

УДК 536.46.:532.517.4

## **ПОЛУЧЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ И АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КАМЕРЫ СГОРАНИЯ КОТЛА БКЗ-75 ШАХТИНСКОЙ ТЭЦ МЕТОДОМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТОПОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ**

*Аскарова А.С., Болегенова С.А., Максимов В.Ю.,  
Бекмухамет А., Бекетаева М.Т.*

*Казахский национальный университет имени аль Фараби, г. Алматы, Казахстан*

Исследованы процессы теплопереноса при горении пылеугольного топлива на примере камеры сгорания БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ с применением технологии моделирования топочных процессов энергетических объектов на основе решения дифференциальных уравнений турбулентного реагирующего течения. Получены распределения составляющих вектора полной скорости в различных сечениях камеры сгорания, приведена зависимость вектора полной скорости по высоте топочной камеры, получены профили температуры и распределение ее по высоте камеры сгорания. Установлены минимальные и максимальные значения приведенных величин, показана динамика изменения указанных характеристик в исследуемой топочной камере.

Основным инструментом теоретического исследования нелинейных процессов теплопереноса в движущихся средах с учетом разнообразных физических явлений (таких, как турбулентность, лучистый теплообмен, горение, многофазность, внешние силы и др.) 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 моделирование 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 теплопереноса 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 теплообменных процессов приобретает особое значение и имеет широкое практическое применение [2].

Среди методов моделирования горения пылеугольного топлива наибольшее распространение получил метод, в основе которого лежит Эйлеров подход для описания движения и теплообмена газовой фазы. Этот метод использует пространственные уравнения баланса массы, импульса, концентраций газовых компонентов и энергий для газовой смеси. Для описания движения и теплообмена одиночных частиц топлив вдоль их траекторий используется Лагранжев подход [3]. Турбулентная структура потока описывается двухпараметрической  $k-\varepsilon$  моделью турбулентности, где  $k$  – кинетическая энергия турбулентности,  $\varepsilon$  – турбулентная энергия диссипации. Радиационный теплообмен представляется шести поточной 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 единичном жидком элементе. Значение этой величины определяется в каждой точке рассматриваемой области.

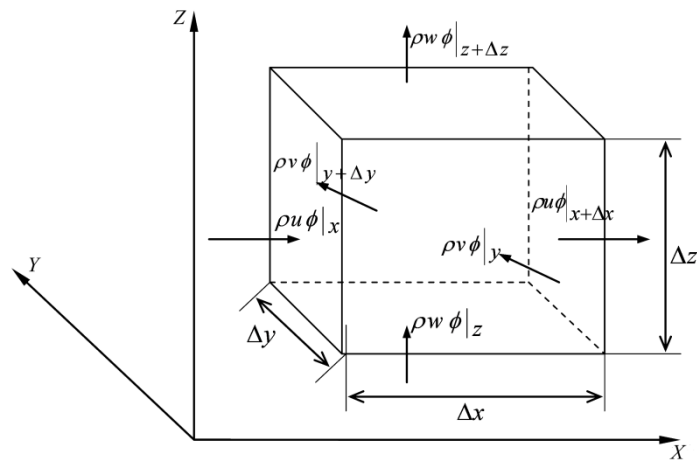


Рис. 1. Контрольный объем для обобщенного уравнения переноса [4], где  $\rho u \phi|_{i,i+\Delta i}$  – описывает конвективный перенос транспортной переменной через границы контрольного объема в декартовой системе координат

При преобразовании предельного значения из конечного в бесконечно малый контрольный элемент объема получается дифференциальное уравнение, описывающее сохранение транспортной переменной  $\phi$  :

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} = & -\frac{\partial(\rho u_1\phi)}{\partial x_1} - \frac{\partial(\rho u_2\phi)}{\partial x_2} - \frac{\partial(\rho u_3\phi)}{\partial x_3} + \frac{\partial}{\partial x_1} \left[ \Gamma \phi \frac{\partial \phi}{\partial x_1} \right] + \\ & + \frac{\partial}{\partial x_2} \left[ \Gamma \phi \frac{\partial \phi}{\partial x_2} \right] + \frac{\partial}{\partial x_3} \left[ \Gamma \phi \frac{\partial \phi}{\partial x_3} \right] + S \phi, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность среды;  $u_i$  – скорость потока в направлении  $x, y, z$ ;  $\phi$  – транспортная переменная,  $\Gamma$  – коэффициент диффузии.

