

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА



УДК 662.739

DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-5-136-146

ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ ТВЕРДОТОПЛИВНОЙ СМЕСИ НА ОСНОВЕ УГЛЕЙ РАЗНОЙ СТЕПЕНИ МЕТАМОРФИЗМА РЕГИОНОВ ЕНИСЕЙСКОЙ СИБИРИ

Жуйков А.В.¹, Матюшенко А.И.¹, Кулагин В.А.^{1В}, Логинов Д.А.²

¹Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

²ООО «Сибниинуглеобогашение», г. Красноярск, Россия

azhuikov@sfu-kras.ru

ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-9809-8285>

Резюме: ЦЕЛЬ. Исследовать процесс горения двух углей разной степени метаморфизма и их смесей с применением термогравиметрического анализа, основанного на изменении массы и скорости изменения массы в процессе нагрева топлив. Определить основные характеристики топлив и процесса горения (температуры воспламенения и выгорания коксового остатка). Провести качественный анализ поверхности топливных частиц двух разных углей с помощью сканирующей электронной микроскопии на наличие пор и трещин. Определить склонность к шлакованию угольных смесей. МЕТОДЫ. При решении поставленных задач применялся термогравиметрический метод, электронный метод и метод расчета, на основе проведенного валового химического анализа минеральной части углей и их смесей. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье представлен краткий обзор по сжиганию непроектных топлив на теплоэлектростанциях. Приведены результаты технического и элементного анализа черногорского каменного угля и балахтинского бурого угля. Описана методика определения температуры воспламенения и выгорания коксового остатка. Представлены термограммы процесса горения двух углей разной степени метаморфизма и их смесей. Определены основные характеристики их горения. Показан качественный анализ поверхности топливных частиц на наличие пор и трещин. Проведен расчёт склонности к шлакованию угольных смесей. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. И черногорский и балахтинский уголь имеют высокий выход летучих веществ и среднюю теплоту сгорания. По степени метаморфизма отличаются незначительно, показатели их технического и элементного анализа близки по своим значениям. Термогравиметрический анализ показал более раннее воспламенение балахтинского бурого угля по сравнению с черногорским каменным углем. При увеличении доли балахтинского угля в угольной смеси профиль кривых горения смещается в область более низких температур. Добавление 25% балахтинского угля снижает температуру воспламенения черногорского угля на 16%, с увеличением доли балахтинского угля в смеси температура воспламенения не изменяется. Расчет склонности угольной смеси к шлакованию применяя основные оксиды, содержащиеся в минеральной части золы исследуемых углей, показал, что балахтинский уголь имеет высокую склонность к шлакованию топочных экранов в отличие от черногорского каменного угля, поэтому увеличение массовой его доли в угольной смеси увеличивает склонность к шлакованию топочных экранов.

Ключевые слова: уголь; степень метаморфизма; угольные смеси; шлакование топочных экранов, термогравиметрический анализ.

Для цитирования: Жуйков А.В., Матюшенко А.И., Кулагин В.А., Логинов Д.А. Особенности горения твердотопливной смеси на основе углей разной степени метаморфизма регионов Енисейской Сибири // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 5. С. 136-146. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-5-136-146.

RESEARCH OF COMBUSTION OF SOLID FUEL MIXTURE BASED ON COALS OF
DIFFERENT DEGREES OF METAMORPHISM IN THE REGIONS OF YENISEI
SIBERIA

