

УДК 621.039.6; 536.46:533.6

Процессы тепломассопереноса в топочных камерах при горении термохимически активированного топлива*

**В.Е. Мессерле¹⁻³, А.С. Аскарлова^{1,2}, С.А. Болегенова^{1,2}, П. Шафарик⁴,
В.Ю. Максимов¹, С.А. Болегенова², А.О. Нугыманова¹**

¹*Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы*

²*НИИ экспериментальной и теоретической физики, Алматы, Казахстан*

³*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

⁴*Чешский технический университет в Праге, Чехия*

E-mail: nugymanova.aizhana@gmail.com

В статье приведены результаты численных исследований влияния термохимической активации пылеугольных потоков на процессы тепломассопереноса, происходящие в областях реальной геометрии (камеры сгорания) при сжигании в них энергетического топлива. Получены аэродинамическая картина течения, скоростные, температурные и концентрационные поля, анализ которых позволяет сделать вывод о том, что плазменная активация топлива повышает эффективность его сжигания и снижает выбросы вредных веществ в атмосферу.

Ключевые слова: численное моделирование, тепломассоперенос; скоростные, температурные и концентрационные поля; плазменно-топливные системы, термохимическая активация.

В настоящее время наблюдается повышенный интерес к исследованию процессов тепломассопереноса в высокотемпературных средах при наличии горения. Такие процессы широко распространены. Они 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.

В связи с принятой концепцией «энергетической безопасности Казахстана» и разработкой «чистых» технологий сжигания топлива особую актуальность приобретает изучение процессов тепломассопереноса, происходящих в топочных камерах пылеугольных тепловых электростанций (ТЭС), составляющих основу энергетики Республики Казахстан. Дорогостоящие эксперименты, проводимые на существующих огневых моделях, не позволяют строго выполнять все условия, которые соответствуют реальному процессу горения топлива. Использование численных методов моделирования и вычислительных

* Исследование ПТС выполнено в рамках гос. задания ИТ СО РАН (АААА-А17-117030910025-7), исследование процессов тепломассопереноса в топочных камерах при горении термохимически активированного топлива выполнено за счет грантового финансирования МОН РК (AP05132988, AP05133590, BR05236730, AP05130731 и AP05130031).

экспериментов предоставляет возможность добиться геометрического и физического подобия исследуемых объектов, соблюдения всех основных параметров и режимных условий, адекватных принятой на реальном энергетическом объекте технологической схеме сжигания.

На современном этапе развития энергетики Республики Казахстан остро встает вопрос о повышении эффективности процессов, связанных с производством энергии, с целью минимизации пылегазовых выбросов и экономичного использования оборудования и топлива. В последнее время в нашей стране и за рубежом происходит переориентация в использовании энергетических ресурсов, которая должна привести к существенному сокращению потребления нефти и природного газа в энергетике и к энерготехнологическому использованию жидких топлив. В этой связи необходимо проводить оптимизацию процессов сжигания традиционного энергетического топлива (в качестве которого рассматривается высокосольный казахстанский уголь), разработку и внедрение «чистых» технологий получения энергии с целью защиты окружающей среды от вредных пылегазовых выбросов и обеспечения эффективности энергетических установок.

Эффективным решением вышеозначенной проблемы является использование технологии плазменной газификации низкосортных твердых топлив [1]. Отличительной особенностью плазмохимических процессов переработки органического сырья является их высокая селективность: получение целевых продуктов (синтез-газа, водорода), которое сопровождается лишь незначительным образованием побочных веществ и примесей. Технология использования плазменно-топливных систем (ПТС) заключается в нагреве аэросмеси с помощью плазменного факела до температуры выделения летучих и частичной газификации углерода коксового остатка. В результате независимо от качества исходного угля из аэросмеси получают высокорекреационное двухкомпонентное топливо (горючий газ и коксовый остаток), которое далее в топке котла смешивается со вторичным воздухом. При этом оно интенсивно воспламеняется и стабильно горит без использования дополнительного мазута или природного газа, традиционно сжигаемых для растопки котлов из холодного состояния и стабилизации горения факела низкосортного энергетического угля.

В настоящей статье представлены результаты применения современной технологии плазменного воспламенения и стабилизации пылеугольного топлива на казахстанских ТЭЦ с использованием методов трехмерного моделирования, что позволяет оптимизировать процессы при сжигании высокосольного казахстанского энергетического топлива, уменьшить вредные пылегазовые выбросы в атмосферу (оксиды углерода, оксиды азота и др.), создать способ получения «чистой» энергии.

Термохимическая подготовка пылеугольного топлива к сжиганию реализуется путем установки плазматронов [2–5] на футерованный канал аэросмеси горелки, которая тем самым преобразуется в ПТС (рис. 1). Для проведения численных экспериментов были выбраны камеры сгорания котлов действующих казахстанских ТЭЦ: БКЗ-420 Алматинской ТЭЦ-2 и БКЗ-160 Алматинской ТЭЦ-3. Эти котлы отличаются друг от друга по мощности, геометрии топочной камеры, ее размерам, способу подачи топлива и окислителя, по компоновке горелочных устройств и типу ПТС [6–12]. Котел БКЗ-420 паропроизводительностью 420 т/ч на фронтальной стенке топки оборудован шестью вихревыми пылеугольными горелками, расположенными в два уровня по три горелки в ярусе (рис. 2). Крайние горелки в ярусе повернуты к центру топки на 8 градусов. Расход экибастузского угля на одну горелку составляет 12 т/ч. Для проведения термохимической активации топлива вместо двух горелок первого яруса и одной горелки второго яруса установлены три ПТС. Котел БКЗ-160 паропроизводительностью 160 т/ч оборудован горелками с тангенциальной подачей топлива. По боковым сторонам топочной камеры расположены

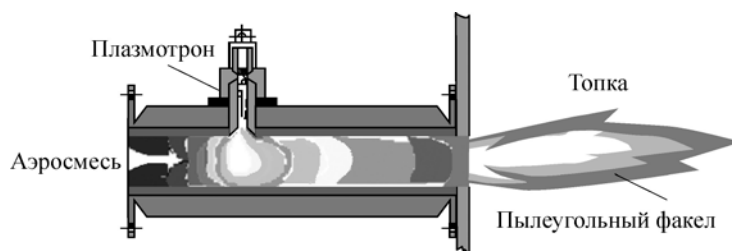


Рис. 1. Плазмотрон и схема его установки на прямоточной горелке.

четыре блока прямоточных щелевых горелок, направленных по касательной к окружности диаметром 0,78 м (рис. 3). Каждая горелка имеет один канал аэросмеси и два канала вторичного воздуха, расположенные сверху и снизу канала аэросмеси и разделенные футерованными простенками.

