

УДК 536.46:532.517.4

## ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ТОПОЧНОЙ КАМЕРЫ КОТЛА БКЗ-160

<sup>1</sup>Аскарова А.С., <sup>1</sup>Болегенова С.А., <sup>1</sup>Болегенова С.А., <sup>2</sup>Байдуллаева Г.Е.,  
<sup>1</sup>Максимов В.Ю., <sup>1</sup>Боранбаева А.Е., <sup>1</sup>Бердыхан К., <sup>1</sup>Максутханова А.М.,  
<sup>1</sup>Шортанбаева Ж.К.

<sup>1</sup>Казахский национальный университет им. аль-Фараби,  
Алматы, e-mail: ainura.boranbaeva@mail.ru;

<sup>2</sup>Казахский национальный медицинский университет им. С.Д. Асфендиярова, Алматы

В статье рассматривается, как сжигание пылеугольного топлива оказывает наибольшее экологическое воздействие на среду обитания: токсичные и парниковые газы, твердые частицы, сточные и фильтрационные воды, шлакоотвалы зола уноса, тепловые сбросы и многое другое. Кроме этого, развитие энергетического комплекса связано с масштабной трансформацией компонентов окружающей среды, негативные последствия которой могут проявляться длительное время. Угольные карьеры изменяют рельеф и формируют специфические почвенно-грунтовые условия отвалов, водохранилища ГЭС вызывают изменение сейсмичности, затопливают наиболее продуктивные долинные экосистемы, изменяют ландшафтную структуру регионов. В статье обсуждается математическая и физическая постановка задачи, этапы их решения и алгоритмы, применены современные методы численного моделирования для проведения компьютерных вычислений.

**Ключевые слова:** топочная камера, котел, горелки, ТЭЦ, двухфазность, аэродинамика, топливо, компьютерное моделирование, 3D численное моделирование, вычислительный эксперимент

## RESEARCHING THE AERODYNAMIC FEATURES OF THE COMBUSTION CHAMBER OF THE BOILER BKZ-160

<sup>1</sup>Askarova A.S., <sup>1</sup>Bolegenova S.A., <sup>1</sup>Bolegenova S.A., <sup>2</sup>Baydullaeva G.E.,  
<sup>1</sup>Maximov V.Y., <sup>1</sup>Boranbayeva A.E., <sup>1</sup>Berdihan K., <sup>1</sup>Maxutkhanova A.M.,  
<sup>1</sup>Shortanbayeva Z.K.

<sup>1</sup>Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, e-mail: ainura .boranbaeva@mail.ru;

<sup>2</sup>Asfendiyarov Kazakh National Medical University, Almaty

The article discusses how the burning of pulverized coal has the greatest environmental impact on the environment: toxic and greenhouse gases, firm particles, waste and filtration waters, slag disposal fly ash, thermal vents and much more. In addition, the development of the energy sector due to the large-scale transformation of the components of the environment, the negative effects that may occur for a long time. Carbon career changing terrain and form specific soil and groundwater conditions dumps, reservoirs HPP cause changes in seismicity, flood the most productive valley ecosystems, change landscape structure of regions. Discusses the mathematical and physical problem definition, stages of their decision and algorithms, applied modern methods of numerical simulation for computing.

**Keywords:** combustion chamber, boiler, burner, CHP, two-staging, aerodynamics, fuel, computer modeling, 3D numerical simulation, computational experiment

Энергетика является одной из ведущих отраслей промышленности многих индустриально развитых стран, в которых принят переход на путь ее инновационного развития, заключающийся в радикальном изменении системы взглядов на ее роль и место в современном и будущем обществе. Новая система взглядов нашла свое отражение в концепции Smart Grid-умная энергосистема, которая должна являться основной национальной политики энергетического и инновационного развития любой страны и должна учитываться при развитии отечественной энергетики.

В последние годы при проектировании и модернизации котлов, промышленных печей и камер сгорания, широкое распро-

странение получили 3D компьютерные технологии, основанные на математическом моделировании термогазодинамики внутри топочного пространства (горение, тепло- и массообмен) с использованием фундаментальных законов физики, дополненными определенными моделями (модели турбулентности, химической кинетики и др.) и современной быстродействующей компьютерной техники. Разработка системы кинетических уравнений двухстадийного горения топлива, методы определения констант скоростей химических реакций, общие требования к математической модели процессов горения топлива, значения энергии активации, уточненные на основе ее связи с тепловым эффектом химических

реакций и кинетические уравнения, описывающие процессы образования оксидов азота, представлены в работе [1].