Заменяя в уравнении (1) конвективный и диффузионный перенос 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) запишется в виде:

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

Запишем уравнение (2) в векторной форме:

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

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  $S_\phi$  – источниковый (стоковый) член для величины  $\phi$ , остальные слагаемые характеризуют изменение величины  $\phi$ :

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} \text{ – от времени;}$$

$$\frac{\partial(\rho u_j \phi)}{\partial x_j} \text{ – за счет конвективного переноса;}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right] \text{ – за счет явлений молекулярного обмена.}$$

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 вы-

ражениями 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:

$$a_p \phi_p = \sum_n a_n \phi_n + S_\phi \quad a_p \phi_p = \sum_n a_n \phi_n + S_\phi.$$

Коэффициенты  $a_n$  определяют вклад конвективного и диффузионного потока по всем направлениям в каждой точке контрольного объема. В результате аппроксимации системы уравнений (2) получено алгебраическое уравнение (3) для каждого контрольного объема и для каждой искомой переменной  $\phi_n$ . Для каждой ячейки расчетной области используются физические законы сохранения и дифференциальные уравнения, описывающие эти законы (уравнения переноса), 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 тепломассопереноса, происходящих при сжигании низкосортного пылеугольного топлива марки КР-200. В исследовании применены технологии 3D моделирования на основе решения дифференциальных уравнений турбулентного реагирующего течения.

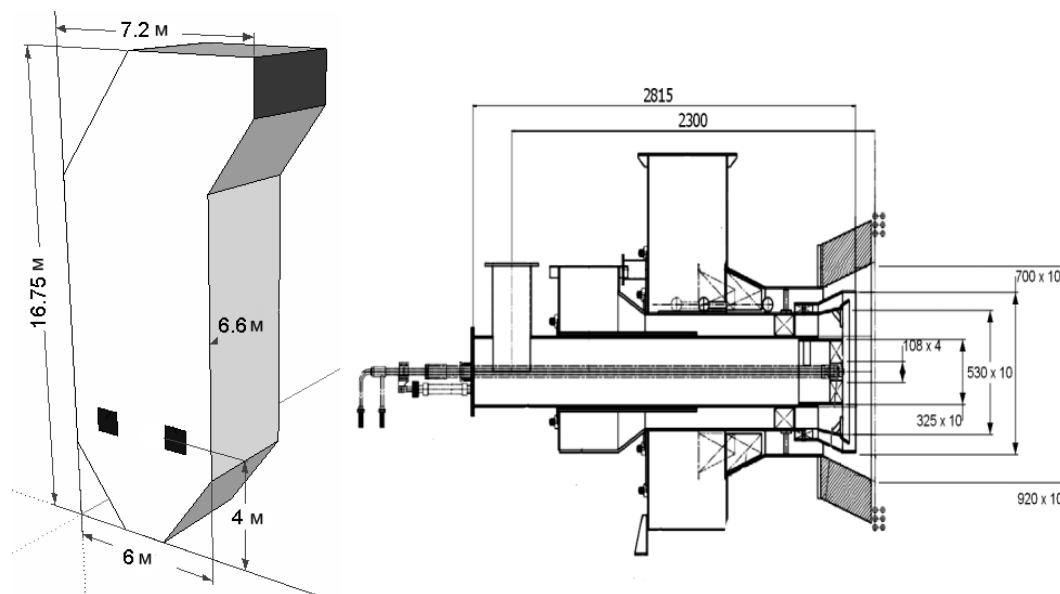


Рис. 2. Общий вид камеры сгорания и пылеугольной горелки

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. Исходные данные для расчета приведены в таблице.