Исходные данные для выполнения численных экспериментов по сжиганию топлива в топочных камерах БКЗ-420 Алматинской ТЭЦ-2 и БКЗ-160 Алматинской ТЭЦ-3, а также все необходимые параметры топочных камер и угольной пыли (до и после плазменной обработки) представлены в табл. 1–3.

Результаты трехмерного моделирования влияния термохимической активации пылеугольных потоков на процесс горения пылеугольного факела в топочных камерах котлов БКЗ-420 и БКЗ-160 получены с использованием метода контрольных объемов, применяемого для численного решения дифференциальных уравнений, описывающих тепло-массоперенос в топочной камере, и подробно изложенного в работах [13–27]. Метод контрольного объема основан на разбиении топочной камеры рассматриваемого котла

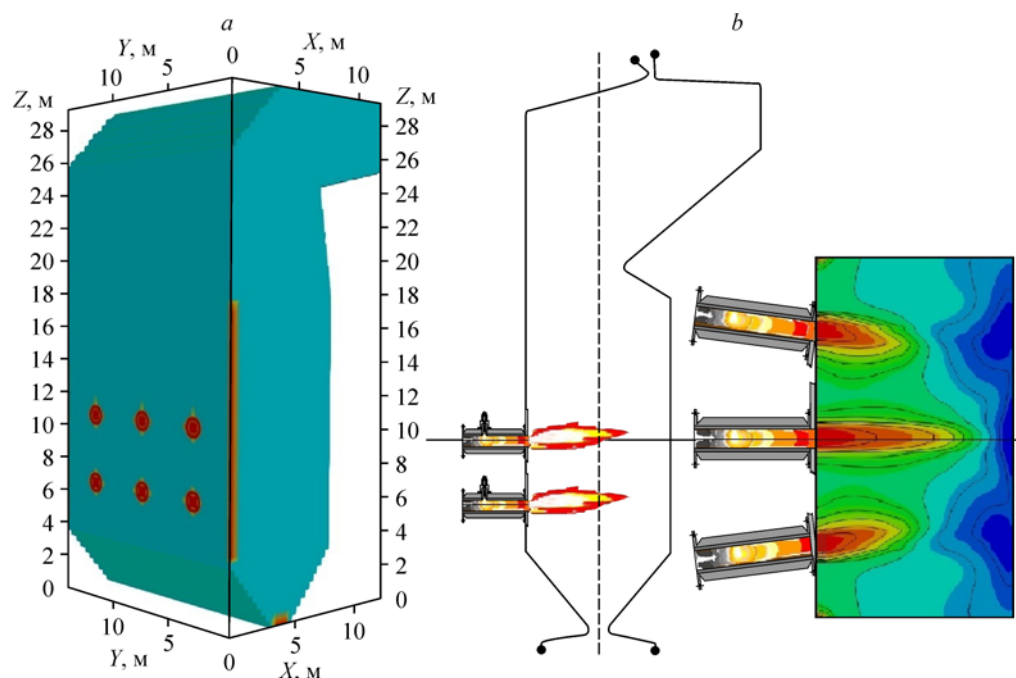


Рис. 2. Геометрия (a) и компоновка горелками (b) котла БКЗ-420 Алматинской ТЭЦ-2.

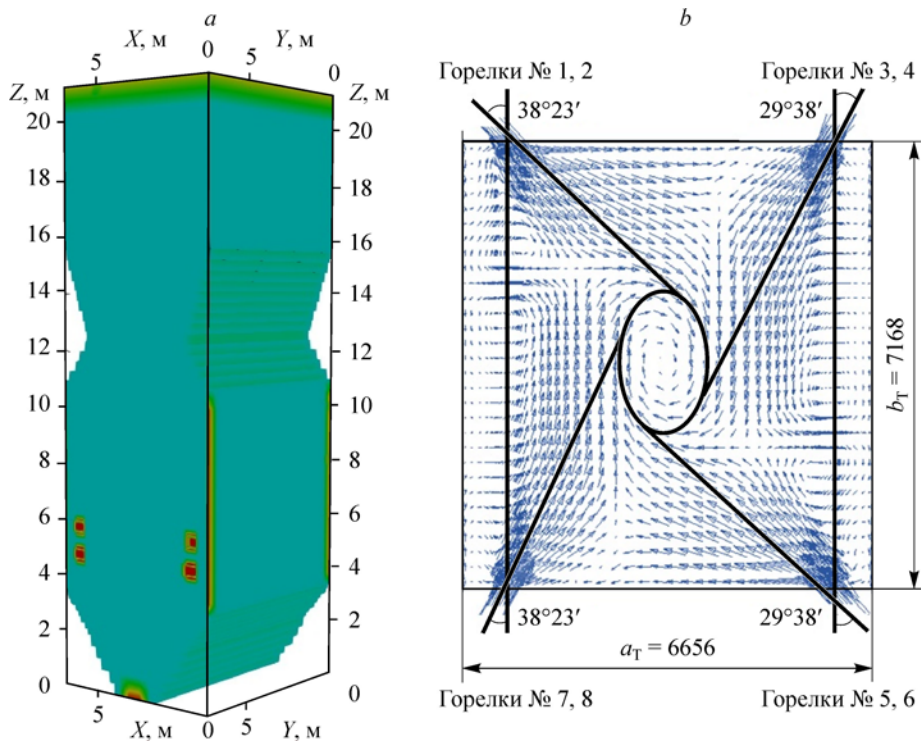


Рис. 3. Геометрия (а) и компоновка горелками (б) котла БКЗ-160 Алматинской ТЭЦ-3.

на малые объемы, по которым интегрируются дифференциальные уравнения математической модели. Количество контрольных объемов зависит от геометрии топочной камеры, ее размеров, расположения горелочных и плазменных устройств.

