

Қорытынды:

Біз бұл зерттеу жұмысымызда ядролық физика әдістерінің біріне саналатын изотопты рентген флуоресценциялық зерттеу әдісімен көмірдегі күл мөлшерін жылдам әрі дәл анықтауға болатындығын сол арқылы көмірді жақпай тұрып көмірдің сапасына алдын-ала баға беруге болатындығын көрсеттік. Бұл мақсатта Чехия елінде өндірілген РФЗ 123-1 анализаторы таптырмас құрал болатындығына көз жеткіздік. РФЗ әдісімен анықталған көмір сынамаларындағы күл мөлшері $Ad=9.05-18.95\%$ аралығында шықты. Осы көмір сынамаларындағы химиялық жолмен анықталған күлдің мөлшері және оның РФЗ нәтижелерімен арасындағы стандарттық ауытқушылық мөлшері $S1=0.748\%$.

Көмірге аса бай Қазақстандағы көмір кеніштерінде салмағы небәрі 10 кг-дай қолмен алып жүруге болатын осындай портативті жеңіл РФЗ анализаторларын пайдалану арқылы көмір кеніштеріндегі көмірдің күлін жақпай тұрып анықтау арқылы оның сапасына алдын-ала баға беру, сол арқылы көмірдің шикізат отын ретіндегі тиімділігін экономикалық тұрғыдан анықтауда бұл тиімді тәсіл бола алады деген қорытындыға келеміз.

Пайдаланылған әдебиеттер тізімі:

- 1 Gluskoter, H.J., *Mineral matter and trace elements in coal. Adv. Jn Chem. 141, 1973*
- 2 Valkovic, V., *Trace Elements in Coal, CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida, 1983.*
- 3 Clayton, C.O., Wormald, M.R *Coal analysis by nuclear methods. Int J.Appl.Rad.Isot.34,1983*
- 4 Dziunikowski, B., Stochalski, A., *Rapid determination of coal ash content by means X-ray fluorescence and scattering. J.Radioanal. Chem, 77,1983*
- 5 Arikan P., Zararsiz, A., Efe, N., *Detremination of ash in Turkish coal using back-scattering in X-ray fluorescence techniques. (Nuclear techniques and mineral resour. Proc. Of Symp. Vienna, 1990), IAEA, 1991*
- 6 Boyce, I.S., Clayton, C.G., Page, D., *Some considerations relating to the accuracy of measuring the ash content of coal by X-ray backscattering. Nucelar techniques and Mineral resources (Proc.Symp.Vienna,1977)*
- 7 Venkatesware, R.N., et all., *Elemental analysis of coal ash using energy dispersive X-ray fluorescence. X-ray Spectrometry.16., 1987.*
- 8 Баймолда Д., *Рентген флуоресценциялық зерттеу әдісін көмір өндірісінде қолдану. Ғылыми монография. Павлодар, 2012*
- 9 *World Energy Council – World Energy Resources: 2013 Survey.*
- 10 *ҚР-ның көмір өнеркәсібін дамытудың 2020 жылға дейінгі кезеңге арналған тұжырымдамасы. <http://adilet.zan.kz/kaz/docs/P080000644>*

УДК 662.87

МРНТИ 44.31.29

М.Т. Бекетаева¹, З.Х. Габитова², К.А. Касымова³, А. Септемирова⁴

¹PhD, *Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики при Казахском национальном университете имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан,*

²PhD, *Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан,*

^{3,4}*магистрант Казахского национального университета имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СГОРАНИЯ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ

Аннотация

Целью работы является исследование процессов сгорания угольной пыли в энергетических устройствах Республики Казахстан. Результаты проведенных исследований позволят определить аэродинамику течения, тепломассообменные характеристики технологических процессов, происходящих в топочных камерах, получить новые численные данные о сложных процессах тепломассопереноса при горении пылеугольного топлива в реальных топочных камерах, действующих ТЭЦ РК. В работе использованы новейшие информационные технологии компьютерного 3D моделирования, которые позволяют заменить или исключить проведение дорогостоящих и трудоемких натуральных экспериментов на угольных ТЭС. Численное моделирование, включающее термодинамическое, кинетическое и трехмерное компьютерное моделирование процессов тепломассопереноса при сжигании пылеугольного топлива позволит найти оптимальные условия для постановки адекватной физико-математической и химической модели технологического процесса горения. Проведение

комплексного исследования позволят оптимизировать процессы воспламенения, газификации и сжигания казахстанских высокозольных углей.

