

**ПАРОВЫЕ КОТЛЫ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ТОПЛИВО,
ГОРЕЛОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА
И ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ КОТЛОВ**

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТОПОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ
ПРИ СЖИГАНИИ НЕПРОЕКТНЫХ УГЛЕЙ В КОТЛЕ
ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ 220 т/ч¹**

© 2022 г. К. И. Мальцев^а *, А. В. Гиль^а, А. С. Заворин^а, Д. В. Лебедь^б

^аНациональный исследовательский Томский политехнический университет,
просп. Ленина, д. 30, г. Томск, 634050 Россия

^бАО «Хабаровская ремонтно-монтажная компания», Адмиральская ул., д. 10, г. Хабаровск, 680033 Россия

*e-mail: kim3@tpu.ru

Поступила в редакцию 17.03.2022 г.

После доработки 12.05.2022 г.

Принята к публикации 23.05.2022 г.

На многих пылеугольных ТЭС России осуществляется перевод котельных агрегатов на непроектное топливо в связи с ужесточением экологических требований, изменением экономической ситуации, а также вследствие снижения запасов проектного угля. За период эксплуатации Артемовской ТЭЦ исчерпалось месторождение проектного угля, поэтому возникла потребность поиска замещающего твердого топлива для котельных агрегатов БКЗ-220-100Ф. Поскольку при переводе на непроектные угли могут возникать негативные факторы, связанные со снижением надежности работы поверхностей нагрева и обеспечением требуемых значений параметров перегретого пара, актуален вариантный анализ, в том числе на основе численного моделирования, процессов, происходящих при сжигании углей в топочной камере (топке) котельного агрегата. Цель настоящего исследования – проанализировать влияние топочных процессов на надежность, эффективность и экологическую безопасность эксплуатации котельного агрегата при сжигании непроектных углей. Численный анализ проведен с использованием пакета прикладных программ ANSYS Fluent, математическое моделирование топочных процессов основано на подходе Эйлера – Лагранжа. Выполнено сравнение результатов моделирования с поверочными и позонными расчетами топочной камеры. В горизонтальном² сечении на уровне горелочных устройств выделяются высокотемпературные зоны в пристеночной области вблизи углов топочной камеры, образованных экранами левой боковой и фронтальной стен, а также экранами правой боковой и тыльной стен. В результате численного моделирования установлено, что тангенциальная компоновка горелок обеспечивает создание вертикального вихря в топочной камере, однако требуется корректировка углов направления горелочных струй. Сжигание эльгинского угля существенно изменяет температурный режим в топке, что увеличивает вероятность шлакования поверхностей нагрева.

Ключевые слова: котельный агрегат, пылеугольная топочная камера, численное моделирование, процессы горения угля, тепловой расчет

DOI: 10.56304/S0040363622110042

До настоящего времени уголь являлся одним из самых дешевых и доступных источников энергии и продолжит оставаться таковым в обозримом будущем [1, 2].

За пятилетие с 2015 по 2020 г. доля угольной генерации в производстве электроэнергии в мире изменилась с 38 до 34%, что в значительной мере обусловлено поэтапным отказом от угля страна-

ми Европейского союза, где угольная генерация упала с 25 до 13%, но произошло увеличение доли природного газа с 18 до 24%. В то же время страны Азии сохраняют лидирующие позиции по использованию угля и не планируют сокращать его потребление в краткосрочной и среднесрочной перспективе [3].

Более того, на фоне общемировой тенденции к уменьшению использования угля многие страны, наоборот, наращивают объемы угольной генерации из-за опережения роста спроса на электроэнергию относительно стремления к вводу новых “чистых” мощностей (источников энергии, для которых выбросы вредных веществ су-

¹ Исследование выполнено при поддержке программы развития Томского политехнического университета.

² Паровой котел имеет три сечения: продольное (вдоль фронта, показывает глубину топки), поперечное (поперек фронта, показывает ширину топки), горизонтальное (разрез, вид сверху).

щественно меньше, чем при традиционной угольной генерации).

Последние десятилетия угольная промышленность России стабильно развивается, объем добычи вырос более чем на 30% и в настоящее время превышает 440 млн т/год. За эти годы активно осваивались угольные месторождения в Восточной Сибири, на Дальнем Востоке и в Арктической зоне [4, 5].

Энергетическая промышленность России на данном этапе технического развития оказалась в сложном положении. Срок эксплуатации значительной части оборудования, установленного на российских ТЭС и предназначенного для генерации мощностей, превышает 30 лет [6, 7]. Оно зачастую не удовлетворяет современным экологическим и экономическим требованиям, так как является технологически устаревшим и физически изношенным.

Характерный пример такого оборудования – Артемовская ТЭЦ, введенная в эксплуатацию в 1936 г. В качестве топлива используются каменные угли различных месторождений Приморского края и угли других регионов, что обусловлено истощением угольного месторождения, на применение которого проектировалась данная электростанция.

Изменение характеристик поставляемого топлива приводит к снижению эффективности его использования с точки зрения экономичности, надежности и экологической безопасности. Поэтому угольные компании во многих случаях заключают договоры на опытное сжигание для определения возможности поставлять непроектные угли на действующие ТЭС в целях дальнейшего сбыта угля с собственных месторождений. Подбор непроектных углей основывается главным образом на схожести теплотехнических характеристик. Зачастую рассматриваемые замещающие угли имеют близкие (а порой и одинаковые) элементные составы, но остальные характеристики (в том числе и шлакующие свойства) различаются, что может приводить к чрезмерному шлакованию поверхностей нагрева котла.

