—— ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ АППАРАТЫ И КОНСТРУКЦИИ ——

УДК 536.46:532.517.4

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ГОРЕНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ТЭЦ

© 2015 г. А. С. Аскарова, С. А. Болегенова, В. Ю. Максимов, А. Бекмухамет, М. Т. Бекетаева, З. Х. Габитова

Казахский национальный университет им. аль-Фараби E-mail: Beketayeva.m@gmail.com Поступила в редакцию 26.03.2014 г.

Был исследован процесс сжигания твердого топлива в реальной камере сгорания, где используется уголь зольностью выше 40% для минимизации вредного воздействия ТЭЦ на окружающую среду (ее загрязнения). Для моделирования и определения различных параметров течения процесса горения использовался пакет прикладных программ FLOREAN.

DOI: 10.7868/S004036441504002X

введение

Промышленность Казахстана направлена на использование угля в качестве энергетического топлива. Согласно [1], в Казахстане сосредоточено около 3.9% мировых запасов угля (рис. 1). Угольная промышленность обеспечивает выработку в Казахстане около 80% электроэнергии. Кроме того, осуществлена возможность полностью удовлетворить потребности в энергетическом топливе коммунально-бытового сектора республики.

В результате эксплуатации энергетических объектов в атмосфере обнаруживаются такие вещества, как окись углерода, оксид азота, диоксид азота, пыль свинца, диоксид серы и др., которые вызывают значительный вред для человеческого организма [2]. Например, общая концентрация выброса CO₂ (диоксид углерода), выделяемого в электрической и тепловой отрасли при сжигании



Рис. 1. Мировые запасы угля.

топлива по статистическим данным 2009 года составила для Казахстана 11930 кг СО2 на душу населения. В соседних странах эти показания следующие: Кыргызстан – 1326, Узбекистан – 4047, Россия – 10800, Китай – 5138 [3]. В связи с этим важно не только производить энергию, но и внимательно следить за экологической стороной процесса, т.е. контролировать концентрацию вредных веществ, поступающих в атмосферу. В ходе выполнения государственной программы развития страны по внедрению систем управления качеством и безопасностью окружающей среды в соответствии с международными стандартами ISO серии 9000 и 14000 [4] особую значимость приобретают фундаментальные исследования, имеющие практический смысл и направленные на повышение эффективности сжигания энергетического топлива и минимизацию выбросов вредных пылегазовых выбросов в атмосферу.

Исследование турбулентного горения твердых пылеугольных топлив и решение проблем современной теплофизики, теплоэнергетики и экологии являются не только острой необходимостью для Казахстана, но и проблемой общемирового масштаба. Об этом свидетельствуют аналогичные исследования, которые проводятся в странах СНГ, Европейского Союза и США [5-13]. Исследования в области прогрессивных технологических процессов по совершенствованию установок сжигания пылеугольного топлива и использованию альтернативных методов сжигания различных видов топлива (с высокой зольностью [14]) являются в настоящее время наиболее актуальными для всего энергетического комплекса Республики Казахстан.

При этом незаменимым эффективным методом теоретического исследования течений хими-

чески реагирующих сред является численное моделирование [15]. Строгое математическое описание всех протекающих процессов в парогенераторах, печах и реакторах совместно с современными вычислительными алгоритмами с использованием супер-ЭВМ позволяют решать эти задачи для конкретных энергетических установок и для любого энергетического топлива [16–18]. Численное моделирование в настоящее время интенсивно развивается во многих странах: строятся усовершенствованные модели, конструируются новые численные алгоритмы, проводятся разнообразные вычислительные эксперименты [19, 20]. Применение компьютерных технологий эффективно, когда одновременно прорабатываются несколько конструкторских решений и определяется стратегия модернизации котла или камеры сгорания. Сочетание компьютерной технологии и экспериментальных исследований позволяет создавать обоснованную стратегию малозатратной модернизации отдельных типов камер сгорания и "сдвигать" дорогостоящие экспериментальные исследования на заключительный этап для окончательной проверки решений. Развитие методов математического моделирования в области исследований процессов тепломассопереноса в течениях с горением привело к появлению различных программно-ориентированных пакетов. С помощью этих пакетов более или менее успешно решаются фундаментальные и прикладные задачи, с которыми в повседневной практике приходится сталкиваться предприятиям топливноэнергетического комплекса.

ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ

Горение пылеугольного факела в реальных условиях представляет собой сложный для математического анализа физико-химический процесс. Особой сложностью отличается он в условиях камер сгорания котельных топок, где ось факела криволинейна, а холодные экранированные стены топочной камеры обусловливают значительный градиент температуры и всех зависящих от нее параметров от периферии к центру факела. Проблема моделирования включает взаимодействие турбулентного горения многих химических компонент с многофазными процессами (частицы газообразного или твердого топлива и углерода в поле течения) и с лучистым теплопереносом.

При сгорании частиц необходимо учитывать скорости гетерогенных реакций, требуется знать распределения частиц по размерам и в пространстве. Эмиссия загрязняющих веществ, таких, как углеводороды, сажа и оксиды азота, может быть уменьшена соответствующим управлением закономерностями изменения температуры и концентрации в области сгорания.

ТЕПЛОФИЗИКА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР том 53 № 5 2015

Математическая модель. В данной работе вычислительный эксперимент проводился на основе решения трехмерных уравнений конвективного тепломассопереноса с учетом распространения тепла, теплового излучения, химических реакций и многофазности среды. Эти уравнения включают в себя закон сохранения массы, закон сохранения импульса или уравнение Навье—Стокса, закон сохранения энергии и компонент, вовлекаемых в камеру сгорания, которые состоят из частиц пылеугольного топлива и воздуха.

Уравнение, описывающее закон сохранения массы, можно записать следующим образом:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0.$$
(1)

Для определения параметров движения пылеугольного потока в камере сгорания с учетом всех возможных влияющих факторов поток импульса, обусловленный поверхностными и объемными силами, имеет вид

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

Полученные выражения (1), (2) являются системой уравнений Навье–Стокса.

Уравнение, описывающее закон сохранения энергии, записывается на основании первого начала термодинамики:

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho u_j E)}{\partial x_j} - \frac{\partial(q_j^{\text{res}})}{\partial x_i} - \frac{\partial(pu_i)}{\partial x_i} + \frac{\partial(u_i \tau_{ij})}{\partial x_i} + \rho u_i g_i + S_Q,$$

 ∂x_j ∂x_i ∂x_j где E – полная энергия, q_j^{res} – поток энергии за счет молекулярного переноса, $\rho u_i g_i$ – изменение энергии за счет действия в потоке силы тяжести, S_Q – выделение или поглощение энергии за счет химических реакций или за счет потока лучистой энергии.

С учетом уравнений изменения парциальной плотности во времени, переноса компоненты β за счет конвекции и за счет диффузии и образования и разложения компоненты β в результате химических реакций закон сохранения компоненты примет вид

$$\frac{\partial(\rho c_{\beta}^{*})}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho c_{\beta}^{*} u_{i})}{\partial x_{i}} + \frac{\partial}{\partial x_{i}} \left(\rho D_{c_{\beta}^{*}} \frac{\partial c_{\beta}^{*}}{\partial x_{i}}\right) + S_{\beta}.$$

Физическая постановка задачи. В качестве исследуемого объекта была выбрана камера сгорания котла ПК-39, предназначенного для работы на экибастузских углях [14] в блоке с паровой турбиной мощностью 300 МВт и паропроизводи-