Математическая модель тепломассообмена и горения пылеугольного топлива на основе движения неизотермического несжимаемого многокомпонентного газа в топочной камере разработана в работе [2]. Течение в данной математической модели считается установившимся, а уравнения стационарными, что позволило авторам работы рассчитать задачи о стационарном и нестационарном, ламинарном и турбулентном течении с химическими реакциями и сложным теплообменом. Математические модели процессов теплообмена и горения в паровых котлах предложены в работе [6].

Тепломассоперенос при наличии физико-химических превращений это взаимодействие турбулентных движений и химических процессов. Для исследования этих сложных течений необходимо использовать результаты современных теоретических исследований из таких областей науки как гидродинамика, термодинамика, аэротермохимия, вычислительная гидродинамика, компьютерное и численное моделирование.

В качестве исходных уравнений для моделирования турбулентного переноса в газах и жидкостях с химическими реакциями используются уравнения Навье-Стокса, дополненные соответствующими уравнениями химической кинетики, уравнениями сохранения компонентов смеси с учетом влияния переменных свойств среды. Закон сохранения транспортной величины  $\phi$  в общем случае имеет вид [3]:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho u_j \phi)}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right] + S_\phi, \quad (1)$$

где  $\frac{\partial(\rho u_j \phi)}{\partial x_j}$  – изменение  $\phi$  за счет конвек-

тивного переноса;  $\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right]$  – изменение

$\phi$  за счет явлений молекулярного обмена.

Таким образом, для решения поставленной задачи рассматриваются уравнения, характеризующие течение и которые выводятся из обобщенного уравнения (1):

- закон сохранения массы (уравнение неразрывности);
- закон сохранения импульса (уравнение Навье-Стокса);
- закон сохранения энергии (первый закон термодинамики);
- частный случай закона сохранения компонентов смеси.

Закон сохранения массы:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j}. \quad (2)$$

Закон сохранения импульса:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i. \quad (3)$$

В стандартной  $k$ - $\epsilon$  модели записывается два основных уравнения переноса турбулентных характеристик  $k$  и  $\epsilon$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} = & -\frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} + \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P - \rho \cdot \epsilon; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} = & -\frac{\partial(\rho u_j \epsilon)}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \\ & + C_{\epsilon,1} \cdot \frac{\epsilon}{k} \cdot P - C_{\epsilon,2} \cdot \frac{\epsilon}{k} \cdot \rho. \end{aligned} \quad (5)$$

В табл. 1 указаны основные характеристики топочной камеры котла БКЗ-160 Алматинской ТЭЦ: расход топлива, характеристики угля, диаметр угольных частиц, коэффициенты избытка воздуха в горелке и в топочной камере, температура аэросмеси и воздуха, количество горелок их расположение, размеры топочной камеры, скорости подачи топлива и окислителя и др. [4].

Все это отражено в построенных физической и геометрической моделях топочной камеры котла БКЗ-160, общий вид которой и разбивка ее на контрольные объемы для проведения вычислительных экспериментов представлены на рис. 1.

Для проведения вычислительных экспериментов по 3D моделированию процессов тепломассопереноса в топочной камере котла БКЗ-160 Алматинской ТЭЦ использовался в качестве основы компьютерный пакет программ FLOREAN, который базируется на решении консервативных уравнений для газотопливной смеси методом контрольного объема. Ниже представлены результаты 3-D моделирования процессов горения твердого топлива (экибастузский уголь) и аэродинамики топочной камеры построенной модели (котел БКЗ-160).

