочной камере котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ. Использование новой геометрической и физической моделей модернизированной камеры сгорания с целью сравнительного анализа расположения и компоновки горелочных устройств.

Ключевые слова: 3D- моделирование, геометрическое моделирование, моделирование процессов, твердое топливо, теплообмен, топочные устройства, физическая модель.

Введение

Для инновации новых энергетических комплексов, основанных на использовании пылеугольного топлива, необходимо модернизировать исследование топочных процессов, что является на данный момент чрезвычайно трудным. Для повышения надежности и улучшения качества проектирования большую актуальность приобретает разработка методов комплексного расчета топочных устройств с учетом аэродинамики топочной камеры, воспламенения, теплообмена и механизмов выгорания пылеугольного факела. Для реализации эффективного комплексного исследования процессов сжигания угольной пыли в топочных камерах котлов натуральных промышленных объектов всемирно используются численные методы и вычислительный эксперимент с использованием методов трехмерного моделирования и привлечением современного компьютерного оборудования вычислительной техники и пакета программ. Преимущество 3D- моделирования заключается в том, что учитывается наибольшее количество явлений и факторов, влияющих на протекание реальных процессов.

Задачами исследования является получить новые результаты теоретического исследования, математического и компьютерного моделирования процессов турбулентного теплообмена при сжигании пылеугольного топлива в топочной камере котла БКЗ-75 для проведения сравнительного анализа компоновок горелочных устройств с использованием прямоточных щелевых и вихревых горелок, исследовать влияние угла закрутки пылеугольного потока при использовании новой физико-математической модели на аэродинамические, концентрационные характеристики в объеме топочной камеры котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ.

Для проведения вычислительного эксперимента использованы современные численные методы решения системы уравнений, описывающих процесс горения пылеугольной смеси, турбулентности течения, нелинейного характера распределения радиационного и конвективного теплообмена, многофазности среды, а также кинетики и многостадийности протекающих химических реакций.

Для сжигания пылеугольного топлива топочная камера исследуемого котла оборудуется четырьмя вихревыми аксиально-лопаточными пылеугольными горелками, расположенными по две на каждой боковой стенке (рисунок 1). Для такой конструкции предусмотрено прямое вдувание пыли и индивидуальная система пылеприготовления, состоящая из двух молотковых мельниц. Каждая горелка обеспечивается угольной пылью от обеих 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%.

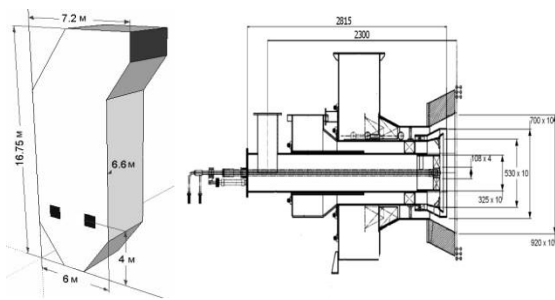


Рисунок 1 - Общий вид камеры сгорания и пылеугольной горелки

Проведен сравнительный анализ компоновки горелочных устройств для случая, когда установлены прямоточные горелки, и случая, когда установлены вихревые горелки с углом закрутки 30 градусов. Кроме того в используемых горелках угол наклона к оси камеры сгорания составляет также 30 градусов.

При сгорании твердого топлива в пылевидном состоянии в топочной камере происходят турбулентные процессы переноса тепла, массы реагирующих компонентов и продуктов их взаимодействия. Такие процессы описываются уравнениями, основанными на законах сохранения массы и им-

пульса. Для реагирующих потоков, в которых происходят процессы теплопередачи и химические реакции необходимо дополнительно

решать уравнение сохранения энергии и добавлять уравнение сохранения компонентов смеси или уравнения сохранения для фракций смеси и их изменений. Турбулентность описывается транспортными уравнениями для турбулентных характеристик.

