

ЕНЕРГЕТИКА ТА НОВІ ЕНЕРГОГЕНЕРУЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 536.46:532.517.4

А.С. Аскарова, С.А. Болегенова, В.Ю. Максимов, А. Бекмухамет

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЯХ ПРИ НАЛИЧИИ ГОРЕНИЯ

By employing modern numerical methods, we conduct a comprehensive theoretical study of convective heat and mass transfer in three-dimensional flows of high-temperature reactive environments in the areas of real geometry. We study the processes of heat and mass transfer during combustion of pulverized coal combustion chamber by the example of BKZ-75 Shakhtinsk TPS using 3D modeling technology based on the solution of differential equations of turbulent reacting flows. Crucially, we obtain novel research results on development of modern methods of theoretical, mathematical and computer modeling to study the processes of turbulent heat and mass transfer in high temperature environments in the presence of physical and chemical transformations. Also, we obtain the components distribution of the full speed vector in various sections of the combustion chamber, represent the dependence of the full-speed vector for height of the combustion chamber, as well as obtain the temperature profiles and the height distribution of the combustion chamber. Finally, we establish minimum and maximum values of these variables and show the time history of the characteristics in the investigated volume of combustion chamber.

Введение

Исследование задач конвективного тепло-массопереноса в турбулентных течениях при наличии химических реакций является актуальной задачей теплофизики и гидроаэродинамики, поскольку такие течения широко распространены в природе и играют важную роль во многих технических устройствах. Знание закономерностей таких течений является важным при построении теории физики горения, создании новых физико-химических технологий, а также при решении проблем теплоэнергетики и экологии. В исследованиях сложный процесс горения необходимо анализировать в зависимости от влияния многочисленных физических и химических параметров реакции горения. Развитие теории теплообмена, разработка на этой базе технологических процессов и систем с рациональным использованием энергетических ресурсов является актуальной задачей. Строгая теория реагирующих турбулентных многофазных течений в настоящее время отсутствует из-за большого числа взаимосвязанных процессов, которые необходимо учитывать при создании математических моделей.

Основным инструментом теоретического исследования нелинейных процессов тепло-массопереноса в движущихся средах с учетом разнообразных физических явлений является математическое моделирование и вычислительный эксперимент. Они включают в себя не только разработку численных методов и проведение численных расчетов, но и глубокий анализ рассматриваемой модели, ее адекватности реальному процессу. Компьютерное моделиро-

вание в значительной степени заменяет дорогостоящие и трудоемкие экспериментальные исследования [1].

Применение технологии 3D-моделирования наряду с новейшими компьютерными технологиями позволяет с высокой точностью провести теоретическое исследование нелинейных физических процессов тепло-массопереноса и движения среды с учетом разнообразных физико-химических явлений, таких как лучистый теплообмен, горение, повышенный уровень турбулентности. При исследовании широкого круга современных задач науки и техники моделирование тепло-массообменных процессов приобретает особое значение и имеет широкое практическое применение [2].

Постановка задачи

Цель исследования – исследовать процессы турбулентного тепло-массопереноса в высокотемпературных химически реагирующих средах в областях реальной геометрии с применением новейших технологий 3D-моделирования и современных методик численного эксперимента, а также получить аэродинамические и температурные характеристики исследуемой камеры сгорания в сечении горелок и по всей высоте топочной камеры и показать их динамику изменения.

Математическая модель исследуемого явления

Среди методов моделирования горения пылеугольного топлива наибольшее распространение получил метод, в основе которого лежит Эйлеров подход для описания движения

и тепломассообмена газовой фазы. Он использует пространственные уравнения баланса массы, импульса, концентраций газовых компонентов и энергий для газовой смеси. Для описания движения и тепломассообмена одиночных частиц топлив вдоль их траекторий используется Лагранжев подход [3]. Турбулентная структура потока описывается двухпараметрической $k-\epsilon$ моделью турбулентности, где k – кинетическая энергия турбулентности, а ϵ – турбулентная энергия диссипации. Радиационный теплообмен представляется шестипоточной моделью переноса.

Математическое описание физических и химических процессов основано на решении уравнений баланса. В общем виде эти уравнения содержат четыре слагаемых, описывающих:

- изменение величины со временем;
- конвективный перенос;
- диффузионный перенос;
- источник или сток.

Для вывода балансных соотношений выбран стационарный контрольный элемент объема или контрольный элемент массы (рис. 1). Предполагается, что центр тяжести выбранного элемента движется со скоростью течения. Этот стационарный контрольный объем соответствует обоснованному подходу Эйлера для течений. Изменение транспортной величины описывается в жидком единичном элементе. Значение этой величины определяется в каждой точке рассматриваемой области.