По результатам опытного сжигания выдаются заключения о возможности использования замещающего топлива. Нередко по итогам испытаний констатируется невозможность несения номинальной нагрузки из-за ограничения производительности пылесистем или слишком высокой температуры на выходе из топочной камеры вследствие ее зашлакованности, вероятности повышения температуры металла пароперегревателей и перегретога пара и значительных отклонений в режимах работы оборудования. Численные исследования топочных процессов, выполненные посредством математического моделирования перед принятием решения об использовании

непроектного топлива на ТЭС (до проведения опытного сжигания), позволяют детально рассмотреть физико-химические процессы в топочной камере и дать более надежную и наименее затратную оценку возможности применения углей тех или иных марок в качестве замещающего топлива.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Объектом численного исследования топочных процессов является барабанный паровой котел БКЗ-220-100Ф с топкой с твердым шлакоудалением открытого типа прямоугольного сечения 6656×9536 мм (рис. 1).

Топочная камера снабжена четырьмя прямоточными шелевыми горелками, расположенными на боковых стенах и направленными по касательной к условной окружности диаметром 1330 мм (см. рис. 1, б). Котел оборудован двумя индивидуальными замкнутыми системами пылеприготовления с шаровыми барабанными мельницами (ШБМ 287/470) и промежуточным пылевым бункером.

Для сушки и транспортировки пыли используется смесь горячего воздуха, дымовых газов после воздухоподогревателя и рециркулирующего сушильного агента. Доля газов рециркуляции 0.2 принята согласно проектной документации.

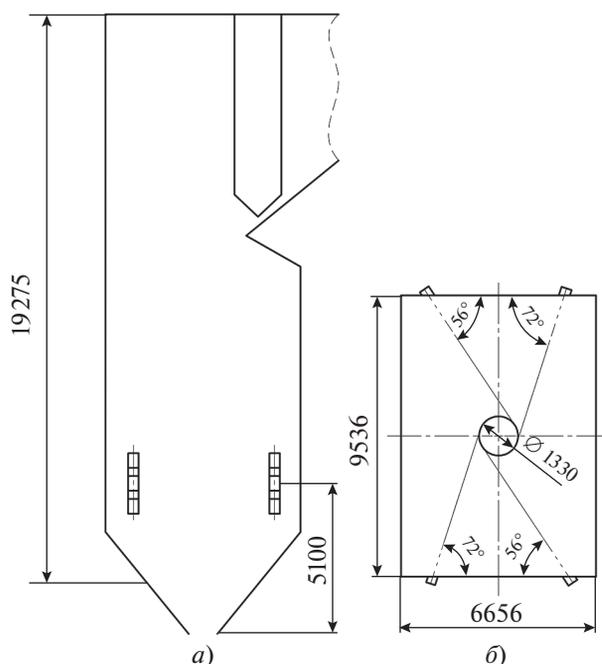


Рис. 1. Эскиз топки парового котла БКЗ-220-100Ф. а – продольное сечение; б – сечение в плане с расположением горелочных устройств

Таблица 1. Характеристики артемовского, липовецкого и эльгинского углей [8, 9]

Параметр	Уголь		
	артемовский ЗБ*	липовецкий Д**	эльгинский ГЖ***
Состав топлива, %			
Зольность A^r	33.1	36.8	28.3
Влажность W^r	23.0	8.0	5.6
Содержание:			
серы S^r	0.3	0.4	0.2
углерода C^r	29.4	41.7	56.7
азота N^r	0.6	0.5	0.7
водорода H^r	2.5	3.2	3.8
кислорода O^r	11.1	9.4	4.7
Теплота сгорания на рабочую массу Q_r^r , МДж/кг	11.14	16.53	21.67
Выход летучих на горючую массу V^{daf}	50.0	50.0	35.5
Химический состав золы на бессульфатную массу, %			
Оксид:			
кремния SiO_2	60.6	65.9	62.4
алюминия AlO_3	25.8	29.6	19.3
титана TiO_2	1.0	1.0	0.8
железа Fe_2O_3	4.5	0.8	7.3
кальция CaO	1.7	0.5	5.7
магния MgO	1.7	0.9	1.2
калия K_2O	3.4	0.8	2.1
натрия Na_2O	1.3	0.5	1.2
Температурные характеристики золы, °С			
Температура начала:			
деформации t_a	1320	1400	1110
размягчения t_b	Более 1500	Более 1500	1350
жидкоплавкого состояния t_c	Более 1500	Более 1500	1430
шлакования $t_{шл}$	1030	1223	995
Коэффициент:			
размолоспособности $K_{л.о}$	0.95	1.20	1.30
взрываемости K_T	1.8	2.3	1.9

* Влажностью менее 30%.

** Длиннопламенный.

*** Газовый жирный.

Проектным топливом для рассматриваемого котельного агрегата являлся бурый уголь ЗБ Артемовского месторождения, в качестве замещающих углей, исходя из теплотехнических свойств (табл. 1) и территориальной близости к объекту исследования, на перспективу выбраны каменные угли Липовецкого и Эльгинского месторождений.

Содержание влаги и золы не достаточная мера энергетической ценности топлива, так как топли-

ва с одинаковым количеством золы или влаги могут иметь разную теплоту сгорания. Более полными являются приведенные характеристики, отражающие содержание влаги и золы в топливе, отнесенное к единице низшей теплоты сгорания (табл. 2).

По приведенным характеристикам липовецкий и эльгинский угли относятся к маловлажным, а артемовский — к высоковлажным видам твердого топлива. Все они являются малосерни-

Таблица 2. Приведенные характеристики артемовского, липовецкого и эльгинского углей

Характеристика, % · кг/МДж	Уголь		
	артемовский ЗБ	липовецкий Д	эльгинский ГЖ
Влажность W^{np}	2.065	0.484	0.258
Зольность A^{np}	2.971	2.227	1.307
Сернистость S^{np}	0.027	0.238	0.009

стыми. По содержанию золы артемовский уголь относится к высокозольным, а остальные — к среднезольным углям.