Указанная система основных уравнений математической модели, используемой в настоящем исследовании для описания процессов турбулентного теплопереноса при сжигании твердого топлива в пылевидном состоянии (пылеугольный факел) выглядит следующим образом:

1) уравнение сохранения массы, или уравнение неразрывности:

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

2) Закон сохранения импульса:

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

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

3) уравнение энергии:

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

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

4) 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:

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

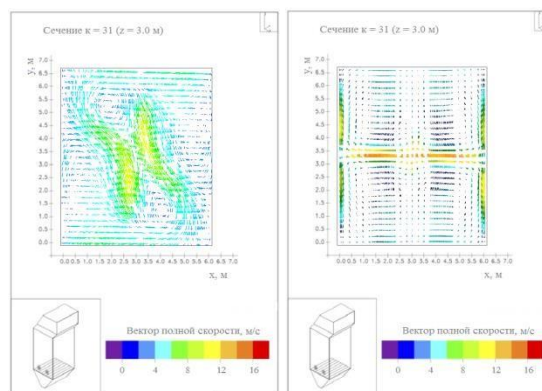
где S_{c_n} - источниковый член, учитывающий вклад химических реакций в изменение концентрации компонентов.

Проведены вычислительные эксперименты, в результате которых получена аэродинамическая картина исследуемой камеры сгорания и проведено сравнение с данными вычислительных экспериментов других авторов.

Исследование аэродинамических характеристик камеры сгорания котла БКЗ-75 Результаты вычислительных экспериментов с использованием прямооточных щелевых горелок были взяты из работы [1]. При проведении сравнительного анализа были исследованы основные закономерности распределения аэродинамических, концентрационных характеристик во всем объеме камеры сгорания котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ.

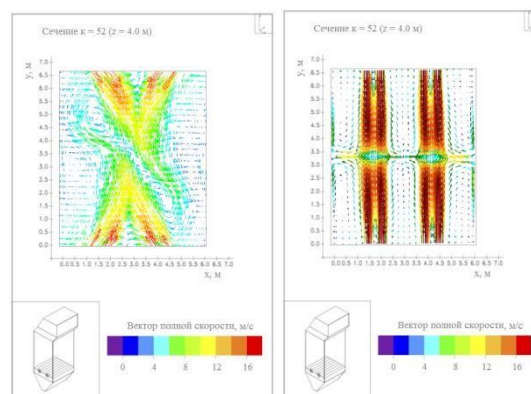
По результатам вычислительных экспериментов были построены распределения вектора полной скорости в поперечных сечениях следующих областей камеры сгорания: верхняя область холодной воронки, которая в исследуемом котле располагается на высоте $z=3.0$ м (рисунок 2); в сечении установки горелочных устройств $z=4.0$ м (рисунок 3) и на выходе из топочной камеры (рисунок 2).

Анализ рисунка 3, а показывает, что в области холодной воронки образуется интенсивное течение, с образованием двух вихревых областей, которые находятся в центральной части камеры сгорания. Образовавшиеся вихри занимают большую область сечения камеры сгорания, нежели в случае с прямооточными горелками (рисунок 2, б), где образуются вихри меньшей величины в области близкой к стенкам камеры сгорания. Что касается числовых значений вектора полной скорости, то они в обоих случаях не превышают 16 м/с. Однако в случае использования вихревых горелок областью максимальных значений является центральная часть холодной воронки исследуемой камеры сгорания.



а) б)

Рисунок 2 – Вектор полной скорости в поперечных сечениях области холодной воронки: а) вихревой горелки; б) прямооточной щелевой горелки



а) б)

Рисунок 3 – Распределение вектора полной скорости в области установки горелочных устройств: а) вихревой горелки; б) прямооточной щелевой горелки

Как видно из рисунка 3, в области пояса горелочных устройств 4 закрученных потока, направляющиеся из вихревых горелок соударяются между собой в центральной части камеры сгорания под углом 30 градусов. Далее, объединившись в два основных потока, они рассекаются, образуя вихревые области больше в горизонтальной области камеры сгорания.

Данная аэродинамическая картина кардинальным образом отличается от случая, когда камера сгорания комплектуется прямооточными щелевыми горелками, где потоки, соударяясь в центре под прямым углом, рассе-

каются в область холодной воронки и к выходу из камеры сгорания, с образованием вихревого течения меньшей интенсивности.