При преобразовании предельного значения из конечного в бесконечно малый контрольный элемент объема получается диффе-

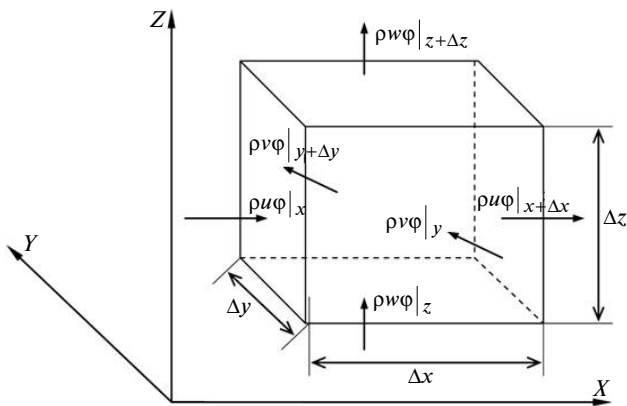


Рис. 1. Контрольный объем для обобщенного уравнения переноса [4], где $\rho u \phi|_{i,i+\Delta i}$ описывает конвективный перенос транспортной переменной через границы контрольного объема в декартовой системе координат

ренциальное уравнение, описывающее сохранение транспортной переменной ϕ :

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho u_1\phi)}{\partial x_1} - \frac{\partial(\rho u_2\phi)}{\partial x_2} - \frac{\partial(\rho u_3\phi)}{\partial x_3} + \frac{\partial}{\partial x_1} \left[\Gamma_\phi \frac{\partial\phi}{\partial x_1} \right] + \frac{\partial}{\partial x_2} \left[\Gamma_\phi \frac{\partial\phi}{\partial x_2} \right] + \frac{\partial}{\partial x_3} \left[\Gamma_\phi \frac{\partial\phi}{\partial x_3} \right] + S_\phi, \quad (1)$$

где ρ – плотность среды; u_i – скорость потока в направлении x, y, z ; ϕ – транспортная переменная; Γ – коэффициент диффузии.

Заменяя в уравнении (1) конвективный и диффузионный переносы плотностью потоков, через границы контрольного объема, получим плотности потоков:

- $\Phi_{(K),j} = \rho u_j \phi$ – конвективного;
- $\Phi_{(D),j} = \Gamma_\phi \frac{\partial\phi}{\partial x_j}$ – диффузионного.

Тогда с учетом данных соотношений уравнение (1) запишем в таком виде:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} = -\frac{\partial\Phi_{(K),j}}{\partial x_j} + \frac{\partial\Phi_{(D),j}}{\partial x_j} + S_\phi. \quad (2)$$

Подадим уравнение (2) в векторной форме:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} = \text{div}((- \rho u \phi) + \Gamma_\phi \text{grad } \phi) + S_\phi,$$

а в тензорной форме уравнение (2) примет вид:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho u_j \phi)}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_\phi \frac{\partial\phi}{\partial x_j} \right] + S_\phi. \quad (3)$$

В дальнейшем для расчета течений газ–твердое вещество с однофазным входом все транспортные величины в контрольном объеме определяются при помощи обобщенного уравнения (3). В этом уравнении S_ϕ – источниковый (стоковый) член для величины ϕ , остальные слагаемые характеризуют изменение величины ϕ :

- $\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}$ – от времени;
- $\frac{\partial(\rho u_j \phi)}{\partial x_j}$ – за счет конвективного переноса;
- $\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_\phi \frac{\partial\phi}{\partial x_j} \right]$ – за счет явлений молекулярного обмена.

В основе математической модели течения газов или жидкостей лежат уравнения сохранения массы и импульса. Для потоков, в которых происходят процессы теплопередачи, а также для сжимаемых сред, необходимо дополнительно решать уравнение сохранения энергии. В течениях с процессами смешивания различных составляющих, с реакциями горения и др. необходимо добавить уравнение сохранения компонентов смеси или уравнения сохранения для фракций смеси и их изменений. Для турбулентных течений система уравнений дополняется транспортными уравнениями для турбулентных характеристик.

Таким образом, для решения поставленной задачи рассматриваются уравнения, характеризующие течение, и которые выводятся из обобщенного уравнения (3). Эта система не имеет аналитического решения и может быть решена только численными методами.

