

УДК 628.524

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕПРОЕКТНЫХ БУРЫХ УГЛЕЙ НА ИХ ПРИГОДНОСТЬ ДЛЯ СЖИГАНИЯ В ТОПКЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОТЛА

© 2024 г. С. Л. Чернов^{1, *}, В. Б. Прохоров^{1, **}, В. Д. Апаров^{1, ***}, А. В. Пай^{1, ****}

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Национальный исследовательский университет “МЭИ”, Россия, Москва,

*e-mail: ChernovSL@mpei.ru

**e-mail: ProkhorovVB@mpei.ru

***e-mail: AparovVD@mpei.ru

****e-mail: PaiAV@mpei.ru

Поступила в редакцию 17.07.2024 г.

После доработки 08.11.2024 г.

Принята к публикации 11.11.2024 г.

Возможность сжигания различных бурых углей (БУ) в топке котла БКЗ-420-140-6 исследовалась с помощью численного моделирования в программе ANSYS Fluent. Для проверки составленной численной модели сжигания твердого топлива предварительно проведена ее валидация, применительно к сжиганию БУ определенного состава путем сравнения результатов расчетов с данными, полученными при режимно-наладочных испытаниях реального котла.

Был разработан способ усреднения характеристик угля и получены зависимости, определяющие состав угля на основании анализа состава 14 типов углей в диапазоне значений низшей теплоты сгорания Q_H^p от 7.5 до 16 МДж/кг. По полученным зависимостям для 4-х значений Q_H^p определен теоретический усредненный состав (ТУС) углей. Для одного из ТУС на 10% в большую и меньшую стороны варьировалась влажность.

В качестве показателей эффективности работы топочной камеры котла, приняты температура газов на выходе из топочной камеры, механический недожог и концентрация оксидов азота в дымовых газах. Результаты численного моделирования показывают, что при теплотворной способности топлива $Q_H^p \leq 10$ МДж/кг механический недожог q_4 превышает допустимые нормативы. Наибольшая концентрация оксидов азота на уровне 800–900 мг/м³ наблюдается для бурых углей с высокой Q_H^p и наибольшим содержанием углерода. Также показано, что применение прямоточных горелок с организацией ступенчатого сжигания топлива позволяет в 3.25 раза снизить образование оксидов азота в топке по сравнению с исходной схемой сжигания с использованием существующих вихревых горелочных устройств. Влияние низшей теплоты сгорания топлива на температуру газов на выходе из топочной камеры в диапазоне Q_H^p от 11.75 до 16.45 МДж/кг незначительное. Повышение влажности топлива сказывается на температуре газов на выходе из топочной камеры и на механическом недожоге только при значении более примерно 45%. В целом исследования показали, что рассматриваемая топка позволяет сжигать различные бурые угли при изменении

физико-химического состава и теплотехнических характеристик в широких пределах.

Ключевые слова: топка котла, бурый уголь, непроектное топливо, математическое моделирование, теплотехнические характеристики, усредненный состав углей, механический недожог, оксиды азота

DOI: 10.31857/S0002331024050067

ВВЕДЕНИЕ

Энергетические топлива обладают различными характеристиками, такими как теплота сгорания, зольность, влажность, выход летучих и другие, которые напрямую оказывают влияние на процессы горения и эффективность работы топочных устройств. Существующие энергетические котлы изначально проектировались заводами-изготовителями без уточнения возможных диапазонов изменения основных характеристик проектных топлив. В то же время запасы углей конкретных месторождений уменьшаются, месторождения вырабатываются, характеристики топлив меняются, что обуславливает необходимость перевода котлов на непроектные виды топлив. В связи с этим возникают такие проблемы, как шлакование поверхностей нагрева котла, неустойчивость горения непроектного топлива, повышенные выбросы оксидов азота в атмосферу, абразивный износ конвективной части котла, снижение экономических показателей и надежности работы оборудования.

По итогам работы [1] было определено, что использование непроектного угля при изменении топливного режима ТЭС без необходимости проведения опытного сжигания и реконструкции (модернизации) оборудования технически возможно, если теплотехнические показатели не выходят за предварительно определяемые пределы.

Как отмечалось выше, причина перехода на непроектное альтернативное топливо, может быть вызвана выработкой бассейна. Например, в работе [2] необходимость поиска нового топлива была обусловлена ухудшением свойств Челябинского БУ, низшая теплота сгорания которого Q_n^p снизилась с 15,0–15,9 МДж/кг до 10,25 МДж/кг, зольность A^p и влажность W^p возросли с 30 до 50% и с 13–16% до 18–26% соответственно. Изменение теплотехнических свойств привело к обрывам факела, образованию золовых отложений, снижению выработки пара, увеличению выброса загрязняющих веществ. В результате в качестве альтернативного угля был выбран Красноярский бурый уголь. Авторы [3] отмечают, что при переходе с Подмосковского на угли Канско-Ачинского бассейна, повысились технико-экономические показатели станции, но возросла сложность эксплуатации оборудования.

В работе [4] представлена численная модель для изучения характеристики горения и работы котла. Валидация результатов численного моделирования проводилась по сравнению с результатами, полученными на огневом стенде и промышленном котле. Авторы [5] делают следующий вывод – следует избегать долю смешивания каменного и бурого угля равной 25% по теплоте сгорания БУ при переводе топки котла на сжигание смеси. В работе [6] используется численное моделирование динамики потока для предсказания горения смесей углей с различными физико-химическими характеристиками. В исследовании [7] показано, что скорость роста отложений является наиболее показательным критерием, чем другие измерения. В [8] показано, что увеличение влажности угля вызывает повышение степени образования NOx за счет того, что влага затрудняет подвод кислорода в зону горения. Эксперимент проводился на опытной топке с одной горелкой.

