

## The Influence of Burning Ratios Based on Coal Characteristics on its Combustion in the Boiler Furnace

Chernov S.L., Prokhorov V.B., Aparov V.D., Fomenko M.V.  
National Research University "Moscow Power Engineering Institute"  
Moscow, Russian Federation

**Abstract.** The need of switch to burn non-design fuel arises during the thermal power plants long-term operation. The choice of replacing coal is quite complicated and currently being solved by various non-design fuels experimental combustion on a specific power boiler. The aim of the work is to develop criteria assessing non-design coal burning possibility in a specific furnace before experimental combustion. The stated goal is achieved with the help of numerical combustion modeling regarding various coals at the pre-critical parameters boiler furnace with an average composition ranking by the lower calorific value. 2 burning ratios have been proposed based on foreign experience: the fuel ratio and the degree of fuel burnout. The first is the ratio of the fuel carbon to volatile substances contents, which in this work are taken as an analytical mass. The second is calculated with the proposed formula, which, instead of the combustible content in fly ash, use mechanical underburning widely included in the technical calculations. Combustion zones with the degree of the acceptable fuel burnout according to the standards and with its excess are distinguished. The limit of possible coal combustion according to the fuel coefficient is found as well. It is shown that this furnace is quite universal for burning a wide range of coals, although it was originally designed for burning brown coal. It is not recommended to burn only lean and low-caking bituminous coals, anthracites and brown coals with calorific value less than 11.5 MJ/kg or humidity more than 40%. The obtained results are significant for the preliminary assessment of non-design fuel combustion and narrowing the range of fuels under consideration. Other the boiler conversion consequences for non-design fuel should be taken into account for the final decision, and above all, the probability of the heating surfaces slagging.

**Keywords:** boiler furnace, non-design fuel, thermal characteristics, fuel ratio, fuel burnout degree, mechanical underburning.

UDC: 621.1: 628.5

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2024.3-63.04>

### Analiza, cu ajutorul coeficienților de ardere, a influenței compoziției și caracteristicilor termice ale cărbunelui asupra arderii acestuia în cuptorul cazanului

Chernov S.L., Prokhorov V.B., Aparov V.D., Fomenko M.V.

Universitatea Națională de Cercetare „Institutul de Inginerie Energetică din Moscova”, Moscova, Federația Rusă  
**Rezumat:** Scopul lucrării este de a elabora criteriile care să evalueze posibilitatea de ardere a cărbunelui neproiectat într-un cuptor specific înainte de arderea experimentală. Acest obiectiv este atins prin modelarea numerică a arderii diversilor cărbuni în cuptorul cazanului la parametrii subcritici cu o compoziție medie bazată pe puterea calorică mai mică. Au fost analizate rezultatele calculării modului de ardere a cuptorului în funcție de parametrul de subardere mecanică a cărbunilor din Rusia și țările învecinate. Sunt luați în considerare doi coeficienți de ardere a combustibilului: coeficientul de combustibil și rata de ardere a combustibilului. Primul reprezintă raportul dintre conținutul de carbon din combustibil și randamentul volatil pe masă analitică. Cel de-al doilea este calculat folosind formula propusă, care în loc de conținutul de combustibil în cenușă zburătoare include valoarea procentuală a subcombustiei mecanice, care este utilizată pe scară largă în calculele tehnice. Cele mai importante rezultate sunt dependențele obținute ale arderii combustibilului într-un focar specific de coeficientul combustibilului. Există zone de ardere cu un grad acceptabil de ardere a combustibilului conform standardelor și cu excesul acestuia. S-a găsit și limita posibilă a arderii a cărbunelui în funcție de coeficientul de combustibil. Cuptorul studiat a fost conceput inițial pentru arderea cărbunelui brun și, după cum au arătat studiile, nu este recomandat să ardeți cărbuni slabi și slab aglomerați, antracit, precum și cărbuni brunii cu o putere calorică mai mică de 11,5 MJ/kg. Și/sau o umiditate de funcționare mai mare de 40%. Rezultatele obținute sunt semnificative pentru determinarea rezultatului arderii combustibilului neproiectat și restrângerea gamei de combustibili luați în considerare, ținând în suprafețe de încălzire.

**Cuvinte-cheie:** cuptor de cazan, combustibil neconcepțional, caracteristici termice, raport combustibil, grad de ardere a combustibilului, subardere mecanică.

**Влияние коэффициентов горения на основе характеристики угля на его сжигание в топке котла  
Чернов С.Л., Прохоров В.Б., Апаров В.Д., Фоменко М.В.**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»

**Аннотация.** В процессе длительной эксплуатации ТЭС возникает необходимость перехода на сжигание непроектного топлива. Выбор пригодного для замены угля является достаточно сложной задачей, которую в настоящее время решают путем опытного сжигания различных непроектных топлив на конкретном энергетическом котле. Целью работы является разработка критериев, оценивающих возможность сжигания непроектного угля в конкретной топке до опытного сжигания. Поставленная цель достигается путем численного моделирования горения различных углей в топке котла на докритических параметрах с усредненным составом по низшей теплоте сгорания. Анализировались результаты расчета топочного режима горения по параметру механического недожога углей России и ближнего зарубежья. Рассмотрены два коэффициента горения топлива: топливный коэффициент и степень выгорания топлива. Первый представляет отношение содержания углерода топлива к величине выхода летучих, на аналитическую массу. Второй рассчитывается по предложенной формуле, в которую вместо содержания горючих в золе уноса входит широко используемое в технических расчетах процентное значение механического недожога. Наиболее важными результатами являются полученные зависимости горения топлив в конкретной топке от топливного коэффициента. Различают зоны горения с допустимой по нормативам степенью выгорания топлива и с ее превышением. Найдена также граница возможного сжигания углей по топливному коэффициенту. Исследуемая топка первоначально проектировалась для сжигания бурого угля, и в ней, как показали исследования, не рекомендуется сжигать тощие и слабоспекающиеся каменные угли, антрацит, а также бурые угли с теплотой сгорания менее 11,5 МДж/кг и/или рабочей влажностью более 40%. Полученные результаты значимы для определения результата сжигания непроектного топлива и сужения круга рассматриваемых топлив, при обязательном учете других последствий перевода котла на непроектное топливо, и прежде всего, вероятности шлакования поверхностей нагрева.