Ключевые слова: Горение, компьютерное моделирование, реагирующая смесь, угольная пыль, энергетические устройства, численный эксперимент.

Аңдатпа

М.Т. Бекетаева¹, З.Х. Габитова², К.А. Қасымова³, А. Септемирова⁴

¹PhD, әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университетінің эксперименттік және теориялық физика ғылыми зерттеу институты, Алматы, Қазақстан,

²PhD, әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университетінің физика-техникалық факультеті, Алматы, Қазақстан,

^{3,4} әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университетінің физика-техникалық факультетінің магистранты, Алматы, Қазақстан

ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ҚҰРЫЛҒЫЛАРДА ШАҢ ТӘРІЗДІ КӨМІРДІҢ ЖАНУ ПРОЦЕСТЕРІН ЗЕРТТЕУ

Жұмыстың мақсаты - Қазақстан Республикасының энергетикалық құрылғыларында көмір шаңының жану процестерін зерттеу. Зерттеудің нәтижелері жану камераларында пайда болатын технологиялық процестердің ағынының, жылу және массалық трансформациясының аэродинамикасын анықтауға мүмкіндік береді, ҚР-дағы қолданыстағы ЖЭО-ның нақты жану камераларында көмірді жану кезінде жылу және масса тасымалдаудың кешенді процестеріне қатысты жаңа сандық деректерді алуға мүмкіндік береді. Бұл құжат көмірмен жұмыс істейтін жылу электр станцияларына арналған қымбат және уақытты толық ауқымды эксперименттерді ауыстыратын немесе жойатын компьютерлік 3D модельдеудің ең соңғы ақпараттық технологиясын қолданады. Тозанданған көмірді жану кезінде термодинамикалық, кинетикалық және үш өлшемді компьютерлік модельдеуді қоса, сандық модельдеу жану технологиялық процесінің тиісті физикалық, математикалық және химиялық моделін құру үшін оңтайлы жағдайларды табуға көмектеседі. Жан-жақты зерттеу жүргізу Қазақстанның жоғары күлді көмірлерін жағу, газдандыру және жану процестерін оңтайландырады.

Түйін сөздер: Жану, компьютерлік модельдеу, реакцияланушы қоспалар, шаңкөмір, энергетикалық құрылғылар, сандық эксперимент

Abstract

STUDY OF COAL DUST COMBUSTION PROCESSES IN ENERGY DEVICES

Beketayeva M.T.¹, Gabitova Z.H.², Kassymova K.A.³, Septemirova A.⁴

¹PhD, Scientific Research Institute of Experimental and Theoretical Physics at Al-Farabi KazNU, Almaty, Kazakhstan

²PhD, Physics and technology department at Al-Farabi KazNU, Almaty, Kazakhstan

^{3,4}student of Master Programme, ²Physics and technology department at Al-Farabi KazNU, Almaty, Kazakhstan

The aim of the work is to study the coal dust combustion processes in energy devices of the Republic of Kazakhstan. Results of the research will allow to determine the flow aerodynamics, heatmasstransfer characteristics of technological processes, to obtain new numerical data on the complex processes of heat-and-mass transfer during the combustion of pulverized coal in real combustion chambers of the existing CHP RK. The paper uses the latest technology of computer 3D modeling, which will replace or eliminate the expensive and time-consuming full-scale experiments on coal-fired TPP. Numerical simulation, including thermodynamic, kinetic and three-dimensional computer simulation of heatmasstransfer processes during combustion of pulverized coal will help to find optimal conditions for setting an adequate physical, mathematical and chemical model of the technological process of combustion. Conducting a comprehensive study will optimize the processes of ignition, gasification and combustion of Kazakhstan's high-ash coals.

Keywords: Combustion, computer simulation, reacting mixture, coal dust, energy devices, numerical experiment.

Введение

Казахстан богат природными ресурсами, включая уголь, нефть, природный газ, уран и обладает значительным возобновляемым потенциалом от ветровой, солнечной, гидроэнергетики и биомассы. Быстрое экономическое развитие Казахстана, связанное с увеличением спроса на электроэнергию к 2020 году потребует значительной модернизации существующих энергетических объектов в дополнение к строительству новых электростанций мощностью 20 ГВт.

В настоящее время страна зависит от ископаемого топлива для выработки электроэнергии. Тепловые электрические станции приводят к выбросам парниковых газов и влияют на здоровье человека и окружающую среду. Согласно последним данным, представленным энергетическим агентством в 2015 году, выбросы CO₂ достигли 12,8 т CO₂ на душу населения [1-3].

