УДК 621.039.6; 536.46; 533.6; 532.517.4

### Трехмерное моделирование аэродинамики и теплообмена в камере сгорания котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ<sup>\*</sup>

А.С. Аскарова<sup>1</sup>, С.А. Болегенова<sup>1</sup>, С.А. Болегенова<sup>1</sup>, В.Ю. Максимов<sup>1</sup>, М.Т. Бекетаева<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики Казахского национального университета им. аль-Фараби, Алматы

<sup>2</sup>Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы

E-mail: Valeriy.Maximov@kaznu.kz

С помощью современных методов трехмерного компьютерного моделирования исследованы процессы тепломассопереноса, протекающие в реальных топках промышленных ТЭС. Выполнены вычислительные эксперименты по изучению аэродинамики высокотемпературных потоков и характеристик теплообмена при горении низкосортного карагандинского угля марки КР200 в камере сгорания котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ. В результате проведения вычислительных экспериментов получена аэродинамическая картина высокотемпературных потоков, а также распределение температуры в основных сечениях топочной камеры и по ее высоте. Методами численного моделирования рассчитан радиационный тепловой поток на стенки камеры сгорания, что позволило определить области максимального его воздействия на топочные экраны. Полученная картина распределения в топочном пространстве интенсивности тепловыделения при горении определяет области максимального взаимодействия топлива и окислителя.

Ключевые слова: аэродинамика, турбулентность, тепломассоперенос, численное моделирование, вычислительный эксперимент, камера сгорания.

В настоящее время наблюдается повышенный интерес к исследованию процессов тепломассопереноса в высокотемпературных средах при наличии в них горения. Эти процессы протекают в условиях сильной неизотермичности и турбулентности течения, многофазности среды, существенного влияния нелинейных эффектов теплового излучения, межфазного взаимодействия и многостадийности протекающих при этом химических реакций. Такие явления широко распространены, играют важную роль в теплофизических процессах, и их изучение является актуальной задачей современной теплофизики.

Исследования процессов тепломассопереноса в турбулентных высокотемпературных и химически реагирующих средах актуальны в свете прикладных возможностей и в отношении технических приложений и могут быть использованы при создании новых физико-химических технологий, при конструировании авиационной и ракетной техники,

<sup>\*</sup> Работа выполнена в рамках проектов, финансируемых Министерством образования и науки Республики Казахстан (гранты AP05133590, AP05132988, BR05236730).

<sup>©</sup> Аскарова А.С., Болегенова С.А., Болегенова С.А., Максимов В.Ю., Бекетаева М.Т., 2019

при разработке новых топочных устройств, газовых турбин и двигателей внутреннего сгорания [1–3]. В условиях истощения природных энергоресурсов и загрязнения окружающей среды развитие теории тепломассопереноса и разработка технологических процессов с рациональным использованием энергетического топлива, решение вопросов экономичного использования энергооборудования, повышения эффективности выработки энергии и решение экологических проблем являются актуальными и важнейшими задачами для многих теплофизических исследований в этом направлении [3–5].

Следует отметить, что более 80 % всей производимой в мире энергии вырабатывается за счет сжигания органического топлива. Другие источники энергии, к которым относится ядерная энергетика, гидроэнергетика, солнечные и ветряные электростанции, в ближайшие десятилетия не смогут конкурировать с традиционными способами ее получения [4]. Уголь, как энергетическое топливо, на фоне сравнительно более высоких цен на нефть и природный газ, а также изобилия его запасов является надежным и экономически эффективным видом топлива в странах Евразии, включая Казахстан. По данным ежегодного отчета статистического обзора мировой энергетики [6] около 70 % мировых разведанных месторождений угля находится на территории США, Китая и стран СНГ, включая Россию и Казахстан (рис. 1). Углубленное понимание процессов, происходящих при горении ископаемого топлива, например угля, дает возможность повысить эффективность теплоэнергетических установок. Улучшение тепловых характеристик топочных процессов может оказать существенное влияние на решение экологических проблем теплоэнергетики.

В настоящее время наиболее эффективным средством в реализации комплексного исследования процессов сжигания пылеугольного топлива в топочных камерах котлов промышленных объектов (ТЭС, ТЭЦ, и др.) является метод трехмерного моделирования с привлечением современной вычислительной техники и пакета программ, который учитывает наибольшее количество явлений и факторов, влияющих на протекание реальных процессов. Кроме того, предлагаемая методика обеспечивает высокую точность предсказания поведения этих факторов при расчетах [7–9].

Горение является одним из самых сложных процессов для математического моделирования, так как оно обычно одновременно включает в себя процессы трехмерной двухфазной динамики жидкости и газа, турбулентного перемешивания, испарения топлива, радиационного и конвективного теплообмена и химической кинетики [9, 10]. Для того чтобы смоделировать процесс сжигания топлива, основываясь на фундаментальных законах физики, необходимо использовать модель, учитывающую все эти факторы. Значительный прогресс в этом направлении был достигнут в детальном моделировании систем горения, но основные проблемы, такие как турбулентность и многофазность реагирующих потоков, формирование и деструкция продуктов взаимодействия и прочие, остаются нерешенными [11, 12].



Рис. 1. Доля мирового запаса угля (%).

Непрерывное и устойчивое развитие компьютерных технологий изменило подходы к инженерному проектированию и выполнению исследований в области тепломассопереноса. Если ранее технологические решения при проектировании и анализе долгое время полагались на теорию и эксперимент, то теперь добавился третий подход — в виде численного моделирования [13]. Результаты физического и математического моделирования, экспериментальные и промышленные исследования являются базой для выбора конструктивных и режимных параметров при создании новых промышленных котлов. Прежде всего, это касается геометрических размеров топочных камер энергетических котлов, уровней температур, скоростей, токсичных выбросов, интенсивности перемешивания, тепловых напряжений внутри камеры сгорания и других характеристик [14, 15].

Основное влияние на протекание процессов тепло- и массообмена в камере сгорания котла оказывает аэродинамика течения, способ подачи аэросмеси, ее скорость и температура, расположение горелочных устройств, полидисперсность частиц топлива и многое другое. При построении химической модели процесса горения пылеугольного факела необходимо учитывать такие стадии, как прогрев угольных частиц, выход и горение летучих, догорание коксового остатка, а также процесс формирования и деструкции продуктов химического взаимодействия [16].