Состав золы всех рассматриваемых углей кислого типа. При этом минеральную часть артемовского и эльгинского углей можно классифицировать как золу угля битуминозного типа, а липовецкого — как золу угля лигнитного типа, которые практически не склонны к образованию железистых и сульфатно-кальциевых отложений, а также отложений на основе активных щелочей [10].

Все угли относятся к III группе по взрывоопасности (коэффициент взрываемости $1.5 \leq K_T \leq 3.5$). Артемовский уголь является трудноразмалываемым (коэффициент размолоспособности $K_{л.о} < 1.15$), липовецкий и эльгинский угли обладают средней сопротивляемостью к размолу ($1.15 \leq K_{л.о} \leq 1.4$).

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Для исследования топочных процессов проведено моделирование в программном комплексе ANSYS Fluent, являющемся одним из самых распространенных программных продуктов и включающем в себя проверенные временем инструменты, которые обеспечивают сравнительно быстрое получение точных результатов в области гидрогазодинамики.

Для решения основных уравнений течения потока газа использовался численный метод — стационарный решатель (pressure-based solver), с помощью которого можно определить плотность по уравнению состояния, а поле давлений — по уравнению неразрывности.

При моделировании топочных процессов сжигания пылевидного топлива в пылеугольных котлах дополнительные сложности возникают из-за двухфазного характера потока [11]. Поэтому для решения указанных задач используется модель Эйлера — Лагранжа, позволяющая более детально описывать процессы движения частиц в двухфазном потоке [12, 13]. Модель дискретных фаз (DPM) применяется для описания траектории движения частиц угля в дымовых газах [14]. Размолотый уголь подают в топочную камеру с первичным воздухом. При моделировании траек-

тории движения учитывают, что на топливную частицу в газовом потоке действуют силы сопротивления и тяжести, и принимают, что все топливные частицы имеют сферическую форму.

Распределение частиц по размерам моделируется с помощью распределения Розина — Рамлера, так как оно наиболее точно отображает фракционный состав пылевидного топлива.

Процесс горения угольных частиц состоит из следующих этапов: прогрев и испарение влаги, выход летучих веществ, горение коксового остатка.

При моделировании сжигания угля летучие вещества представлены в виде $C_xH_yO_zN_f$. Стехиометрические коэффициенты реакций выхода летучих веществ, а также их соотношение рассчитываются с учетом элементного состава топлива.

Трехмерное течение потока газа описывается системой уравнений Навье — Стокса, усредненных по Рейнольдсу (RANS), которая состоит из уравнений сохранения массы, импульса и энергии [15, 16].

В качестве модели турбулентности выбрана наиболее распространенная k — ϵ -модель, основанная на решении уравнений переноса для турбулентной кинетической энергии (k) и скорости турбулентной диссипации (ϵ) [17]. Для моделирования пристеночной области использовалась стандартная пристеночная функция.

Уравнение переноса лучистой энергии решалось с помощью модели P-1, в которой газ принимался как серое тело [13, 15].

При проведении расчетов использовался алгоритм SIMPLE, применяемый для корректировки давления при оценке взаимосвязи между ним и скоростью среды в исследуемой задаче. Градиент давления рассчитывался по схеме PRESTO!, хорошо зарекомендовавшей себя для сильнозакрученных потоков, остальные основные уравнения имеют второй порядок дискретизации.

Концентрации NO_x при сжигании рассматриваемых углей определяли с помощью расширенного механизма Зельдовича. Образование топливных NO_x рассматривалось согласно модели Де Созте, предполагалось, что 90% азота летучих ве-



Рис. 2. Расчетная сеточная модель топочной камеры парового котла БКЗ-220-100Ф

ществ превращается в HCN, а остальная часть образует NH₃.

Аналогичные подходы, примененные в работах [18–22] для моделирования процессов в топочных камерах котельных агрегатов при сжигании пылеугольного топлива, показали хорошие результаты при их верификации и валидации. Например, в работе [18] данные модели используются авторами для численных исследований влияния фракционного состава топлива на движение и выгорание частиц углей разных марок, поступающих в топку. Результаты исследований позволили выявить оптимальную тонкость помола для устойчивого горения угля и снижения на 20% расходов электроэнергии на собственные нужды пылеприготовления.

В работе [11] путем математического моделирования были проведены исследования влияния избытка первичного воздуха на процессы горения в топочной камере энергетического котла, итоги которых хорошо согласуются с натурными экспериментами.

Для получения качественных результатов сетку расчетной области сгущали путем увеличения количества конечных элементов. Сеточная модель (рис. 2) состояла из 1 207 202 тетраэдрических ячеек и обеспечивала сеточно-независимое решение. Для проведения качественного расчета было выполнено 100 000 итераций, невязка для уравнений неразрывности составляла менее 10⁻⁵, для остальных уравнений – менее 10⁻⁶.