МЕТОДИКА УСРЕДНЕНИЯ СОСТАВА БУРЫХ УГЛЕЙ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ

Для анализа влияния теплотехнических характеристик углей на эффективность работы топki котла были выбраны наиболее перспективные БУ для использования в энергетических котлах России, сведенные в табл. 1 по данным [9] во всем диапазоне значений низшей теплоты сгорания Q_H^p от 7.45 МДж/кг до 16.16 МДж/кг по мере ее убывания. На рис. 1–3 приведены линейные зависимости Q_H^p соответственно от содержания углерода C , от суммы рабочей зольности и влажности $A^p + W^p$ и от выхода летучих на горючую массу, V^{daf} . Зависимости Q_H^p от C^p и от $A^p + W^p$ достаточно хорошо ложатся на линейную зависимость (рис. 1 и 2). На рис. 1 получена линейная зависимость низшей теплоты сгорания от содержания углерода, что характерно для твердых видов топлив, где углерод преобладает по сравнению с другими горючими компонентами. Известно, что для БУ можно достаточно точно принять, что сумма рабочей зольности и влажности есть величина постоянная, то есть с ростом влажности зольность падает и наоборот. При этом теплота сгорания БУ значительно не изменяется.

В вышеуказанном диапазоне были выбраны 4 значения Q_H^p 7.5 МДж/кг; 9.625 МДж/кг; 11.75 МДж/кг и 16 МДж/кг, для которых определялся теоретический усредненный состав (ТУС) углей, получивших названия № Б1, № Б2, № Б3 и № Б4. Б1 и Б2 это наибольшее и наименьшее значения, а Б3 и Б4 промежуточные значения выбранного диапазона. ТУС углей определялся по следующему алгоритму, состоящему из формул (1.1)–(1.10):

Таблица 1. Состав, принятых в расчетах марок БУ

Бассейн, месторождение	Q_H^p , МДж/кг	W^p , %	A^p , %	C^p , %	O^p , %	S^p , %	H^p , %	N^p , %	V^{daf} , %
Кызыл-Кия (ЗБ)	16.16	28	13	45.4	9.5	0.8	2.4	0.5	35
Азейское (ЗБ)	15.99	25	16.5	42.7	11.3	0.5	3.1	0.9	48
Березовское (2Б)	15.66	33	4.7	44.2	14.4	0.2	3.1	0.4	48
Ирша-Бородинское (2Б)	15.28	33	7.4	42.6	13.2	0.2	3	0.6	47
Гусиноозерское (ЗБ)	14.32	26	18.5	39.4	12.3	0.4	2.8	0.6	43
Назаровское (2Б)	12.85	39	7.9	37.2	12.5	0.4	2.5	0.5	47
Итатское (1Б)	12.81	40.5	6.8	36.6	12.7	0.4	2.6	0.4	48
Челябинский бассейн (ЗБ)	12.56	17	35.7	33.6	9.5	0.8	2.5	0.9	44
Райчихинское (2Б)	11.72	37	13.9	34.9	11.3	0.3	2.1	0.5	43
Харанорское (1Б)	11.39	40	13.2	33.5	10.3	0.3	2.2	0.5	44
Артемовское (ЗБ)	11.14	23	33.1	29.4	11.1	0.3	2.5	0.6	50
Подмосковный бассейн (2Б)	8.67	32.1	30.6	24.3	8.2	1.6	1.9	0.4	48
Бабаевское (1Б)	8.1	56	10.1	23.2	7.5	0.9	2.1	0.2	65
Тульганское (1Б)	7.45	52	14.4	22.2	8.6	0.4	2.1	0.2	65.5

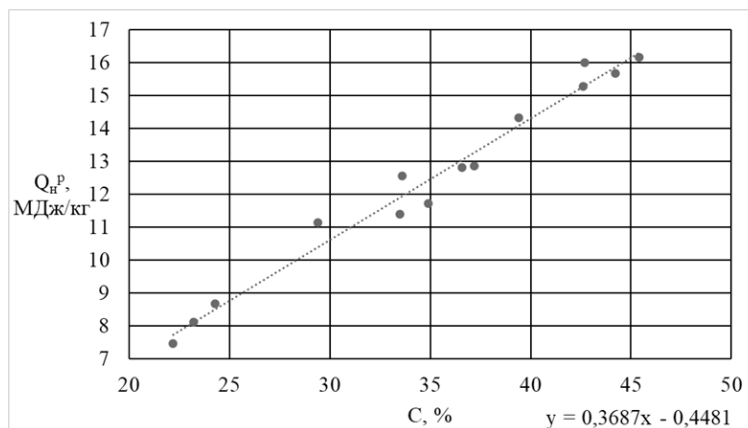


Рис. 1. Зависимость низшей теплоты сгорания от содержания углерода в БУ.