**Ключевые слова:** топка котла, непроектное топливо, теплотехнические характеристики, коэффициенты горения, топливный коэффициент, степень выгорания топлива, механический недожог.

## ВВЕДЕНИЕ

Доля угля в энергобалансе России к 2050 г., вопреки климатической повестке и целям по достижению углеродной нейтральности к 2060 г., может не только не снизиться, но даже немного возрасти. Такой вариант обсуждался в рамках подготовки новой энергетической стратегии до 2050г. В июле 2023 речь шла пока об увеличении доли угольной генерации с нынешних 13% до 15% ([www.vedomosti.ru](http://www.vedomosti.ru)) за счет строительства новых блоков на Дальнем Востоке и в Сибири. Ранее намечалось снижение этой доли до 4,9% к 2050 г. Следует учитывать, что в 2022 г. производство электроэнергии на угле в наиболее быстроразвивающихся странах Индии и Китае соответственно составило 74% и 61%.

В процессе длительной эксплуатации ТЭС часто возникает необходимость перехода на сжигание непроектного угля. Причинами такого перехода могут быть: ухудшение характеристик базового угля в сравнении с первоначальным уменьшением его запасов, увеличением стоимости топлива, необходимостью снижения вредных выбросов в атмосферу и т. д. Несмотря на огромные запасы угля в стране далеко не все марки

могут быть эффективно использованы в топке конкретного котла.

При сравнительном анализе характеристик сжигаемого на ТЭС и непроектного углей производят прежде всего расчетно-аналитические сопоставительные оценки теплотехнических и шлакующих свойств топлива в топке котла. В данной статье рассматриваются исключительно подходы к определению возможности горения непроектного угля с точки зрения эффективности его сжигания в топке конкретного котла. Оценку вероятности шлакования ширмовых и конвективных поверхностей нагрева можно проводить по методикам, изложенным как в отечественной, так и в зарубежной литературе [1-3].

Определение годности того или иного угля в настоящее время определяется путем опытного сжигания [4,5]. Такой метод достаточно затратный и требует много времени на реализацию. За рубежом проводится много научно-исследовательских работ направленных на моделирование конечных параметров горения в зависимости от состава и теплотехнических характеристик углей. Исследования, как правило, направлены на оптимизацию горения топлива

путем смешения двух или нескольких видов углей в различных пропорциях.

В работе [6] проводилось исследование сжигания смеси бурого и каменного угля в соотношении 0, 25, 50, 75 и 100% (доля бурого угля по низшей теплоте сгорания). Валидация результатов численного моделирования проводилась по сопоставлению их с параметрами, полученными на огневом стенде. Максимум механического недожога был получен для смеси с долей бурого угля равной 25%, что объясняется значительным увеличением влажности, при недостаточном росте выделяемых летучих. Аналогичная работа, но для смесей кокса, полученного в результате пиролиза, и каменного угля с высоким выходом летучих, проведена в [7]. Отмечается рост выгорания на 39% и более раннее зажигание на 30% по сравнению с горением чистого кокса. Также в [8] и [9] приведены результаты опытного сжигания непроектных топлив в котлах П-59 и П-57 соответственно. В работе [10,11] используются компьютерные модели динамики потока для предсказания горения углей с различными физико-химическими характеристиками. В [12] показано, что увеличение доли кокса ослабляет реакционную активность смеси углей потому, что величина энергии активации не может быть рассчитана по методу Coats-Redtech. В работе [13] проводились исследования на экспериментальном стенде со щелевой горелкой. Низкосортные угли в смеси в основном влияют на температуру зажигания, а высокосортные угли на температуру горения. В модели рассматривались три зоны: нагрев, выход летучих, горение кокса. В [14] приведены исследования на котле 500 МВт по сжиганию подсушенного лигнита. Производилось изменение двух параметров: пропорции смесей и ступенчатость подачи воздуха на горение. В работах [15] и [16] показано, что поведение смеси углей не всегда аддитивно отдельным углям. Проводились анализы золы. Недожог в смеси углей характерен для менее реакционного угля.

Так в [17] проведено исследование сжигания смесей различных Индийских углей. В работе [18] приведены термогравиметрические исследования на лабораторном стенде «нисходящая труба». Получены кривые выгорания для каменного угля, полукокса и их смесей. Отмечается, что кривые для топлива одинаковы для чистых

каменных углей и полукокса, а при сжигании их смеси увеличение доли полукокса повышает температуры зажигания и горения топлива. Результаты работы [19] показывают, что с ростом доли каменного угля в смеси с полукоксом температура воспламенения и температура горения снижаются. Получены эмпирические формулы для индексов зажигания углерода и развитого горения серы, которые могут применяться для определения параметров совместного горения каменного угля и полукокса (антрацита). В [20] проведено численное моделирование для котла 500 МВт с тангенциальным сжиганием. Моделировалось, как смешение внутри топки, так и снаружи со смесью 60% каменного и 40% бурого угля по весу. Наилучший результат дает внутреннее совместное сжигание, когда каменный уголь сжигается в нижних горелках, а бурый уголь в верхних. В [21] рассматривался перевод котла на сжигание смеси бородинского угля марки 2БР и большесырского угля марки 3БР.