Генерируется гидроэлектростанциями 13% электроэнергии Казахстана, а 90% - тепловыми электростанциями (75% угольными электростанциями).

В целях сокращения выбросов и удовлетворения растущего спроса на электроэнергию необходимо разработать и внедрить новые экономичные и экологически чистые (безопасные) технологии, а также модернизировать существующие объекты энергоснабжения. В последние десятилетия наблюдается повышенный интерес к прогнозированию возможности получения выбросов от промышленного сжигания угля. Это связано с отсутствием способности вычислять уровень выбросов на основе решения отдельных уравнений даже при использовании компьютеров. Тем не менее, исследования образования вредных веществ в системах сжигания угля очень распространено.

Моделирование сжигания угля

Для математического моделирования процессов, происходящих в устройствах горения при сжигании угля, используются компьютерные программы, основанные на численном решении трехмерных уравнений переноса энергии и вещества с учетом химических реакций. Все эти математические модели представляют собой сложную систему нелинейных трехмерных уравнений в частных производных. Они состоят из уравнений непрерывности среды, состояния идеального газа и движение двухфазной среды, уравнений переноса тепла, химическая кинетика и диффузии для компонентов реагирующей смеси, принимая во внимание радиационного и турбулентного, описанных в k - ϵ модели турбулентности.

Во всех моделях рассматривается упрощенная модель химического сгорания, где нет промежуточных реакций и образования промежуточных компонентов, учитываются только выход летучих веществ из угля, их окисление до оксидов углерода и выгорание углерода.

Компьютерные программы для моделирования сжигания угля позволяют нам определить компоненты скорости $\{u, v, w\}$, температурные поля, давления, концентрации продуктов сгорания. Программа FLOREAN используется для описания газовой и твердой фаз и использует подход Эйлера, в котором предполагается, что скорость твердых частиц совпадает со скоростью газа, т.е. эффектом скольжения можно пренебречь. Сложные физико-химические процессы, возникающие при сжигании топлива, описываются уравнениями сохранения [4-5], уравнениями сохранения массы, сохранения углового момента и энергии для газовой и твердой фаз. Газовый поток рассматривают в Эйлеровой системе, в то время как динамику твердой фазы рассматривают в Лагранжевой системе.

Поскольку нет источников массы, происходит только преобразование составляющих компонентов. В этом случае уравнение сохранения массы или уравнение неразрывности принимает вид (где первый член уравнения описывает нестационарность потока, второй член - конвективный транспорт):

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

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

Первый член уравнения описывает не стационарность потока, второй – конвективный транспорт, третий и четвертый члены – поверхностные силы (градиент давления и молекулярную диффузию), пятый – массу (гравитация), шестой – внешние массовые силы.

Уравнение сохранения энергии учитывает перенос энергии за счет теплопроводности, диффузии и вязкой диссипации:

$$\frac{\partial (\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho h u_i) = \frac{\partial p}{\partial t} + u_i \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial}{\partial x_{ij}} h_j J_j + \left(\tau_{ij} \right)_{eff} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} + S_h$$

где $h = \sum_j m_j h_j$ – энтальпия для идеальных газов, $h = \sum_j m_j h_j + P/\rho$ – энтальпия для несжимаемой жидкости газа, $h_j = \int_{T_{ref}}^T c_{p,j} dT$ – энтальпии потока J_j - диффузия вещества, $k_{eff} = k_l + k_t$ – эффективная теплопроводность (сумма ламинарной и турбулентной теплопроводности), $(\tau_{ij})_{eff}$ – эффективный тензор напряжений, S_h – источник, учитывающий теплоту химических реакций и других объемных источников энергии.

Для изучения турбулентного потока горения промышленного пламени используются усредненные уравнения сохранения, дополненные двухпараметрической $k-\varepsilon$ -моделью турбулентности.

Выделение летучего остатка описывается реакцией первого порядка. В этом случае процесс пиролиза может быть аппроксимирован первым порядком реакции разрушения угольной частицы, которая протекает равномерно по всему объему. После удаления летучих углерода и инертная зола остаются в коксовых остатках. Гетерогенные реакции с углеродом остатка кокса контролируются двумя конкурирующими процессами: диффузия кислорода к поверхности частицы и химическая кинетика окисления углерода на поверхности частиц. Моделирование образования и уменьшение оксидов азота описывается двумя стадиями, которые не включены в общую модель сжигания топлива.