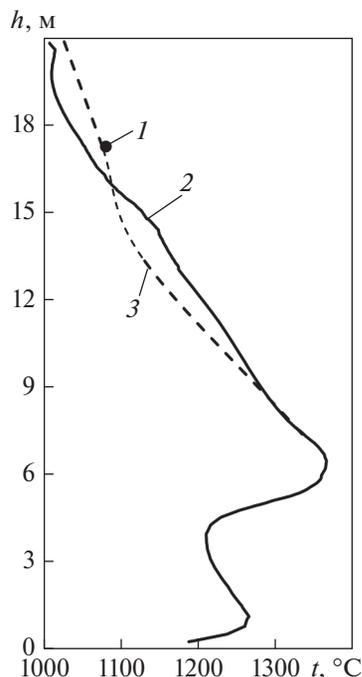


Рис. 3. Распределение температуры t по высоте топочной камеры h при сжигании угля Артемовского месторождения. 1 – поверочный расчет; 2 – результаты математического моделирования; 3 – позонный расчет

Исходные данные для математического моделирования – результаты теплового расчета топочной камеры согласно [9]. В частности, температура горячего воздуха для артемовского угля достигала 360°C, липовецкого – 380°C и эльгинского – 388°C. Температура пылевоздушной смеси 70°C для всех исследуемых вариантов угля принималась по условиям обеспечения взрывопожаробезопасности. Значение коэффициента тепловой эффективности для трех видов угля составляло 0.45.

Сравнение результатов моделирования с данными позонного и поверочного расчетов топки показало отклонение температур по расчетным зонам и на выходе из топочной камеры не более чем на 45°C (рис. 3), что, согласно [9], является вполне допустимым.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 4, 5 показана аэродинамическая структура потока газов в продольном и горизонтальном сечениях топки. Видно, что данная компоновка горелочных устройств во всех рассматриваемых вариантах (для артемовского, липовецкого и эльгинского углей) обеспечивает создание вер-

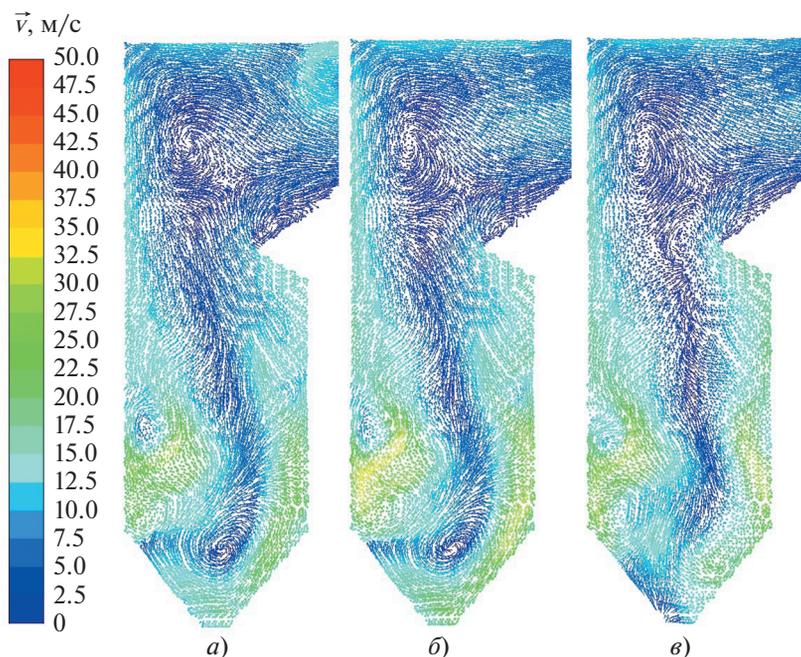


Рис. 4. Векторное поле скоростей в продольном сечении топочной камеры. Уголь: *a* – артемовский; *б* – липовецкий; *в* – эльгинский

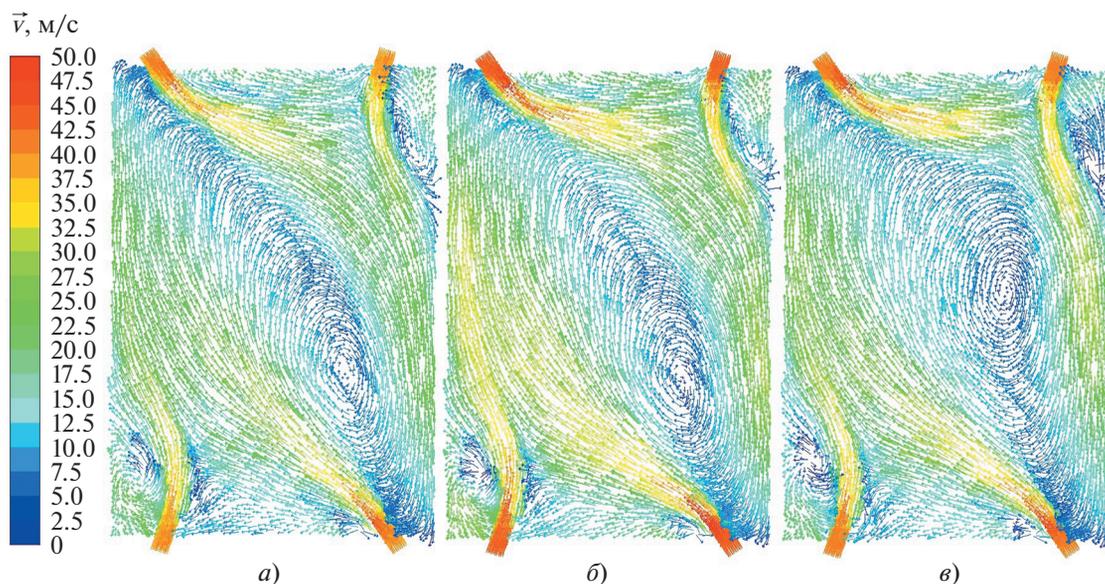


Рис. 5. Векторное поле скоростей в горизонтальном сечении топочной камеры. Обозначения см. рис. 4

тикального вихря в объеме топочной камеры. Его особенность — асимметричное положение относительно прямоугольного сечения топочной камеры (отношение глубины топки к ее ширине составляет 1.4), вызванное смещением горелочных струй к фронту и тылу топки под влиянием, с одной стороны, зон разрежения вблизи примыкаю-