Таблица 1

Исходные данные для моделирования камеры сгорания БКЗ-420 Алматинской ТЭЦ-2

Наименование	Обозначение	Единицы измерения	Значение
Паропроизводительность	D	т/ч	280÷450
Теплопроизводительность котла	Q_k	Гкал/ч	160÷255
Расход топлива на котел	B_y	т/ч	48÷72
Число горелок на котле (двухпоточных)	n_r	шт	6
Расход топлива на один поток горелки	B_r	т/ч	4÷6
Диаметр пылепровода к горелке	\varnothing_p	м	0,53
Температура аэросмеси	t_a	°С	90÷130
Температура горячего воздуха	$t_{гв}$	°С	280÷340

Таблица 2

Исходные данные для моделирования топочной камеры котла БКЗ-160 Алматинской ТЭЦ-3

Наименование	Обозначение	Единицы измерения	Значение
Расход топлива на котел	B_y	т/ч	30,296
Расход топлива на горелку	B_r	т/ч	3,787
Температура аэросмеси	t_a	°С	250
Количество горелок	n_r	шт	8
Количество ярусов	N	шт	2

Таблица 3

Исходные данные экибастузского угля до и после плазменной обработки

Состав исходной угольной пыли, масс. %		Состав продуктов плазменной активации пылеугольного потока				
		Состав газовой фазы	об. %	кг/ч	Состав газовой фазы, масс %	
W^{P*}	7,0	H ₂ O	1,84	232,9	A^{C*}	85,78
A^P	40,9	CO ₂	13,9	4295	C^C	14,22
S^P	0,8	CO	10,63	2097		
C^P	41,1	CH ₄	0,22	24,83		
H^P	2,8	C ₆ H ₆	0,43	235,5		
O^P	6,6	H ₂	2,01	28,39		
N^P	0,8	N ₂	70,86	13980		
Температура аэросмеси, К	423	O ₂	0,15	33,44		
		Температура газа, К	1074			
Скорость потока, м/с	15,0	Температура частиц, К	1077			
		Скорость потока, м/с	41,9			

* Индексы P и C означают, что состав исходной газовой пыли рассчитан на рабочую и сухую массы соответственно.

На рис. 4 представлен общий вид топочных камер котлов БКЗ-420 и БКЗ-160, оборудованных ПТС, и разбивка их на контрольные объемы. Расчетная область зависит от размеров топочных камер и для БКЗ-420 составляет 261008 контрольных объемов (72×139×126), а для БКЗ-160 — 177472 контрольных объемов (59×32×94). Для котла БКЗ-420 (рис. 4а) были исследованы три режима работы топочной камеры: первый — традиционное сжигание, когда топка работает со стандартными пылеугольными горелками; второй — установлено три плазматрона и они воздействуют на пылеугольный поток в трех горелках: в двух крайних горелках нижнего яруса и в центральной горелке верхнего яруса; третий — плазматроны установлены во всех шести горелках двух ярусов (рис. 5). Применительно к топочной камере котла БКЗ-160 (рис. 4б) исследованы два случая: традиционное сжигание пылеугольного топлива и горение угля с установленными ПТС в двух противоположных горелках нижнего яруса. В результате проведенных численных экспериментов были получены аэродинамическая картина течения (распределение вектора полной скорости), температурные и концентрационные поля оксидов углерода CO и азота NO по всему объему топочных камер котлов БКЗ-420 и БКЗ-160.

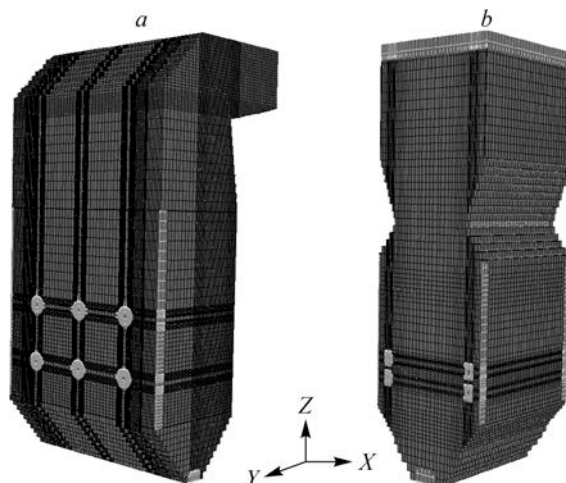


Рис. 4. Общий вид топочных камер котлов БКЗ-420 (а), БКЗ-160 (б) и разбивка их на контрольные объемы.

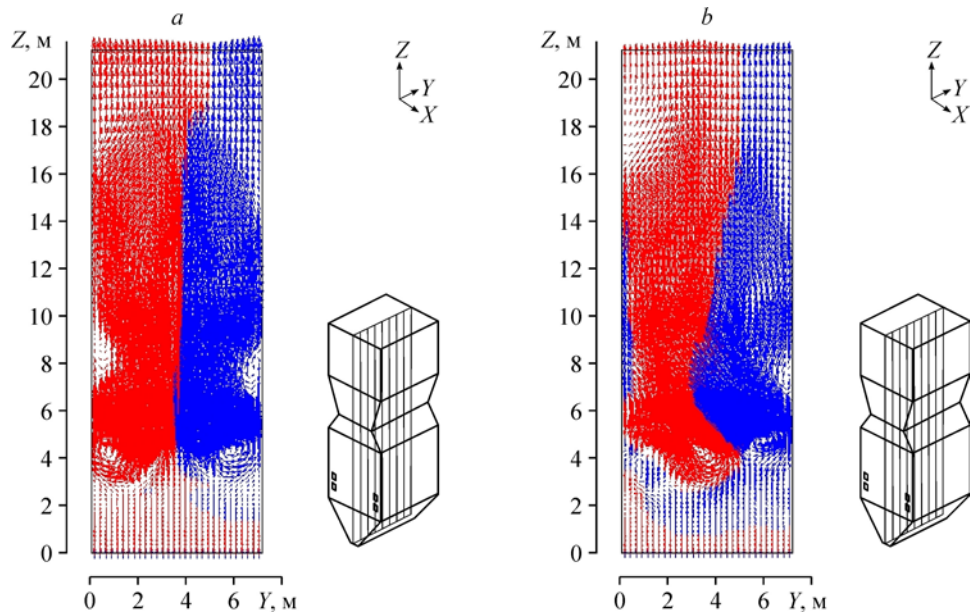


Рис. 5. Поле вектора полной скорости в продольном сечении $I = 33$ ($X = 3,16$ м) камеры сгорания котла БКЗ-160 Алматинской ТЭЦ-3.
a — традиционное сжигание топлива, *b* — 2 ПТС.

Анализ рис. 5–7, где представлено поле вектора полной скорости для каждого из котлов, показывает, что активация пылеугольного потока оказывает значительное влияние на поле течения: на распространение реагирующей струи в топке, процессы подмешивания в струе, на размеры и формы факела. В объеме топки котла БКЗ-420 потоки двухкомпонентного высокорекреационного топлива, полученного с помощью плазменной активации (рис. 6*b*, 6*c*), распространяются в соответствии с законами аэродинамики