AV. Zhuikov¹, AI. Matyushenko¹, VA. Kulagin¹, DA. Loginov²

¹Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

²ООО «Sibniugleobogoshenie», Krasnoyarsk, Russia

azhuikov@sfu-kras.ru

ORCID *: <https://orcid.org/0000-0001-9809-8285>, azhuikov@sfu-kras.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Consider the combustion process of two coals of different degrees of metamorphism and their mixtures using thermogravimetric analysis based on the change in mass and the rate of change in mass during the heating of fuels. Determine the main characteristics of fuels and the combustion process (temperature of ignition and burnout of the coke residue). Determine the tendency to slagging of coal mixtures. *METHODS.* When solving the tasks, the thermogravimetric method (TGA). *RESULTS.* The article provides a brief overview of the combustion of non-design fuels at thermal power plants. The results of technical and elemental analysis of Chernogorsk bituminous coal and Balakhta brown coal are presented. A technique for determining the ignition temperature and burnout of the coke residue is described. The thermograms of the combustion process of two coals of different degrees of metamorphism and their mixtures are presented. The main characteristics of their combustion have been determined. A qualitative analysis of the surface of fuel particles for the presence of pores and cracks is shown. The calculation of the tendency to slagging of coal mixtures has been carried out. *CONCLUSION.* Thermogravimetric analysis showed an earlier ignition of the Balakhta brown coal in comparison with the Montenegrin bituminous coal. With an increase in the proportion of Balakhta coal in the coal mixture, the profile of the combustion curves shifts to the region of lower temperatures. The addition of 25% Balakhta coal reduces the ignition temperature of Chernogorsk coal by 16%, with an increase in the proportion of Balakhta coal in the mixture, the ignition temperature does not change. Balakhta coal has a high tendency to slagging furnace walls, in contrast to Chernogorsk coal, therefore, an increase in its mass fraction in the coal mixture increases the tendency to slagging furnace screens.

Keywords: coal; degree of metamorphism; coal mixtures; slagging of furnace walls; thermogravimetric analysis (TGA).

For citation: Zhuikov AV, Matyushenko AI, Kulagin VA, Loginov DA. Research of combustion of solid fuel mixture based on coals of different degrees of metamorphism in the regions of Yenisei Siberia. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(5):136-146. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-5-136-146.

Введение

Уголь является вторым энергетическим топливом по объему использования в процессе генерации тепловой и электрической энергии, обеспечивая около 30% выработки по всему миру [1]. Сжигание угля на теплоэлектростанциях и промышленно-отопительных котельных связано с двумя основными задачами это – ресурсосбережение и улучшение экологической обстановки. Существует множество методов по решению этих проблем, но все они предусматривают огромные капиталовложения в топливно-энергетический комплекс. Одним из доступных методов является переход на сжигание непроектных топлив. Цели, которые преследуются при переходе на сжигание непроектного топлива (твердотопливных смесей), могут быть разные: снижение потребления твердого топлива, снижение содержания золы и оксидов серы, вынужденный переход из-за закрытия угольного разреза, переход на более дешевый уголь и другие.

Прекращение поставок донецкого антрацита на теплоэлектростанции Украины стало причиной перехода большинства ТЭС на непроектные топлива, основными из которых стали тощий каменный уголь марки Т и угольные смеси антрацитового штыба и каменными углями марки Т или Г [2]. Снижение теплоты сгорания сланцев, которые являются основным энергетическим топливом Эстонии, привело к поискам новых топлив, которые могли бы стать альтернативой замены сланцев. П.В. Росляков и др. [3] исследовали

возможность сжигать на котле ТП–101 сланцы совместно с бурым углем Кемеровского бассейна и каменным углем, добываемым в шахте Талдинская-Западная 1, и установили, что совместное сжигание этих топлив принципиально возможно. На Железногорской ТЭЦ перешли на сжигание угольной смеси, состоящей из 50% бородинского бурого угля ($A^d = 7,5$; $Q_f^d = 20,03$ МДж/кг) и 50% большесырского бурого угля ($A^d = 3,9$; $Q_f^d = 20,03$ МДж/кг). Проектным топливом ЖТЭЦ до перехода был бородинский уголь. Переход был сделан с целью снижения расхода твердого топлива на ТЭЦ (улучшение технико-экономических показателей); снижения выбросов в атмосферу золы; уменьшение объема золошлаковых отходов (улучшение экологических показателей) [4].