В общей модели предполагается, что влиянием химических реакций азотсодержащих соединений можно пренебречь. Задача усложняется из-за взаимодействия турбулентности и кинетики процесса горения в связи с тем, что турбулентные реактивные потоки характеризуются резкими колебаниями температуры и плотности при сильном влиянии экзотермических реакций процесса горения. Для моделирования сгорания газовой фазы используется простая химическая реакционная система, разработанная Спалдингом. Модель описывает глобальный характер процесса горения, когда сложный механизм химической кинетики заменяется бесконечно быстрыми химическими реакциями между топливом и окислителем.

Оксид углерода является продуктом сгорания летучих веществ и выгорания остатка кокса, образование которого зависит от температуры и размера частиц [6]. В общем, CO может превращаться в CO₂. При описании процесса формирования CO, сгорания летучих веществ, который также включает в себя CO и CO₂, может быть представлено как двухступенчатый реакции. CO будет формироваться в больших количествах в органических соединениях, когда топливо сгорает не полностью. Важно присутствие оксида углерода, действуя как индикатор несовершенства, неэффективности процесса горения. В камерах сгорания эти уравнения часто не работают. Поэтому выброс углекислого газа является одной из наиболее сложных проблем моделирования.

Во время сжигания угля оксиды азота получают потенциально десятками видов и сотен вовлеченных реакций, которые тесно связаны с механизмами сжигания угля при нагревании, выделением летучих веществ, сжиганием кокса в турбулентном двухфазном потоке со значительными тепловыми выбросами.

Образование и разложение азотистых веществ NO_x учитывает влияние минерального состава в топливной композиции, которое (в частности, зола) влияет на разложение топлива и образование оксида азота в процессах пиролиза. При сжигании угольной пыли в кинетической модели образования топлива NO учитываются пиролиз угля, гомогенное сжигание углеводородов и гетерогенное сжигание кокса. Корреляции учитываются при высоких температурах в камере сгорания. Таким образом, результаты вычислительного эксперимента отражают наиболее реальную картину происходящих процессов формирования вредных выбросов пыли и газа азотсодержащих веществ при сжигании низкосортных углей. В электроэнергетике нашей страны преобладает использование низкосортного угля с высоким содержанием золы (до 35-50%).

Основные характеристики котла и угольного топлива

В качестве объекта исследования выбрана камера сгорания котла БКЗ-75-39ФБ Шахтинской ТЭЦ, действующая в Карагандинской области. Котел этой марки имеет блочную конструкцию, он может использоваться при использовании каменного угля, торфа, антрацита. В таблице 1 показаны основные геометрические параметры камеры сгорания энергокотла БКЗ-75. Для численного расчета использовались первичные и граничные условия, а также метод контроля объема для решения дифференциальных уравнений [7-9].

Топочной камеры котла БКЗ-75 оснащена четырьмя осевыми лопастными вихревыми пылеугольными горелками, которые расположены на одной ступени двух горелок на боковых стенках камеры.

Уголь Карагандинского бассейна трудно обогатить. Их внутренний компонент почти не поддается разрушению (органическая часть состоит из растительного вещества, выведенного из минеральных примесей, осажденных растительными остатками, и инфильтрационной части минеральных солей, содержащихся в воде, циркулирующей через трещины).

Таким образом, их обогащение не оправдывает экономические затраты, связанные с процессом обогащения. Характеристики угля марки КР-200 представлены ниже в таблице 2.

Таблица 1. Основные геометрические параметры камеры сгорания котла БКЗ-75

Название	Обозначение	Единица измерения	Значение
Высота камеры сгорания	(Z) Нт	m	16,75
Ширина камеры сгорания	(X) бт	m	6
Глубина камеры сгорания	(Y) Гт	m	6,6
Площадь передней и задней стен	Ffr, Fp	m ²	90,675
Площадь правой боковой стенки	Fs1	m ²	92,4
Площадь левой боковой стенки	Fs2	m ²	110,55
Потолочные стены	Fs	m ²	27,72
Площадь стены	Fh	m ²	7,26
Площадь поперечного сечения канала воздушной струи в горелке	Fa	m ²	0,12
Площадь поперечного сечения канала вторичного воздуха в горелке	Fsa	m ²	0,25