В общем случае для численного решения вся расчетная область разделяется разностной сеткой на дискретные точки или объемы, непрерывное поле переменных заменяется дискретными значениями в узлах сетки, а производные, входящие в дифференциальные уравнения, заменяются их приближенными выражениями через разности значений функций в узлах сетки. В представленной работе для решения поставленной задачи применяется метод контрольного объема. Система алгебраических уравнений для разностного уравнения контрольного объема для каждой балансной величины имеет следующий вид:

$$a_p \varphi_p = \sum_n a_n \varphi_n + S_\varphi.$$

Коэффициент a_p определяет вклад конвективного и диффузионного потоков по всем направлениям в конкретной точке контрольного объема, а коэффициенты a_n — в каждой точке контрольного объема. В результате аппроксимации системы уравнений (2) получено алгебраическое уравнение (3) для каждого контрольного объема и для каждой искомой переменной φ_n . Для каждой ячейки расчетной области используются физические законы сохранения и дифференциальные уравнения, описывающие эти законы (уравнения переноса), которые интегрируются по объему каждой ячейки.

Результаты вычислительного эксперимента

Для получения температурных и аэродинамических характеристик в камере сгорания БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ (Казахстан) проведено численное исследование процессов тепло-массопереноса, происходящих при сжигании низкосортного пылеугольного топлива марки КР-200. В исследовании применены технологии 3D-моделирования на основе решения дифференциальных уравнений турбулентного реагирующего течения.

Получены профили в составляющих вектора полной скорости в сечении горелок и в продольном сечении камеры сгорания. Представлена зависимость вектора полной скорости по высоте камеры сгорания. Получены профили температуры в указанных сечениях и приведена зависимость температуры потока в зависимости от высоты камеры сгорания.

Котел БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ (рис. 2) оборудован четырьмя пылеугольными горелками, установленными по две горелки с фронта и с тыла в один ярус. В котле сжигается пыль Карагандинского рядового (КР-200) угля, зольностью 35,1 %, выходом летучих 22 %, влажностью 10,6 % и теплотой сгорания 18550 кДж/кг. Исходные данные для расчета приведены в таблице.

Расчетная область для проведения вычислительных экспериментов и создание базы данных для моделирования проводится в несколько этапов с использованием программных комплексов [4, 5]. Эти компьютерные пакеты программ позволяют проводить сложные вычислительные эксперименты по моделированию реагирующих многофазных течений в областях реальной геометрии. 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 затем устанавливаются координаты пространственного положения горелочных устройств на определенных стенках. Отверстие горелки (вход) описывается в виде концентрических окружностей (для круглых горелок), выход — в виде прямо угольника с соответствующими координатами. В соответствии с заданной геометрией создается решетка для численного моделирования (рис. 3). В процессе создания окончательного