Для исследования процессов горения топлив во всем мире широко используется термогравиметрический анализ. При нагреве образцов, по кривым потери веса, скорости потери веса и дифференциально сканирующей калориметрии определяются основные характеристики горения (температура зажигания коксового остатка, температура выгорания коксового остатка и универсальный индекс горения топлива и др.) и рассчитываются кинетические константы [5, 6]. S.Santhosh Raa и др. [7] исследовали совместное сжигание двух видов углей, установили их аддитивные свойства при смешивании. Ma L. и др. [8] установили при исследовании совместного сжигания двух каменных углей, что мелкие топливные частицы с большей удельной поверхностью увеличивают реакционную способность смеси, ослабляя эффект ингибирования выгорания угля с низким содержанием летучих. Wang H. и др. [9] с помощью термогравиметрического анализа исследовали горение твердотопливной смеси на основе бурого угля и антрацита. Бурый уголь с высоким содержанием летучих ($V^d = 38,92\%$) смешивали с низкорекреационным антрацитом ($V^d = 14,19\%$) получая угольные смеси по массе с шагом 20%. Температура воспламенения антрацита составила $T_i = 416$ °C, а температура выгорания $T_b = 583$ °C, бурый уголь имел следующие характеристики горения $T_i = 306$ °C и $T_b = 485$ °C. С увеличением доли бурого угля улучшались характеристики горения угольной смеси. Niu S.-L. и др. [10] исследовали горение угольной смеси на основе каменного угля ($T_i = 385$ °C и $T_b = 634$ °C) и антрацита ($T_i = 506$ °C и $T_b = 831$ °C) при кислородном сжигании. Было установлено, что сжигание угля улучшается в атмосфере обогащённом кислородом. Guo L. и др. [11] исследовали горение и шлакование угольной смеси на основе каменного и бурого угля. Угли низкого качества содержали высокое количество золы (более 35%), невысокое количество летучих (до 25%) и соответственно имели невысокую теплоту сгорания (до 20 МДж/кг). Температура зажигания и выгорания составила у бурого угля ($T_i = 344$ °C и $T_b = 548$ °C), а у каменного угля ($T_i = 435$ °C и $T_b = 571$ °C). Авторами было установлено, что существует связь между характеристиками горения и шлакуемостью, низкорекреационный уголь выгорает качественней высокорекреационного угля, но сильнее склонен к шлакованию. Han J. и др. [12] применяя термогравиметрический анализ и электронный модуль для расчета содержания мышьяка в процессе окисления исследовали горение бурого и каменного угля и их смесей установили, что для снижения образования мышьяка в процессе горения угольной смеси, в топливе должно преобладать содержания кальция. Zhang L. и др. [13] исследовали кислородно-паровое сжигание каменного и полуантрацитового (тощего) углей и их смесей применяя термогравиметрический анализ. Установлено, что температуры воспламенения и выгорания ниже в атмосфере O_2/H_2 чем в атмосфере O_2/N_2 .

Самый распространенный размер частиц при исследовании процессов горения угля составляет 75–200 мкм. Установлено, что воспламенение углей низкой степени метаморфизма происходит в области более низких температур, по сравнению с углями средней и высокой степени метаморфизма. На процесс зажигания и выгорания так же оказывает влияние удельная поверхность угольной частицы, так угольные частицы с большим количеством пор и трещин на своей поверхности зажигаются раньше, чем угольные частицы, имеющие более ровную поверхность с минимальным количеством пор и трещин [14–16].

Масштабные исследования по сжиганию угольных смесей на теплоэлектростанциях России были проведены сотрудниками ВТИ разных отделений [17], на данный момент такие исследования сведены к минимуму. В связи с этим необходимо получение новых научных данных о характеристиках горения и шлакующих свойств угольных смесей, на основе углей ранее не изучавшихся. Полученные новые данные о характеристиках горения

угольных смесей могут представлять научное обоснование их эффективного применения в энергетических котлах, работающих на твердом топливе.