#### Математическая модель турбулентного тепломассопереноса

В настоящей работе для исследования тепломассопереноса в высокотемпературных средах использованы физико-математическая и химическая модели. Эти модели включают в себя систему трехмерных уравнений Навье–Стокса и уравнений тепломассопереноса с учетом источниковых членов, которые определяются химической кинетикой процесса, нелинейными эффектами теплового излучения, межфазного взаимодействия, а также многостадийностью химических реакций. Запишем основные уравнения, используемые для решения поставленной задачи:

— закон сохранения массы (уравнение неразрывности)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \rho u_i \right) = S_m, \tag{1}$$

где *S<sub>m</sub>* — источниковый член, который определяет массу, добавленную к непрерывной фазе от дисперсной фазы;

- закон сохранения импульса (уравнение Навье-Стокса)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) = -\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial P}{\partial x_i} + F_i, \qquad (2)$$

где  $\rho$  — плотность,  $u_{i,}, u_{j,}$  — скорость в направлении  $i, j; x_i, x_j$  — декартовы координаты,  $\tau_{i,j}$  — тензор вязких напряжений, P — давление,  $F_i$  — силы межфазного взаимодействия; — закон сохранения энергии (первый закон термодинамики)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) = \frac{-\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h) - \frac{\partial q_i^{\text{res}}}{\partial x_i} + \frac{\partial P}{\partial t} + \tau_{ij}\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + S_h,$$
(3)

где h — удельная энтальпия,  $q_i^{\text{res}}$  связан с переносом энергии за счет теплопроводности потока вещества и диффузии,  $S_h$  — источник энергии за счет химических реакций и теплообмена излучением и за счет межфазного теплообмена;

— закон сохранения компонентов смеси

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \rho C_{\beta} \right) = -\frac{\partial}{\partial x_{i}} \left( \rho C_{\beta} u_{i} \right) + \frac{\partial j_{i}}{\partial x_{i}} + S_{\beta}, \tag{4}$$

где  $C_{\beta}$  — массовые доли компонент  $\beta$ ;  $j_i$  — среднемассовый поток в *i*-м направлении,  $S_{\beta}$  — источниковое слагаемое компоненты  $\beta$ .

Для теоретического анализа вихревых течений, имеющих место в камерах сгорания промышленных котлов, а также для большинства инженерных приложений используются усредненные по Рейнольдсу уравнения Навье–Стокса (RANS, Reynolds-averaged Navier-Stokes), которые можно записать в виде [1]

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right] \right) - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) + F_i,$$
(5)

где  $-\rho \overline{u'_i u'_j}$  представляют собой напряжения Рейнольдса  $\tau_{ij}$  и могут быть смоделированы с помощью гипотезы Буссинеска, которая используется в большинстве моделей турбулентности [17] в виде

$$-\rho \overline{u_i' u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_l}{\partial x_l}\right) \delta_{ij},$$

где  $\mu_t$  — турбулентная вязкость. Для замыкания усредненной по времени системы уравнений в частных производных авторы использовали стандартную *k*- $\varepsilon$  модель, где k — кинетическая энергия турбулентности, а  $\varepsilon$  — ее диссипация [18].

В рамках представленной работы используется модель мгновенного перемешивания, в которой нет необходимости решать дополнительно уравнение переноса. В основе данного приближения лежит предположение о том, что крупномасштабные вихри, характеризуемые энергией турбулентности k, ускоряют макросмешивание, а диссипация энергии турбулентности є ускоряет микросмешивание. Следовательно, скорость сгорания летучих можно связать с характеристиками k- $\varepsilon$  модели. Кроме того, выбор стандартной  $k \cdot \varepsilon$  модели турбулентности обусловлен тем, что она достаточно хорошо зарекомендовала себя при проведении исследований с помощью методов вычислительной гидродинамики (CFD, Computational Fluid Dynamics) и ее реализация требует сравнительно небольших вычислительных ресурсов. Правильность выбора подтверждается также и результатами исследования, опубликованными в статье [19], где авторы заключили, что: «Сравнительный анализ применения моделей турбулентности k- $\varepsilon$  и k- $\omega$  SST и модели рейнольдсовых напряжений для математического моделирования процесса горения угольной пыли в закрученном потоке в рамках RANS-подхода показал их незначительное влияние на распределения аксиальной и тангенциальной скоростей, температур и концентрации газов. При использовании любой из рассматриваемых моделей турбулентности достаточно хорошо предсказываются процессы, связанные с выгоранием угольной пыли. Учитывая, что k- $\varepsilon$  модель турбулентности требует меньше вычислительных затрат, она является предпочтительней для решения рассмотренной задачи. Установлено, что выбор модели турбулентности оказывает влияние на значение пульсационных составляющих скорости и это может сказаться на некоторых характеристиках процесса. Образование ряда вредных веществ, таких как оксиды азота, — одно из наиболее значительных возможных последствий этого влияния». Таким образом, применение k-є модели турбулентности в настоящей работе оправдано. Используемые основные уравнения можно записать в обобщенном виде следующим образом:

$$\frac{\partial \left(\rho\phi\right)}{\partial t} = -\frac{\partial \left(\rho u_{1}\phi\right)}{\partial x_{1}} - \frac{\partial \left(\rho u_{2}\phi\right)}{\partial x_{2}} - \frac{\partial \left(\rho u_{3}\phi\right)}{\partial x_{3}} + \frac{\partial}{\partial x_{1}} \left[\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x_{1}}\right] + \frac{\partial}{\partial x_{2}} \left[\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x_{2}}\right] + \frac{\partial}{\partial x_{3}} \left[\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x_{3}}\right] + S_{\phi},$$
(6)

320

где  $\phi$  — транспортная переменная,  $S_{\phi}$  — источниковый член, который определяется химической кинетикой процесса, нелинейными эффектами теплового излучения, межфазного взаимодействия, а также многостадийностью химических реакций.

Пылеугольный факел представляет собой турбулентный двухфазный поток обычно с малой объемной долей твердой фазы частиц. Следовательно, вне факела облако частиц аппроксимируется как континуум, и средняя скорость частицы принимается приблизительно равной скорости газовой фазы. В течениях с большим количеством частиц твердая среда может оказывать обратное воздействие на конвективный и диффузионный перенос. Поскольку наличие твердых веществ в уходящих газах незначительно (за исключением области вблизи горелок), авторы настоящей работы учитывали дисперсную фазу только в области подачи топлива и окислителя. Такое упрощение было сделано в целях уменьшения вычислительных затрат.