Характеристика	Величина
Расход топлива на горелку, кг/ч	7291.1
Состав экибастузского угля, %	7.0
	40.9
	0.8
	41.1
	2.8
	6.6
	0.8
Теплота сгорания, МДж/кг	15.87
Выход летучих, %	30.0
Диаметр угольных частиц, м, 10 ⁻⁶	30.0
Коэффициент избытка воздуха на выходе из топки	1.25
Коэффициент избытка воздуха в горелках	1.15
Присосы воздуха в топку	0.1
Температура аэросмеси, К	423
Температура вторичного воздуха, К	600
Температура третичного воздуха, К	600
Температура стенок, К	873
Количество горелок, шт	12
Количество ярусов	2
Высота топки, м	29.985
Ширина топки, м	10.76
Глубина топки, м	7.762
Скорость первичного воздуха (аэросмеси) горелок нижнего яруса, м/с	15.0
Скорость вторичного воздуха горелок нижнего яруса, м/с	28.0
Скорость третичного воздуха горелок нижнего яруса, м/с	26.0
Скорость центрального воздуха горелок нижнего яруса, м/с	10.0
Скорость первичного воздуха горелок верхнего яруса, м/с	15.0
Скорость вторичного воздуха горелок верхнего яруса, м/с	23.0
Скорость третичного воздуха горелок верхнего яруса, м/с	23.0
Скорость центрального воздуха горелок верхнего яруса, м/с	10.0

Таблица 1. Основные характеристики топочной камеры котла ПК-39 Аксуйской ГРЭС

тельностью 475 т/ч. Котел установлен на Аксуйской электростанции (Казахстан). В табл. 1 представлены основные характеристики котла. Котел сверхкритического давления с промежуточным перегревом — прямоточный, двухкорпусный, Т-образной компоновки, с уравновешенной тягой и твердым шлакоудалением. Оба корпуса имеют одинаковую симметричную конструкцию. На рис. 2 представлена общая схема камеры сгорания этого котла и разбивка ее на элементарные объемы для проведения вычислительных экспериментов.

Вычислительные эксперименты по исследованию процесса горения в камере котла ПК-39 проводились на основе нового современного программного комплекса с использованием пакета компьютерных программ, который позволяет проводить сложные вычислительные эксперименты по моделированию реагирующих многофазных течений в областях реальной геометрии. В соответствии с заданной геометрией в работе для проведения вычислительных экспериментов была создана решетка размером $27 \times 61 \times 60$, которая содержит 98820 контрольных объемов. Ниже приводятся результаты вычислительных экспериментов по



Рис. 2. Общий вид камеры горения ПК-39.



Рис. 3. Распределение температуры в топочной камере в различных сечениях: (а) – плоскость центрального сечения по оси X = 3.61 м; (б) – плоскость центрального сечения по оси Y = 5.38 м; (в) – плоскость сечения расположения нижних горелок – Z = 7.32 м; (г) – на выходе из топки по оси Z = 29.60 м; (максимальные, минимальные и средние значения температуры – см. табл. 2).

сжиганию экибастузского угля в топочной камере котла ПК-39 Аксуйской ГРЭС.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ

Пакет программ для вычислительного расчета Florean [21] был разработан в Институте теплотехники и горючих веществ при Техническом университете г. Брауншвейг (Германия). 3D-моделирование в программе Florean позволяет получить подробную информацию о производительности печи, включая поля скоростей, температуры, теплового излучения и распределений концентрации и т.д. в оси печи и вдоль стен [22–32]. Получаемая информация при моделировании полезна для оценки процесса горения и для проектирования оптимальных печей для эксплуатации по отраслям. Использование Florean также полезно для улучшения процесса сгорания различных видов топлив в промышленных котлах, при оптимизации работы и минимизации выбросов загрязняющих веществ.