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

Наименование	Обозначение	Единица измерения	Численное значение			
Тип угля	КР-200	–	–			
Зольность на сухую массу	$A^c$	%	35,1			
Выход летучих на горючую массу	$V^T$	%	22			
Влажность рабочая	$W^P$	%	10,6			
Теплота сгорания	$Q^P_H$	ккал/кг	4433			
Количество горелок на котле	$N_G$	шт.	4			
Производительность одной горелки по топливу	$B_G$	т/ч	3,2			
Расход первичного воздуха на котел	$V_{п.в.}$	кг/ч	28233			
Расход вторичного воздуха на котел	$V_{вт.в}$	кг/ч	78163			
Температура горячего воздуха	$t_{ГВ}$	°С	290			
Гидродинамическое сопротивление канала аэросмеси горелки	$\Delta P$	–	67,1			
Присосы в топку	$\Delta a$	–	30,4			
Коэффициент избытка воздуха за топкой	$\alpha_T$	–	2,019			
Механический недожог топлива	$Q_4$	%	13,37			
КПД котла-брутто	$\eta_k$	%	80,88			
Расход топлива на котёл	$B$	т/ч	12,49			
Плотность угля	$\rho$	кг/м <sup>3</sup>	1300			
Состав угля						
С	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	S <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Зола
43,21	3,60	5,24	1,04	1,21	10,60	35,10

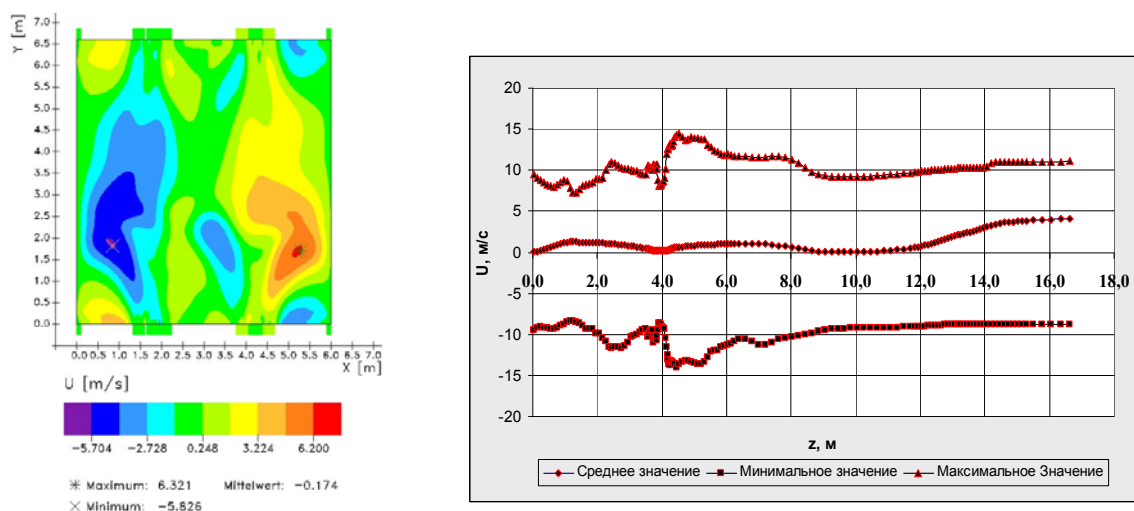


Рис. 3. Распределение составляющей скорости  $U$  в сечении горелки по высоте камеры сгорания.