В большинстве случаев при пылеугольном горении речь идет о слабонагруженных потоках, т.е. когда максимальная объемная концентрация твердой фазы не превышает 1 %, а диаметр твердых частиц составляет не более 1000 микрон, причем средний диаметр частиц по всему объему не более 100 микрон. Тогда процесс горения твердого топлива в топочных камерах можно представить следующим образом: пламя является двухфазной газодисперсной системой, причем влияние твердой фазы на аэродинамику течения незначительно, а влияние твердой фазы в области пламени на коэффициенты турбулентного обмена учитывается с помощью следующего эмпирического соотношения, входящего в уравнение (6):

$$\Gamma_{\varphi} = \frac{\mu_{\rm p}}{\sigma_{\rm p,\,turb}} = \frac{\mu_{\rm t}}{\sigma_{\rm p,\,turb}} \left( 1 + \frac{\rho_{\rm p}}{\rho} \right)^{-1/2},\tag{7}$$

где  $\mu_{\rm p}$  — турбулентная вязкость с учетом твердых частиц,  $\sigma_{\rm p,turb}$  — турбулентное число Шмидта–Прандтля с учетом частиц,  $\rho_{\rm p}$  — плотность частиц,  $\rho_{\rm m}$  плотность газовой фазы. В этом случае для турбулентной вязкости с учетом твердых частиц можно использовать соотношение [20]

$$\mu_{\rm p} = \mu_t \left( 1 + \rho_{\rm p} / \rho \right)^{-1/2}, \tag{8}$$

которое показывает, что увеличение парциальной плотности твердых частиц приводит к уменьшению турбулентного обмена. Парциальная плотность твердых частиц определяется из соотношения для массовой доли частиц, поступающих в факел:  $Y_p = \rho_p / \rho$ .

Для турбулентного числа Шмидта–Прандтля с учетом частиц выбрано численное значение  $\sigma_{p,turb} = 0,7.$ 

Для численного моделирования движения полидисперсных частиц топлива в пылеугольном факеле был использован подход, подробно описанный в монографии [21], который заключается в следующем: весь спектр частиц пылеугольного топлива, поступающего в топочную камеру, разбивается на группы, поведение каждой группы частиц характеризуется поведением ее представителя — «частицы-маркера». Для расчета параметров, характеризующих теплофизическое состояние «частицы-маркера», используется система обыкновенных дифференциальных уравнений, подробно описанная в работе [22].

При решении поставленной задачи математическая модель должна включать в себя начальные и граничные условия для искомых функций (скорость, температура, концентрация компонент смеси и др.), соответствующие геометрии выбранной топочной камеры и реальному технологическому процессу сжигания топлива на ТЭС. Эти условия были определены следующим образом.

Начальные условия: u = 0, v = 0, w = 0, P = 0 при t = 0.

Граничные условия задаются на свободных поверхностях, к которым относятся горелки, выход из топочной камеры котла, а также плоскость симметрии, и описываются ниже.

На входе:  $u_i$  — значения скорости,  $c_\beta$  — начальная концентрация каждой компоненты, энтальпия h определяется через температуру потока на входе из следующего со- $\partial h$ 

отношения: 
$$C_{\rm P} = \frac{\partial n}{\partial T}\Big|_{P={\rm const}}$$
, где  $T$ — температура на входе (эксперимент или расчет).

На выходе:  $\frac{\partial u_i}{\partial x_i}\Big|_{\text{normalA}} = 0, \quad \frac{\partial h}{\partial x_i}\Big|_{\text{normalA}} = 0, \quad \frac{\partial c_\beta}{\partial x_i}\Big|_{\text{normalA}} = 0$  — производные скоро-

сти, энтальпии и концентрации компонент, нормальные к плоскости выхода.

В плоскости симметрии:  $u_i|_{normals} = 0$  — скорость, нормальная к плоскости сим-

метрии,  $\frac{\partial u_i}{\partial x_i}\Big|_{\text{normalS}} = 0$ ,  $\frac{\partial h}{\partial x_i}\Big|_{\text{normalS}} = 0$  — производные скорости и энтальпии, нормаль-

ные к плоскости симметрии,  $\frac{\partial c_{\beta}}{\partial x_i}\Big|_{\text{погтеле}} = 0$  — производные концентрации компонент, нормальные к плоскости симметрии.

На твердой поверхности:  $u_i \Big|_{\text{normalB}} = 0$ ,  $\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \Big|_{\text{normalB}} = 0$ ,  $u_i \Big|_{\text{taB}} = 0$ ,  $\partial p \Big|_{\text{boundary}} = 0$  поправка на давление на границе твердой поверхности,  $\frac{\partial c_{\beta}}{\partial x_i}\Big|_{\text{постве} \mathbb{R}} = 0.$ 

Граничные условия для температуры на стенке в настоящей работе задаются тепловым потоком  $q_w = \alpha (T_{\text{steam}} - T_{\text{surf}})$ . При переменной температуре стенки топочной камеры тепловой поток *q* можно рассчитать по формуле

$$\dot{q} = \underbrace{\alpha(T_{\rm fg} - T_{\rm surf})}_{\rm KOHBEKUUN} + \underbrace{C_{12}(T_{\rm fg}^4 - T_{\rm surf}^4)}_{\rm pajualung}, \qquad (9)$$

где  $C_{12} = \varepsilon_{12}\sigma$ ,  $T_{fg}$  — температура дымовых газов,  $T_{surf}$  — температура поверхности стенок камеры,  $\alpha$  — коэффициент переноса тепла конвекцией, Вт/м<sup>2</sup>·К,  $\varepsilon_{12}$  — излучательная способность стенки,  $\sigma$  — постоянная Больцмана, Вт/ м<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>. Температура поверхности стенки камеры  $T_{\rm surf}$  определяется как

$$\dot{q} = K \left( T_{\text{surf}} - T_{\text{steam}} \right), \quad T_{\text{surf}} = \frac{q}{K} + T_{\text{steam}},$$
(10)

где К — коэффициент теплопередачи от поверхности стенки до паровой смеси в трубопроводе.

Граничные условия для используемой модели турбулентности записываются в виде  $k = 1, 5(u_i T u)^2$ , где k — значение кинетической энергии турбулентности на входе, T u степень турбулентности потока, которая для технических приложений определяется 

сти диссипации кинетической энергии турбулентности на входе, L<sub>m</sub> — длина пути смешения.