ТЕПЛОФИЗИКА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР том 53 № 5 2015

	Сечение котла	Максимальное значение	Минимальное значение	Среднее значение
Температура (рис. 3), °С	<i>X</i> = 3.61 м	1759.3	56.46	1408.8
	<i>Y</i> =5.38 м	1825.1	54.78	1271.9
	Z=7.32 м	1647.8	172.2	1065.5
	Z=29.60 м	1299.1	1014.5	1202.9
Концентрация веществ на выходе (рис. 5), мг/Нм ³	Компонент	Максимальное значение	Минимальное значение	Среднее значение
	NH ₃	5.42×10^{-6}	2.33×10^{-7}	8.72×10^{-7}
	HCN	1.12×10^{-4}	2.80×10^{-5}	4.35×10^{-5}
	NO	580.7	448.7	527.8

Таблица 2. Результаты вычислительного эксперимента

Минимумы температур находятся в области расположения горелок. Падения температур обусловлены низкой температурой подачи топлива по сравнению с полем температуры в камере сгорания. На рис. 3 представлено трехмерное распределение температурного поля в различных се-



Рис. 4. Распределение концентрации CO_2 в камере сгорания ПК-39 в области горелок нижнего уровня (а) и верхнего (б) уровня.

чениях. Из рисунка можно заметить, что факелы образуют своего рода "ядро" в центральной части области расположения горелок. В этой области камеры сгорания температура достигает наибольших значений ($T = 1807.4^{\circ}$ С, см. табл. 2). По мере продвижения к выходу температурное поле выравнивается, и на выходе из топочной камеры получается среднее значение температуры, равное 1202°С, что незначительно отличается от эксперимента.

На рис. 4 представлено трехмерное распределение концентрации диоксида углерода в области расположения горелочных устройств в реальной камере сгорания. Видно, что наиболее интенсивное образование CO_2 происходит по мере удаления от входных отверстий, т.е. в области столкновения струй топлива и окислителя из противогорелок. Шкала позволяет определить значения концентраций CO_2 в любой точке топочного пространства и на выходе из него.

Углерод может реагировать с кислородом разными способами. Любые технологии сжигания должны обеспечивать полное смешивание топлива с кислородом до полного сгорания с образованием CO₂, а не CO. В противном случае тепловыделение резко снизится, поскольку при образовании CO выделяется лишь 28% той энергии, которая выделяется при образовании CO₂.

Для поддержания нормального горения необходимо подводить воздух в топочное пространство в таком объеме, который требуется для полного сгорания топлива, что достигается постоянным контролем за содержанием оксида углерода в дымовых газах. В случае неполного сгорания при недостатке воздуха в составе уходящих из топки газов будет наблюдаться завышенное содержание окиси углерода СО, углеводородов, а иногда и чистого водорода. При чрезмерном избытке воздуха создаются условия для удаления из топки несгоревших летучих горючих веществ и уноса части-



Рис. 5. Распределение концентрации азотсодержащих веществ на выходе из топочной камеры котла ПК-39 Аксуйской ГРЭС (максимальные, минимальные и средние значения концентраций – см. табл. 2).

чек твердого топлива. Поэтому при организации процесса горения в топочной камере следует сводить неполноту сгорания к возможному минимуму.

На рис. 5 и в табл. 2 представлено распределение максимальных, минимальных и средних по сечению значений концентраций азотсодержащих соединений (HCN, NH₃ и NO) на выходе из топочной камеры котла ПК-39 Аксуйской ГРЭС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе на основе методов компьютерного 3D-моделирования проведены исследования сложных процессов тепло- и массообмена, происходящих в областях реальной геометрии при сжигании в них энергетического твердого топлива. Разработаны физическая и геометрическая модели топочной камеры энергетического котла ПК-39 Аксуйской ГРЭС. Показано, что значения температур и концентраций СО и СО₂, NO, полученные при моделировании горения пылеугольного факела, наиболее точно описывают данные натурного эксперимента [33, 34]. Это позволяет сделать вывод о возможности применения предложенной в настоящей работе математической модели для расчетов высокотемпературных потоков с химическими реакциями в реальной геометрии. Показано, что процесс образования оксидов углерода зависит не только от явлений переноса, но и от кинетики процесса. Скорости образования CO_2 и CO сильно увеличиваются с ростом температуры *T*. В области расположения горелок происходят основные реакции реагирования углерода с образованием окиси углерода, о чем свидетельствуют максимумы на кривых распределения CO.