### I. Выбор критериев горения топлива

В зарубежной литературе в качестве критерия качества топлива применяется коэффициент FR (fuel ratio) [19], который представляется как отношение содержания твердого углерода в угле к содержанию летучих. При этом считается, что чем больше FR, тем топливо более высокосортное с более высокой теплотой сгорания. И, наоборот, чем FR, меньше, тем меньше температура воспламенения топлива.

С нашей точки зрения, целесообразно это отношение представить на гигроскопическую массу, так как соответствующая влажность является табличной величиной и входит в расчетные характеристики твердых топлив. Для одних и тех же топлив аналитическая равновесная влажность близка к гигроскопической, если температура и влажность воздуха в лаборатории незначительно отличаются от стандартных. В этом случае нами применяется топливное отношение  $K_T$ , которое равно:

$$K_T = C_T^a / V^a \quad (1)$$

где  $C_T^a$  – содержание углерода в топливе на аналитическую массу, %;  $V^a$  – выход летучих на аналитическую массу, %.

Углерод топлива и выход летучих на аналитическую массу рассчитывается по формулам:

$$C_T^a = 100 - (W^a + A^a + V^a) \quad (2)$$

$$W^a = W^{gi} \quad (3)$$

$$A^a = (100 - W^{gi}) / (100 - W^r) \cdot A^r \quad (4)$$

$$V^a = (100 - W^a - A^a) / 100 \cdot V^{daf} \quad (5)$$

где  $W^a$ ,  $A^a$  - влажность и зольность на аналитическую массу, %;  $W^{gi}$  - влажность на гигроскопическую массу, %;  $W^r$ ,  $A^r$  - влажность и зольность на рабочую массу, %;

$V^{daf}$ ,  $V^a$  - выход летучих на сухую беззольную и аналитическую массы соответственно, %.

Состав расчетных углей приведен в табл.1. В основу таблицы были положены усредненные составы наиболее распространенных в России 14 бурых (№ Б1-№ Б4) и 19 каменных (№ К1-№ К3) углей, расположенные в порядке возрастания  $Q_i^r$ . Усредненные характеристики углей № Б3+10% $W^r$  и № Б3-10% $W^r$  получены соответственно увеличением или уменьшением влажности усредненного угля № Б3 на 10%. При этом сумма влажности и зольности угля оставалась неизменной. Составы № К4\* и № К5\*\* соответствуют реальным углям Кузнецкому Т и Кузнецкому 2 СС [1].

Таблица 1

Исходные данные для расчетов горения БУ и КУ

Table 1

Initial data for calculations of combustion of brown and bituminous coal

	$W^r$ , %	$A^r$ , %	$S^r$ , %	$C^r$ , %	$H^r$ , %	$N^r$ , %	$O^r$ , %	$W^{gi}$ , %	$V^{daf}$ , %	$Q_i^r$ , MJ/kg	$q_4$ , %
№ Б1 (Brown coal № 1)	55,8	11,3	0,41	21,5	2,39	0,31	8,3	-	58,0	7,5	-
№ Б2 (Brown coal № 2)	43,9	16,0	0,39	27,3	2,41	0,29	9,67	8,7	53,8	9,63	16,2
№ Б3+10% $W^r$ (Brown coal № 3 +10% $W^r$ )	42,1	10,7	0,37	33,1	2,44	0,28	11,0	11,4	49,6	11,8	0,64
№ Б3 (Brown coal № 3)	32,1	20,7	0,37	33,1	2,44	0,28	11,0	11,4	49,6	11,8	0,26
№ Б3-10% $W^r$ (Brown coal № 3 -10% $W^r$ )	22,1	30,7	0,37	33,1	2,44	0,28	11,0	11,4	49,6	11,8	0,22
№ Б4 (Brown coal № 4)	29,2	10,5	0,50	44,6	2,75	0,87	11,6	10,8	41,2	16,0	0,41

	$W^r$ , %	$A^r$ , %	$S^r$ , %	$C^r$ , %	$H^r$ , %	$N^r$ , %	$O^r$ , %	$W^{gi}$ , %	$V^{daf}$ , %	$Q_i^r$ , MJ/kg	$q_4$ , %
№ K1 (Bituminous coal №1)	5,0	44,2	1,00	37,8	2,96	1,30	7,7	1,3	40,7	15,0	0,04
№ K2 (Bituminous coal №2)	8,4	27,9	1,00	51,9	3,14	1,30	6,4	1,6	33,1	20,0	0,48
№ K3 (Bituminous coal №3)	9,4	14,0	1,00	65,9	3,26	1,30	5,1	3,0	25,6	25,0	0,36
№ K4 (Кузнецкий бассейн, Т; Kuznetskiy T, lean coal)	7,0	14,6	0,50	70,2	3,00	1,70	3,0	1,8	12,5	25,1	23,4
№ K5 (Кузнецкий бассейн, 2СС; Kuznetskiy SS, low-caking bituminous coal )	8,5	16,5	0,40	66,0	3,50	1,60	3,5	1,8	20,0	25,3	3,89

Результаты расчетов показали, что  $K_T$  растет с увеличением низшей теплоты сгорания  $Q_i^r$ , причем как для бурых, так и для каменных углей эта зависимость является экспоненциальной до теплоты сгорания около 25 МДж/кг. Далее увеличение топливного отношения происходит при практически неизменной низшей теплоте сгорания (рис. 1).