На выходе:  $\frac{\partial k}{\partial x_i}\Big|_{\text{normalA}} = 0, \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}\Big|_{\text{normalA}} = 0$  — производная, нормальная к плоскости

выхода.

В плоскости симметрии:  $\frac{\partial k}{\partial x_i}\Big|_{\text{normalS}} = 0, \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}\Big|_{\text{normalS}} = 0$  — производная, нормальная

к плоскости симметрии.

На твердой поверхности:  $\varepsilon_i \Big|_{\text{boundary}} = 0$  — значение на границе твердой поверхно-

сти;  $k_i|_{\text{boundary}} = 0$  — значение на границе твердой поверхности.

Приведенная выше система уравнений решается численно с использованием метода контрольного объема, который подробно описан в работах [1, 23] и в дальнейшем использовался при проведении вычислительных экспериментов по сжиганию высокозольного угля на казахстанских ТЭС [3, 4, 7, 24].

### Описание модели горения пылеугольного факела

В модели горения можно выделить следующие этапы:

- пиролиз с выходом летучих веществ и образованием коксового остатка,
- горение летучих продуктов и оксида углерода,
- горение коксового остатка.

Моделирование пиролиза. Модель горения должна описывать исключительно локальное выделение тепла в результате сгорания и влияния продуктов сгорания на теплообмен. Поэтому при выборе моделей пиролиза и сгорания авторы отказались от применения громоздких систем с большим количеством компонент. В настоящей работе используется одноэтапная модель пиролиза, описанная в исследованиях [1, 25], так как в этом случае стехиометрические коэффициенты реакции пиролиза можно вывести из данных экспресс-анализа, что важно и предпочтительно. Кроме того, эта модель достаточно точно работает во многих случаях и является хорошим компромиссом для уменьшения вычислительных затрат.

Моделирование горения летучих веществ. Продукты пиролиза, смешиваясь с воздухом, образуют реакционноспособную смесь. При описании процесса пиролиза летучие вещества рассматриваются как фиктивные углеводороды. Поскольку в основном интерес представляют только скорость и тепловыделение при окислении, то при высоких температурах и достаточном количестве кислорода сгорание летучих веществ может быть представлено в виде двухступенчатой реакции в предположении, что сначала происходит окисление летучих веществ до СО и H<sub>2</sub>O [26]:

$$C_x H_y + \left(\frac{x}{2} + \frac{y}{4}\right) O_2 \rightarrow x CO + \frac{y}{2} H_2 O,$$
(11)

а на втором этапе — окисление до СО<sub>2</sub>:

$$xCO + \frac{x}{2}O_2 \to xCO_2.$$
(12)

Для определения скорости сгорания продуктов пиролиза с учетом реакций (11) и (12) используется концепция турбулентной диссипации (Eddy–Dissipation Model, EDM), предложенная и подробно рассмотренная в работе [27].

Моделирование горения коксового остатка. Гетерогенная реакция горения твердого углерода на поверхности частиц кокса определяется диффузией кислорода из окружающей среды в пограничный слой и в пористую среду частицы, а также реакцией между углеродом и кислородом на поверхности частицы. Самый медленный из этих процессов определяет скорость выгорания кокса. В зависимости от диаметра и температуры частиц образуется соответственно оксид и диоксид углерода [28]:

$$2C + O_2 \rightarrow 2CO, \tag{13}$$

$$C + O_2 \to CO. \tag{14}$$

Предполагается, что при горении коксового остатка диаметр частиц топлива изменяется от  $d_1$  до  $d_2$ . При выходе летучих компонентов размер частиц остается постоянным, а изменяется только плотность топлива — от значения плотности сухого угля до плотности кокса.

Изменение концентрации углерода коксового остатка  $\xi_{\rm C}$  определяется уравнением

$$d\xi_{\rm C}/dt = -K_{\rm C}A_{\rm sp}\xi_{\rm C},\tag{15}$$

где  $A_{\rm sp}$  — удельная поверхность частицы, отнесенная к ее массе,  $K_{\rm C}$  — константа скорости окисления углерода коксового остатка, имеющая вид

$$K_{\rm C} = \frac{p_{\rm O_2}}{1/K_{\rm d} + 1/K_{\rm kin}},\tag{16}$$

здесь  $K_{\rm kin}$  — константа скорости кинетической составляющей реакции горения углерода коксового остатка,  $K_{\rm d}$  — константа скорости диффузии окислителя,  $p_{\rm O_2}$  — относительное парциальное давление кислорода.

Вклад диффузии кислорода определяется через эффективный коэффициент диффузии согласно выражению [28]

$$K_{\rm d} = \frac{{\rm Sh}M_{\rm C}f_{\rm m}D_{\rm O_2}}{Rd_{\rm p}T_{\rm gs}},\tag{17}$$

где  $M_{\rm C}$  — молярная масса углерода, Sh — число Шервуда (для сферических частиц принимаем Sh = 2);  $T_{\rm gs} = (T_{\rm g} + T_{\rm p})/2$  — средняя температура смеси,  $T_{\rm g}$  и  $T_{\rm p}$  — температуры газа и твердых частиц соответственно;  $D_{\rm O_2} = D_{0,{\rm O}_2} (T_{\rm gs}/T_0)^{1.75}$  — коэффициент диффузии кислорода к поверхности частицы, где  $D_{0,{\rm O}2} = 3,49\cdot10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с — коэффициент самодиффузии при  $T_0 = 1600$  K [28],  $f_{\rm m}$  — механизм-фактор, который равен единице для реакции с образованием CO<sub>2</sub> и равен двум для реакции с образованием CO.

Вклад химических реакций определяется через константу скорости химической реакции, которая выражается соотношением:

$$K_{\rm kin} = k_{0,\rm C} {\rm e}^{-E_{a,\rm C}/(RT_{\rm p})}.$$
 (18)

Кинетические параметры, используемые в расчетах, взяты из работы [29].

Модель сжигания угольной пыли, используемая в настоящей работе, учитывает интегральные реакции окисления компонент топлива до стабильных конечных продуктов реакции. При этом промежуточные реакции, образование и изменение неустойчивых промежуточных продуктов не учитываются.

#### Описание объекта и метода исследования

В качестве объекта исследования был выбран котел БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ, эксплуатируемый в Карагандинской области Республики Казахстан. В таблице представлены основные данные по режимным параметрам топочной камеры котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ, а также приведен состав используемого угля.