щих к струям экранов, а с другой — сносящего потока от воздействия кругонаправленных соседних струй. Зона вихреобразования в горизонтальном сечении представляет собой эллипсоид, вытянутый по диагонали топки. По мере продвижения вверх вихрь выравнивается относительно вертикальной оси топочной камеры. На выходе из нее

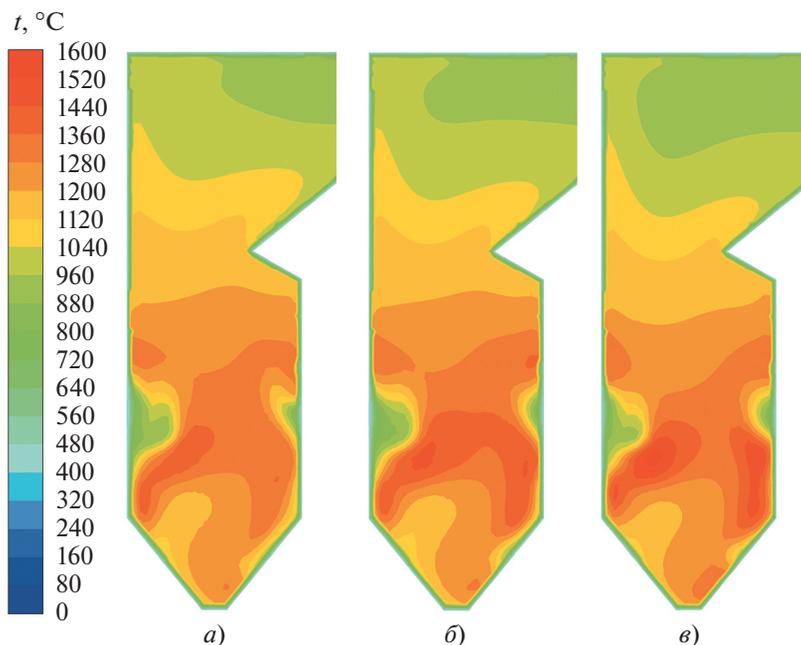


Рис. 6. Распределение температур t в продольном сечении топочной камеры. Обозначения см. рис. 4

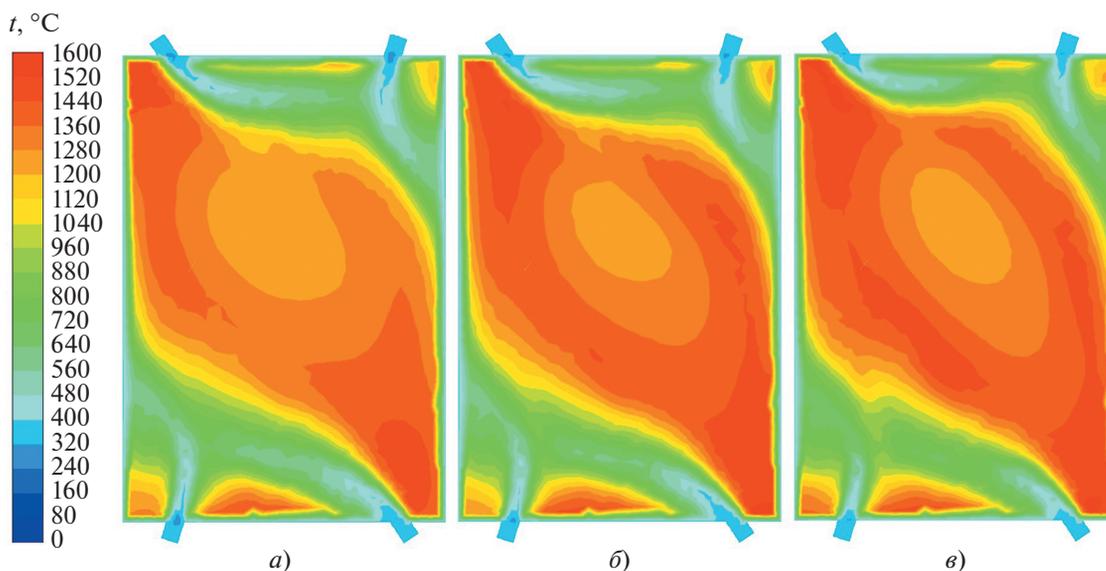


Рис. 7. Распределение температур t в горизонтальном сечении топочной камеры. Обозначения см. рис. 4

скорость дымовых газов при сжигании указанных углей находится в пределах 6–8 м/с.

Распределения температурных полей по объему топочной камеры во всех исследуемых вариантах не имеют существенных различий (рис. 6, 7). Область максимальных значений температуры, расположенная на уровне ядра горения, для артемовского угля составляет около 1380°C, а для липовецкого и эльгинского доходит до 1420°C.

В горизонтальном сечении на уровне горелочных устройств (см. рис. 7) выделяются высокотемпературные зоны в пристеночной области вблизи углов топочной камеры, образованных экранами левой боковой и фронтальной стен, а также экранами правой боковой и тыльной стен.