Другим важным показателем эффективности горения является количество сгоревшего топлива или сопряженная величина несгоревшего остатка. В [6,14,19,22] предложены различные варианты расчетных выражений, в которые так или иначе входит содержание горючих в золе уноса,  $G_{un}$ , %:

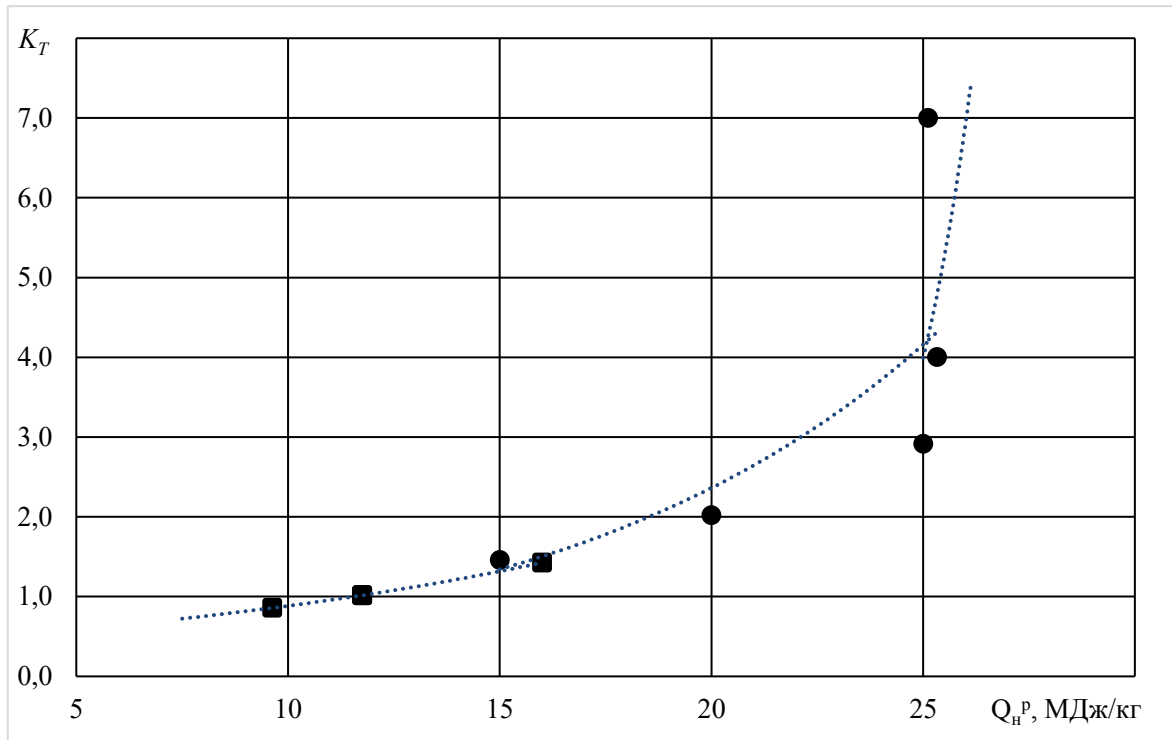
$$\chi_s = 1 - (A^c \cdot G^{un}) / ((100 - A^c) \cdot (100 - G_{un})) \quad (6)$$

где  $\chi_s$  – степень выгорания топлива (весовая характеристика);  $A^c$  – зольность топлива на сухую массу, %;  $G_{un}$  – содержание горючих в золе угля, %;

В технических расчетах топочного горения в России принято определять другую величину полноты сгорания топлива, а именно, механический недожог  $q_4$ .

Предложена формула пересчета  $q_4$  на  $G_{un}$ :

$$G_{un} = 100 / ((32,7 / Q_i^r) \cdot (A^r / q_4) + 1) \quad (7)$$



● – Каменные угли, ■ – Бурые угли

Рис. 1 Зависимость топливного отношения от низшей теплоты сгорания угля.

● – Bituminous coal, ■ – Brown coal

Ris. 1 Dependence of fuel ratio on the coal lower calorific value.

## II. Численная модель и её валидация

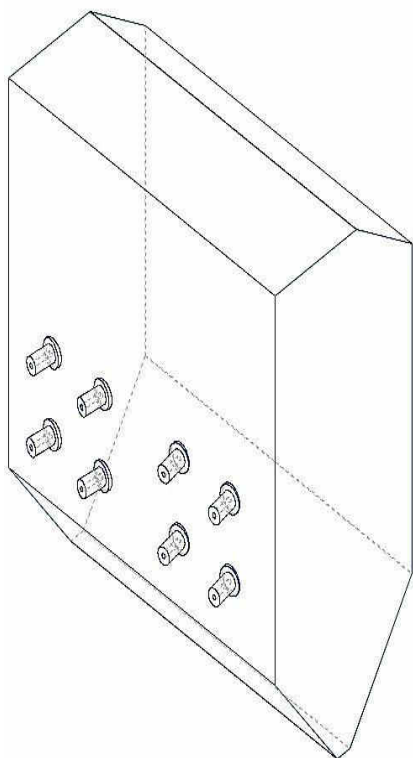
Анализ процессов горения углей проводился построением зависимости степени выгорания топлива  $\chi_e$  от  $K_T$ . С помощью программного обеспечения Ansys Fluent проведены расчеты тепловых процессов горения различных углей в топке котла БКЗ-420-140-6, первоначально рассчитанной на сжигание бурого азейского угля. Методика численного моделирования изложена в работе [23] и [24]. Основным расчетным параметром, определяющим эффективность горения топлива и используемым для построения зависимостей  $\chi_e$  от  $K_T$  является механический недожог  $q_4$ .

Данный котел имеет открытую призматическую топочную камеру с восемью вихревыми горелками, расположенными в два яруса на фронтальной стене топки. 3D модель данной топки представлена на рис. 2. В 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.