Таблица

N⁰		Наименование		Обозначение		Единица измерения		Значение	
1	Паропроизводительность			D			т/час	75	
2	КПД котла				η		%	80,88	
3	Количество горелок на котле					N <sub>Γ</sub>		ШТ	4
4	Механический недожог топлива					$q_4$		%	13,37
5	Давление перегретого пара					P <sub>nn</sub>		кг/см <sup>2</sup>	39
6	Высота топочной камеры					H <sub>T</sub>		Μ	16,75
7	Ширина топочной камеры					b <sub>T</sub>		М	6
8	Глубина топочной камеры				$\Gamma_{\rm T}$			М	6,6
9	Расход первичного воздуха на котел				V <sub>IIB</sub>			нм <sup>3</sup> /час	31797
10	Расход вторичного воздуха на котел					V <sub>bt b</sub>		нм <sup>3</sup> /час	46459
11	1 Температура горячего воздуха					t <sub>rb</sub>		°C	290
12	12 Температура холодного воздуха					t <sub>xB</sub>		°C	30
13	13 Коэффициент избытка воздуха					а		_	1,22
14	4 Тип угля					KP200		-	-
15	Расчетный расход топлива на котел				B <sub>p</sub>			т/час	12,49
16	Производительность одной горелки по топливу				B <sub>Γ</sub>			т/час	3,2
17	Тонина помола				R <sub>90</sub>			%	20
18	Теплота сгорания				$Q^{P}_{H}$		ккал/кг		4433
19	Выход летучих на горючую массу				$V^{\Gamma}$		%		22
20	Плотность угля				ρ		кг/м <sup>3</sup>		1300
Состав используемого угля, %									
	С	Н	0	S	N			$W^p$	$A^p$
43	,21	3,6	5,24	1,04	1,21			10,6	35,1

Технические характеристики топочной камеры котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ и входные данные для проведения вычислительного эксперимента

В настоящее время наблюдается прогресс в развитии трехмерных компьютерных технологий, что дает возможность получать недоступную ранее детальную информацию по параметрам турбулентного течения, тепломассообмена, горения, эмиссии токсичных выбросов и другим характеристикам практически в любой точке пространства топочной камеры [30]. Результаты трехмерного моделирования являются основой для выбора конструктивных и режимных параметров при создании новых котлов и реконструкции функционирующих с наиболее оптимальной технологией сжигания пылеугольного топлива.

В общем случае при проведении численного моделирования вся расчетная область разделяется разностной сеткой на дискретные точки или объемы (рис. 2*b*), 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.

Для реализации вычислительных экспериментов авторы использовали программный комплекс FLOREAN [1, 2, 31–35]. Этот пакет программ позволяет проводить сложные вычислительные эксперименты по моделированию реагирующих многофазных течений в областях реальной геометрии (топочные камеры ТЭЦ и ТЭС). Используемая конечноразностная сетка имеет разрешение 110×61×150 или 1006500 контрольных объемов.

# Исследование аэродинамических характеристик камеры сгорания промышленного котла

Аэродинамика двухфазных турбулентных потоков при сжигании пылеугольного топлива обуславливает характер протекания всего процесса горения. К примеру, известны



Рис. 2. Общий вид котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ (а) и его дискретизация на контрольные объемы (b).

некоторые весьма экономичные способы уменьшения выбросов вредных азотосодержащих веществ в атмосферу с применением различных аэродинамических приемов [1, 2, 35, 36].

Аэродинамической основой всего процесса сжигания в топочных устройствах является вихревой перенос. Основное свойство аэродинамической структуры вихревого потока — совершенное смесеобразование пылеугольного топлива и окислителя (кислород воздуха), без чего невозможно достигнуть ни требуемой интенсивности процессов, ни допустимых показателей по вредным выбросам, ни высокого уровня экономичности сжигания [1, 2]. На рис. 2 приведены результаты вычислительных экспериментов по исследованию аэродинамики реальной топочной камеры.

На рис. 3–6 представлены результаты вычислительных экспериментов по исследованию аэродинамических характеристик камеры сгорания котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ. Так, на рис. 3 приведены минимальные, максимальные и средние значения модуля вектора полной скорости  $\left(\left|\vec{V}\right| = \sqrt{U^2 + V^2 + W^2}\right)$  по сечению в зависимости от высоты то-

почной камеры в соответствие со знаком У-компоненты скорости. Анализ рисунка показывает, что на высоте четырех метров скорость потока достигает своего максимального значения. Именно на этой высоте установлены горелочные устройства, через которые происходит впрыск аэросмеси с максимальной скоростью, равной 16 м/с. Также на рисунке можно заметить, что в области установки горелочных устройств средние по се-



чению значения модуля вектора полной скорости принимают отрицательные, в соответствие со знаком У-компоненты скорости, значения. Вероятно, это связано с наличием возвратного течения, образующегося вблизи этой области.

Рис. 3. Изменение модуля вектора полной скорости по высоте камеры сгорания котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ. Значения |⊽|: минимальное (1), максимальное (2), среднее (3).



*Рис. 4.* Трехмерное распределение траектории потока аэросмеси в объеме камеры сгорания (*a*) и вектор полной скорости в сечении горелок (*b*).

На рис. 4 представлено трехмерное распределение траектории потока аэросмеси в объеме камеры сгорания исследуемого котла. На рис. 4a можно видеть подачу аэросмеси из противогорелок как в положительном, так и в отрицательном направлениях относительно плоскости симметрии котла, а анализ рис. 4b показывает, что поток аэросмеси с продуктами горения имеет завихренный характер в области горелок и в нижней части топочной камеры. Последнее объясняется тем, что противоточные потоки, вдуваемые из горелочных устройств, направляясь с максимальной скоростью к центру камеры сгорания, соударяются. В этой области поток образует несколько вихрей с наличием возвратного течения вверх и вниз по пространству камеры сгорания (рис. 5a). Такой характер завихренности возникает вследствие турбулентности течения и за счет соударения встречных потоков аэросмеси из противогорелок. По направлению к выходу из пространства топочной камеры наблюдается постепенное сглаживание течения. В поворотной части камеры сгорания и на выходе из нее скорость течения лежит в интервале 4-8 м/с (рис. 5b).