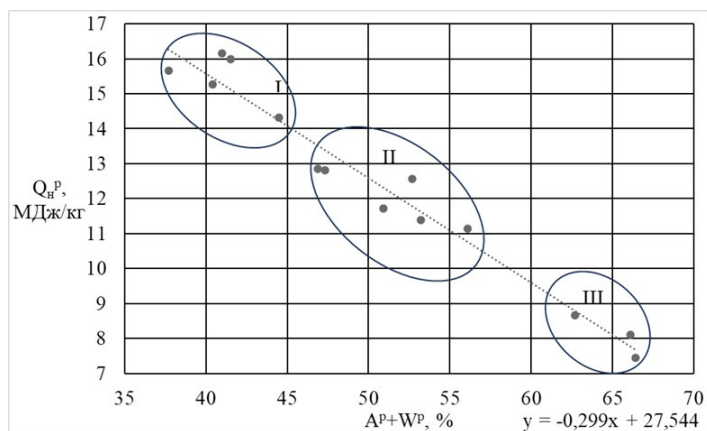


Рис. 2. Зависимость низшей теплоты сгорания от зольности и влажности в БУ.

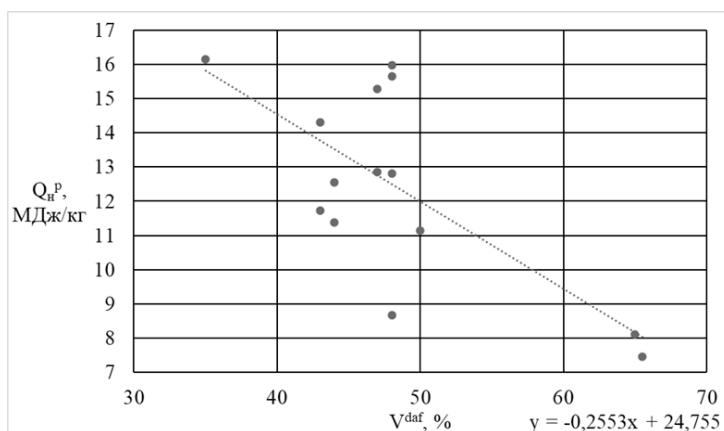


Рис. 3. Зависимость низшей теплоты сгорания от выхода летучих в БУ.

1. Определяется содержание углерода по формуле линии тренда (рис. 1):

$$Q_H^p = 0,3687 \cdot C^p - 0,4481, \quad (1.1)$$

$$C = \frac{Q_H^p + 0,4481}{0,3687}. \quad (1.2)$$

2. Сумма $A^p + W^p$ определяется из формулы линии тренда (рис. 2):

$$Q_H^p = -0,299 \cdot (A^p + W^p) + 27,544, \quad (1.3)$$

$$(A^p + W^p) = \frac{Q_H^p - 27,544}{-0,299}. \quad (1.4)$$

3. Значения для влажности W определяется по среднему значению для групп углей, указанных на рис. 2 (обведенные зоны).

4. Зольность угля определяется из выражения:

$$A = (A^p + W^p) - W. \quad (1.5)$$

5. Содержание кислорода O^p и серы S^p находятся по их средним значениям для принятых в расчетах БУ.

6. Значение содержания водорода определяется из формулы Менделеева:

$$Q_H^p = 0,339 \cdot C^p + 1,025 \cdot H^p + 0,109 \cdot S^p - 0,109 \cdot O^p - 0,025 \cdot W^p, \quad (1.6)$$

$$H^p = \frac{Q_H^p - 0,339 \cdot C^p - 0,109 \cdot S^p + 0,109 \cdot O^p + 0,025 \cdot W^p}{1,025}. \quad (1.7)$$

7. Содержание азота N^p определяется по формуле:

$$N^p = 100 - C^p - N^p - A^p - W^p - H^p - O^p - S^p. \quad (1.8)$$

8. Выход летучих V^{daf} рассчитывается из оценочного уравнения линии тренда (рис. 3) и уточняется в процессе расчета конкретного топлива:

$$Q_H^p = -0,2553 \cdot V^{daf} + 24,755, \quad (1.9)$$

$$V^{daf} = \frac{Q_H^p - 24,755}{-0,2553}. \quad (1.10)$$

Полученные значения ТУС углей сведены в табл. 2. Помимо этого в табл. 2 приведены составы углей № БЗ+10% W^p и № БЗ–10% W^p , отличающихся от угля № БЗ содержанием влажности и зольности на 10%, при постоянной их сумме, а также состав угля № Б5 – реального угля, использованного для проведения валидации численной модели. Изменение влажности угля производится для определения влияния данного параметра на параметры топочного процесса. Зависимости низшей теплоты сгорания от содержания кислорода, серы и азота на рабочую массу топлива носят

Таблица 2. Осредненный состав БУ

Вариант	$Q_{\text{н}}^{\text{р}}, \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$	$A^{\text{р}+} + W^{\text{р}}, \%$	$W^{\text{р}}, \%$	$A^{\text{р}}, \%$	$C^{\text{р}}, \%$	$O^{\text{р}}, \%$	$S^{\text{р}}, \%$	$H^{\text{р}}, \%$	$N^{\text{р}}, \%$	$V^{\text{daf}}, \%$
№ Б1	7.5	67.04	55.75	11.28	21.56	8.31	0.41	2.39	0.31	58.01
№ Б2	9.625	59.93	43.93	16.00	27.32	9.66	0.39	2.41	0.29	53.81
№ Б3+10%W	11.75	52.82	42.11	10.71	33.08	11.01	0.37	2.44	0.28	49.61
№ Б3	11.75	52.82	32.11	20.71	33.08	11.01	0.37	2.44	0.28	49.61
№ Б3-10%W	11.75	52.82	22.11	30.71	33.08	11.01	0.37	2.44	0.28	49.61
№ Б4	16	39.67	29.17	10.50	44.61	11.61	0.50	2.75	0.87	41.21
№ Б5 (Иркутск)	16.446	40.9	27	13.9	43.5	10.69	0.74	3.27	0.9	47.3

неупорядоченный характер. Определение содержания кислорода и серы осуществлялось по средним значениям. Содержание азота определялось по остатку.