В качестве исходных данных для моделирования и для сравнения результатов моделирования использовались информация из режимных карт котлов и их инструкций по эксплуатации. Для получения расхода топлива, а также значений температур дымовых газов в расчетном сечении на выходе из модели были проведены тепловые расчеты котла в программе BoilerDesigner, а также позонные расчеты топочной камеры.

Для проверки разработанной численной модели сжигания твердого топлива в рамках настоящей работы проведено сравнение результатов численного моделирования с результатами, полученными при эксплуатации данного котла.



**Рис. 2 Геометрическая 3D модель топочной камеры котла.**

**Fig. 2 Geometric 3D model of the boiler furnace.**

Необходимые исходные данные (расход топлива, расход и температура первичного и вторичного воздуха и т.д.) приняты на основании данных по режиму работы котла на Ново-Иркутской ТЭЦ на буром азейском угле и получены в расчетах теплового баланса котла, расчетах теплообмена в топке и в тепловых расчетах системы пылеприготовления. Для определения температуры дымовых газов по высоте на уровне вершины аэродинамического выступа выполнен позонный тепловой расчет топки.

В результате численного моделирования получено, что потери тепла от механического

недожога составили 0,23 % (по данным испытаний – 0,20 %, абсолютная разница – 0,03 %), температура дымовых газов на выходе из модели составила 1216 °С (по данным позонного расчета топки – 1211 °С, относительная разница 0,4 %).

Результаты расчета горения углей усредненного состава табл.1 приведены в табл.2.

### III. Зависимости основных параметров горения от теплотехнических характеристик углей

График зависимости для каменных углей приведен на рис. 3, где показано, что степень выгорания топлива меняется от 0,80 до 0,96 при уменьшении топливного отношения от 7 до 4. Следует отметить, что в диапазоне значений  $K_T$  от 1,5 до 3  $\chi_e$  превышает 0,99, а при дальнейшем росте резко падает и при значениях более 7 в данной топке горение вообще не поддерживается. Анализ полученных результатов показывает, что в указанные пределы с от 1,5 до 3 не входят тощие угли и антрацит, а остальные угли при сжигании в топке данного котла должны сгорать с допустимыми пределами недожога.

На рис. 4 приведена аналогичная зависимость  $\chi_e$  от  $K_T$  для бурых углей, сжигаемых в том же котле БКЗ-420-140. Для сравнения на графике нанесена часть зависимости, полученной для каменных углей рис. 3, сопряженных по своим характеристикам с бурыми углями. Показано, что для бурых углей характерно резкое снижение степени выгорания  $\chi_e$  при  $K_T$  меньше 1.

Таблица 2

*Результаты расчетов горения усредненных составов бурых и каменных углей*

Table 2

*Combustion calculations results of brown and bituminous average compositions coals*

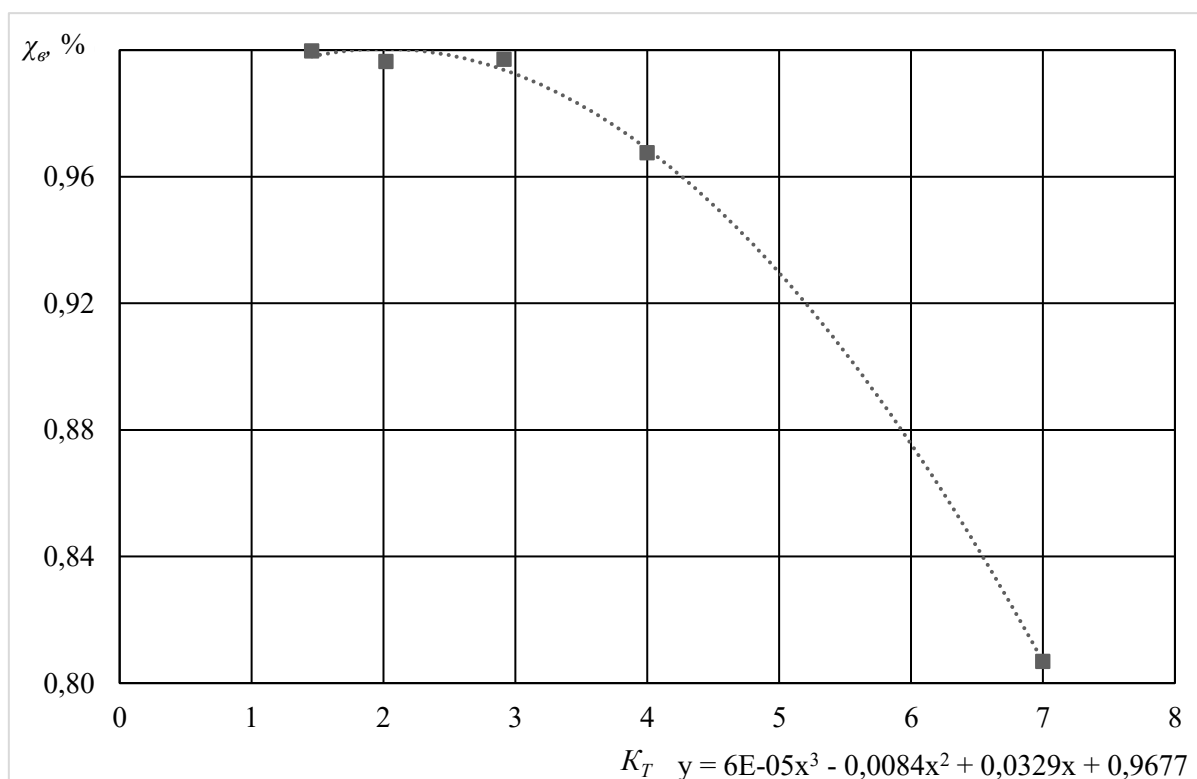
	$W^a, \%$	$A^a, \%$	$V^a, \%$	$C_T^a, \%$	$G_{un}$	$\chi_e$	$K_T$
№ Б2 (Brown coal № 2)	8,67	26,06	35,12	30,15	22,96	0,9706	0,86
№ Б3+10% $W^r$ (Brown coal № 3 +10% $W^r$ )	11,40	16,40	35,82	36,38	2,10	0,9986	1,02