Таблица 1

## Характеристика топочной камеры котла БКЗ-160

Наименование, характеристики, размерность	Обозначение	Величина
Расход топлива на котел, т/ч	$B$	30
Расход топлива на горелку, т/ч	$B_{\Gamma} = B/N$	3,787
Теплота сгорания, МДЖ/кг	$Q_H^p$	12,2
Выход летучих, %	$V^f$	32
Диаметр угольных частиц, м·10 <sup>-6</sup>	$d^{par}$	60
Коэффициент избытка воздуха на выходе из топки	$a_{\Gamma}$	1,27
Коэффициент избытка воздуха в горелках	$\alpha_{\Gamma}$	0,68
Присосы воздуха в топку	$\Delta a$	40
Температура аэросмеси, °С	$T_a$	250
Температура вторичного воздуха, °С	$T_2$	380
Температура третичного воздуха, °С	$T_3$	380
Тип используемых горелок	Щелевые	
Количество горелок, шт	$n_B$	8
Количество ярусов, $n$	$N$	2
Высота топки, м	$z(H)$	21,000
Ширина топки, м	$Y$	6,565
Глубина топки, м	$X$	7,168
Скорость первичного воздуха, (аэросмеси), м/с	$W_1$	25
Скорость вторичного воздуха, м/с	$W_2$	40
Расход вторичного воздуха, м <sup>3</sup> /ч		6000
Коэффициент избытка вторичного воздуха		0,38
Расход первичного воздуха, м <sup>3</sup> /ч		4850
Коэффициент избытка первичного воздуха		0,3

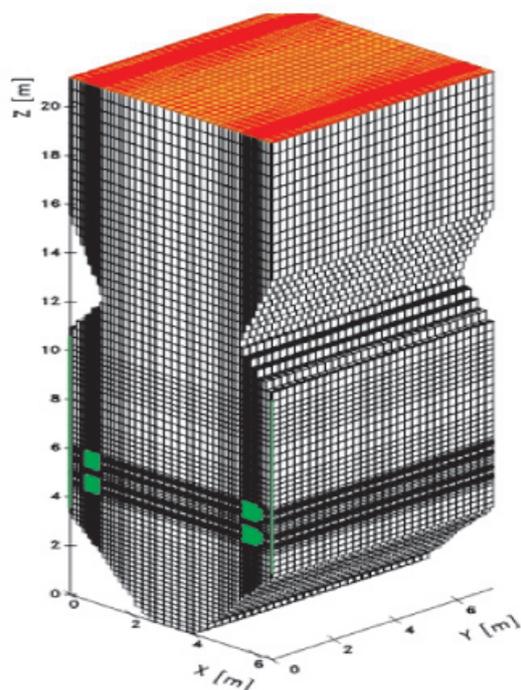


Рис. 1. Общий вид топочной камеры котла БКЗ-160 Алматинской ТЭЦ и разбивка ее на контрольные объемы

На рис. 2–5 представлены поля вектора полной скорости  $V = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$  по всему объему камеры сгорания: рис. 2 – в сечении, которое приходится на нижний ярус горелок ( $k = 32$ ,  $h = 4,81$  м), рис. 3 – в сечении верхнего яруса горелок ( $k = 50$ ,  $h = 5,79$  м), рис. 4 – в области между поясами горелок ( $k = 41$ ,  $h = 5,3$  м), рисунок 5 – на выходе из топочной камеры ( $k = 102$ ,  $h = 20,96$  м).

Поля на рисунках показаны в виде стрелок-векторов, длина которых дает величину полной скорости, их направление связано с направлением полной скорости в выбранной точке камеры сгорания. Указанная на рис. 9–12 аэродинамика течения в топочной камере, построенная на расчетных данных скоростей, полностью совпадает с описанием характера течения в тангенциальных топках, имеющаяся в литературе [5]. Объемная картина расположения векторов отчетливо показывает картину течения: места тангенциальной подачи топлива (уголь) и окислителя (воздух) с разными скоростями через горелочные устройства, расположенные на передней и задней стенках камеры сгорания, образование условной окружности в центре топочной камеры и симметрию течения (рис. 2–5).