Существенно то, что в случае использования щелевых горелочных устройств, вихревое течение образуется вблизи стенок камеры сгорания, повышая тем самым тепловую нагрузку на экраны. С течением времени, при такой организации процесса горения пылеугольного топлива, стенки камеры сгорания будут «перегорать», что вызовет дополнительные конструкционные расходы. В противовес этому, при использовании вихревых горелок, вихревой областью течения является центральная часть камеры сгорания. Таким образом, угольная пыль будет большее время пребывать в этой области, вдали от экранов, обеспечивая меньшие температуры возле них, тем самым снижая риск перегрева.

На рисунке 4 показан сравнительный анализ распределения вектора полной скорости в поперечном сечении камеры сгорания в области расположения горелочных устройств (рисунок 4 а, б), а также на выходе из нее (рисунок 4 в, г). Видно, что в случае использования прямооточных щелевых горелок в сечении холодной воронки образуется вихревое течение в вертикальной плоскости, тем самым «задерживая» поток аэросмеси в этой области. Однако, в реальности, этого не должно происходить, поскольку ядро факела формируется в центральной части камеры сгорания.

Иным образом дело обстоит в случае использования вихревых горелок. Из рисунка 4 а, видно, что по всей высоте камеры сгорания вихревого течения в вертикальной плоскости не наблюдается, тем самым поддерживается равномерное движение потока к выходу. На выходе из камеры сгорания (рисунок 4 в) мы наблюдаем полностью безвихревое течение продуктов горения.

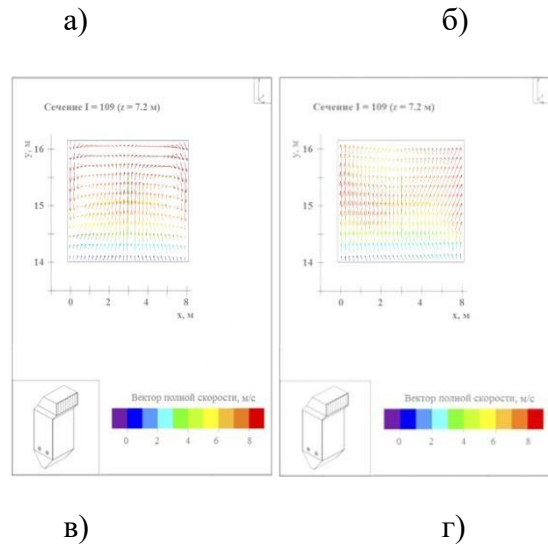
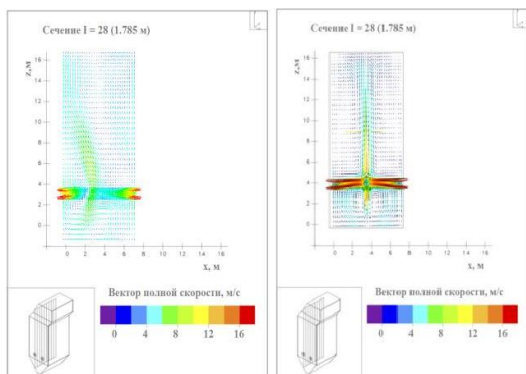


Рисунок 4— Распределение вектора полной скорости в сечениях установки горелочных устройств и на выходе из камеры сгорания: а, в) вихревой горелки; б, г) прямооточной щелевой горелки

Заключение

По результатам исследований можно сформулировать следующие выводы:

В области холодной воронки образуется интенсивное течение, с образованием двух вихревых областей, которые находятся в центральной части камеры сгорания. Образовавшиеся вихри занимают большую область сечения камеры сгорания, нежели в случае с прямооточными горелками, где образуются вихри меньшей величины в области близкой к стенкам камеры сгорания. Что касается числовых значений вектора полной скорости, то они в обоих случаях не превышают 16 м/с. В случае использования вихревых горелок областью максимальных значений является центральная часть холодной воронки исследуемой камеры сгорания. В области пояса горелочных устройств 4 закрученных потока, направляющиеся из вихревых горелок соударяются между собой в центральной части камеры сгорания под углом 30 градусов. Далее, объединившись в два основных потока, они рассекаются, образуя вихревые области больше в горизонтальной области камеры сгорания. Химические реакции с наибольшим выделением тепла наблюдаются в области подачи топлива и окислителя, т.е. вблизи установки горелочных устройств.