В вихревой области с наибольшими изменениями полей скорости, то есть там, где интенсивно происходят процессы физико-химических превращений при горении пылеугольного топлива (область пояса горелок), наблюдаются и максимальные возмущения турбулентных потоков. Об этом свидетельствуют максимумы в распределении турбулентных характеристик процесса, таких как кинетическая энергия турбулентности k и ее диссипация  $\varepsilon$ , средние значения которых представлены на рис. 6. Как видно из рис. 6, кинетическая энергия турбулентности k, так же как и ее диссипация  $\varepsilon$ , достигают своих максимальных значений в области горелочных устройств, расположенных на высоте 4 метров, поскольку эта область является зоной столкновения пылеугольных потоков с наибольшим возмущением закрученного течения. Аэродинамика вихревых потоков оказывает наибольшее влияние на длину факела, его излучательную способность, а также на интенсивность процессов тепломассопереноса при сжигании пылеугольного топлива в топочной камере.



*Рис.* 5. Распределение вектора полной скорости в основных сечениях камеры сгорания: в области горелок (*a*) и в поворотной части камеры и на выходе из нее (*b*).





l — кинетическая энергия турбулентности (k), 2 — диссипация кинетической энергии турбулентности (є).

# Исследование характеристик теплообмена в камере сгорания промышленного котла

В процессе переноса тепла в камерах сгорания теплообмен излучением вносит наибольший вклад в суммарный теплоперенос. В зоне пламени вклад лучистого теплообмена составляет до 90 % и даже больше [37]. В связи с этим моделирование переноса излучения в реагирующих течениях является одним из наиболее важных этапов при расчетах процессов тепломассообмена в реальных топочных камерах. При сжигании пылеугольного топлива и мазута источником излучения является центральная область пламени, которая образуется вблизи поверхности частиц топлива. Источниками излучения в таком случае являются частицы кокса и золы, а также продукты сгорания.

При математическом описании лучистого теплообмена, как правило, выделяется область пространства, в котором движутся потоки пылегазовой смеси. Стенки этого пространства и вещество, заключенное в нем, поглощают и испускают излучение в инфракрасной и видимой областях. Величиной, характеризующий теплоперенос излучением, является спектральная интенсивность, которая определяется следующим соотношением [38]:

$$I_{\nu} = \lim_{\Delta A, \Delta \Omega \to 0} \left( \frac{\Delta E_{\nu,\Theta}}{\Delta A \cdot \Delta \Omega \cdot \cos \Theta} \right), \tag{19}$$

здесь  $\Delta E_{\nu,\Theta}$  — лучистая энергия с частотой  $\nu$ , испускаемая от элемента площади  $\Delta A$  в телесном угле  $\Delta \Omega$ , в направлении, определяемом косинусом угла  $\Theta$ .

В общем виде уравнение баланса энергии излучения записывается следующим образом:

$$\frac{\partial I_{\nu}}{\partial s} = -\left(K_{\rm abs} + K_{\rm sca}\right) \cdot I_{\nu} + K_{\rm abs} \cdot \frac{\sigma}{\pi} T^4 + \frac{K_{\rm sca}}{4\pi} \cdot \int_{4\pi} \left[P\left(\Omega_i \to \Omega\right) \cdot I_{\nu}\left(\Omega_i\right)\right] d\Omega_i, \quad (20)$$

где  $K_{abs}$ ,  $K_{sca}$  — оптические коэффициенты поглощения и рассеивания,  $\sigma$  — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура. Аналитическое решение интегро-дифференциального уравнения (20) получить невозможно. Однако можно использовать различные модели, которые применяются исследователями при проведении вычислительных экспериментов. Так, авторами для расчета теплообмена излучением в топочной камере исследуемого котла использовалась шестипоточная модель лучистого теплообмена, описанная в работе [39].

В результате проведения вычислительных экспериментов по исследованию теплообменных характеристик были получены профили температуры (рис. 7, 8), интенсивность тепловыделения при горении (рис. 9, 10), а также были определены радиационные тепловые потоки на основные тепловоспринимающие поверхности камеры сгорания котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ (рис. 11).



Рис. 7. Распределение температуры *T* в сечении горелок (*a*), в центральном продольном сечении камеры сгорания котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ (*b*). *a* — сечение *k* = 52 (*z* = 4 м), *b* — сечение *I* = 51 (*x* = 3 м).





На рисунках 7 и 8 приведены распределения температуры, характеризующие тепловое поведение пылеуголь-

ного потока в исследуемой топочной камере. Можно заметить, что температура достигает максимальных значений в области, близкой к месту расположения горелочных устройств, поскольку здесь, вследствие вихревого характера течения наблюдается максимальный конвективный перенос и, как результат, увеличивается время пребывания угольных частиц, что приводит к росту температуры в указанной зоне. Из рис. 8 видно, что на высоте 4 метров наблюдается также и минимум в средних значениях распределения температуры. Это объясняется тем, что в этой области располагаются горелочные устройства, через которые поступает пылеугольное топливо и окислитель с низкой начальной температурой, равной 290 °С. Поскольку горелки установлены на противоположных стенках и направлены навстречу друг к другу, то в центре топочной камеры в зоне соударения потоков аэросмеси эти потоки растекаются (рис. 4, 5). Часть потока уходит в зону холодной воронки, образуя два продольных вихря на высоте 2,5 метров, а часть потока посредством образующейся тяги направляется к выходу. В результате этих процессов на высоте 2,5 и 6,5 метров наблюдаются максимумы в средних значениях распределения температуры, а в самом сечении горелок на высоте 4 метров наблюдается минимум.



Рис. 9. Распределение интенсивности тепловыделения при горении Q<sub>chem</sub> в сечениях горелочных устройств (a) и в центральном продольном сечении исследуемой камеры сгорания (b).
a — сечение k = 52 (Z = 4 м), b — сечение J = 32 (Y = 3,36 м).

Рис. 10. Распределение интенсивности
тепловыделения при горении $Q_{\sf chem}$
по высоте камеры сгорания котла
БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ.
<i>1</i> — максимальные значения,
2 — средние значения.