ВАЛИДАЦИЯ СОСТАВЛЕННОЙ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ГОРЕНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА НА КОТЛЕ БКЗ-420-140-6

В работе был выбран котел БКЗ-420-140, как наиболее распространенный на докритических параметрах (ДКД). Для проверки составленной численной модели сжигания твердого топлива было проведено численное моделирование сжигания бурого угля в топке котла БКЗ-420-140-6 путем сравнения результатов численного моделирования с результатами, полученными при эксплуатации данного котла. Данный котел изначально рассчитан на сжигание Азейского бурого угля (№ Б5, табл. 2).

Котел имеет открытую призматическую топочную камеру с восемью вихревыми горелками, расположенными в два яруса на фронтальной стене топки. На рис. 4 приведена расчетная схема топочной камеры по двум разрезам. В расчетной 3D модели в месте ввода потока из горелок установлены плоскости, соответствующие каналам горелок для уменьшения количества элементов расчетной сетки и снижения времени расчета. При этом параметры входа потока на плоскости задаются в цилиндрических координатах с указанием центра горелки, а также осевой, радиальной и нормальной составляющей скорости. Выход из модели ограничен по высоте на уровне вершины аэродинамического выступа для уменьшения количества расчетных ячеек в сетке. Данное допущение не должно повлиять на результаты численного моделирования, так как основные процессы горения и образования оксидов азота происходят в нижней части топки.

Для проведения численного моделирования был выбран хорошо зарекомендовавший себя в решении подобного рода задач комплекс вычислительной гидродинамики ANSYS Fluent. Для построения расчетной сетки применялась неструктурированная расчетная сетка, состоящая из тетраэдров, построенная в ANSYS ICEM. По стенам сетки выполнены призматические элементы для лучшего моделирования

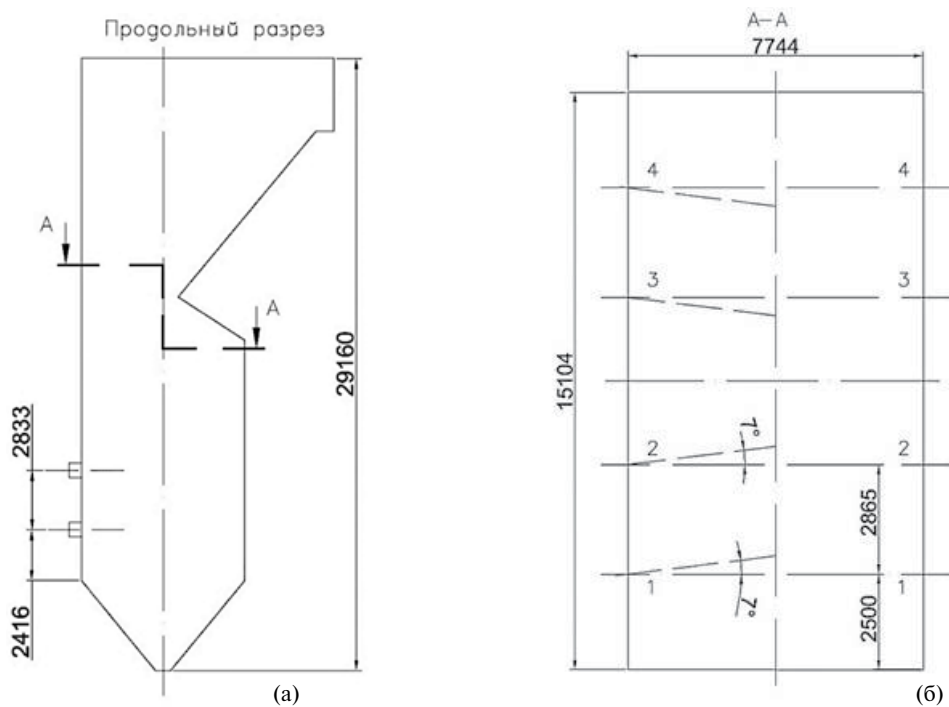


Рис. 4. Схема топочной камеры котла БКЗ-420-140-6: а) продольный разрез; б) разрез по А-А; 1-1, 2-2, 3-3, 4-4 — оси расположения вертикальных плоскостей для визуализации.

пограничного слоя. Для моделирования турбулентности применялся подход Reynolds Averaged Navier–Stokes (RANS, осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье–Стокса) с использованием k - ϵ модели турбулентности и пристеночных функций. Теплообмен моделировался с использованием уравнения энергии Energy, лучистый теплообмен — модели Discrete Ordinates (DO). Движение частиц твердого топлива в газовой фазе моделировалось подходом Эйлера–Лагранжа (Discrete Phase Model); фракционный состав задавался при помощи уравнения Розина–Раммлера. Для моделирования выхода летучих применялась модель Single Kinetic Rate, для горения применялась модель Species Transport в совокупности с моделью ограничения кинетической/диффузной скорости (Kinetics/Diffusion Limited Rate). Моделирование образования оксидов азота (применялись модели для топливных, термических и быстрых оксидов азота) проводилось после получения установившегося решения горения с применением модели DO. Входы в каналы горелочных устройств задавались с помощью типа граничного условия mass-flow inlet с указанием направления потока, его температуры и состава смеси. Выход из модели задавался с помощью типа граничного условия outlet. Для топочных экранов использовался тип граничного условия wall с заданием температуры и коэффициента тепловой эффективности.