	$W^a, \%$	$A^a, \%$	$V^a, \%$	$C_T^a, \%$	$G_{un}$	$\chi_e$	$K_T$
№ Б3 (Brown coal № 3)	11,40	27,03	30,54	31,03	0,45	0,9993	1,02
№ Б3-10% $W^r$ (Brown coal № 3 -10% $W^r$ )	11,40	34,94	26,62	27,04	0,26	0,9992	1,02
№ Б4 (Brown coal № 4)	10,80	13,22	31,31	44,67	1,87	0,9985	1,43
№ К1 (Bituminous coal №1)	1,30	45,91	21,48	31,31	0,04	0,9997	1,46
№ К2 (Bituminous coal №2)	1,60	29,96	22,67	45,77	1,04	0,9964	2,02
№ К3 (Bituminous coal №3)	3,00	15,00	20,95	61,05	1,93	0,9971	2,91
№ К4 (Кузнецкий бассейн, Т; Kuznetskiy T, lean coal)	1,80	15,42	10,35	72,44	55,15	0,8068	7,00
№ К5 (Кузнецкий бассейн, 2СС; Kuznetskiy SS, low-caking bituminous coal)	1,80	17,71	16,10	64,39	15,44	0,9675	4,00

Результаты расчета, по которым построены кривые на рис. 3, 4, а также основные параметры углей для расчета по формулам (1)-(5) сведены в табл. 2. Расчеты показали, что бурый уголь № Б1 с влажностью более 55% и низшей теплотой сгорания 7,5 МДж/кг не поддерживает горение в топке данного котла и не включен в таблицу результатов. Уголь № Б2 с влажностью 43,93% и низшей теплотой сгорания 9,63 МДж/кг имеет повышенную величину механического недожога  $q_4$  равную 16,2%, а степень выгорания  $\chi_e$  около 0,97; что говорит о невозможности использования его в данной топке энергетического котла. Остальные бурые угли имеют полноту выгорания  $\chi_e$  более 99%, что вполне приемлемо для сжигания бурых углей. Дополнительно проведены исследования для угля № Б3 с повышенным содержанием влаги на 10% (№ Б3+10% $W^r$ ), которые также показали степень выгорания выше нормативного значения.

Каменные угли № К1 – № К3 определялись путем усреднения схожих по теплоте сгорания углей и их состав приведен в табл.1. Они характеризуются сравнительно высоким выходом летучих от 25 до 40% и умеренной теплотой сгорания от 15 до 25 МДж/кг. Уголь № К1 отличается от остальных высокой зольностью – 44,19%. Расчеты показали, что степень выгорания для всех вышеперечисленных каменных углей составляет более 99%, что удовлетворяет нормам сжигания каменного угля. Угли № К4 и № К5 представляют собой табличные угли марки Т и СС, указанные в примечании к табл.1. Отличительной их чертой является умеренный выход летучих от 12,5 до 20%. Расчеты показали, что механический недожог  $q_4$  для этих углей меняется от 3,89 до 23,37%. Угли № К4 и № К5 имеют  $K_T$  от 4 до 7 и не пригодны к сжиганию по существующим нормативам для механического недожога.





**Рис. 3** Зависимость степени выгорания угля  $\chi_6$  от топливного отношения  $K_T$  для расчетных каменных углей.

**Ris. 3** Dependence of the degree of coal burnout  $\chi_6$  on the fuel ratio  $K_T$  for calculated bituminous coals.

Анализ приведенных результатов показывает, что исследуемая топка котла БКЗ-420-140-6, с точки зрения поддержания эффективного горения, может применяться для бурых, так и каменных углей, хотя первоначально проектировалась для сжигания азейского бурого угля. Для каменного угля зависимость выгорания  $\chi_6$  от топливного отношения  $K_T$  достаточно точно описывается кубическим уравнением, приведенным на рис. 3. Существенный недожог топлива наступает при  $K_T > 3$ , что характерно для марок углей Т и СС, а также АШ. К ним относятся: тощие угли Углегорского, Кузнецкого, Партизанского, Донецкого бассейнов; слабоспекающиеся угли Кузнецкого, Нерюнгринского, Экибастузского бассейна; антрациты Донецкого бассейна и другие. Остальные марки каменных углей по нормативам выгорания топлива могут успешно сжигаться в рассматриваемой топке.

Что касается бурых углей, то в данной топке механический недожог резко увеличивается при  $K_T < 1$  ( $q_4$  более 4% по

табл.1). Это характерно для бурых углей с  $Q_u^r$  равной или менее 11,5 МДж/кг или влажностью на рабочую массу более 40%. К таким углям можно отнести угли Райчихинского, Харанорского, Артемовского, Бабаевского, Тюльганского, Подмосковного месторождений и другие. Остальные угли, например, такие как угли Канско-Ачинского бассейна должны вполне подходить по своим характеристикам горения к данной топке.

Таким образом, предлагаемая методика быстрой оценки годности непроектного угля с точки зрения эффективного горения в конкретной топке энергетического котла позволяет сузить круг возможных вариантов применения альтернативных топлив. Расчеты критериев горения следует проводить по уточненному химическому составу и теплотехническим характеристикам конкретных альтернативных топлив. Дальнейший выбор подходящего топлива должен учитывать другие лимитирующие факторы, такие как склонность к шлакованию и отложениям золы, выбросы вредных веществ, масштабы реконструкции оборудования, экономическую

эффективность и т. д. В ряде случаев следует рассмотреть переход на сжигание смесей

углей, который может быть более эффективным, экономичным и экологичным.