Распределение интенсивности тепловыделения  $Q_{\rm chem}$ , при горении пылеугольного топлива в топочном пространстве, представлено на рис. 9, 10. Анализ рис. 9, 10 показывает, что интенсивность тепловыделения при горе-



нии  $Q_{\text{chem}}$ , достигает, как и следовало ожидать, максимального значения в области пояса горелок топки (~ 5567 кВт/м<sup>3</sup>). По мере продвижения пылеугольного потока к выходу интенсивность процессов горения ослабевает и на выходе из топочной камеры  $Q_{\text{chem}}$  составляет всего ~ 12 кВт/м<sup>3</sup>. Это говорит о завершении окислительных процессов, что подтверждается картиной распределения  $Q_{\text{chem}}$  в различных сечениях топочной камеры котла БКЗ-75 (рис. 9*b*).

На рисунке 11 представлены результаты моделирования радиационных тепловых потоков  $Q_{\rm rad}$  на основные тепловоспринимающие поверхности камеры сгорания котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ. Анализ рисунка показывает, что на всех основных тепловоспринимающих поверхностях падающий лучистый тепловой поток распределяется равномерно и составляет 90–100 кВт/м<sup>2</sup>. Это обусловлено тем, что все стенки топочной камеры котла расположены взаимно симметрично, а граничные условия на них заданы одинаковыми. Полученная картина распределения тепловых потоков на стенках камеры сгорания способствует анализу оптимального расположения топочных экранов при проведении оптимизации режимов работы исследуемого котла с целью исключения перегрева



*Рис. 11.* Распределение радиационных тепловых потоков *Q*<sub>rad</sub> на основные тепловоспринимающие поверхности камеры сгорания котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ.

этих экранов. Это позволит добиться равномерного нагрева стенок камеры, что в свою очередь будет благоприятно влиять на эффективный теплосъем с экранов котла и, следовательно, скажется на общем КПД котельной установки.

Таким образом, в настоящей работе методами трехмерного моделирования проведено комплексное исследование процессов тепломассопереноса в турбулентных течениях высокотемпературных реагирующих сред в областях реальных конструкций (ТЭС, ТЭЦ). Вычислительные эксперименты по исследованию тепловых процессов и аэродинамических характеристик течения проведены в топочной камере котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ при сгорании в ней высокозольного энергетического топлива. При использовании методов трехмерного моделирования учтено наибольшее количество явлений и факторов, влияющих на протекание реальных технологических процессов в камерах сгорания промышленных объектов. Представлена аэродинамическая картина исследуемой топочной камеры, построены температурные поля и распределения энергии, выделяющейся за счет химических реакций, а также получены значения радиационных тепловых потоков на основных тепловоспринимающих поверхностях камеры сгорания.

Результаты проведенных вычислительных экспериментов помогут оптимизировать способы сжигания низкосортного казахстанского угля и в то же время создать концепцию производства энергии с минимальным количеством вредных веществ.

#### Список литературы

- Müller H. Numerische Berechnung dreidimensionaler turbulenter Strömungen in Dampferzeugern mit Wärmeübergang und chemischen Reaktionen am Beispiel des SNCR-Verfahrens und der Kohleverbrennung // Fortschritt-Berichte VDI-Verlag. 1992. Vol. 6, No. 268. 158 p.
- Leithner R. Der Zero Emission Coal Alliance Prozess und ähnliche Kreisläufe // DECHEMA GVC-Jahrestagung. Karlsruhe. 2004. 201 p.
- 3. Askarova A., Bolegenova S., Maximov V., Beketayeva M., Safarik P. Numerical modeling of pulverized coal combustion at thermal power plant boilers // Thermal Sci. 2015. Vol. 24, Iss. 3. P. 275–282.
- 4. Аскарова А.С., Мессерле В.Е., Устименко А.Б., Болегенова С.А., Максимов В.Ю. Численное моделирование процесса горения угля, инициируемого плазменным источником // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 21, № 6. С. 779–786.
- 5. Askarova A.S., Bolegenova S.A., Bolegenova S., Bekmukhamet A., Maximov V., Beketayeva M. Numerical experimenting of combustion in the real boiler of CHP // Int. J. of Mechanics. 2013. Vol. 7. P. 343–352.
- 6. BP statistical review of world energy [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.bp.com/statisticalreview.
- 7. Аскарова А.С., Нагибин А.О., Мессерле В.Е., Устименко А.Б. Горение пылеугольного факела в топке с плазменно-топливной системой // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17, № 3. С. 467–476.
- 8. Аскарова А.С., Мессерле В.Е., Устименко А.Б., Болегенова С.А., Максимов В.Ю., Габитова З.Х. Численное моделирование горения пылеугольного топлива в камере сгорания энергетического котла // Теплофизика высоких температур. 2015. Т. 53, № 3. С. 445–452.
- 9. Gorokhovski M., Chtab-Desportes A., Voloshina I., Askarova A. Stochastic simulation of the spray formation assisted by a high pressure // 6-th Intern. Symposium on Multiphase Flow, Heat Mass Transfer and Energy Conversion. Book Series: AIP Conference Proceedings. 2010. Vol. 1207. P. 66–73.
- 10. Алексеенко С.В., Маркович Д.М., Дулин В.М., Чикишев Л.М. Исследование прецессии вихревого ядра в камерах сгорания // Теплофизика и аэромеханика. 2013. Т. 20, № 6. С. 695–704.
- Askarova A.S., Bekmukhamet A., Bolegenova S.A., Beketayeva M.T., Maximov V.Yu., Ospanova Sh.S., Gabitova Z.K. Numerical modeling of turbulence characteristics of burning process of the solid fuel in BKZ-420-140-7c combustion chamber // Int. J. of Mechanics. 2014. Vol. 8. P. 112–122.
- Leithner R. Energy conversion processes with intrinsic CO<sub>2</sub> separation // Transactions of the Society for Mining, Metallurgy and Exploration. 2005. Vol. 18. P. 135–145.
- 13. Гиль А.В., Старченко А.В. Влияние внутренней влаги углей на температурный уровень в топках энергетических котлов // Теплофизические основы энергетических технологий: сб. науч. тр. всеросс. научнопракт. конф. с междунар. участ., 24–26 июня 2010. Томск, С. 226–233.
- Burdukov A.P., Popov V.I., Faleev V.A. Study of mechanically activated coal combustion // Thermal Sci. 2009. Vol. 13, Iss. 1. P. 127–138.