Решение проводилось до достижения невязками значений ниже 10^{-3} , для уравнений энергии и излучения — ниже 10^{-6} и получения удовлетворительных значений небалансов на входе и выходе из модели по массе и энергии, а также получения постоянных значений контрольных величин в зависимости от итераций (температура на выходе из топки, концентрация кислорода на выходе из топки, выгорание

коксовых частиц в модели, массовый расход газовой фазы на выходе из модели). Подробно методика расчета численной модели описана в [10].

Уточнение составленной численной модели сжигания бурого угля в топке БКЗ-420-140 проводилось путем сравнения результатов численного моделирования с данными по эксплуатации котла (концентрация оксидов азота NO_x в дымовых газах, потери теплоты с механическим недожогом топлива q_4), а также с расчетными данными (температура дымовых газов на выходе из модели на уровне вершины аэродинамического выступа).

В качестве топлива для проведения моделирования принят бурый уголь с низшей теплотой сгорания на рабочую массу топлива равной 16 446 кДж/кг, влажностью и зольностью на рабочую массу равными 27.00% и 13.90% соответственно, выходом летучих 43.7% [№ Б5, табл. 2].

Необходимые исходные данные (расход топлива, расход и температура первичного и вторичного воздуха и т. д.) приняты на основании данных режимно-наладочных испытаний котла ст. № 4 Ново-Иркутской ТЭЦ, выполненных специализированной организацией в 2022 году. Эти данные использовались как при численном моделировании, так и в расчетах теплового баланса котла, теплообмена в топке и системы пылеприготовления по стандартным методикам.

Сравнение результатов испытаний котла и численного моделирования в программе ANSYS FLUENT проводилось по трем конечным параметрам, характеризующих экономичность, надежность и экологичность работы топочной камеры: потери от механического недожога q_4 , температуру газов на выходе из топки t'_t , концентрацию оксидов азота в дымовых газах C_{NO_x} . В результате численного моделирования получено: q_4 составили 0.23% (по данным испытаний – 0.20%, абсолютная разница – 0.03%), t'_t составила 1216°C (по данным позонного расчета топки – 1211°C, относительная разница 0.4%), C_{NO_x} , приведенная к нормальным условиям и коэффициенту избытка воздуха $\alpha = 1.4$ составила 888 мг/м³ (по данным испытаний – 869 мг/м³, относительная разница – 2.2%). Разработанная численная модель горения твердого топлива в топке котла БКЗ-420-140 успешно прошла валидацию по всем трем параметрам.

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БУРЫХ УГЛЕЙ (БУ) НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ТОПОК КОТЛОВ

В качестве основных показателей эффективности работы топочной камеры котла, как и при валидации численной модели, приняты: температура газов на выходе из топочной камеры t''_t , °C; механический недожог q_4 , %; концентрация оксидов азота в дымовых газах C_{NO_x} , мг/м³.

Температура газов на выходе из топочной камеры определяет соотношение доли радиационного и конвективного теплообмена в котле и вероятность шлакования плотных радиационно-конвективных поверхностей нагрева, расположенных на выходе из топочной камеры, т.е. надежность работы топки. Механический недожог характеризует величину тепловых потерь с недогоревшими коксовыми частицами, процессы горения и полноту выгорания топлива, т.е. экономичность сжигания угля. Оксиды азота являются загрязняющим веществом и связаны с экологичностью процессов горения. В качестве способа снижения выбросов применяется режимный метод, при котором минимизируется образование оксидов азота в процессе горения топлив при оптимизации необходимых затрат.

Для ТУС углей, представленных в табл. 2, выполнено численное моделирование процессов сжигания топлив, результаты которого сведены в табл. 3 и представлены на рис. 5а, б, в. Численное моделирование процесса горения угля № Б1 показало, что в рассматриваемой топке данный уголь практически не горит, и поэтому на рис. 5 точки, характеризующие горение этого угля, отсутствуют. Остальные точки, начиная с угля № Б2, нанесены на графики рис. 5. Численное моделирование сжигания реального угля № Б5 (Иркутск) проведено для существующей схемы сжигания с вихревыми горелками, а также для разработанной схемы с прямоточными горелками и соплами что отражено в табл. 3. Подробное описание схемы сжигания с прямоточными горелками не является предметом настоящей статьи и будет рассмотрено отдельно.

Таблица 3. Результаты численного моделирования горения БУ

Вариант	Температура газов на выходе из модели, °С	Механический недожог, %	Концентрация оксидов азота в дымовых газах, мг/нм ³
№ Б1	не горит	не горит	не горит
№ Б2	873	16.2	220
№ Б3+10%W	1178	0.64	426
№ Б3	1181	0.26	411
№ Б3-10%W	1186	0.22	398
№ Б4	1226	0.41	824
№ Б5 (вихревые горелки)	1216	0.23	888
№ Б5 (прямоточная схема)	1176	0.69	273

Наивысшим механическим недожогом 16.2% обладает бурый уголь с составом № Б2 (рис. 5б), тогда как для остальных вариантов механический недожог составляет менее 1%. Этот уголь характеризуется низкой Q_H^P , которая в свою очередь является следствием высокой влажности (табл. 2). Сжигать этот уголь в рассматриваемой топке не представляется возможным без кардинальной реконструкции системы пылеприготовления на полуразомкнутую или разомкнутую, что не является предметом рассмотрения настоящей статьи.