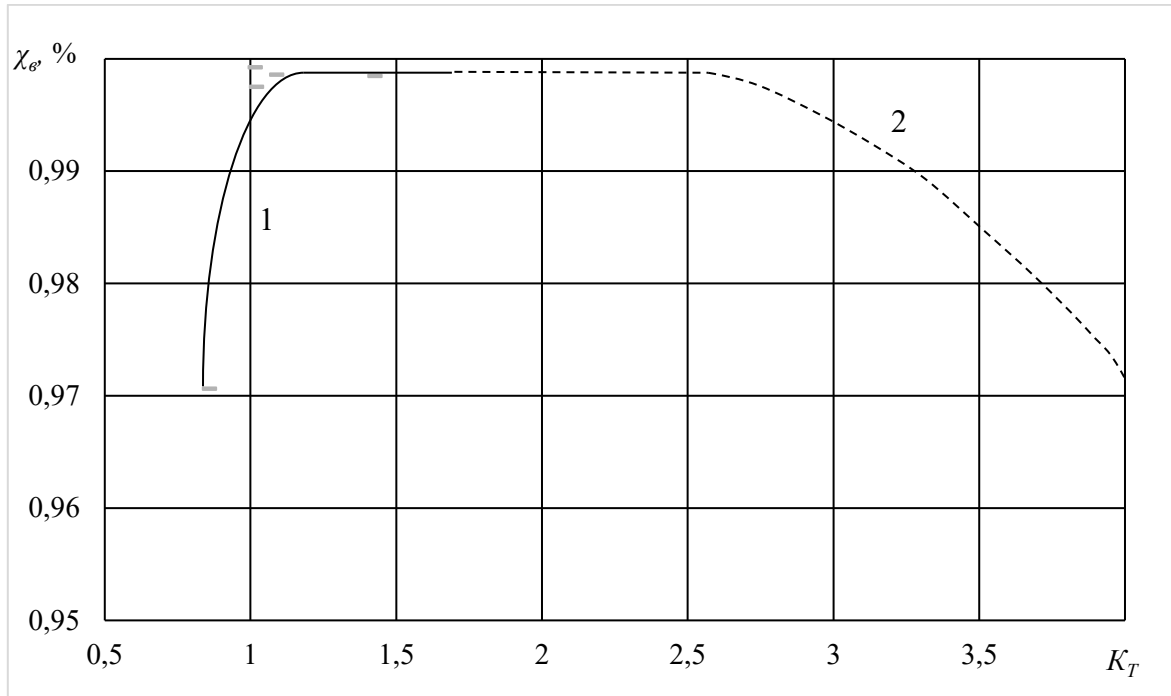


Рис. 4. Зависимость степени выгорания  $\chi_6$  от топливного отношения  $K_T$  для расчетных бурых (1) и каменных (2) углей.

Ris. 4. Dependence of the degree of burnout  $\chi_6$  on the fuel ratio  $K_T$  for calculated brown (1) and bituminous (2) coals.

### Выводы

1. В качестве основных критериев, характеризующих совместимость конструкции топочных устройств с непроектными видами твердого топлива, предлагается принять топливное отношение  $K_T$  и степень выгорания топлива  $\chi_6$ .  $K_T$  представляет собой отношение содержания углерода топлива к величине выхода летучих на аналитическую (гигроскопическую массу). Степень выгорания топлива  $\chi_6$  рассчитывается по предложенной формуле, учитывающей механический недожог  $q_4$ .

2. Анализ полученных результатов показывает, что для топки котла БКЗ-420-140-6 при изменении  $K_T$  от 1,5 до 3 сжигание каменных углей происходит с допустимыми значениями  $q_4$ , а дальнейшее повышение  $K_T$  приводит к значительному снижению  $\chi_6$ , а при значении более 7 горение вообще не

поддерживается. Для бурых углей характерно резкое снижение  $\chi_6$ , при  $K_T$  меньше 1.

3. Анализ приведенных результатов показал, что исследуемая топка котла БКЗ-420-140-6 может применяться для сжигания как бурых, так и каменных углей, хотя первоначально проектировалась для сжигания азейского бурого угля. Применение данной топки по эффективности горения возможно для всех марок углей кроме каменных марки Т и СС, антрацита и полуантрацита, бурых углей с  $Q_n^r$  равной или менее 11,5 МДж/кг или влажностью  $W^r$  более 40%.

4. Предлагаемая методика быстрой оценки возможности сжигания непроектного угля может применяться и для других топков энергетических котлов при использовании численной модели расчета эффективности горения. Это позволяет сузить круг возможных вариантов применения альтернативных топлив. Однако окончательный выбор непроектного топлива

может быть проведен только с учетом других лимитирующих факторов и прежде всего склонности непроектного угля к шлакованию поверхностей нагрева в сравнении с проектным.