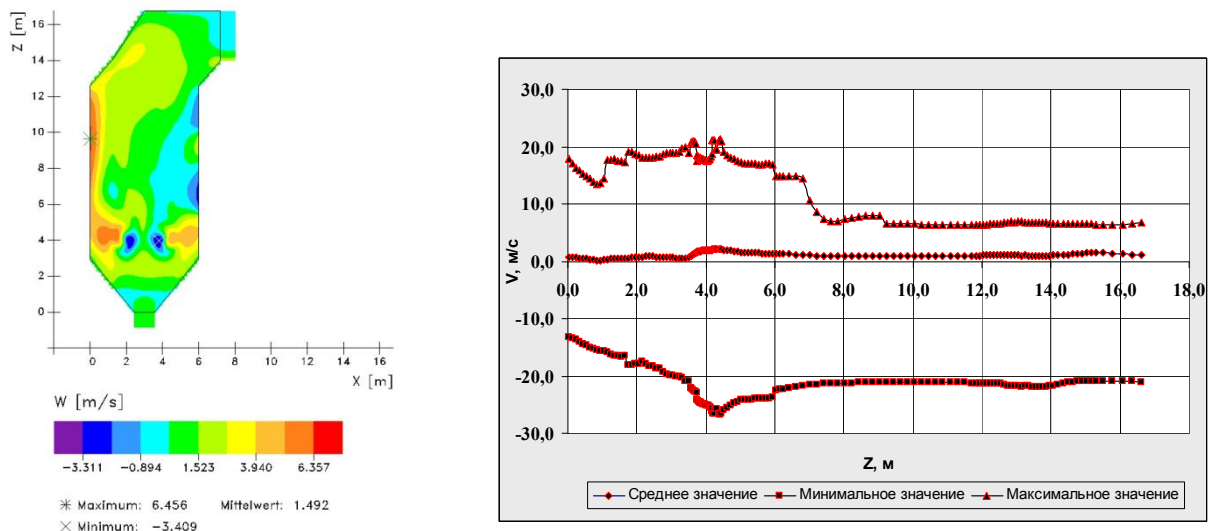


Рис. 4. Распределение составляющей скорости  $V$  в продольном сечении и по высоте камеры сгорания

Глубокое взаимное проникновение встречных струй и наличие поперечных градиентов скорости турбулизирует поток. Значительная 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 расположения 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.

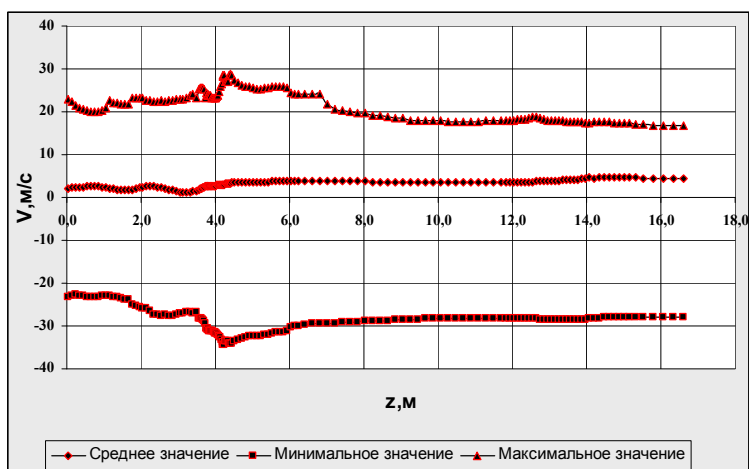


Рис. 5. Распределение вектора полной скорости по высоте камеры сгорания.