Наибольшая концентрация оксидов азота наблюдается у вариантов № Б4 и № Б5 (Иркутск) (рис. 5в), что объясняется высоким содержанием углерода в угле C^P и соответственно наивысшей среди рассматриваемых углей теплотой сгорания Q_H^P . Для вариантов № Б2–№ Б5 (Иркутск) для схемы сжигания с вихревыми горелками с увеличением низшей теплоты сгорания растет концентрация оксидов азота в дымовых газах. Минимальное значение наблюдается для варианта № Б2 с низшей теплотой сгорания 9.63 МДж/кг – 220 мг/нм³, максимальное для варианта № Б5 (Иркутск) с низшей теплотой сгорания 16.45 МДж/кг – 888 мг/нм. Применение прямоточных горелок позволяет в 3.25 раза снизить образование оксидов азота в топке при вполне приемлемом увеличении механического недожога топлива.

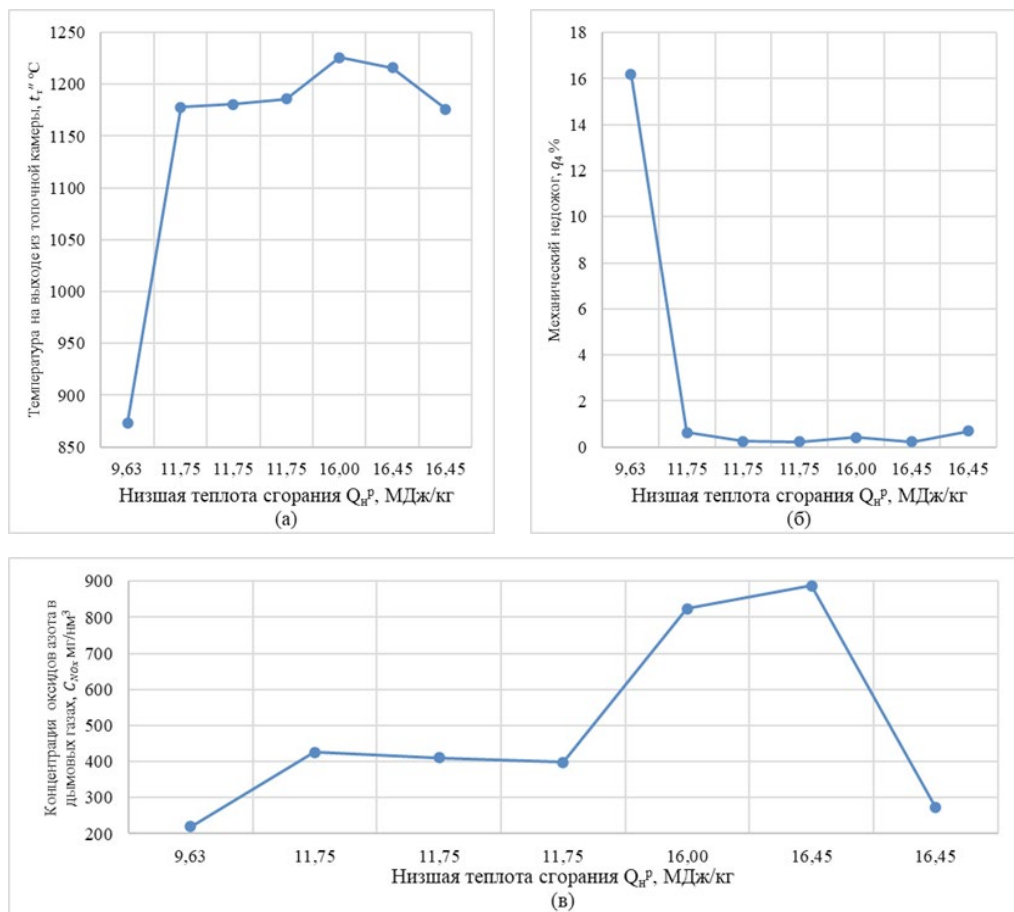


Рис. 5. Влияние низшей теплоты сгорания БУ на эффективность работы топочной камеры (а) t'' , (б) q_4 , (в) C_{NOx} .

Из полученных результатов (рис. 5а) видно, что влияние низшей теплоты сгорания топлива на температуру газов на выходе из топочной камеры в диапазоне $Q_{н}^p$ от 11,75 МДж/кг до 16,45 МДж/кг незначительное. Резкое падение температуры в 1,35 раза при увеличении механического недожога более чем в 25 раз наблюдается для варианта № Б2 с низшей теплотой сгорания менее 10 МДж/кг.

По результатам расчетов проведен анализ влияния различных характеристик топлив на 3 принятых параметра эффективности сжигания топлива. Влияние повышения влажности на температуру газов на выходе из топочной камеры и механический недожог незначительное. Только увеличение влажности примерно выше 45% (уголь № Б2) сопровождается резким падением температуры и увеличением величины механического недожога. Следует подчеркнуть, что при этом решающим фактором может быть снижение низшей теплоты сгорания топлива, которая равна 9,625 МДж/кг. Что касается влияния влажности угля на образование оксидов азота, то явной зависимости не выявлено. Главным фактором с этой точки зрения является организация процесса горения топлива и выбор горелочных устройств.