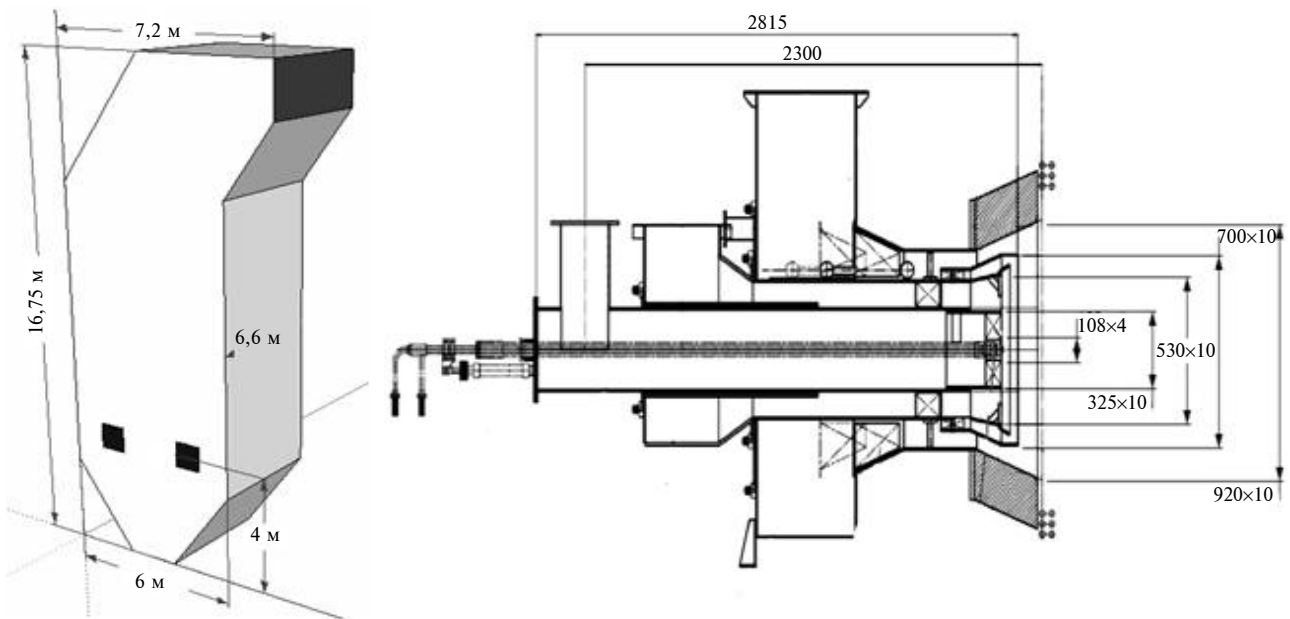


Рис. 2. Общий вид камеры сгорания и пылеугольной горелки

Таблица. Исходные данные для расчета аэродинамических и температурных характеристик камеры сгорания котла БКЗ-75

Наименование, единицы измерения	Обозначение	Численное значение				
Тип угля	КР-200	—				
Зольность на сухую массу, %	A^c	35,1				
Выход летучих на горючую массу, %	V^F	22				
Влажность рабочая, %	W^P	10,6				
Теплота сгорания, ккал/кг	Q_H^P	4433				
Количество горелок на котле, шт	N_{Γ}	4				
Производительность одной горелки по топливу, т/ч	B_{Γ}	3,2				
Расход первичного воздуха на котел, кг/ч	$V_{\text{п.в}}$	28233				
Расход вторичного воздуха на котел, кг/ч	$V_{\text{вт.в}}$	78163				
Температура горячего воздуха, °С	$t_{\text{г.в}}$	290				
Гидродинамическое сопротивление канала аэросмеси горелки	ΔP	67,1				
Присосы в топку	$\Delta \alpha$	30,4				
Коэффициент избытка воздуха за топкой	α_{Γ}	2,019				
Механический недожог топлива, %	Q_4	13,37				
КПД котла-брутто, %	η_k	80,88				
Расход топлива на котёл, т/ч	B	12,49				
Плотность угля, кг/м ³	ρ	1300				
Состав угля						
С	H ₂	O ₂	S ₂	N ₂	H ₂ O	Зола
43,21	3,60	5,24	1,04	1,21	10,60	35,10

варианта расчетной области решетка неодно-кратно редактируется для выбора оптимального варианта при проведении дальнейших расчетов физических процессов в топочном объеме. В итоге исследуемая камера сгорания была раз-бита на 1 500 000 элементарных ячеек.

Расчеты по численной модели выполнены для условий, принятых при организациях ре-ального процесса на ТЭС. Перенос излучения и динамика многофазных течений в отсутствие турбулентности уже представляют собой специ-альные области исследований с присущими им

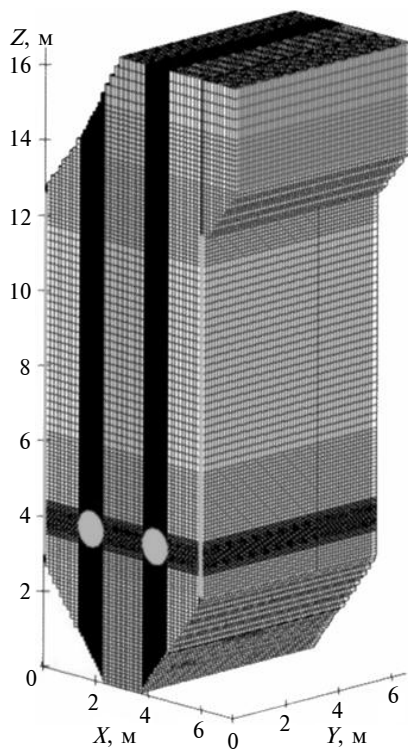


Рис. 3. Конечно-разностная сетка камеры сгорания БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ

трудностями, а несовершенство моделей для расчета турбулентных течений при наличии внешних воздействий и химических реакций только их усиливают. Многообразие и слож-

ность указанных факторов создает принципиальные трудности при разработке полноценной теории и методов расчета таких сред. Для теоретического исследования конвективного тепло-массопереноса в реагирующих средах необходимо использовать математическую модель. Она представляет собой сложную систему неавтономных нелинейных многомерных дифференциальных уравнений в частных производных. Эта система состоит из уравнений неразрывности, состояния и движения вязкой среды, уравнений распространения тепла и диффузии для компонентов реагирующей смеси и продуктов реакций с учетом теплообмена излучением и многофазности среды, уравнений химической кинетики, определяющих интенсивность нелинейных источников энергии и вещества и уравнений выбранной модели турбулентности.

Проведенные в данной работе исследования позволили определить основные закономерности распределения аэродинамических (рис. 4–7) и температурных (рис. 8, 9) характеристик во всем объеме топочной камеры.