Таблица 2. Характеристики карагандинского угольного сорта КР-200

Название	Обозначение	Единица измерения	Величина
Вид угля	KR-200	-	-
Тонина помола	R90	%	20
Плотность угля	ρ	kg/m ³	1350
Теплота сгорания	Qy	kJ/kg	3,4162·10 ⁴
Зольность	Ac	%	35,10
Выход летучих веществ	VГ	%	22,00
Влажность	WP	%	10,60
Углерод	C	%	43,21
Водород	H2	%	3,6
Кислород	O2	%	5,24
Сера	S	%	1,04
Азот	N	%	1,21

Результаты исследования сгорания пылевидного угля в энергетическом котле БКЗ

Аэродинамика двухфазных турбулентных потоков при сжигании топлива из пылеугольного угля вызывает характер утечки всего процесса горения. Аэродинамическая основа всего процесса горения в печных устройствах представляет собой перенос вихря [10]. Основная роль аэродинамической структуры вихревого потока - идеальная смесь пылеугольного топлива и окислителя (кислород воздуха). Из анализа трехмерного распределения, показанного на рисунке 1, можно сказать, что поток воздушной смеси с продуктами сгорания имеет вихревой характер в области горелок и в нижней части камеры сгорания при высоте от 2 м до 8 м.

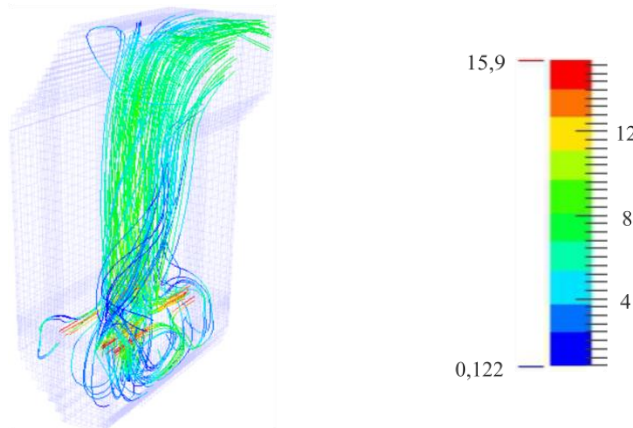


Рисунок 1. Трехмерное распределение вектора полной скорости в объеме камеры сгорания котла БКЗ-75-39ФБ Шахтинская ТЭЦ

Видно, что вектор полной скорости имеет свои максимальные значения ($V \sim 16$ м/с) в области пояса горелки. Это связано с тем, что токи счетчика, выдуваемые из устройств горелки, направлены на максимальную скорость до центра пространства печи, сталкиваются. И здесь, рассекая на несколько вихрей, образуется обратный поток вверх и вниз по пространству печи.

Этот характер завихренности возникает из-за турбулентности из-за взаимодействия воздушной смеси с окислителем. Наличие объемного вихревого потока в центральной области камеры сгорания благоприятно влияет на сжигание пылевидного угля (передача тепла и массопереноса) [11-13].

Значения температуры достигают своих максимальных значений в области ядра факела на высоте около трех метров. Здесь, из-за вихревой природы потока, направленного вверх и вниз по объему печи, наблюдается максимальный конвективный перенос и увеличение времени пребывания частиц угля, в результате чего наблюдается повышение температуры происходит в этой зоне (рис. 2). Топливная смесь и окислитель (воздух), поступающие из противоположных горелок, из-за вихревой природы тока образуют высокотемпературное ядро факела в нижней части камеры сгорания (рис. 2а). На высоте камеры сгорания можно наблюдать постепенное снижение температуры до выхода из печи (рис. 2б). На выходе ($X=7$ м) из камеры сгорания химические процессы значительно ослаблены, температурные поля выравниваются во вращающейся области печи, средняя температура составляет $T=941$ °С, а на выходе из пространства сгорания $T=879$ °С. Анализируя рисунок 2в, хорошо согласуется с данными теоретического расчета котла и данных ТЭС [14-15].