На рис. 8 показано распределение температуры вдоль фронтальной стены на расстоянии 0.05, 0.10, 0.15 и 0.20 м от нее. При сжигании артемов-

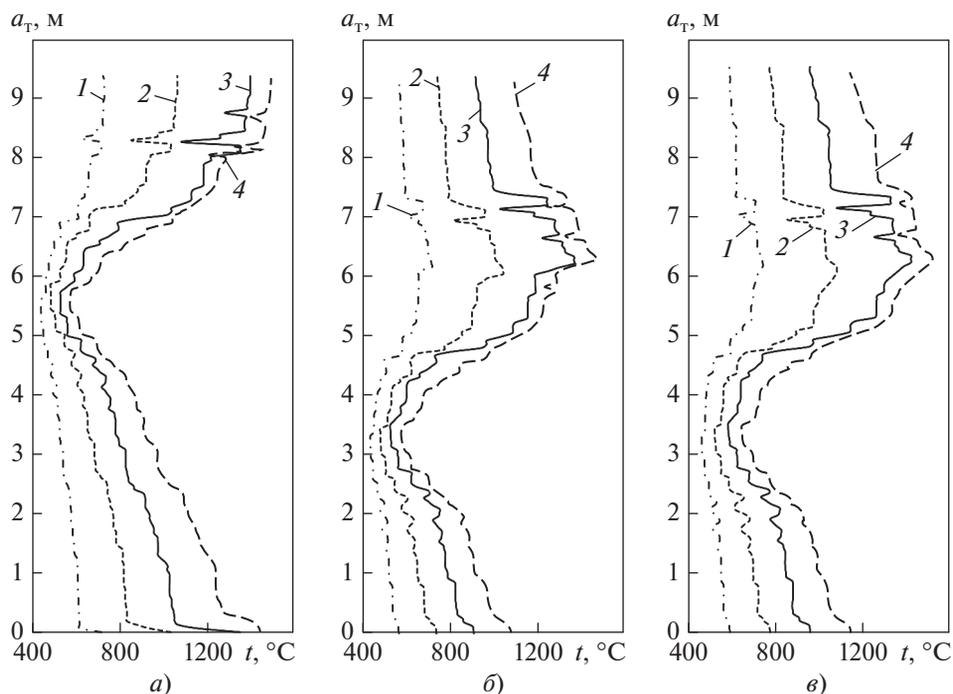


Рис. 8. Распределение температуры t в пристеночной области по ширине топочной камеры a_T на уровне высотной координаты $y = 5.1$ м при сжигании артемовского (а), липовецкого (б) и эльгинского (в) углей. Расстояние от экранных труб, м: 1 – 0.05; 2 – 0.10; 3 – 0.15; 4 – 0.20

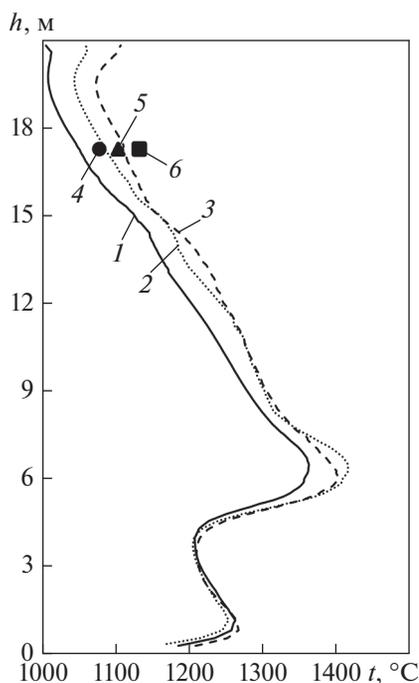


Рис. 9. Изменение температуры t по высоте топочной камеры h при сжигании проектного и замещающих углей. Уголь: 1 – артемовский; 2 – липовецкий; 3 – эльгинский; 4, 5, 6 – поверочный расчет для артемовского, липовецкого и эльгинского угля соответственно

ского угля значения температур, превышающих значение температуры начала шлакования, наблюдаются на расстоянии 0.10 м от фронтальной стены на участке по ширине топочной камеры 8.5–9.3 м, на 0.15 м – на участке 7.2–9.3 м, на 0.20 м – на участках 0–2.5 и 7.0–9.3 м (см. рис. 8, а). При сжигании липовецкого угля превышение температуры шлакования зафиксировано на расстоянии 0.2 м от фронтальной стены на участке 5.5–7.5 м, по мере приближения к экранным поверхностям температура топочной среды снижается (см. рис. 8, б). Наиболее значительное превышение температуры шлакования наблюдается при сжигании эльгинского угля на расстоянии 0.10 м от фронтальной стены на участке 5.5–6.8 м, на 0.15 м – на участке 5.0–8.8 м, на 0.20 м – на участках 0–0.9 и 4.8–9.3 м.

Изменение среднеинтегральной температуры в топке исследуемого котла при сжигании проектного и замещающих углей происходит следующим образом (рис. 9). В нижней части топки температура составляет около 1250°С. С увеличением высоты топочной камеры она возрастает и достигает максимальных 1350–1400°С незначительно выше уровня расположения горелочных устройств. При дальнейшем подъеме факела температура плавно уменьшается и на выходе из топки составляет 1050°С при сжигании артемовского угля, 1085 и 1110°С – липовецкого и эльгинского