Материалы и методы

Для исследования были выбраны два образца углей, черногорский каменный уголь, длиннопламенный (ЧР) был отобран с разреза Черногорский, Республика Хакасия. Уголь имеет высокое количество летучих (табл.1), невысокую зольность и теплоту сгорания, при этом отмечается высокое содержание азота и серы. Данный вид угля в основном добывается для экспорта, а также используется на местных промышленно-отопительных котельных. Балахтинский бурый уголь (ЗБР) был получен с Большесырского разреза, входящего в Канско-Ачинский угольный бассейн, Красноярский край. Данный уголь имеет ряд уникальных характеристик (табл. 1) по сравнению с другими бурыми углями это – низкая зольность, низкое содержание влаги и высокая теплота сгорания. В мире всего три разреза с бурыми углями схожими по своим характеристикам с балахтинским углем, они расположены в Колумбии, Казахстане и Индонезии. Балахтинский уголь в основном используется как энергетическое топливо на промышленно-отопительных котельных, так как доставляется с разреза только автотранспортом.

Характеристики углей изучены после достижения ими состояния аналитической пробы, влажность которой доведена до состояния равновесия с влажностью воздуха в лабораторном помещении. Образцы углей с начальным размером менее 20 мм по отдельности измельчали в дисковой мельнице *Retsch DM 200 (Retsch GmbH, Germany)*. Ее основные характеристики: максимальный начальный размер частиц менее 20 мм, максимальное число оборотов 528 об/мин, гарантированная тонина помола менее 100 мкм. Для подготовки экспериментальных образцов использовалась аналитическая просеивающая машина *Retsch AS 200 BASIC (Retsch GmbH, Germany)* с двумя ситами, размер ячеек которых составлял 53 и 200 мкм. Таким образом, получались образцы углей с размерами частиц 53–200 мкм, что соответствует размерам пылеугольного топлива, используемого при факельном сжигании в энергетических котлах. Теплоту сгорания топливных образцов определяли в калориметре *IKA C6000*. Элементный состав топлива определяли в анализаторе *Vario MACRO cube (Elementar, Германия)*. Влажность определялась по ГОСТ 8.649-2015, зольность по ГОСТ 55661-2013, выход летучих веществ по ГОСТ R 55660-2013, содержание серы по ГОСТ 32979-2014, высшая теплота сгорания по ГОСТ 147-2013, содержание углерода, водорода, азота по ГОСТ 32979-2014, серы по ГОСТ 8606-2015, содержание кислорода по ГОСТ 27313-2015. Угольные смеси получали с помощью аналитических весов *MS105du (Mettler Toledo, Швейцария)*:

- 100% ЧР;
- 75%ЧР + 25%ЗБР;
- 50%ЧР + 50%ЗБР;
- 25%ЧР + 75%ЗБР;
- 100% ЗБР.

Таблица 1

Технические характеристики и элементный состав образцов

	W^a , %	A^d , %	V^{daf} , %	Элементный состав, мас.% на d_{af}					Q_i^a , МДж/кг
				C	H	N	S	O	
ЧР	4,7	18,8	31,5	80,2	5,2	2,1	0,7	11,8	20,93
ЗБР	8,0	6,2	44,6	74,1	5,0	0,9	0,4	19,6	20,47

Термический анализ образцов проводился с применением синхронного термоанализатора *SDT Q600 (TA Instruments-Waters LLC, New Castle, DE, USA)*. Кривые ТГ, ДТГ, ДСК снимали для навесок топлив массой 6.0 ± 0.25 мг в потоке воздуха с расходом 50 мл/мин при скорости нагрева 20 °С/мин. Основные характеристики процессов горения определяли путем анализа термогравиметрических кривых, полученных из *Universal Analysis 2000* (программное обеспечение V5.5.24 от *TA Instruments-Waters LLC, New Castle, DE, USA*).

Электронно-микроскопические (СЭМ) исследования проводили на сканирующем электронном микроскопе *TM4000 (Hitachi, Япония)*, оборудованном энергодисперсионным

спектрометром и системой рентгеновского микроанализа Quantax150 (Bruker, Германия) в режиме низкого вакуума (без напыления платины).