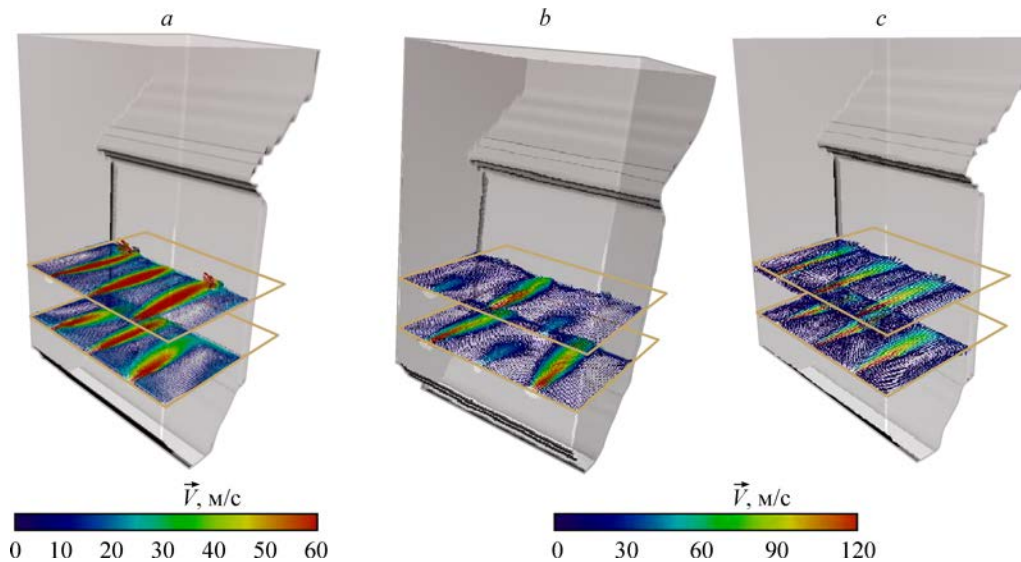


Рис. 6. Поле вектора полной скорости в области пояса горелок топочной камеры котла БКЗ-420 Алматинской ТЭЦ-2.
a — традиционное сжигание, *b* — 3 ПТС, *c* — 6 ПТС.

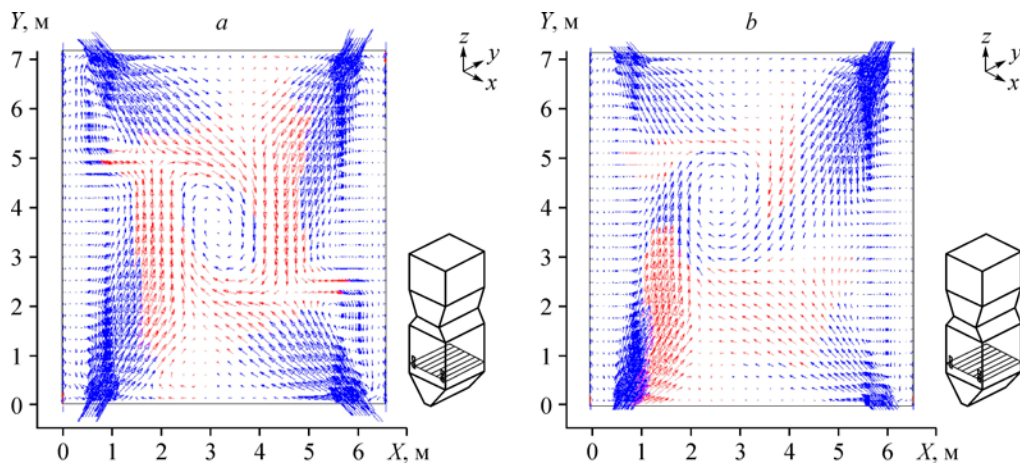


Рис. 7. Распределение вектора полной скорости в области расположения горелок топочной камеры котла БКЗ-160 (сечение $K = 32$ ($Z = 4,81$ м)) Алматинской ТЭЦ-3.

a — традиционное сжигание топлива, *b* — 2 ПТС.

и являются тепловыми источниками для аэросмеси, подаваемой через горелки, не оснащенные системами плазменного воспламенения. Таким образом, для одной и той же угольной пыли в объеме топки имеются два вида топлива: традиционное (аэросмесь) и аэросмесь, термохимически подготовленная к интенсивному сжиганию. С увеличением числа плазменных горелок для котла БКЗ-420 наблюдается более четкая граница движения термохимически активированных потоков из горелок, оснащенных плазматронами (рис. 6*b*, 6*c*). Под действием плазменной активации пылеугольного топлива усиливается турбулизация потоков и в значительной степени ускоряется массо- и теплообмен, а усиливающиеся при этом смесеобразование и нагрев смеси интенсифицируют процесс горения.

На рис. 5 представлено поле вектора полной скорости в продольном сечении камеры сгорания котла БКЗ-160, а на рис. 7 — в области пояса горелок. Традиционно потоки пылеугольного топлива, вторичного и третичного воздуха, поступая в топочное пространство, создают объемное завихренное течение в центре камеры сгорания, что несомненно улучшает процесс смесеобразования и повышает интенсивность теплообмена. Это, в свою очередь, приводит к увеличению времени пребывания угольных частиц в камере сгорания и к уменьшению химического и механического недожога за счет их более полного выгорания. 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 (рис. 5*a*). 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, имеющего место в топочной камере, достигают своих экстремальных значений, на что указывает анализ представленных ниже температурных и концентрационных полей.

При использовании плазменно-топливных систем (рис. 5*b* и 7*b*) в двух противоположных горелках нижнего яруса топочной камеры котла БКЗ-160 наблюдается увеличение скорости потока аэросмеси и термохимически газифицированного топлива во всем объеме топки. Это приводит к значительной турбулизации потока (особенно в центральной части камеры сгорания), благодаря чему происходит подмешивание и воспламенение потоков, исходящих из обычных горелок. Анализ этих рисунков позволяет сделать вывод о том, что вследствие увеличения скорости вдоль ПТС длина факела заметно возрастает и основное вихревое течение, обусловленное тангенциальной подачей аэросмеси,

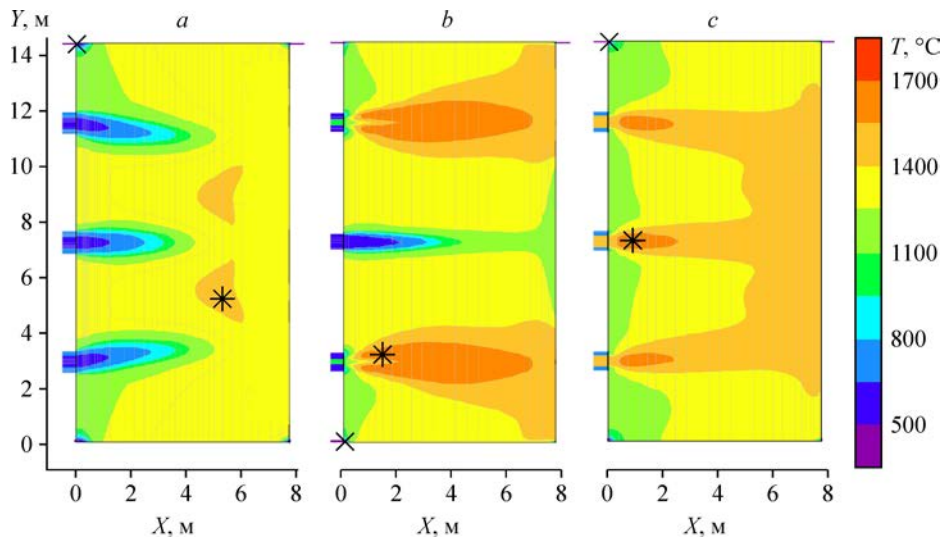


Рис. 8. Поле температуры в плоскости сечения $K = 32$ ($Z = 4,81$ м) горелок нижнего яруса топочной камеры котла БКЗ-420 Алматинской ТЭЦ-2.

a — традиционное сжигание, b — 3 ПТС, c — 6 ПТС.