Приведенные рисунки иллюстрируют картину распределения скоростей в топочном пространстве, при помощи которой можно охарактеризовать поведение пылеугольного потока внутри камеры сгорания. Отчетливо видны области подачи топливной смеси через горелки.

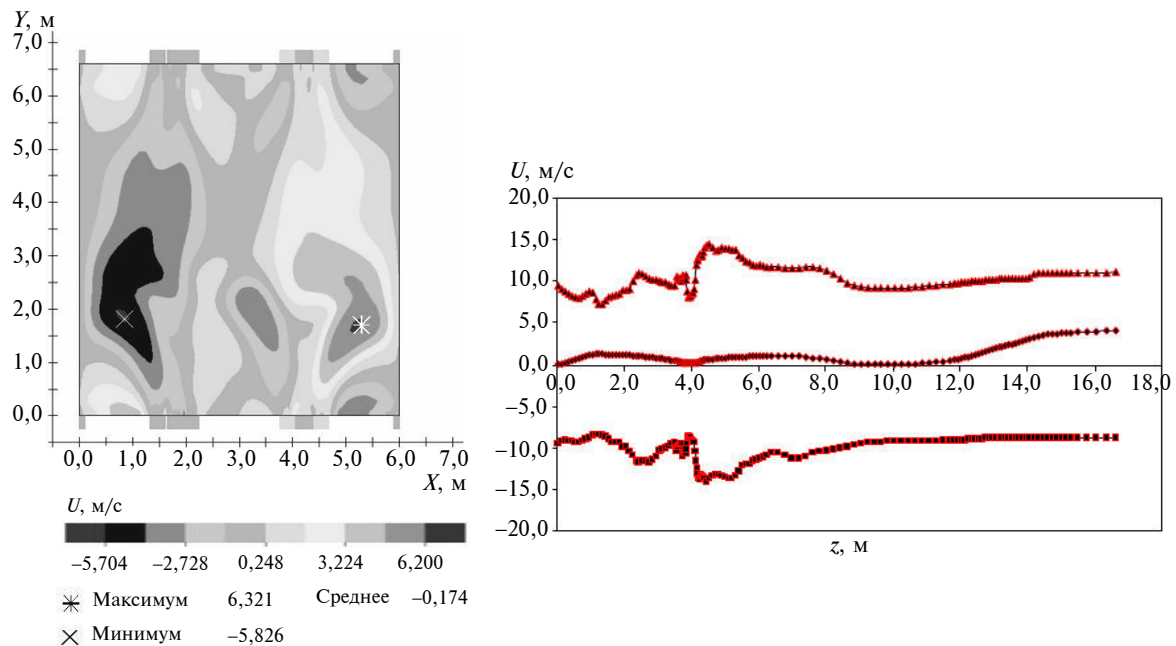


Рис. 4. Распределение составляющей скорости U в сечении горелки по высоте камеры сгорания;
 —●— среднее значение; —■— минимальное значение; —▲— максимальное значение