Представленные графики трехмерного распределения температур *T*, концентраций CO, CO₂, NO для различных сечений камеры сгорания позволяют узнать минимальные, максимальные и средние значения этих величин на выходе из топочного пространства, в области расположения пояса горелок и по всему объему камеры сгорания. Эти данные вычислительного эксперимента очень важны для специалистов, работающих на ТЭЦ, поскольку замерить такие величины в каждой точке топочной камеры непосредственно на ТЭЦ не представляется возможным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Statistical Review of World Energy // (http://www.bp. com/en/global/corporate/about-bp/energy-economics/ statistical-review-of-world-energy-2013).
- 2. Алиярова М.Б., Чурсина Н.Я., Котов Г.В., Михеева И.В., Строганов Д.Н. Экологически вредные примеси в углях и продуктах их сжигания. Алматы, 1996. 19 с. – Деп. КаэгосИНТИ. 29.04.96. № 6945-КА.
- International Energy Agency CO₂ Emissions from Fuel Combustion // Highlights. IEA Publ. 9. Paris: Luxembourg by Imprimerie Centrale, October 2011.

- 4. ISO 14000 / ISO 14001 Environmental Management // (http://www.iso14000-iso14001-environmental-man-agement.com/index.htm). 2007.
- 5. Lawn C.J. Principles of Combustion Engineering for Boilers. London: Acad. Press, 1987. P. 628.
- Иванов П.П. Термодинамическое моделирование энергетических установок с твердооксидным топливным элементом // ТВТ. 2011. Т. 49. № 4. С. 627.
- 7. Launder B., Spalding D. The Numerical Computation of Turbulent Flows // Computer Methods in Appl. Mech. Eng. 1974. V. 3. P. 269.
- Dryer F.L., Glassmann I. High Temperature Oxidation of CO and CH₄ // Works of 14th Int. Symp. on Combustion. Pennsylvania, 1973. P. 987.
- 9. Askarova A.S., Bolegenova S.A., Bolegenova S.A., Maximov V.Yu., Bekmukhamet A., Beketayeva M.T. Numerical Experimenting of Combustion in the Real Boiler of CHP // Int. J. Mech. 2013. V. 7. № 3. P. 343.
- 10. Askarova A., Bolegenova S., Bekmukhamet A., Maximov V., Beketayeva M. Computational Research of Burning Coal in the Real Boiler of Almaty CHP // Int. J. Energy Environment. 2013. V. 7. № 2. P. 47. (http://www. naun.org/wseas/).
- Korobeinichev O.P. // Proc. 5th Int. Seminar on Flame Structure (http://www.kinetics.nsc.ru/conferences/semkpg/ Start.pdf). 2005.
- 12. Кавтарадзе Р.З., Сергеев С.С. Новый альтернативный (частично-гомогенный) процесс сгорания как способ снижения концентраций оксидов азота и сажи в продуктах сгорания дизеля // ТВТ. 2014. Т. 52. № 2. С. 294.
- 13. *Lawn C.J.* Principles of Combustion Engineering for Boilers. London: Acad. Press, 1987. 628 p.
- 14. Bergman J.V., Bergman A.O., Aksenov G.G. Ekibastuz Coal Basin // (http://ru.wikipedia.org/). 1973.
- 15. Roache P.J. Computational Fluid Dynamics. Albuquerque: Hermosa Press, 1985. 283 p.
- 16. Askarova A.S., Jirous F., Bolegenova S., Maksimov V., Bekmuchamet A. Use of the Technology "Overfire Air" at Combustion of the Pulverized Coal in Combustion Chamber of the Boiler BKZ-160 Almaty Heat Plants with Objective to Reduce Emissions // J. Energetika. 2012. № 1(62). P. 22.
- Askarova A.S., Bolegenova S.A., Maximov V.Yu., Bekmuhamet A., Ospanova Sh.S. Numerical Research of Aerodynamic Characteristics of Combustion Chamber BKZ-75 Mining Thermal Power Station // J. Proc. Eng. 2012. V. 42. № 389(162). P. 1365.
- 18. Аскарова А.С. Тепломассоперенос при сжигании твердого топлива в промышленных котлах на примере Павлодарской ТЭЦ // Теплофизика и аэромеханика. 2000. Т. 7. № 2. С. 293.
- Görner K. Technische Verbrennungssysteme Grundlagen. Modellbildung, Simulation. Berlin–Heidelberg: Springer–Verlag, 1991. 198 s.
- 20. *Müller H*. Numerische Simulation von Feuerungen. CFD–Vorlesung. TU. Braunschweig: IWBT, 1997. S. 8.