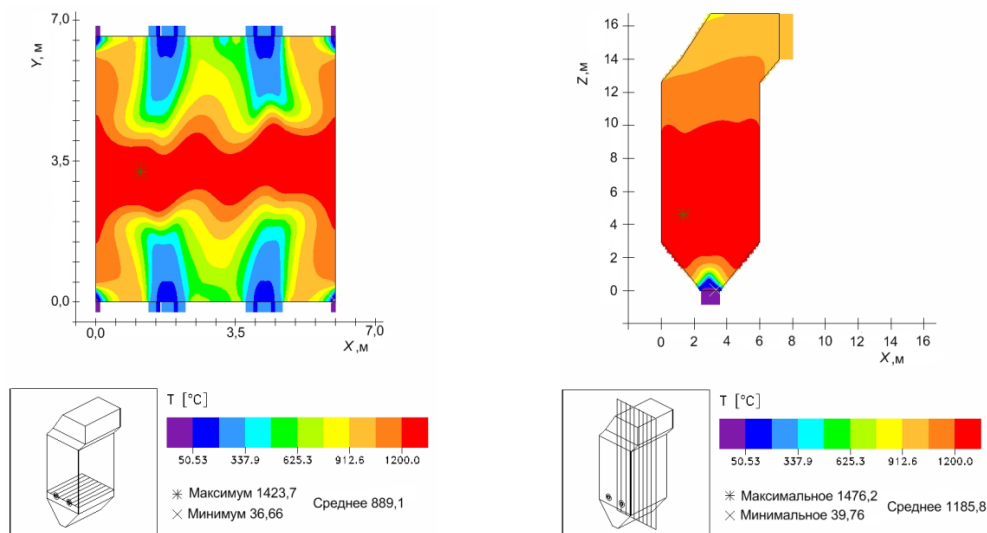


Рис. 6. Профиль температуры в области горелок и в продольном сечении камеры сгорания.

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. 6, 7 в распределении температуры в различных сечениях 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.

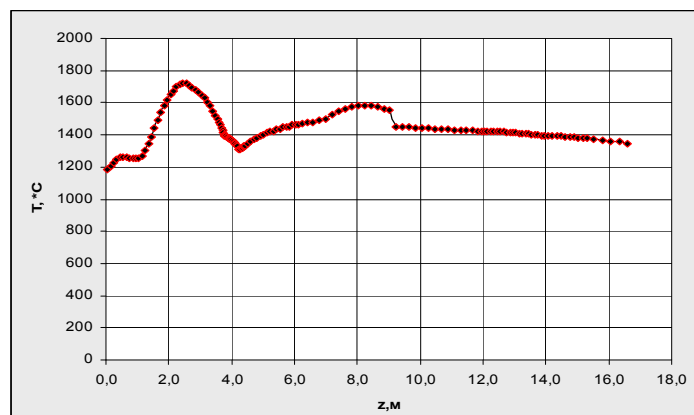


Рис. 7. Распределение температуры по высоте топочной камеры.

## Выводы

1. 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.

2. 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 уменьшается.

## Литература

1. Полежаев В.И., Бунэ А.В., Вerezуб Н.А. и др. Математическое моделирование конвективного теплообмена 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. Pauker W. Creating data sets for FLOREAN using the tool PREPROZ, TU. – Braunschweig: IWBT, 1997. – 3–24 s.
4. Müller H. Numerische Berechnung dreidimensionaler turbulenter Strömungen in Dampferzeugern mit Wärmeübergang und chemischen Reactionen am Beispiel des SNCR–Verfahrens und der Kohleverbrennung. – Braunschweig: Fortschritt–Berichte VDI–Verlag, 1992. – 158 S.
5. Askarova A.S., Messerle V.E., Ustimenko A.B., Nagibin A.O. Горение пылеугольного факела в топке с плазменно-топливной системой // Теплофизика и аэромеханика. – 2010. – Т. 17. – № 3. – С. 467–476.
6. Аскарова А.С., Мессерле В.Е., Нагибин А.О., Устименко А.Б., Лаврищев О.А. Modelling of plasmasupported coal combustion in fullscale boiler // Термотехника. – 2009. – Т. 35. – № 2. – С. 149–162.
7. Askarova A., Karpenko E., Lavrishcheva Y., Messerle V., Ustimenko A. Plasma-supported coal combustion in boiler furnace // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2007. – V. 35. – № 6. – P. 1607–1616.
8. Askarova A.S., Messerle V.E., Nagibin A.O., Ustimenko A.B. Modeling of plasma-assisted coal dust ignition and combustion // Acta Technica. – 2011. – V. 56. – P. 338–355.