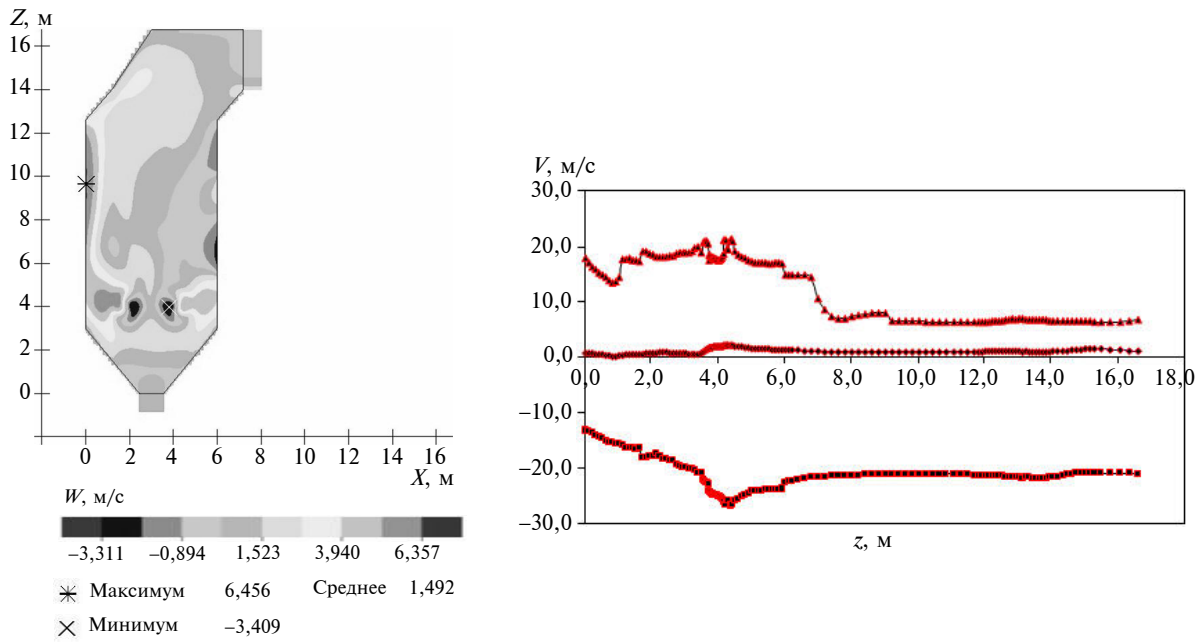


Рис. 5. Распределение составляющей скорости V в продольном сечении и по высоте камеры сгорания

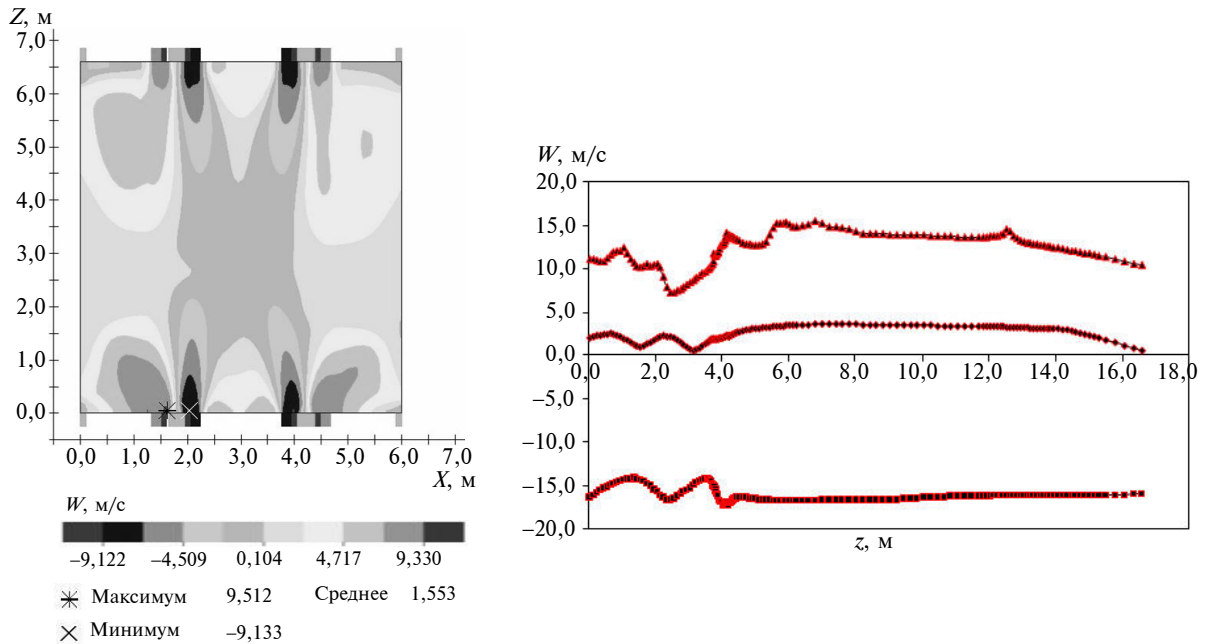


Рис. 6. Распределение составляющей скорости W в сечении горелок и по высоте камеры сгорания

Глубокое взаимное проникновение встречных струй и наличие поперечных градиентов скорости турбулизует поток. Турбулизация потока имеет место при хорошем заполнении топочного пространства, а, следовательно, при увеличенном времени пребывания горючей смеси в топочном пространстве. Вследствие немного разреженного заполнения области камеры над горелками у передней и задней стен

развиваются вихри. Часть восходящего потока направляется на выход из топки. Избыточный расход рециркулирует, образуя у стен в области над горелками вихревые области. Наличие вращения потоков в пристеночной зоне способствует равномерному обогреву поверхностей и снижению шлакования экранов, что позволяет уменьшить коррозию и тепловой перегрев [6, 7]. По мере удаления от плоскости распо-

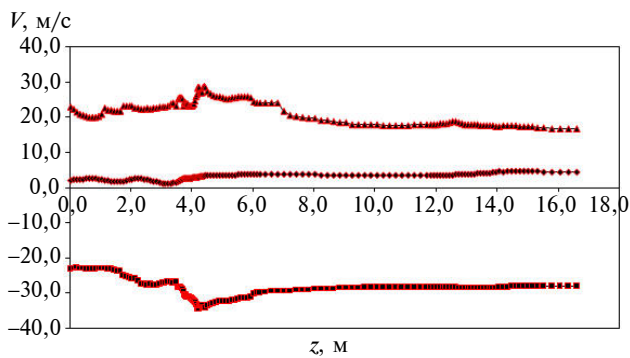


Рис. 7. Распределение вектора полной скорости по высоте камеры сгорания

ложения горелок поле скоростей выравнивается, восходящий поток расширяется, и вихревой характер течения ослабевает. К выходу из топочной камеры восходящий поток интенсивно расширяется и на выходе равномерно распределяется по всему сечению.