Зависимости влияния зольности БУ на эффективность работы топочной камеры аналогичны влиянию влажности угля. Это подтверждает, что главным фактором, непосредственно влияющим на низкую эффективность горения угля № Б2 является его низкая теплота сгорания. Содержание углерода влияет аналогично низшей теплоте сгорания угля ввиду их линейной зависимости между собой.

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ШЛАКОВАНИЯ ТОПОЧНЫХ ЭКРАНОВ

Для всех рассматриваемых ТУС БУ определена температура начала деформации золы t_A (табл. 4), на основании которой проведено численное моделирование возможности шлакования экранов топочной камеры. Условием шлакования в данной работе принято условие контакта частицы со стенкой при температуре частицы большей или равной температуре t_A . При анализе результатов моделирования учтено, что при опробовании разработанной математической модели шлакования на реальном котле (условия закрепления частицы на поверхности нагрева те же), при интенсивности шлакования равной $0.015 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ формирования отложений на поверхностях нагрева топочной камеры не наблюдалось [10].

Результаты численного моделирования возможности шлакования топочных экранов при сжигании ТУС БУ представлены в табл. 4. Видно, что превышение порогового значения интенсивности шлакования $0.015 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ наблюдается только в случае сжигания № Б3-10% W^p (максимальная интенсивность шлакования равна $0.0164 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$) (картина интенсивности роста отложений для этого случая приведена на рис. 6). Таким образом, можно сделать вывод, что при сжигании ТУС БУ в топке котла БКЗ-420-140-6 вероятность шлакования возникает только для одного угля из рассмотренных.

Таблица 4. Температура начала деформации золовых частиц для рассматриваемых бурых углей и максимальная интенсивность шлакования

Бурый уголь	Температура начала деформации золовых частиц t_A , °C	Максимальная интенсивность шлакования, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$
№ Б2	1230	0.0144
№ Б3+10% W^p	1198	0.0049
№ Б3	1198	0.0065
№ Б3-10% W^p	1198	0.0164
№ Б4	1190	0.0032

Из табл. 4 видно, что отсутствует прямая связь между температурой начала деформации золы t_A и максимальной интенсивностью шлакования топочных экранов. Поэтому оценка шлакования того или иного топлива в каждом случае должна проводиться с учетом других его характеристик помимо температуры начала деформации золы t_A , а также с учетом аэродинамических особенностей схемы сжигания. Методика оценки возможности применения того или иного угля по индексу шлакования приведена в [11].

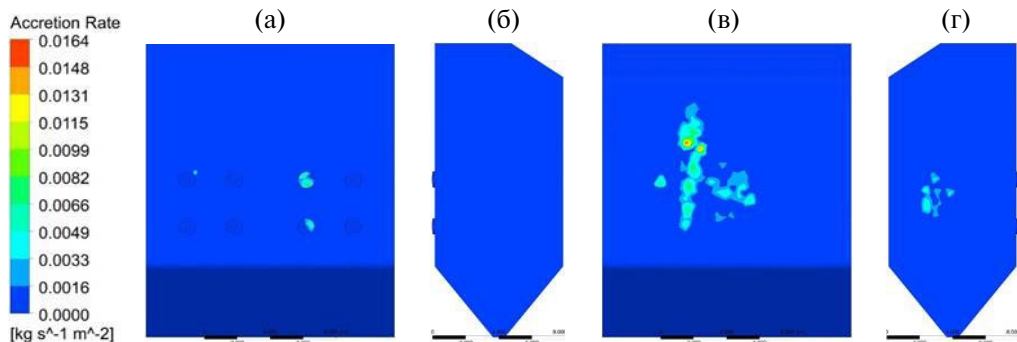


Рис. 6. Интенсивность роста отложений на стенах топочной камеры с вихревыми горелками с топливом № БЗ-10% W^p : (а) фронтальная; (б) правая; (в) задняя; (г) левая.

ВЫВОДЫ

1. Предложена методика теоретического усреднения состава (ТУС) для 14 наиболее распространенных марок бурого угля (БУ). Дальнейшие расчеты проводились для шести ТУС БУ с низшей теплотой сгорания на рабочую массу топлива Q_H^p от 7.5 до 16 МДж/кг. (а)(б)(в)(г)

2. Валидация предложенной численной модели расчета сжигания была проведена в сравнении с результатами испытания котла БКЗ-420-140-6 Ново-Иркутской ТЭЦ и показало хорошую сходимость по трем основным показателям эффективности горения угля: температуре на выходе из топки, механического недожога и концентрации оксидов азота в дымовых газах.

3. Показано, что рассматриваемая в работе топка является достаточно универсальной при сжигании непроектных БУ. Влияние низшей теплоты сгорания топлива на температуру газов на выходе из топочной камеры и на механический недожог в диапазоне от 11.75 МДж/кг до 16.45 МДж/кг незначительное. Резкое падение температуры газов на выходе из топки в 1.35 раза и увеличение механического недожога более, чем в 25 раз наблюдается для угля с низшей теплотой сгорания менее 10 МДж/кг.

4. Влияние повышения влажности топлива на температуру газов на выходе из топочной камеры и на механический недожог начинает сказываться при увеличении влажности свыше 45%. Решающим фактором при этом является снижение низшей теплоты сгорания топлива, которая снижается до 9.625 МДж/кг.

5. Незначительное превышение порогового значения интенсивности шлакования 0.015 кг/(м²·с) по температуре начала деформации золовых частиц t_A наблюдается только в случае сжигания БУ со средней по величине Q_H^p при снижении влажности на 10%.