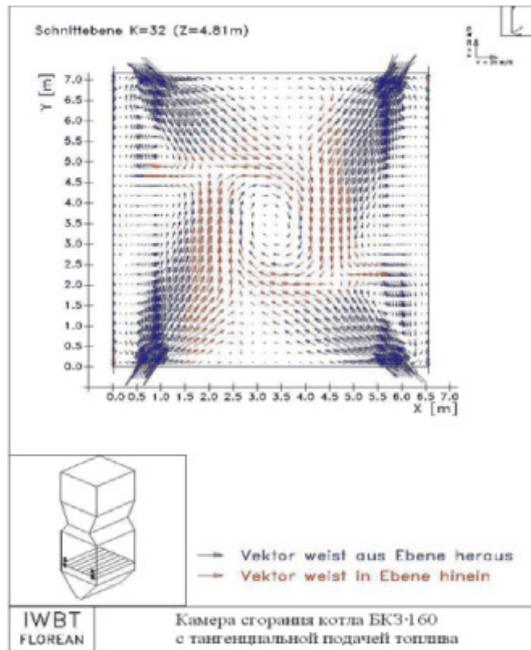


Рис. 2. Поле вектора полной скорости  $V$  в поперечном сечении камеры сгорания в области нижнего яруса горелок ( $h = 4,81$  м)

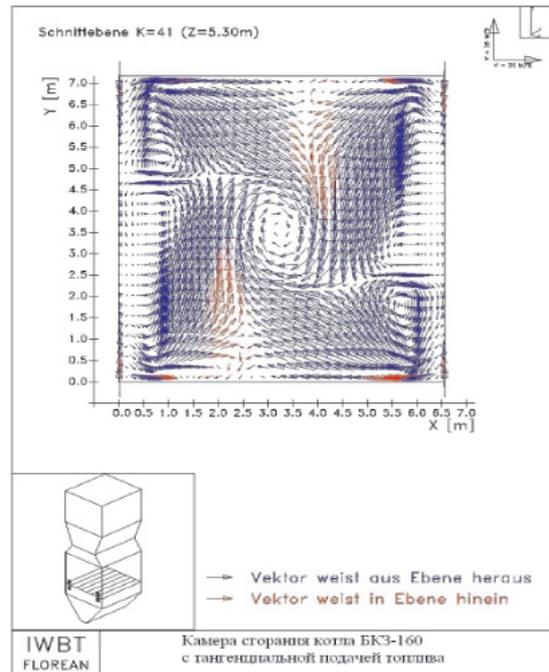


Рис. 4. Поле вектора полной скорости  $V$  в поперечном сечении камеры сгорания в области между ярусами горелок ( $h = 5,30$  м)

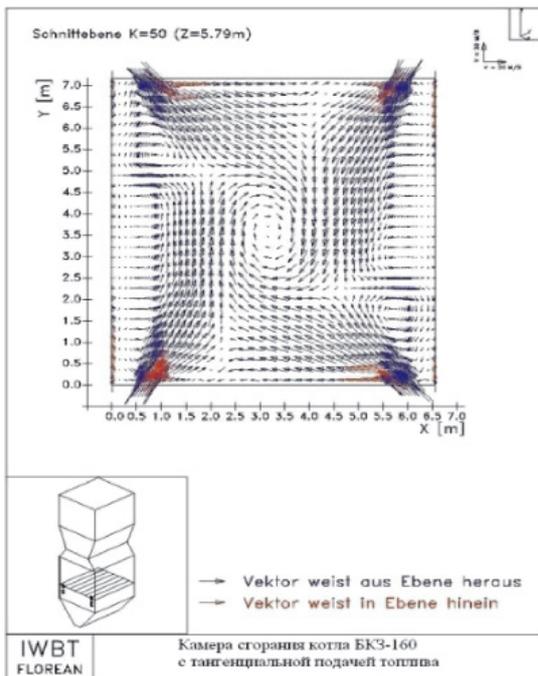


Рис. 3. Поле вектора полной скорости в поперечном сечении камеры сгорания в области верхнего яруса горелок ( $h = 5,79$  м)

Потоки пылеугольного топлива, вторичного и третичного воздуха, поступая в топочное пространство, создают объемное завихренное течение в центре камеры сгорания (рис. 2–4), что несомненно улучшает процесс смесеобразования и повышает интенсивность теплообмена.