Горение угольной пыли в топочной камере протекает в неизотермической запыленной газовой струе, распространяющейся в среде горячих топочных газов. Запыленная струя (поток аэросмеси) в топочном пространстве распространяется вместе с окружающим ее потоком вторичного воздуха. Температурные условия, в которых протекает горение угольной пыли в топочной камере, создаются в турбулентных стру-

ях и определяются интенсивностью теплообмена в них и характером распространения их в топочных газах. Поэтому физические условия горения в турбулентных струях определяются закономерностями распределения температуры и полями скоростей [7].

Таким образом, максимальный конвективный перенос в рассматриваемой физической модели наблюдается в области подачи пылеугольной смеси. Следовательно, наиболее интенсивное горение наблюдается в центральной части топки, о чем свидетельствуют максимумы на рис. 8 и 9 в распределении температуры в различных сечениях камеры сгорания.

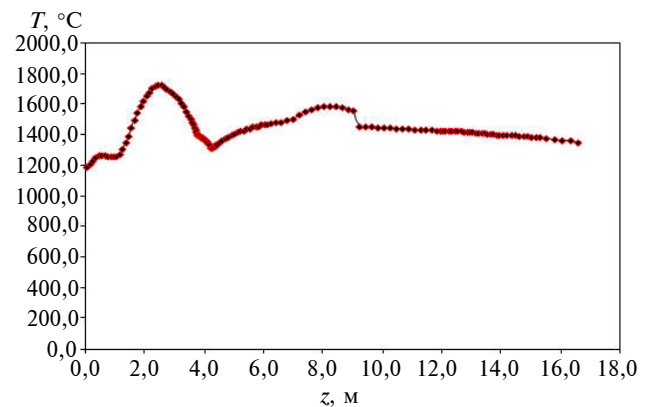


Рис. 9. Распределение температуры по высоте топочной камеры

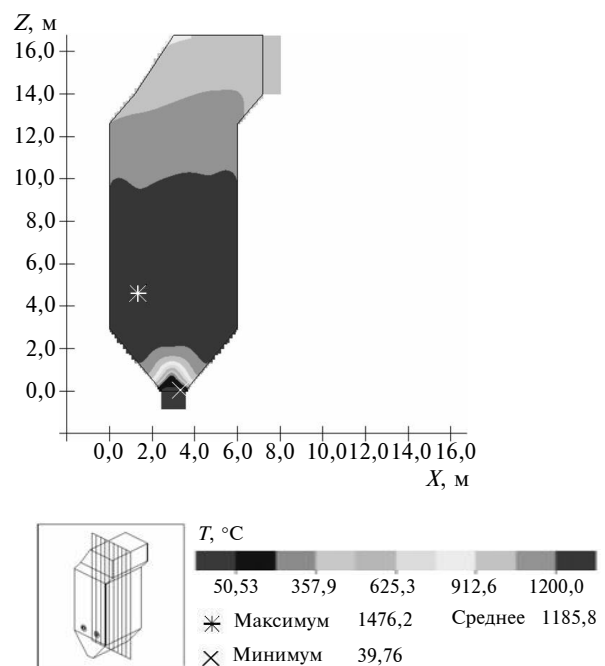
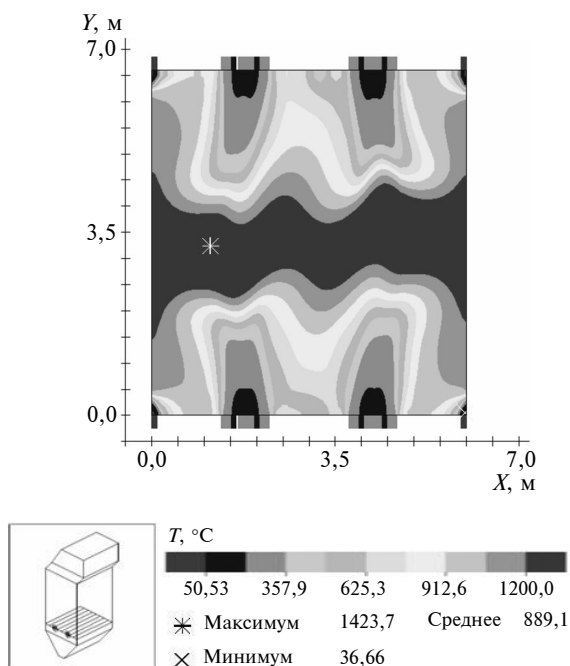