6. Расчетные значения концентраций оксидов азота дымовых газов при штатной схеме горения могут превышать нормативные допустимые для БУ со сравнительно высоким содержанием углерода топлива. В этом случае можно рассматривать, наряду с дорогостоящей очисткой дымовых газов, возможность установки прямоточных горелок.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00722, <https://rscf.ru/project/22-19-00722/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Майданик М.Н., Вербовецкий Э.Х., Тугов А.Н. Предварительная оценка возможности перевода котлов тепловых электростанций на сжигание альтернативного угля // Теплоэнергетика. 2021. № 9. С. 33–42.
2. Осинцев В.В. и др. Анализ результатов опытного сжигания высокорекреационного бурого угля на котле БКЗ-210-140Ф // Теплоэнергетика. 2003. № 8. С. 27–31.
3. Двойнишников В.А., Шумилов Т.И. Организация сжигания канскоачинских углей в паровых котлах энергоблоков 300 МВт Рязанской ГРЭС // Теплоэнергетика. 1998. № 6. С. 2–7.
4. Al-Abbas A.H., Naser J., Hussein E.K. Numerical simulation of brown coal combustion in a 550 MW tangentially-fired furnace under different operating conditions // Fuel. 2013. V. 107. P. 688–698.
5. Hashimoto N., Shirai H. Numerical simulation of sub-bituminous coal and bituminous coal mixed combustion employing tabulated-devolatilization-process model // Energy. 2014. V. 71. P. 399–413.
6. Sheng C. et al. A computational fluid dynamics based study of the combustion characteristics of coal blends in pulverised coal-fired furnace // Fuel. 2004. V. 83. № 11–12. С. 1543–1552.
7. Su S., Pohl J.H., Holcombe D. Fouling propensities of blended coals in pulverized coal-fired power station boilers // Fuel. 2003. V. 82. № 13. P. 1653–1667.
8. Ikeda M. et al. Emission characteristics of NO_x and unburned carbon in fly ash during combustion of blends of bituminous/sub-bituminous coals // Fuel. 2003. V. 82. № 15–17. P. 1851–1857.
9. Абрютин А.А., Карасина Э.С., Петросян Р.А. Тепловой расчет котлов. Нормативный метод – СПб.: Изд-во “ВТИ” и НПО “ЦКТИ”, 1998. 258 с.
10. Prokhorov V.B., Fomenko M.V. and Fomenko N.E. Solid fuel combustion processes modelling in the furnace in terms of the boiler K-50-14-250. The Third Conference “Problems of Thermal Physics and Power Engineering”, Journal of Physics: Conference Series 1683 (2020) 042050.
11. Chernov S.L., Prokhorov V. B., Pay A.V., Aparov V.D. Assessment of the Slagging Tendency in Power Plant Boiler Furnaces Depending on the Physical-Chemical Characteristics of Ash and Coal // Problems of the Regional Energetics. 2023. Vol. 60. No. 4. pp. 71–85.

Assessment of the Influence of Thermal Characteristics of Non-Design Lignite on their Suitability for Combustion in the Furnace of an Energy Boiler

S. L. Chernov^{a, *}, V. B. Prokhorov^{a, **}, V. D. Aparov^{a, ***}, A. V. Pai^{a, ****}

^aNational Research University "Moscow Power Engineering Institute", Russia, Moscow

*e-mail: ChernovSL@mpei.ru

**e-mail: ProkhorovVB@mpei.ru

***e-mail: AparovVD@mpei.ru

****e-mail: PaiAV@mpei.ru

The possibility of burning various brown coals (LC) in the furnace of the BKZ-420-140-6 boiler was studied using numerical simulation. To check the compiled numerical model of solid fuel combustion, it was previously validated in relation to the combustion of BU of a certain composition by comparing the calculation results with data obtained during the operation of a real boiler.

A method was developed for averaging the characteristics of coal and dependencies were obtained that determine the composition of coal based on an analysis of the composition of 14 types of coal in the range of values of the lower calorific value Q_{nr} from 7.5 to 16 MJ/kg. Based on the obtained dependencies for 4 values of Q_{nr} , the theoretical average composition (ATC) of coals was determined. For one of the TUSs, the humidity varied by 10% up and down.

As indicators of the efficiency of the combustion chamber of the boiler, the temperature of the gases at the exit from the combustion chamber, mechanical underburning and the concentration of nitrogen oxides in the flue gases are taken. The results of numerical modeling show that with the calorific value of the fuel $Q_n^r \leq 10$ MJ/kg, the mechanical underburning q_4 exceeds the permissible standards. The highest concentration of nitrogen oxides at the level of 800–900 mg/nm³ is observed for brown coals with high Q_n^r and the highest carbon content. It is also shown that the use of direct-flow burners with the organization of staged fuel combustion makes it possible to reduce the formation of nitrogen oxides in the furnace by 3.25 times compared to the original combustion scheme using existing vortex burner devices. The influence of the lower calorific value of fuel on the gas temperature at the exit from the combustion chamber in the range Q_n^r from 11.75 to 16.45 MJ/kg is insignificant. The effect of increasing fuel humidity on the gas temperature at the outlet of the combustion chamber and on mechanical underburning is insignificant up to a working fuel humidity of approximately 45%. In general, studies have shown that the firebox under consideration allows the combustion of various brown coals with changes in the physico-chemical composition and thermal characteristics within a wide range.

Keywords: boiler furnace, lignite, non-design fuel, mathematical modeling, thermal characteristics, average composition of coal, mechanical underburning, nitrogen oxides