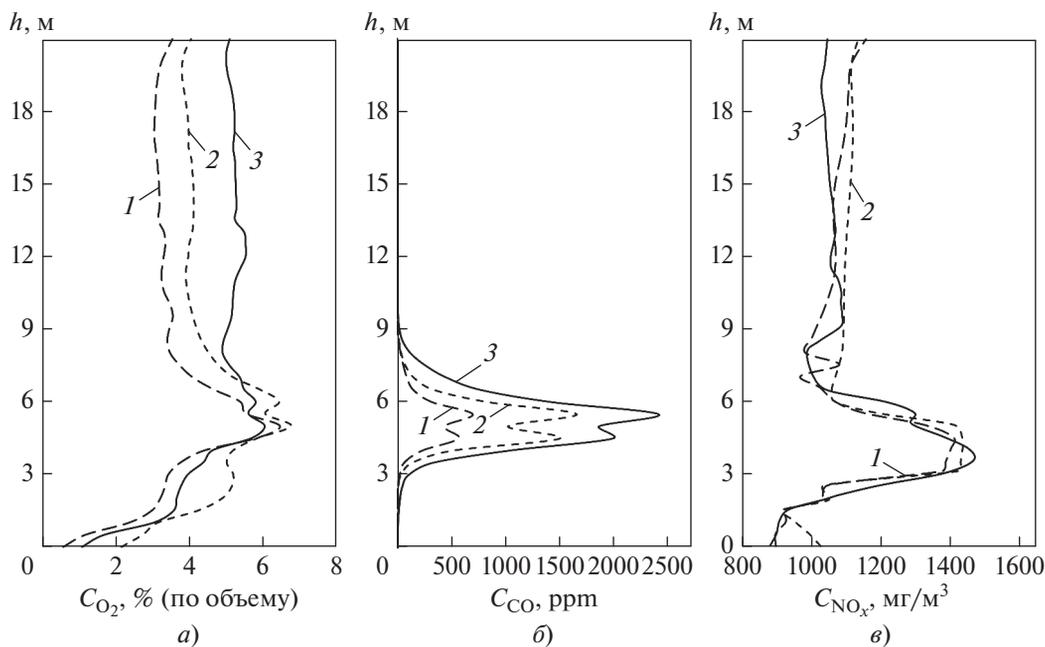


Рис. 10. Распределение среднелинейных в горизонтальных сечениях концентраций кислорода (а), монооксида углерода (б) и оксидов азота (в) по высоте топочной камеры *h*. Уголь: 1 – артемовский; 2 – эльгинский; 3 – липовецкий

угля соответственно. Сравнение результатов моделирования с данными поверочного теплового расчета показало, что разница температур на выходе из топки не превысила 30°C.

Согласно полученным при численном моделировании данным (рис. 10), максимальные концентрации O₂, CO и NO_x наблюдаются на уровне горелочных устройств. Содержание кислорода на выходе из топочной камеры (см. рис. 10, а) при сжигании проектного угля составляет 3%, что соответствует нормативному избытку воздуха, а при горении замещающих каменных углей Липовецкого и Эльгинского месторождений концентрация кислорода равна 5.2 и 4.0% соответственно. Концентрация CO во всех исследованных вариантах на выходе из топочной камеры близка к нулю, что свидетельствует о высокой полноте сгорания топлива (оно выгорает полностью). Содержание оксидов азота на выходе из топочной камеры при сжигании исследуемых углей находится на уровне 1000–1100 мг/м³.

ВЫВОДЫ

1. Использование математической модели исследования топочных процессов позволило провести качественную и количественную оценку теплофизических параметров сжигания артемовского, липовецкого и эльгинского углей в котельном агрегате паропроизводительностью 220 т/ч с удовлетворительным соответствием результатов

численного моделирования по температуре данным поверочного теплового расчета.

2. При организации сжигания рассматриваемых в исследовании непроектных углей средний температурный уровень в топочном объеме возрастает на 50–60°C, о чем свидетельствует незначительное повышение температуры на выходе из топочной камеры. В целом, использование замещающих углей не повлияет на надежность работы котельного агрегата, за исключением температуры продуктов сгорания на выходе из топки при сжигании эльгинского угля, которая превышает температуру начала шлакования и деформации золы и может привести к налипанию размягченных частиц золы на поверхности пароперегревателя.

3. Имеющиеся недостатки в компоновке горелочных устройств приводят к “прилипанию” горелочных струй к экранам фронтальной и тыльной стен, а также к формированию высокотемпературных локальных зон в этих областях. Вследствие этого при сжигании артемовского и липовецкого углей эти экранные поверхности будут в большей степени подвержены абразивному и эрозионному износу, а при сжигании эльгинского угля – шлакованию, что может привести к уменьшению нагрузки котельного агрегата и снижению надежности работы пароперегревателя.

4. Использование замещающих углей, имеющих более высокую теплоту сгорания по сравнению

нию с артемовским углем, позволит уменьшить нагрузку на системы золоудаления, снизить объемы золоотвалов и выбросы твердых частиц. Согласно результатам численного исследования, наиболее перспективным для сжигания является уголь Липовецкого месторождения.