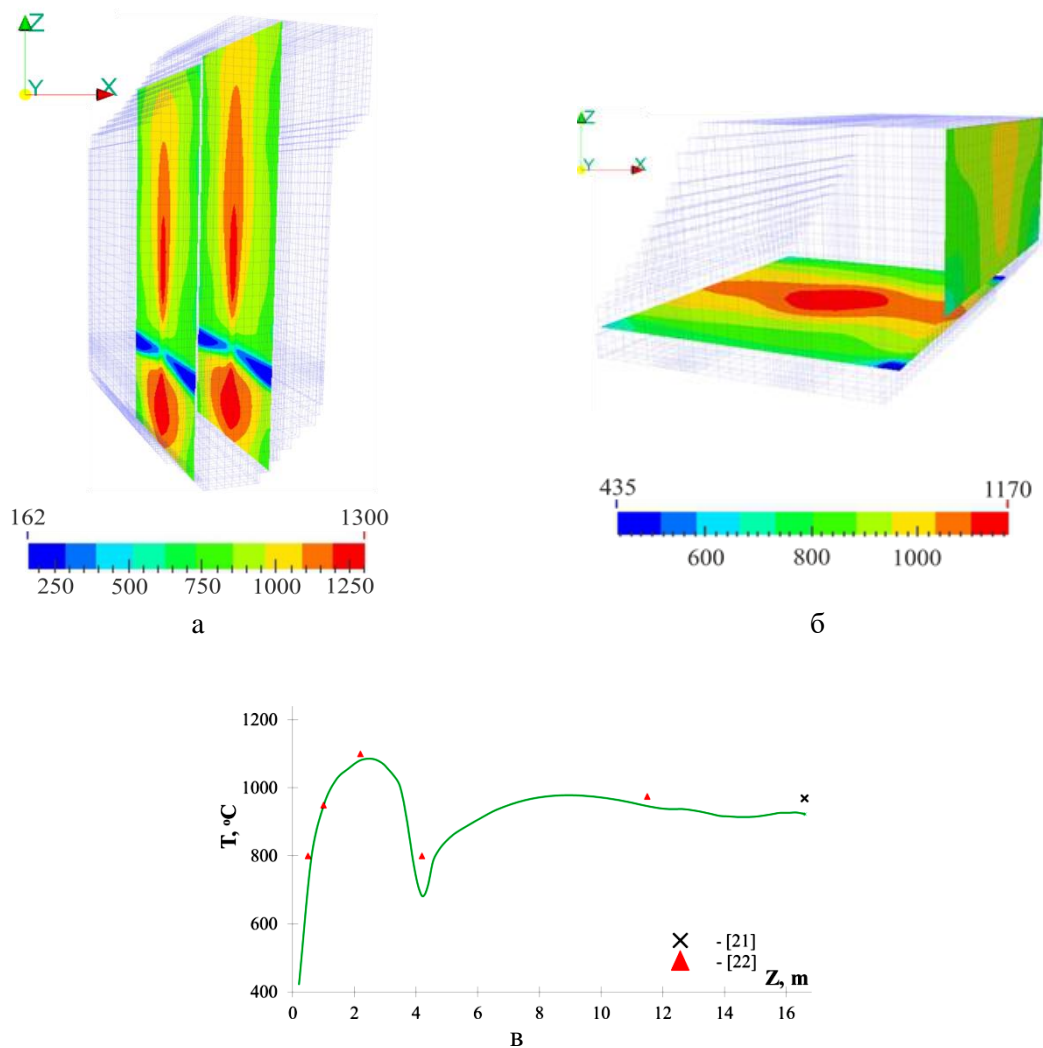


Рисунок 2. Трехмерное распределение температуры в 2 сечениях (а) $X=1,76$ м и $X=4,22$ м; (б) $Z=12,65$ м и $X=7$ м камеры сгорания и (в) сверка результатов с известными данными [14-15]

Распределение концентрации CO_2 в центральной части (рис. 3а) меньше, чем на выходе (рис. 3б). Заключительные этапы полного сжигания энергетического топлива с наибольшим количеством образования продуктов сгорания CO_2 происходят в выходной зоне. На рис. 3в показана проверка полученных результатов с известными данными [15] от реальных ТЭС. Можно сказать, что максимальное значение концентраций CO_2 находится в хорошем соответствии.

Трёхмерное компьютерное моделирование сжигания топлива из пылевидного угля позволяет лучше понять проблемы вычислительной гидродинамики (CFD), математическое и численное моделирование процессов сжигания твердого топлива и механизм химического взаимодействия продуктов сгорания. Результаты проведенных исследований способствуют решению актуальных проблем теплофизики, технической физики, теплоэнергетики и экологической безопасности, поскольку они позволяют дать рекомендации по оптимизации процессов горения низкосортных энергетических топлив для того, чтобы повысить энергоэффективность и улучшить экологическую ситуацию и создать «чистую» энергетическую продукцию.