вторичного и третичного воздуха, смещается, что несомненно влияет на форму ядра факела (см. далее рис. 9b). Таким образом, анализ рис. 5, 7 указывает на существенное различие в распределении скоростей для двух исследуемых случаев (традиционного сжигания топлива (без ПТС) и с двумя ПТС), что в дальнейшем отразилось на температурных и концентрационных полях.

Рисунки 8, 9 иллюстрируют температурные поля в области расположения горелок нижнего яруса котлов БКЗ-420 и БКЗ-160. Можно отметить, что по сравнению с использованием обычного пылеугольного потока среднее значение температуры в этой области

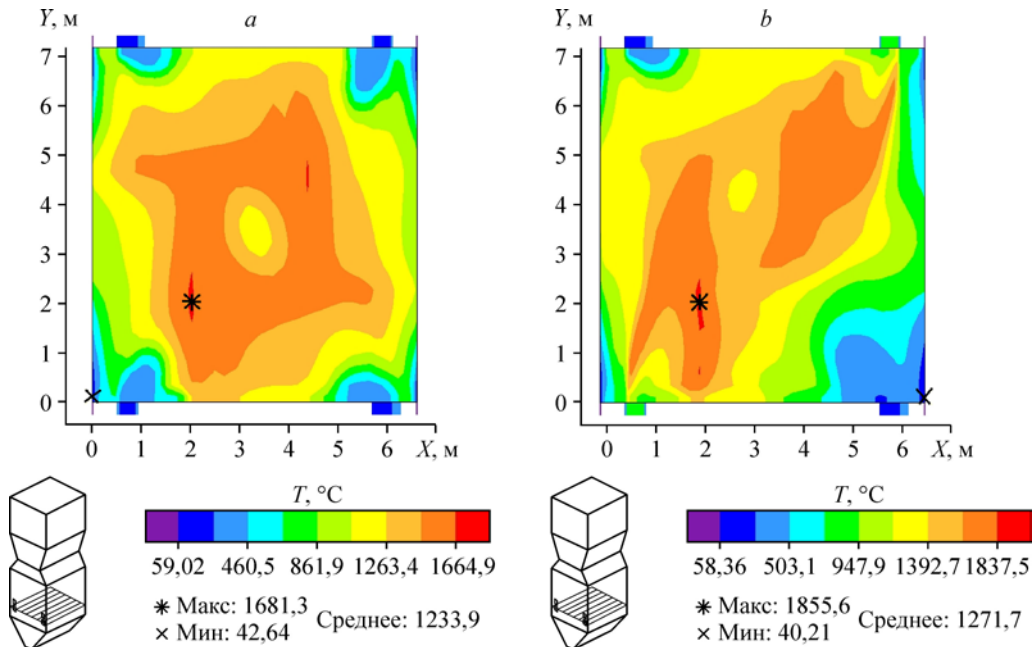


Рис. 9. Распределение температуры в области расположения горелочных устройств нижнего яруса топочной камеры котла БКЗ-160 (сечение $K = 32$ ($Z = 4,81$ м) Алматинской ТЭЦ-3.

a — традиционное сжигание топлива, b — 2 ПТС.

с увеличением числа термохимически активированных потоков увеличивается и составляет для котла БКЗ-420 без активации 1530 °С, при наличии трех активированных потоков — 1640 °С, при наличии шести активированных потоков — 1680 °С. Для котла БКЗ-160 в области пояса горелок средняя температура для традиционного сжигания равна 1234 °С, а при двух термохимически активированных потоках она составляет 1272 °С. Таким образом, можно сделать вывод о том, что плазменная активация приводит к быстрому нагреву и воспламенению аэросмеси и к смещению фронта горения к месту расположения систем плазменной активации угольных потоков. Область высоких температур при увеличении числа активированных плазмой потоков смещается к центру симметрии топки, при этом у боковых поверхностей также наблюдается более высокий уровень температур. Кроме того, ускорение прогрева и воспламенения топлива с увеличением числа термохимически активированных потоков ведет к более быстрой стабилизации высокоинтенсивных процессов горения.

На рис. 10 представлен сравнительный анализ распределения средней в сечении температуры по высоте топочной камеры для двух исследуемых режимов: когда в камеру сжигания поступает обычное топливо и топливо, прошедшее термохимическую плазменную подготовку. Во втором случае наблюдается смещение местоположения ядра факела и увеличение зоны максимальных температур. Увеличение температуры в ядре факела и снижение ее на выходе оказывает существенное влияние на химические процессы образования продуктов горения, поскольку температура является основным фактором, влияющим на скорость реакции горения компонентов топливной смеси.

Распределение концентрации оксида углерода (СО) по высоте топочных камер котлов БКЗ-420, БКЗ-160 и сравнительный анализ для исследуемых случаев установки ПТС представлены на рис. 11 (все результаты приведены к нормальным условиям). Оксид углерода сконцентрирован преимущественно в зоне основного распространения топливного потока из горелок, т.е. там, где присутствует углерод топлива. При увеличении плазменно-активированных потоков и, соответственно, вследствие увеличения содержания СО в поступающем высокорекреационном двухкомпонентном потоке, в плоскости сечения горелок наблюдаются максимальные значения СО, а на выходе его концентрация уменьшается. Так, концентрация СО на выходе для котла БКЗ-420 при традиционном сжигании составляет 191 мг/м³, для 3-х активированных потоков — 156 мг/м³, для 6-ти — 142 мг/м³, а для котла БКЗ-160 она при традиционном сжигании составляет 225,81 мг/м³, для 2-х плазменно-активированных потоков — 187,88 мг/м³.