Рис. 8. Профиль температуры в области горелок и в продольном сечении камеры сгорания

Аэродинамические условия, создаваемые в топочном пространстве при движении пылеугольных потоков, приводят к тому, что в плоскости подачи топливной смеси и в плоскости симметрии топочной камеры наблюдается максимальный конвективный перенос. Реакции горения здесь идут наиболее интенсивно, с чем связаны значительные изменения температуры в этой области. Вблизи зоны реакции в пламени обнаруживаются пики в распределении температуры и ее градиента. По мере продвижения к выходу топочной камеры температура равномерно падает.

Выводы

При равенстве начальных количеств движения встречные потоки соударяются в центре топки при практически одинаковых скоростях в них. Закрученные струи, подающие топливо через встречные горелки, создают объемное завихренное течение в центральной области топочной камеры. В области горелок поток движется горизонтально, а по мере движения вверх угол подъема увеличивается. В углах топки вследствие прямого удара о стенки камеры поток растекается, и угол подъема его увеличивается. Часть потока под небольшим углом направляется вниз, развиваясь в два вихря. Благодаря интенсивному вихревому движению пылегазовых потоков внутри топочной камеры существенно возрастает время пребывания частиц топлива в топке, что позволяет добиться

более полного выгорания, а в техническом плане возможно применение угольной пыли более крупных фракций.

Наиболее интенсивное горение наблюдается в центральной части топки, где температура потока достигает порядка 1700 °С. Вследствие того, что угольные частицы в этой области обладают более интенсивным излучением и имеют более высокую концентрацию и суммарную поверхность, видно, что температура достигает максимума в сечениях расположения горелок. Именно в этой области реакция горения происходит наиболее интенсивно. По мере приближения к выходу из топочного пространства температурный профиль стабилизируется, и расхождения между минимальными и максимальными значениями уменьшаются.

В дальнейшем планируется применить предложенные в работе модели и методы для улучшения проведения вычислительного эксперимента, направленного на фундаментальное исследование процессов тепломассопереноса в камерах сгорания, а также создать методику исследования процессов горения энергетического топлива и формирования вредных пылегазовых выбросов, предложить экономичные эффективные методы его трехмерного моделирования и разработать соответствующую концепцию проведения вычислительного эксперимента с целью повышения эффективности энергетических установок и уменьшения выброса вредных веществ в атмосферу.

1. *Полежаев В.И., Бунэ А.В., Везуб Н.А. и др.* Математическое моделирование конвективного тепломассопереноса на основе уравнений Навье–Стокса. – М.: Наука, 1987. – 256 с.
2. *Оран Э., Борис Дж.* Численное моделирование реагирующих потоков. – М.: Мир, 1990. – 660 с.
3. *W. Pauker,* Creating Data Sets for FLOREAN Using the Tool PREPROZ, TU. Braunschweig: IWBТ, 1997.
4. *H. Müller,* Numerische Berechnung dreidimensionaler turbulenter Strömungen in Dampferzeugern mit Wdrmebergang und chemischen Reactionen am Beispiel des SNCR–Verfahrens und der Kohleverbrennung. Braunschweig: Fortschritt–Berichte VDI–Verlag, 1992.
5. *Аскарова А.С., Мессерле В.Е., Нагибин А.О., Устименко А.Б.* Горение пылеугольного факела в топке с плазменно-топливной системой // Теплофизика и аэромеханика. – 2010. – 17. – № 3. – С. 467–476.
6. *Askarova A.S., Messerle V.E., Nagibin A.O. et al.* Modelling of Plasmasupported Coal Combustion in Fullscale Boiler // Термотехника. – 2009. – 35. – № 2. – С. 149–162.
7. *A. Askarova, E. Karpenko, Y. Lavrishcheva et al.,* “Plasma-supported Coal Combustion in Boiler Furnace”, IEEE Trans. Plasma Sci, vol. 35, no. 6, pp. 1607–1616, 2007.
8. *A.S. Askarova, V.E. Messerle, A.O. Nagibin, A.B. Ustimenko,* “Modeling of Plasma-Assisted Coal Dust Ignition and Combustion”, Acta Technica, vol. 56, pp. 338–355, 2011.