- 21. *Leithner R.* Numerical Simulation. Computational Fluid Dynamics CFD: Course of Lecture. Braunschweig, 2006. 52 p.
- 22. Аскарова А.С., Волошина И.Э., Болегенова С.А. Численное моделирование процессов тепломассопереноса в потоках при наличии горения. Алматы, 2010. 132 с.
- Askarova A., Heierle Y., Leithner R., Müller H. CFD Code Florean for Industrial Boilers Simulations // WSEAS Trans. Heat Mass Transfer. 2009. V. 4. № 4. P. 98.
- 24. Аскарова А.С., Болегенова С.А., Рыспаева М.Ж. Здмоделирование реагирующих течений в камерах сгорания. Учеб. пособ. для студентов. Алматы: КазНУ им. аль-Фараби, 2010. 154 с.
- 25. Аскарова А.С. Конвективный тепломассоперенос в физико-химически реагирующих средах. Дис. ... докт. физ.-матем. наук. Алматы: КазНУ им. аль-Фараби, 1998. 315 с.
- 26. *Pauker W*. Creating Data Sets for Florean Using the Tool Preproz. TU. Braunschweig: IWBT, 1997. S. 3.
- 27. Askarova A.S., Lavrichsheva Ye., Leithner R., Müller H., Magda A. Combustion of Low-Rank Coals in Furnaces of Kazakhstan Coal-Firing Power Plants // VDI Berichte. 2007. № 1088. P. 497.
- 28. Аскарова А.С., Болегенова С.А., Максимов В.Ю., Бекмухамет А. Применение технологий 3D-моделирования при исследовании процессов тепломассопереноса в камерах сгорания действующих энергетических объектов // Изв. Томск. политех. ун-та. Энергетика. 2012. Т. 320. № 4. С. 26.
- Аскарова А.С., Болегенова С.А., Максимов В.Ю., Бекетаева М.Т., Габитова З. Влияние турбулентности на процесс горения в реальной камере сгорания // Global Science Communications. Гранендонск, 2012. С. 53.
- 30. Askarova A.S., Bolegenova S.A., Maximov V.Yu., Bekmukhamet A., Beketayeva M.T. Influence Degree of Turbulence in Combustion Chamber // Int. J. Res. Eng. Technol. 2012. V. 1. № 6. P. 319.
- Askarova A.S., Bolegenova S. CFD Modeling of Low-Rank Coals Combustion with Different Moisture Content at Power Plants of Kazakhstan // Mater. 19th Int. Congress of Chem. CHISA 2010 and Proc. Eng. and the 7th Europ. Congress of Chem. Eng. ECCE-7. Praha, 2010. P. 1166.
- 32. Askarova A.S., Bolegenova S.A., Maximov V.Yu., Bekmukhamet A., Beketayeva M.T. Numerical Research of Burning Kazakhstan Solid Fuel in the Real Boiler // Proc. Conf. on Applied Mathematics and Computational Methods in Engineering. Rhodos Island, 2013. P. 144
- Алияров Б.К., Алиярова М.Б. Сжигание казахстанских углей на ТЭС и на крупных котельных. Алматы, 2006. 302 с.
- 34. Алияров Б.К. Освоение сжигания экибастузского угля на тепловых электростанциях. Алматы: Fылым, 1996. 272 с.