- 15. Алексеенко С.В., Ануфриев И.С., Вигриянов М.С., Дулин В.М., Копьев Е.П., Шарыпов О.В. Сажепаровой режим горения жидких углеводородов: распределение скорости в факеле горелки // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 21, № 3. С. 411–414.
- Askarowa A.S., Buchmann M.A. Structure of the flame of fluidized-bed burners and combustion processes of high-ash coal // 18th Dutch-German Conf. on Flames, Germany, 1997. Vol. 1313. P. 241–244.
- Полежаев В.И., Бунэ А.В. Математическое моделирование конвективного тепломассообмена на основе уравнений Навье–Стокса. М.: Наука, 1987. 272 с.
- Launder B.E., Spalding D.B. The numerical computation of turbulent flows // Comp. Methods in Appl. Mech. and Eng. 1974. Vol. 3. P. 269–289.
- 19. Чернецкий М.Ю., Кузнецов В.А., Дектерев, А.А., Абаимов, Н.А., Рыжков, А.Ф. Сравнительный анализ влияния моделей турбулентности на описание процессов горения угольной пыли при наличии закрутки потока // Теплофизика и аэромеханика. 2016. Т. 23, № 4. С. 615–626.
- 20. Smoot L.D., Smith P.J. Coal combustion and gasification. U.S.A.: Springer, 1985. 444 p.
- 21. Гиль А.В., Старченко А.В., Заворин А.С. Применение численного моделирования топочных процессов для практики перевода котлов на непроектное топливо. Томск: STT, 2011. 184 с.
- 22. Кроу С., Шарма М., Сток Д. Численное исследование газокапельных потоков с помощью модели «капля–внутренний источник» // Теоретические основы инженерных расчетов. 1977. Т. 99, № 2. С. 150–159.
- **23. Патанкар С.** Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости // М: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.
- 24. Аскарова А.С., Мессерле В.Е., Устименко А.Б., Болегенова С.А., Болегенова С.А., Максимов В.Ю., Ергалиева А.Б. Уменьшение выбросов вредных веществ при сжигании пылеугольного топлива в камере сгорания котла БКЗ-160 Алматинской ТЭЦ с применением технологии «Overfire Air» // Теплофизика и аэромеханика. 2016. Т. 23, № 1. С. 131–140.
- 25. Harmor R.J. Kinetics of combustion of pulverized brown coal char // Combust. Flame. 1973. No. 21. P. 153–162.
- 26. Edelman R.B., Fortune O.F. A quasi-global chemical kinetic model for the finite rate combustion of hydrocarbon fuels with application to turbulent burning and mixing in hypersonic engines and nozzles // AIAA 7th Aerospace Sciences Meeting. AIAA Paper. 1969. No. 69–86.
- Magnussen B.F. On the mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion // Works 16th Int. Symp. on Combustion. Pitsburgh, 1976. P. 719–729.
- Field M.A., Gill D.W., Morgan B.B., Hawksley P.G.W. Combustion of pulverized coal. england: BCURA. Leatherhead, Surrey, 1967. P. 155–174.
- Görner K. Technische verbrennungssysteme grundlagen, modellbildung, simulation. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 1991. 198 p.
- 30. Саломатов В.В., Красинский Д.В., Аникин Ю.А., Ануфриев И.С., Шарыпов О.В., Энхжаргал Х. Экспериментальное и численное исследование аэродинамических характеристик закрученных потоков в модели вихревой топки парогенератора // Инженерно-физический журнал. 2012. Т. 85, № 2. С. 266–276.
- 31. Аскарова А.С., Карпенко Е.И., Мессерле В.Е., Устименко А.Б. Плазмохимическая активация горения твердых топлив // Химия высоких энергий. 2006. Т. 40, № 2. С. 141–148.
- 32. Vockrodt S., Leithner R., Schiller A., Askarowa A., Buchman M. Firing technique measures for increased efficiency and minimization of toxic emissions in Kasakh coal firing // 19th German Conf. on Flames, Germany, 1999. Vol. 1492. P. 93–97.
- 33. Аскарова А.С., Болегенова С.А., Максимов В.Ю., Бекмухамет А., Бекетаева М.Т., Габитова З.Х. Вычислительный метод исследования горения твердого топлива в камерах сгорания ТЭЦ // Теплофизика высоких температур. 2015. Т. 53, № 5. С. 792–798.
- 34. Askarova A.S., Karpenko E.I., Karpenko Yu.E., Messerle V.E., Ustimenko A.B. Mathematical modeling of the processes of solid fuel ignition and combustion at combustors of the power boilers // 7-th Int. Fall Seminar on Propellants, Explosives and Pyrotechnics. Theory and Practice of Energetic Materials. China, 2007. Vol. 7. P. 672–683.
- 35. Askarova A.S., Bekmukhamet A., Bolegenova S., Ospanova Sh., Symbat B., Maximov V., Beketayeva M., Ergalieva A. 3D modeling of heat and mass transfer during combustion of solid fuel in BKZ-420-140-7c combustion chamber of Kazakhstan // J. Applied Fluid Mechanics. 2016. Vol. 9, No. 2. P. 699–709.
- 36. Серант Ф.А., Гордеев В.В., Саломасов Ю.М., Коняшкин В.Ф., Квривишвили А.Р., Барташук Е.Г., Шихотинов А.В. Двухступенчатое сжигание высокозольного экибастузского угля на модернизированном котле ПК-39-2М энергоблока 325 МВт (ст. № 2) электростанции АО «ЕЭК» г. Аксу (Казахстан) // VIII Всеросс. конф. с междунар. участ. «Горение твердого топлива», 13–16 ноября 2012 г., Новосибирск, 2012. С. 92.1–92.9.
- Viskanta R., Mengüc M.P. Radiation heat transfer in combustion systems // Prog. Energy Combustion Sci. 1987. No. 13. P. 97–160.

- **38.** De Marco A., Lockwood F. A new flux model for the calculation of radiation furnaces // Italian Flame Days. Sanremo, 1975. P. 1–13.
- 39. Lockwood F., Shah N. An improved flux model for calculation of radiation heat transfer in combustion chambers // ASME–Paper. Salt Lake City. 1976. P. 2–7.
- **40.** Митор В.В., Кузнецов Н.В., Дубовский И.Е., Карасина Э.С. Тепловой расчет котельных агрегатов: нормативный метод. М.: Энергия, 1973. 297 с.
- **41.** Алияров Б.К., Алиярова М.Б. Сжигание казахстанских углей на ТЭС и на крупных котельных: опыт и перспективы. Алматы, 2011. 306 с.

Статья поступила в редакцию 24 февраля 2016 г., после переработки — 8 октября 2018 г., принята к публикации 11 декабря 2018 г.