#### Благодарность.

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

#### Литература (References)

- [1] Teplovoy raschet kotlov. Normativniy metod. SPB, Izdatelstvo «VTI» I NPO «CKTI», 1998. 258 s. [Thermal design of the boilers. Standard method-SPB.; Publishing house «VTI» and «CKTI», 1998. 258 pp.
- [2] Degereji M.U. / Numerical assessment of coals/blends slagging potential in pulverized coal boilers // Fuel. – 2012. – Т. 102. – pp. 345-353.
- [3] C. Goni, S. Helle, X. Garcia / Coal blend combustion: fusibility ranking from mineral matter composition // Fuel. – 2003. – Vol. 82, No. 15-17. – pp. 2087-2095. – DOI 10.1016/S0016-2361(03)00156-X. – EDN EJWJDP.
- [4] Maidanik, M. N. / Preliminary Assessment of the Possibility to Shift Thermal Power Plant Boilers for Burning Alternative Coal / M. N. Maidanik, E. K. Verbovetskii, A. N. Tugov // Thermal Engineering. – 2021. – Vol. 68, No. 9. – pp. 690-697
- [5] Osintsev V. V., Kuznetsov G. F., Petrov V. V., Sukharev M. P. / An Analysis of the Results of the Pilot Firing of Highly Reactive Brown Coal in a BKZ-210-140F Boiler // Thermal Engineering. – 2003. – Vol. 50, No. 8. – pp. 639-645.
- [6] Durgun D., Genc A. / Effects of coal properties on the production rate of combustion solid residue // Energy. – 2009. – Т. 34. – № 11. – pp. 1976-1979.
- [7] Qi H. / Experimental investigation on the ignition and combustion characteristics of pyrolyzed char and bituminous coal blends // Fuel. – 2020. – Т. 281. – 118732.
- [8] Dvoinishnikov V. A., Shumilov T. I. / Organization of the Combustion of Kansk-Achinsk Coals in the Steam Boilers of the 300-MW Power-Generating Units at the Ryazanskaya District Power Station // Thermal Engineering. – 1998. – Vol. 45, No. 6. – pp. 439-445.
- [9] Mansurov V. I., Bogomolov V. V., Koryagin Yu. V. / The Results of Experimental Combustion of Kuznetsk Black Coal in the P-57 Steam Boiler of a 500-MW Power-generating Unit // Thermal Engineering. – 1997. – Vol. 44, No. 2. – pp. 100-107.
- [10] Sheng C. / A computational fluid dynamics based study of the combustion characteristics of coal blends in pulverised coal-fired furnace // Fuel. – 2004. – Т. 83. – № 11-12. – pp. 1543-1552.
- [11] Hashimoto N., Shirai H. / Numerical simulation of sub-bituminous coal and bituminous coal mixed combustion employing tabulated-devolatilization-process model // Energy. – 2014. – Т. 71. – pp. 399-413.
- [12] Tong C. / Experimental investigation for the combustion characteristics of blends of three kinds of coal // Fuel. – 2021. – Т. 300. – 120937.
- [13] Moon C. / Thermochemical and combustion behaviors of coals of different ranks and their blends for pulverized-coal combustion // Applied Thermal Engineering. – 2013. – Т. 54. – № 1. – pp. 111-119.
- [14] Avagianos I. / Nanoparticle emission and characterization from pre-dried lignite and bituminous coal co-combustion // Energies. – 2020. – Т. 13. – № 9. – 2373.
- [15] Ulloa C. / Char characterization and DTF assays as tools to predict burnout of coal blends in power plants // Fuel. – 2005. – Т. 84. – № 2-3. – pp. 247-257.
- [16] Haas J., Tamura M., Weber R. / Characterisation of coal blends for pulverised fuel combustion // Fuel. – 2001. – Т. 80. – № 9. – pp. 1317-1323.
- [17] Raaj S.S. Characterization of coal blends for effective utilization in thermal power plants // Applied Thermal Engineering. – 2016. – Т. 102. – pp. 9-16.
- [18] Hu L. / Experimental study on the combustion and NOx emission characteristics of a bituminous coal blended with semi-coke // Applied Thermal Engineering. – 2019. – Т. 160. – 113993.
- [19] Zhang J. / Experimental investigation on combustion and NO formation characteristics of semi-coke and bituminous coal blends // Fuel. – 2019. – Т. 247. – pp. 87-96.
- [20] Baek S.H., Park H.Y., Ko S.H. / The effect of the coal blending method in a coal fired boiler on carbon in ash and NOx emission // Fuel. – 2014. – Т. 128. – pp. 62-70.
- [21] Malkin V. V., Gvozdev V. S., Kalmykov G. I., Yakshov V. I. / Conversion of a TPP-110 boiler at the novocherkassk district power station to firing the seasonal excess of natural gas // Thermal Engineering. – 2004. – Vol. 51, No. 9. – pp. 694-698.
- [22] Ikeda M. / Emission characteristics of NOx and unburned carbon in fly ash during combustion of blends of bituminous/sub-bituminous coals // Fuel. – 2003. – Т. 82. – № 15-17. – pp. 1851-1857.
- [23] 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.
- [24] 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. – Т. 107. – pp. 688-698.

- [25] Bureska L. Influence of coal quality to the boiler efficiency and opportunity for its improvement Termotehnika, vol. 43, no. 1-4, 2017, pp. 59-65

**Сведения об авторах.**



**Чернов Сергей Львович**, кандидат технических наук, доцент кафедры ТЭС НИУ «МЭИ». Область научных интересов: теплоэнергетика, котельные установки, струйные и вихревые течения.

E-mail: [chernovserl@gmail.com](mailto:chernovserl@gmail.com)



**Прохоров Вадим Борисович**, кандидат технических наук, профессор кафедры ТЭС НИУ «МЭИ». Область научных интересов: котельные установки, аэродинамика горения, охрана окружающей среды, моделирование.

E-mail: [ProkhorovVB@mpei.ru](mailto:ProkhorovVB@mpei.ru)



**Апаров Владимир Дмитриевич**, студент кафедры ТЭС НИУ «МЭИ». Область научных интересов: теплоэнергетика, котельные установки, горелочные устройства.

E-mail: [AparovVD@mpei.ru](mailto:AparovVD@mpei.ru)



**Фоменко Михаил Вячеславович**, старший преподаватель ТЭС НИУ «МЭИ». Область научных интересов: теплоэнергетика, котельные установки

E-mail: [FomenkoMV@mpei.ru](mailto:FomenkoMV@mpei.ru)