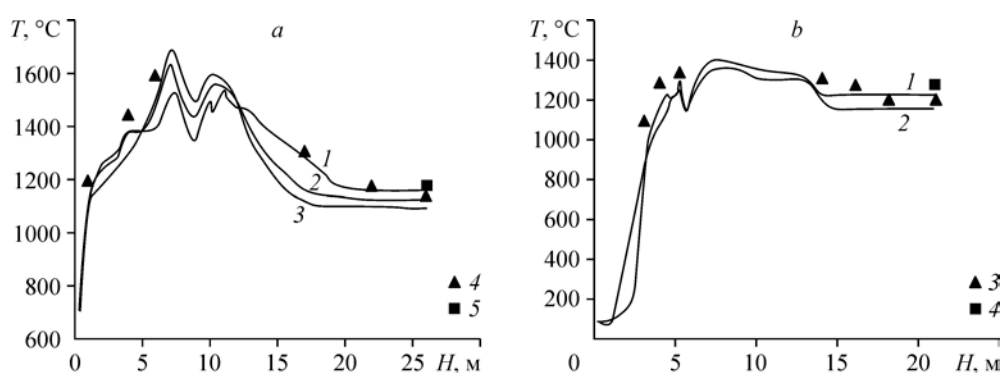


Рис. 10. Распределение температуры по высоте топочных камер котлов БКЗ-420 Алматинской ТЭЦ-2 (а) и БКЗ-160 Алматинской ТЭЦ-3 (б).

а: 1 — традиционное сжигание топлива, 2 — 3 ПТС, 3 — 6 ПТС, 4 — результаты расчетов [11, 15, 20, 27], 5 — данные экспериментов [28–29]; б: 1 — традиционное сжигание топлива, 2 — 2 ПТС, 3 — результаты расчетов [7, 30], 3 — данные экспериментов [28–29].

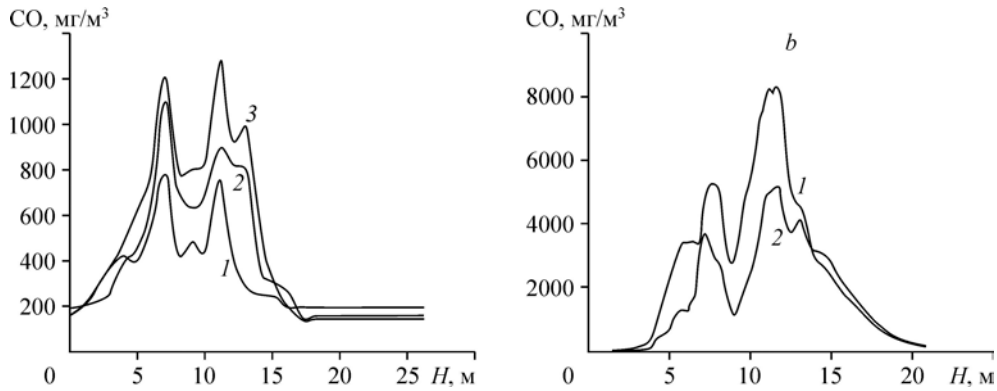


Рис. 11. Распределение концентрации оксида углерода CO по высоте топочных камер котлов БКЗ-420 Алматинской ТЭЦ-2 (а) и БКЗ-160 Алматинской ТЭЦ-3 (b).

а: 1 — традиционное сжигание топлива, 2 — 3 ПТС, 3 — 6 ПТС;
 б: 1 — традиционное сжигание топлива, 2 — 2 ПТС.

На рис. 12 представлены поля концентраций оксидов азота (NO) по высоте камер сгорания котлов БКЗ-420, БКЗ-160. Основное газообразование NO происходит в области распространения потоков из горелок. При этом характер распределения кривых на этом участке неоднозначен, что говорит о сложном процессе образования оксидов азота в этой области [31–34] и о влиянии плазменной активации на формирование NO. Видно, что использование плазменных горелок приводит к снижению суммарной концентрации NO на выходе из топочного пространства и для котла БКЗ-420 при традиционном сжигании составляет 507 мг/м^3 , а при 3-х и 6-ти термохимически активированных потоках — 456 мг/м^3 и 407 мг/м^3 соответственно. Что касается котла БКЗ-160, то средняя концентрация NO при традиционном сжигании на выходе равна $522,8 \text{ мг/м}^3$, при двух плазменно-активированных потоках — $444,5 \text{ мг/м}^3$. Это подтверждает рис. 13, на котором представлены картины трехмерного распределения концентраций оксида азота NO на выходе из топочной камеры ($K = 102$, $h = 20,96 \text{ м}$). В этой области минимальное значение концентрации составляет $\text{NO}_{\min} = 484,6 \text{ мг/м}^3$ для традиционного сжигания и $383,4 \text{ мг/м}^3$ —

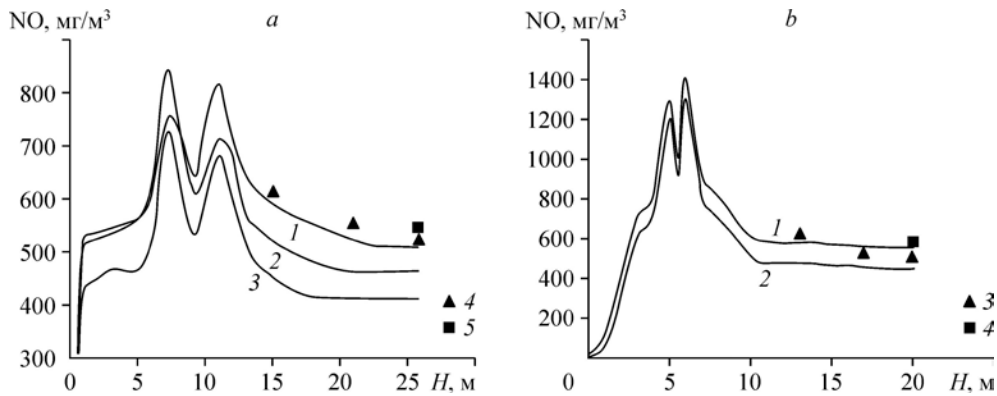


Рис. 12. Распределение концентрации оксидов азота NO по высоте топочных камер котлов БКЗ-420 Алматинской ТЭЦ-2 (а) и БКЗ-160 Алматинской ТЭЦ-3 (b) и сравнение с экспериментальными данными.

а: 1 — традиционное сжигание топлива, 2 — 3 ПТС, 3 — 6 ПТС, 4 — результаты расчетов [11, 5, 20, 27], 5 — данные экспериментов [28, 29]; б: 1 — традиционное сжигание топлива, 2 — 2 ПТС, 3 — результаты расчетов [7, 30], 4 — данные экспериментов [28, 29].