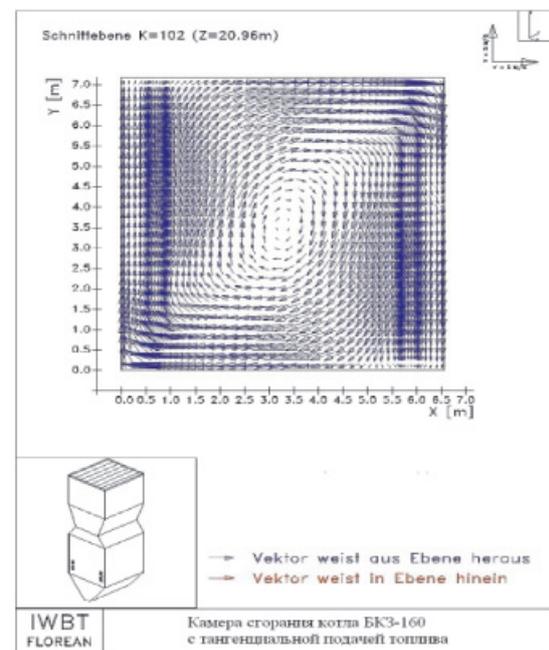


Рис. 5. Поле вектора полной скорости  $V$  на выходе из камеры сгорания ( $h = 20,96$  м)

Встречные пылегазовые потоки из противоположно расположенных горелок ударяясь о стенки топочной камеры создают возвратное течение, а часть потока направляется вниз к воронке, образуя ниже горелок два симметричных вихря. Центральное завихренное движение пылеугольного потока приводит к равномерному обогреву стенок

камеры сгорания, к снижению зашлакованности тепловых экранов и тепловых потерь. Уже на выходе из камеры сгорания ( $k = 102$ ,  $h = 20,96$  м) поле скоростей выравнивается, не наблюдается больших градиентов скоростей, вихревой характер течения ослабевает, наблюдается равномерное симметричное относительно центра камеры течение (рис. 5). Указанный характер течения приводит к тому, что наиболее интенсивно горение происходит в центральной зоне камеры сгорания, в области пояса горелок. Именно здесь все теплофизические и концентрационные характеристики процесса, происходящего в топочной камере, достигают своих экстремальных значений, на что указывает анализ представленных ниже температурных и концентрационных полей [7].

С использованием методов 3-D компьютерного моделирования были проведены исследования сложных процессов теплообмена, происходящие в областях реальной геометрии (топочные камеры ТЭЦ) при сжигании в них энергетического твердого топлива. В физическую и математическую модели горения пылеугольного факелов внесены следующие изменения: скорректирован учет теплового излучения, кинетики химических реакций горения твердого топлива, размеров угольных частиц. Проведена адаптация параметров моделей к реальным условиям, разработан алгоритм решения и внесены изменения в программы численного расчета, прове-

дена их отладка. Проведено 3-D численное моделирование процессов теплообмена в турбулентном реагирующем потоке, содержащем угольные частицы. С помощью разработанных математической, химической, физической и геометрической моделей численно решена задача о сжигании пылеугольного факела в топочной камере котла БКЗ-160 Алматинской ТЭЦ и проведены вычислительные эксперименты.

#### Список литературы

1. Аскарлова А.С. Конвективный теплообмен в физико-химически реагирующих средах: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. – Алматы, 1998. – С. 315.
2. Аскарлова А.С. Теплообмен при сжигании твердого топлива в промышленных котлах на примере Павлодарской ТЭЦ // Теплофизика и аэромеханика. – Новосибирск, СО РАН, 2000. – Т. 7, № 2. – С. 293–300.
3. Аскарлова А.С., Болегенова С.А., Лаврищева Е.И., Локтионова И.В. Численное моделирование топочных процессов при горении высокозольного Экибастузского угля // Теплофизика и Аэромеханика. – 2002. – Т. 9, № 4. – С. 585–596.
4. Устименко Б.П., Алияров Б.К., Абубакиров Е.К. Новое моделирование пылеугольных топок. – Алма-ата: Наука, 1982. – С. 212.
5. 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. 497–502.
6. Müller H. Numerische simulation von Feuerungen. CFD. – Vorlesung, TU. – Braunschweig: IWB, 1997. – P. 8–12.
7. Müller H. Numerische Berechnung dreidimensionaler turbulenter Strömungen in Dampferzeugern mit Wärmeübergang und chemischen Reactionen am Beispiel des SNCR-Verfahrens und der Kohleverbrennung / Fortschritt // Berichte VDI. – Verlag. – 1992. Reihe 6, № 268. – P. 158.