5. Для улучшения экологических характеристик котла в соответствии с современными требованиями понадобится проработка различных вариантов снижения выбросов вредных веществ, образующихся в процессе сжигания, например применение ступенчатого сжигания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Прогноз** и развитие энергетики мира и России 2019 / под ред. А.А. Макарова, Т.А. Митровой, В.А. Кулагина. М.: ИНЭИ РАН; Центр энергетики Московской школы управления “Сколково”, 2019.
2. **Тумановский А.Г.** Перспективы развития угольных ТЭС России // Теплоэнергетика. 2016. № 6. С. 3–13. <https://doi.org/10.1134/S004036361706008X>
3. **Перспективы** мирового угольного рынка: энергет. бюл. М.: Аналит. центр при Правительстве РФ, 2021.
4. **Программа** развития угольной промышленности России на период до 2035 г. Утв. распоряжением Правительства РФ от 13.06.2020 № 1582-р.
5. **Генеральная** схема размещения объектов электроэнергетики до 2035 г. Утв. распоряжением Правительства РФ от 09.06.2017 № 1209-р.
6. **Сжигание** топлива на крупных установках в целях производства энергии: Информ.-техн. справ. М.: Бюро НДТ, 2017.
7. **Энергетическая** стратегия Российской Федерации на период до 2035 г. Утв. распоряжением Правительства РФ от 09.06.2020 № 1523-р.
8. **Энергетические** угли восточной части России и Казахстана: справ. / В.В. Богомолов, Н.В. Артемьев, А.Н. Алехнович, Н.В. Новицкий. Челябинск: УралВТИ, 2004.
9. **Тепловой** расчет котельных агрегатов (нормативный метод). 3-е изд., перераб. и доп. СПб.: НПО ЦКТИ, 1998.
10. **Алехнович А.Н.** Характеристики и свойства энергетических углей. Челябинск: Цицеро, 2012.
11. **Численное** исследование влияния избытка первичного воздуха на процессы горения в топочной камере энергетического котла с многоканальными вихревыми горелками / А.В. Гиль, А.С. Заворин, О.М. Кокшарев, Е.С. Воронцова // Изв. Томск. политехн. ун-та. 2020. Т. 331. № 9. С. 18–27.
12. **Madejki P.** Numerical study of a large-scale pulverized coal-fired boiler operation using CFD modelling based on the probability density function method // Appl. Therm. Eng. 2018. V. 145. P. 352–363. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.09.004>
13. **Gil A.V., Zavorin A.S., Starchenko A.V.** Numerical investigation of the combustion process for design and non-design coal in T-shaped boilers with swirl burners // Energy. 2019. V. 186. P. 115844. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.174>
14. **Understanding** the ash deposition formation in Zhundong lignite combustion through dynamic CFD modelling analysis / X. Yang, D. Ingham, L. Ma, H. Zhou, M. Pourkashanian // Fuel. 2017. V. 194. P. 533–543. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.01.026>
15. **Dugum A., Hanjalic K.** Numerical simulation of coal-air mixture flow in a real double-swirl burner and implications on combustion anomalies in a utility boiler // Energy. 2019. V. 170. P. 942–953. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.121>
16. **Detailed** analysis of early-stage NO_x formation in turbulent pulverized coal combustion with fuel-bound nitrogen / X. Wen, A. Shamooni, O.T. Stein, L. Cai, A. Kronenburg, H. Pitsch, A. M. Kempf, C. Hasse // Proc. Combust. Inst. 2021. V. 38. Is. 3. P. 4111–4119. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2020.06.317>
17. **Гиль А.В., Старченко А.В.** Математическое моделирование физико-химических процессов сжигания углей в камерных топках котельных агрегатов на основе пакета прикладных программ FIRE 3D // Теплофизика и аэромеханика. 2012. Т. 19. № 5. С. 655–671.
18. **Зройчиков Н.А., Каверин А.А.** Численное исследование сжигания каменного угля в топке котла с нижним дутьем // Теплоэнергетика. 2016. № 11. С. 51–61. <https://doi.org/10.1134/S0040363616110126>
19. **Исследование** процесса сжигания твердого топлива в топках с прямоточными горелками / Э.П. Волков, В.Б. Прохоров, С.Л. Чернов, В.С. Киричков, А.А. Каверин // Теплоэнергетика. 2020. № 6. С. 47–56. <https://doi.org/10.1134/S0040363620060119>
20. **Опыт** CFD-моделирования процессов горения жидкого и газообразного топлива в энергетических установках (обзор) / П.В. Росляков, I.V. Khudyakov, Д.А. Хохлов, М.Н. Зайченко // Теплоэнергетика. 2019. № 9. С. 3–23. <https://doi.org/10.1134/S0040363619090030>
21. **Computation** investigation of hydrodynamics, coal combustion and NO_x emissions in a tangentially fired pulverized coal boiler at various loads / J. Chiang, Z. Zhou, X. Ma, J. Liu // Particuology. 2022. V. 65. P. 105–116. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2021.06.012>
22. **Optimization** of operating conditions to achieve combustion stability and reduce NO_x emission at half-load for a 550-MW tangentially fired pulverized coal boiler / Y. Jiang, B.-H. Lee, D.-H. Oh, C.-H. Jeon // Fuel. 2021. V. 306. P. 121727. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121727>

Numerical Study of Furnace Processes during Combustion of Off-Design Coals in a 220 t/h Boiler

K. I. Mal'tsev^{a,*}, A. V. Gil'^a, A. S. Zavorin^a, and D. V. Lebed'^b

^a National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 634050 Russia

^b AO Khabarovsk Repair and Erection Company, Khabarovsk, 680033 Russia

*e-mail: kim3@tpu.ru

Abstract—In Russia, boiler units at many coal-fired thermal power plants (TPPs) are being converted to operation on off-design fuel due to the introduction of more and more strict environmental regulations, changes in the economic situation, and also due to a decrease in design coal reserves. During the service life of the Artemovsk combined heat and power plant (TETs), the design coal deposit was exhausted. Therefore, a replacement solid fuel for BKZ-220-100F boiler units had to be found. Since conversion to off-design coals may induce negative factors, such as a decrease in the reliability of the heating surfaces and maintenance of the required superheated steam conditions, a variant analysis, including that on the basis of numerical simulation, of the processes occurring during coal burning in a combustion chamber (furnace) enjoys current interests. The objective of this study is to analyze the effect of furnace processes on operating reliability, efficiency, and environmental safety of a boiler unit when burning off-design coals. Numerical analysis was carried out using the ANSYS Fluent software package, and mathematical modeling of furnace processes was based on the Euler-Lagrange approach. The results of simulation are compared with check and zone-by-zone calculations of the furnace chamber. In the horizontal section, at the level of the burners, high-temperature zones are singled out in the near-wall region at the corners of the furnace chamber, which are formed by the waterwalls on the left side and front walls as well as the waterwalls on the right side and rear walls. The numerical simulation has revealed that the tangential arrangement of the burners induces a vertical vortex in the furnace chamber; however, the direction angles of the burner jets should be corrected. Combustion of El'ginsk coal considerably changes the furnace temperature conditions, thereby increasing the risk of heating surfaces slugging.

Keywords: boiler unit, pulverized coal furnace chamber, numerical simulation, coal combustion processes, thermal design calculation