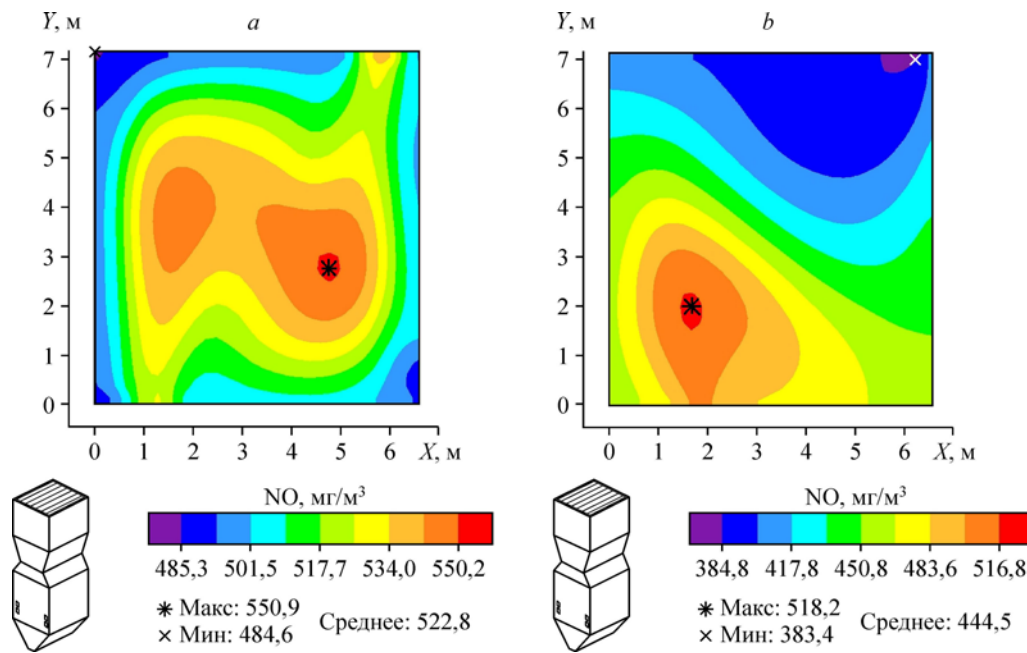


Рис. 13. Распределение концентрации оксида азота NO на выходе из камеры сгорания ($h = 20,96$ м) котла БКЗ-160 в сечении $K = 102$ ($Z = 20,96$ м).

a — традиционное сжигание топлива, b — 2 ПТС.

для двух плазменно-активированных потоков. Полученные результаты хорошо согласуются с нормами выбросов NO, принятых на ТЭЦ. Предельно допустимая концентрация для оксидов азота NO, принятая в Республике Казахстан к 2016 году, составляет 850 мг/м^3 . Таким образом, можно сделать вывод о том, что установка ПТС в топочных камерах энергетических котлов значительно улучшает экологические показатели ТЭС.

Заключение. Представлены результаты исследования влияния термохимической активации пылеугольных потоков на процессы теплопереноса, происходящие в областях реальной геометрии (камеры сгорания) при сжигании в них энергетического топлива. Численные эксперименты проведены с использованием методов трехмерного моделирования. Сравнительные численные исследования процессов традиционного сжигания угля с плазменной активацией его горения в топочном пространстве показали удовлетворительное качественное и количественное согласование опытных и расчетных данных по основным параметрам процесса горения угля (температура, концентрации оксидов углерода и оксидов азота в продуктах сгорания). Исследовано влияние плазменной термохимической обработки топлива на основные характеристики процессов горения и установлено, что метод термохимической активации пылеугольных потоков позволяет в значительной степени оптимизировать процесс сжигания низкосортных высокозольных углей в топочных камерах ТЭС и существенно снизить выбросы вредных веществ (NO и CO) в окружающую среду.

Полученные результаты численного моделирования позволяют создать высокоэкономичные технологии по сжиганию низкосортных топлив в топочных камерах действующих ТЭС; предложить наилучшие конструктивные и компоновочные решения по внедрению систем плазменной активации и выработать ряд рекомендаций по использованию предварительной термохимической подготовки топлива; оптимизировать процесс горения высокозольного пылеугольного топлива с целью уменьшения выбросов вредных веществ и создания тепловых электростанций на «чистом» и эффективном использовании угля.