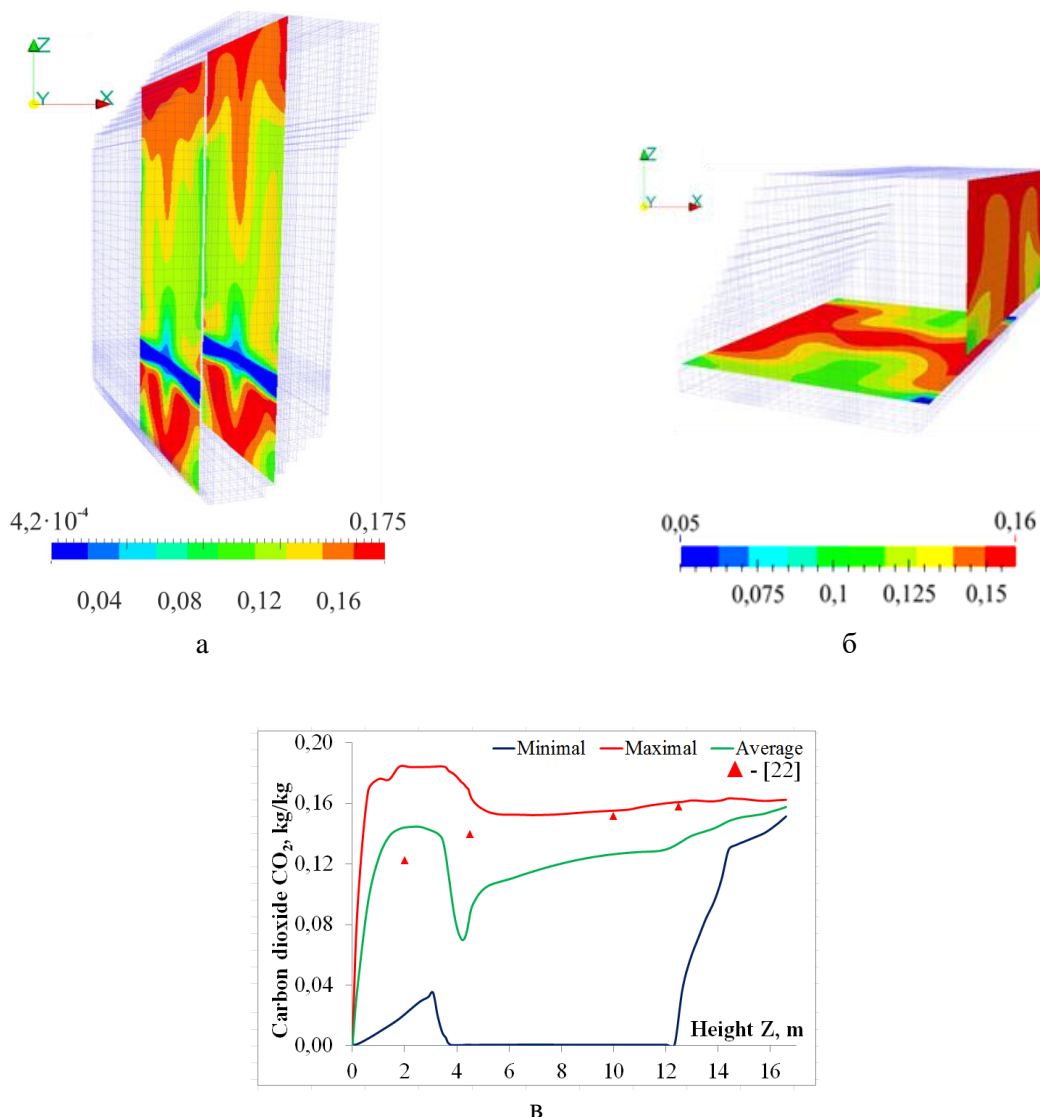


Рисунок 3. Трёхмерное распределение концентраций CO_2 в 2 поперечных сечениях (а) $X=1,76$ м и $X=4,22$ м; (б) $Z=12,65$ м и $X=7$ м камеры сгорания и (в) проверка результатов с известными данными [15]

Заключение

Результаты проведенных исследований позволяют предложить новые физико-математические и химические модели низкосортного сжигания угля в реальных камерах энергетических объектов. Используемый метод дает адекватный характер процессов теплопереноса и образования выбросов вредных веществ при сжигании низкокачественного карагандинского угля марки KR-200 с

высоким содержанием золы (более 35%) в камере сгорания существующий энергетический котел БКЗ- 75-39 Шахтинской ТЭЦ.

Как показано на рисунках выше, концентрации диоксида углерода CO₂ находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными, полученными от реальной тепловой электростанции [15]. Сравнивая результаты численного эксперимента, проведенные в этой работе с экспериментальными данными из ТЭС, мы можем предложить, что наблюдаемый метод исследования процессов горения является надежным. Результаты, выполненные в этой работе, и используемый метод вычислительного исследования могут быть полезны при разработке новых, а также в улучшении существующих камер сгорания энергетических котлов ТЭС.