Именно в этой области смесеобразование горючего вещества и кислорода воздуха достигает максимального уровня, благодаря интенсивному перемешиванию, посредством турбулентных пульсаций и вихревого характера течения. Это в свою очередь способствует увеличению скорости химической реакции окисления углерода с выделением максимального количества энергии ($Q_{\text{chem}}=3470 \text{ kW/m}^3$) в двух исследуемых случаях. По мере продвижения пылеугольного потока к выходу, интенсивность протекания химических реакций ослабевает, и на выходе энергия химических реакций составляет всего 15.64 kW/m^3 , по сравнению с 3470 kW/m^3 в области пояса горелок для двух исследуемых случаев. Это отражает реальную картину процессов теплообмена, происходящих при сжигании пылеугольного топлива в топочных камерах.

Список литературы

- 1 Максимов В.Ю. Исследование тепловых процессов и аэродинамических характеристик угольных теплостанций: диссертация на соискание ученой степени PhD по специальности Техническая физика, Алматы, 2013. – 83-97 с.
- 2 Mitchell, J.W., Tarbell, J.M. A kinetic model of nitric oxide formation during pulverized coal combustion // *AIChE Journal*. – 1982. – Vol.28. – P.302–320.
- 3 Walker, P.L., Rusinko, F., Austin, L.G. *Gas Reactions of Carbon, Advances in Catalysis and Related Subjects*. - New York: Academic Press, 1959. – 350 p.
- 4 S. Patankar *Numerical heat transfer and fluid flow*. Hemisphere Publishing Corporation, New York.- 1980.- 152 p.
- 5 Howard, J.B., Williams, G.C., Fine, D.H. *Kinetics of carbon Monoxide Oxidation in Postflame Gases // Works of 14th Int. Symposium on Combustion*. – Pennsylvania, 1973. – P. 975–986.
- 6 Тепловой расчет котлов (нормативный метод). СПб.: Изд-во АОТ "НПО ЦКТИ", 1998. 270 с.
- 7 Тепловой расчет котлов (нормативный метод). Издание 3-е, переработанное и дополненное.- НПО ЦКТИ, СПб, 1998.- 256с.
- 8 Н.В. Кузнецов, В.В. Митор, И.Е. Дубовский и др. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод). Издание 2-е, переработанное, изд. «Энергия», 1972.- 296с.
- 9 Устименко Б.П., Алдияров Б.К., Абубакиров Е.К. *Огневое моделирование пылеугольных топок*. Алма-Ата: Наука, 1982. - 212 с.
- 10 А.С. Аскарлова, С.А. Болегенова, В.Ю. Максимов *Трехмерное моделирование процессов образования вредных веществ при сжигании низкосортных углей в камерах сгорания // Известия НАН РК. Серия физ-мат.*, 2010. №6, С. 15 – 18.
- 11 Кнорре Г.Ф. и др. *Теория топочных процессов*.- Издательство "Энергия". Москва. 1966.- 476 с.
- 12 Галкин С.В., Запасный В.В. Поиск пути снижения выбросов оксидов азота на ТОО «АЭС Согринская ТЭЦ». Электронный ресурс: http://www.rusnauka.com/15_DNI_2008/Ecologia.htm
- 13 Askarova A.S., Bolegenova S.A., Maximov V., Bekmukhamet A., Beketaeva M. *Influence Degree of Turbulence on Heat and Mass Transfer in the Combustion Chamber // Материалы 7-ой Межд. научной конференции «Современные достижения физики и фундаментальное физическое образование»-2011*, Алматы, с.40-41.
- 14 Askarova A.S., Bolegenova S.A., Maximov V., Bekmukhamet A., Beketaeva M. *Numerical simulation of influence degree of turbulence on heat and mass transfer in the combustion chamber // Известия НАН РК, серия физико-математическая*, 2011, №5, pp. 31-34.

Принято к печати 05.04.2016

А. А. Аскарова, С. А. Болегенова, В. Ю. Максимов, А. Н. Алдиярова
*Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
Республика Казахстан, г. Алматы*
E-mail: maximov.v@mail.ru

3D- МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СЖИГАНИЯ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ КОМПОНОВКИ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ТЭЦ ВИХРЕВЫМИ ГОРЕЛОЧНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ

Абстракт. Исследование направлено на изучение тепловых процессов, обусловленных сжиганием пылеугольного топлива в камере сгорания промышленного котла действующей ТЭЦ. На основе численного решения системы уравнений конвективного теплопереноса, с учетом кинетики химических реакций, двухфазности течения, нелинейных эффектов конвективного и радиационного теплообмена и методов трехмерного моделирования, необходимо выявить аэродинамические характеристики по всему объему топочной камеры, в ее основных сечениях и на выходе из нее; определение влияния закрутки пылеугольного потока в топочной камере котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ. Использование новой геометрической и физической моделей модернизированной камеры сгорания с целью сравнительного анализа расположения и компоновки горелочных устройств.