Список литературы

1. Messerle V.E., Ustimenko A.B. Solid fuel plasma gasification // *Advanced Combustion and Aerothermal Technologies* / Eds. N. Syred, A. Khalatov. Springer, 2007. P. 141–156.
2. Messerle V.E., Ustimenko A.B., Lavrichshev O.A. Comparative study of coal plasma gasification: simulation and experiment // *Fuel*. 2016. Vol. 164. P. 172–179.
3. Мессерле В.Е., Устименко А.Б., Аскарлова А.С., Нагибин А.О. Горение пылеугольного факела в топке с плазменно-топливной системой // *Теплофизика и аэромеханика*. 2010. Т. 17, № 3. С. 467–476.
4. Мессерле В.Е., Устименко А.Б., Аскарлова А.С., 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. Buchmann M., Askarova A. Structure of the flame of fluidized-bed burners and combustion processes of high-ash coal // *Proc. of 18th Dutch-German Conf. on Flames: Gesell Energietechn., «Combustion and Incineration» VDI Berichte*. 1997. Vol. 1313. P. 241–244.
6. Karpenko E.I., Messerle V.E., Ustimenko A.B., Karpenko Yu.E., Askarova A.S. Mathematical modeling of the processes of solid fuel ignition and combustion at combustors of the power boilers // *Proc. 7th Int. Fall Seminar on Propellants, Explosives and Pyrotechnics, Xian*. 2007. Vol. 7. P. 672–683.
7. Мессерле В.Е., Устименко А.Б., Болегенова С.А., Аскарлова А.С., 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. 131–141.
8. Beketayeva M., Gabitova Z., Bekmukhamet A., Bolegenova S.A., Askarova A.S., Bolegenova S.A., Maximov Yu.V. Control harmful emissions concentration into the atmosphere of megacities of Kazakhstan Republic // *Proceedings of Int. Conf. on Future Information Engng, Beijing, Peoples China*. 2014. Vol. 10. P. 252–258.
9. Bolegenova S.A., Maximov V.Yu., Bekmukhamet A. Mathematical simulation of pulverized coal in combustion chamber // *Procedia Engng*. 2012. Vol. 42. P. 1150–1156.
10. Bolegenova S.A., Bekmukhamet A., Maximov V., Askarova A.S., Bolegenova S.A., Beketayeva M. Numerical experimenting of combustion in the real boiler of CHP // *Int. J. Mechanics*. 2013. Vol. 7, No. 3. P. 343–352.
11. Askarova A.S., Bekmukhamet A., Bolegenova S.A., Beketayeva M.T., Maximov Yu.V., Ospanova S.S., Gabitova Z.K. Investigation of turbulence characteristics of burning process of the solid fuel in BKZ 420 combustion chamber // *WSEAS Transactions on Heat and Mass Transfer*. 2014. Vol. 9. P. 39–50.
12. Safarik P., Maximov V., Beketayeva M., Askarova A., Bolegenova S. Numerical modeling of pulverized coal combustion at thermal power plant boilers // *J. Thermal Sci.* 2015. Vol. 24, Iss. 3. P. 275–282.
13. Аскарлова 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.
14. Бекетаева М.Т., Болегенова С.А., Аскарлова А.С., Болегенова С.А., Максимов В.Ю. Моделирование тепломассопереноса в высокотемпературных реагирующих потоках при наличии горения // *Теплофизика высоких температур*. 2015. Т. 53, № 5. С. 813–820.
15. Bolegenova S.A., Beketayeva M.T., Ospanova S.S., Bekmukhamet A., Maximov V.Yu., Gabitova Z.K. Numerical modeling of turbulence characteristics of burning process of the solid fuel in BKZ-420-140-7C combustion chamber // *Int. J. Mechanics*. 2014. Vol. 8, No. 1. P. 112–122.
16. Lavrisheva Ye.I., Leithner R., Askarova A.S., Muller H., Magda A. Combustion of low-rank coals in furnaces of Kazakhstan coal-firing power plants // *VDI Berichte*. 2007. No. 1088. P. 497–502.
17. Manatbayev R.K., Nugymanova A.O., Bolegenova S.A., Ospanova Sh.S., Maximov V.Yu., Bolegenova S.A., Beketayeva M. The computational study of heat and mass transfer processes at combustion of pulverized kazakh coal in real conditions of energy objects // *J. Bulgarian Chemical Communications*. 2018. Vol. 50. P. 61–67.
18. Gorokhovskii M., Chtab-Desportes A., Voloshina I., Askarova A. Stochastic simulation of the spray formation assisted by a high pressure // *Proceedings of 6-th Int. Symp. on Multiphase Flow, Heat Mass Transfer and Energy Conversion. Book Series: AIP Conference Proceedings*. 2010. Vol. 1207. P. 66–73.
19. Bolegenova S.A., Maximov V.Yu., Beketayeva M., Ergaliyeva A.B., Gabitova Z., Bolegenova S.A. Three-dimensional modeling of heat and mass transfer during combustion of low-grade Karaganda coal // *Proc. 22nd National Congress of Chemical and Process Engng, CHISA 2016 and 19th Conf. on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction, Press*. 2016. Vol. 2. P. 1093–1102.
20. Ospanova Sh., Bolegenova S., Ergaliyeva A., Bekmukhamet A., Bolegenova S., Maksimov V., Beketayeva M. 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. P. 699–709.
21. Leithner R., Ergaliyeva A., Nugymanova A., Maksimov V., Bolegenova S., Beketayeva M., Bolegenova S., Ospanova S. Computational modeling of heat and mass transfer processes in combustion chamber at power plant of Kazakhstan // *Proc. MATEC Web of Conferences*. 2016. P. 5.
22. Maksimov V.Yu., Bekmukhamet A., Ospanova Sh.S., Askarova A.S., Bolegenova S.A. Numerical research of aerodynamic characteristics of combustion chamber BKZ-75 mining thermal power station // *Proc. Engng*. 2012. Vol. 42. P. 1250–1259.

23. Heierle E.I., Bolegenova S.A., Manatbayev R., Maximov V.J., Askarova A., Bolegenova S.A., Beketayeva M., Yergaliev A. CFD study of harmful substances production in coal-fired power plant of Kazakhstan // Bulgarian Chemical Communications. 2016. Vol. 48, Iss. E2. P. 260–265.
24. Yevgeniya H., Reinhard L., Horst M., Aliya A. CFD code FLOREAN for industrial boilers simulations // WSEAS Transactions on Heat and Mass Transfer. 2009. Vol. 4, No. 4. P. 98–107.
25. Bekmukhamet A., Maximov V., Askarova A., Beketayeva M., Bolegenova S. Numerical experimenting of combustion in the real boiler of CHP // Int. J. Mechanics. 2013. Vol. 7, Iss. 3. P. 343–352.
26. Vockrodt S., Leithner R., Schiller A., Askarova A., Buchman M. Firing technique measures for increased efficiency and minimization of toxic emissions in kazakh coal firing // Proc. 19th German Conf. on Flames, VDI Gesell Energietechn; Verein Deutsch Ing., Combustion and Incineration, VDI Berichte, Germany, 1999. Vol. 1492. P. 93–96.
27. Gabitova Z.K., Ospanova S., Bekmukhamet A., Bolegenova S. Using 3D modeling technology for investigation of conventional combustion mode of BKZ-420-140-7C combustion chamber // J. Engng and Applied Sci. 2014. Vol. 9, No. 1. P. 24–28.
28. Алияров Б.К., Алияров М.Б. Сжигание казахстанских углей на ТЭС и на крупных котельных: опыт и проблемы. Алматы: Гылым ордасы, 2012. 306 с.
29. Алияров Б.К. Освоение сжигания экибастузского угля на тепловых электростанциях. Алматы: Гылым, 1996. 272 с.
30. Yergaliev A., Safarik P., Askarova A., Maximov V., Bolegenova S. Bolegenova S. Numerical investigation of heat and mass transfer processes in the combustion chamber of industrial power plant boiler. Pt 1. Flow Field, temperature distribution, chemical energy distribution // J. Applied and Computational Mechanics. 2017. Vol. 11. P. 115–128.
31. Аскарова А.С., Болегенова С.А., Болегенова С.А., Максимов В.Ю., Бекетаева М.Т. Трехмерное моделирование аэродинамики и теплообмена в камере сгорания котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26, № 2. С. 317–335.
32. Safarik P., Nugymanova A., Bolegenova S., Askarova A., Maximov V., Bolegenova S. Simulation of low-grade coal combustion in real chambers of energy objects // J. Acta Polytechnica. 2019. Vol. 59, No. 2. P. 98–108.
33. Georgiev A., Baizhuma Zh., Nugymanova A., Bolegenova S., Askarova A., Bolegenova S. The use of a new “clean” technology for burning lowgrade coal in on boilers of Kazakhstan TPPs // J. Bulgarian Chemical Communications. 2018. Vol. 50. P. 53–60.
34. Messerle V.E., Askarova A.S., Bolegenova S.A., Maximov V., Nugymanova A. 3D-modelling of Kazakhstan low-grade coal burning in power boilers of thermal power plant with application of plasma gasification and stabilization technologies // J. of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1261, No. 1. P. 12–22.

*Статья поступила в редакцию 11 марта 2019 г.,
после доработки — 24 апреля 2019 г.,
принята к публикации 4 июня 2019 г.*