Работа была выполнена в рамках Гранта Министерства образования и науки Республики Казахстан №АР05133590 «Создание новых компьютерных технологий 3D моделирования процессов теплопереноса в высокотемпературных физико-химически реагирующих средах» (2018-2020).

1 International Energy Agency [Электрон.ресурс]. Available at: <https://www.iea.org> (дата обращения: 12.01.2019)

2 KIER. Spatial organization of territory in Kazakhstan for the period until 2030. Kazakh Institute of Economic Research 2014. Available at: www.economy.kz (дата обращения: 22.01.2019)

3 Arynov AA Condition and quality indicators of Ekibastuz coals. - Vestnik KarGU, 2007. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-himicheskogo-sostava-zoly-uglya-na-ekspluatatsionnye-parametry-topok-1> (дата обращения: 22.01.2019)

4 Askarova A.S., Bolegenova S.A., Beketayeva M.T., etc. Computational Method for Investigation of Solid Fuel Combustion in Combustion Chambers of a Heat Power Plant // High Temperature, 2015, Vol. 53, No. 5. – 752–758 pp.

5 Leithner R. Numerical Simulation. Computational Fluid Dynamics CFD: Course of Lecture. – Braunschweig, 2006. - 52 p.

6 Leithner R., Askarova A., Bolegenova S., Bolegenova S., Maximov V., Ospanova S., Ergaliev A., Nugymanova A., Beketayeva M. Computational modeling of heat and mass transfer processes in combustion chamber at power plant of Kazakhstan // MATEC Web of Conferences 76, 06001 (2016). CSCC 2016. – P. 5.

7 Leithner R., Müller H. CFD studies for boilers // Second M.I.T. Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics – Cambridge, 2003. - P.172.

8 Kang Z.Z., Ding S.X., Shuai Z.A., Sun B.M. Modeling of coal combustion in the CFB by the EDC model with the global reaction mechanism // International journal of numerical methods for heat & fluid flow. – 2018. – Vol. 28, Iss. 4. – P. 963-981.

9 Launder B., Spalding D. The numerical computation of turbulent flows // Comp. Meths. Appl. Mech. Eng. - 1974. - Vol.3. - P. 269-289.

10 Gao S.P., Zhai L.R., Qin Y.H., Wang Z.Q., Zhao J.T., Fang Y.T. Investigation into the Cleavage of Chemical Bonds Induced by CO₂ and Its Mechanism during the Pressurized Pyrolysis of Coal // Energy & fuels. – 2018. – Vol. 32, Iss. 3. – P. 3243-3253.

11 Ma H.H., Zhou L., Ma S.X., Wang Z.J., Cui Z.G., Zhang W., Li J. Reaction Mechanism for Sulfur Species during Pulverized Coal Combustion // Energy & fuels. – 2018. – Vol. 32, Iss. 3. – P. 3958-3966.

12 Askarova A.S., Bolegenova S.A., Beketayeva M.T., etc. Analysis of formation harmful substances formed as a result of burning the low-grade coal in the combustion chamber of the industrial boiler of Kazakhstan using CFD-code FLOREAN // 17th Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction (PRES 2014). Prague, Czech Republic, August 23-27, 2014. 1308. P.7.160.

13 Askarova A.S., Heierle E.I., Bolegenova S. A., Manatbayev R., Maximov V.Ju., Bolegenova S.A, Beketayeva M.T., Yergaliyeva A.B. CFD study of harmful substances production in coal-fired power plant of Kazakhstan // Bulgarian Chemical Communications. ISSN: 0324-1130. – 2016. – Vol. 48. – Special Issue E. – pp. 260-265.

14 Askarova A., Safarik P., Bolegenova S., Bolegenova S., Maximov V., Beketayeva M., Ospanova Sh., Maksutkhanova A., Kassymova K., Nugymanova A. Research of Formation and Destruction of NO_x During Combustion of Low-Grade Coal in CHP // International Conference on Electronic, Control, Automation and Mechanical Engineering (ECAME 2017). ISBN: 978-1-60595-523-0. – Sanya, China, November 19–20, 2017. – P. 731-735.

15 Устименко Б.П., Алияров Б.К., Абубакиров Е.К. Огневое моделирование пылеугольных топок. – М.: Наука, 1982. – 212 с.