Ключевые слова: 3D- моделирование, геометрическое моделирование, моделирование процессов, твердое топливо, теплообмен, топочные устройства, физическая модель.

Ә.С. Аскарова, С.Ә. Болегенова, В.Ю. Максимов, Ә.Н. Алдиярова
Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті Алматы қ., Қазақстан

ОТТЫҚ ҚҰРЫЛҒЫЛАРДЫҢ ҚҰЙЫНЫН ЖЭО-НЫҢ ЖАНУ КАМЕРАСЫНДАҒЫ ҚҰРАУШЫЛЫҚ ӘСЕРІН ЕСКЕРЕ ОТЫРЫП ШАНТОЗАНДЫ КӨМІРДІҢ ЖАНУ ПРОЦЕСІН 3D МОДЕЛДЕУ

Аннотация. Зерттеу жұмысы Шахтинск ЖЭО-ның БКЗ-75 қазандығы жану камерасының көлемінде шаңкөмірлі отынды жаққан кезде зиянды компоненттердің түзілуін зерттеуге бағыталған. Химиялық реакциялар кинетикасын, ағыстың екіфазалығын, конвективті және радиациялық жылуалмасудың, үш өлшемді модельдеу әдістерінің бейсызықтық әсерлерін ескере отырып, конвективті жылуалмасымалдау тендеулері жүйесін сандық есептеу негізінде жану камерасының толық көлемі бойынша, оның негізгі кескіндеріндегі және одан шығысындағы СО тұншықтырғыш газының түзілуін анықтау қажет. Зерттеу нәтижелері қоршаған ортаға зиянды әсерін барынша төмендете отырып, энергияны алудың максимал тиімділігін, шынайы энергетикалық қондырғыларда отынды жағу кезіндегі процестер тиімділігін арттыру мақсатында қазақстандық кен орындарының төменгі сұрыпты көмір отындарын жағуда қолданылатын технологияларды оңтайландыру бойынша ұсыныстарды әзірлеуде қолданыс табады. Есептеу тәжірибелерінің нәтижелері энергетикалық отын ретінде жоғары күлді көмір қолданылатын өнеркәсіптік жану қазандықтарын жетілдіру және жаңадан жобалауда оңтайлы құрылымдық және құраушылық шешімдерді іздеуде пайдаланылуы мүмкін.

Түйінді сөздер: 3D-модельдеу, геометриялық модельдеу, процестерді модельдеу, қатты отын, жылуалмасу, жанарғылық құрылғылар, физикалық модель, зиянды газтозанды компонент.

A.A. Askarova, S.A. Bolegenova, V.Ju. Maximov, A.N. Aldiyarova
[Al-Farabi Kazakh National University](#), Almaty, Kazakhstan

3D - MODELING OF PULVERIZED COAL COMBUSTION TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF THE LAYOUT OF THE COMBUSTION CHAMBER OF THE CHP VORTEX BURNERS

Abstract. The study aims to examine thermal processes, caused by burning of pulverized coal in the combustion chamber of an industrial boiler existing CHP. Based on the numerical solution of the system of equations of convective heat and mass transfer, taking into account the kinetics of chemical reactions, two-phase flow, nonlinear effects of convection and radiation heat transfer methods and three-dimensional modeling, it is necessary to identify the aerodynamic characteristics throughout the volume of the combustion chamber, in its main sections and at the exit from it; to determine the influence of pulverized coal swirl flow in the combustion chamber of the boiler BKZ-75 Shakhtinskaya CHP. The use of new geometric and physical models of the upgraded combustion chamber for the purpose of comparative analysis of the location and layout gorelochnyh devices.

Keywords: 3D modeling, geometric modeling, process modeling, solid fuel, heatmass exchange, furnace, physical model.