Для вычисления значения индекса горения по кривым ТГ и ДТГ определялись температура воспламенения коксового остатка (T_i) и температура выгорания коксового остатка (T_b) по методу экстраполяции при пересечении касательных на кривых ТГ и ДТГ. Визуализация методики определения значений T_i , T_b , DTG_{max} и T_{max} представлена на (рис. 1) [18, 19]. Температуре T_{max} соответствовала максимальная скорость потери массы DTG_{max} .

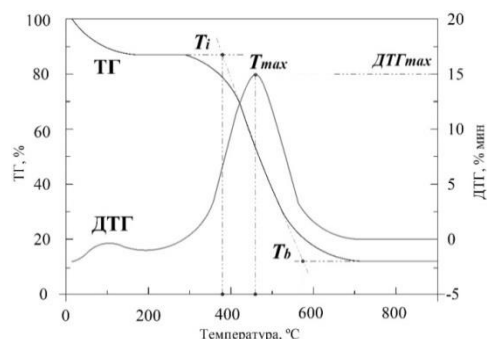


Рис. 1. Определение параметров горения методом экстраполяции кривых

Fig. 1. Determination of combustion parameters by extrapolation of curves

Результаты и обсуждения

Горение топлива представляет собою сложный физико-химический процесс и состоит из трех основных этапов. В первом этапе происходит нагрев и удаление влаги, во втором этапе начинается разрушение органических соединений сопровождающаяся воспламенением и горением летучих на поверхности топливной частицы повышая температуру коксового остатка, в третьем этапе происходит воспламенение и горение коксового остатка, догорания особо плотного углеродного остатка. Иногда второй и третий этап процесса горения совмещены. На рисунке 2 профилями кривых ТГ и ДТГ представлен процесс горения углей и их смесей.

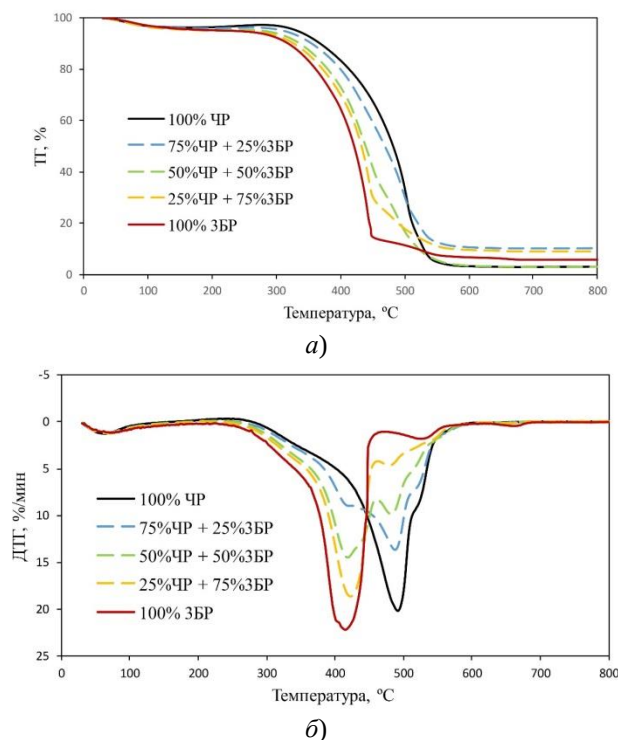


Рис. 2. Профили горения углей черногорского (ЧР), балахтинского (ЗБР) и их смесей: а) – кривые потери массы; б) – кривые дифференциальной потери массы

Fig. 2. Coal burning profiles of Montenegrin (CR), Balakhtinsky (ZBR) and their mixtures: а) - Mass loss curves; б) - Differential mass loss curves

На первом этапе при нагреве топлив происходит потеря массы углей и их смесей достигая 7–10% за счет испарения абсорбированной воды. При нагревании черногорского угля в области температур 150–250 °С происходит небольшое увеличение массы (рис. 2а) из-за начала процесса окисления сопровождающимся проникновением атомов кислорода в его структуру [20]. У балахтинского угля увеличение массы не происходит, что характерно для бурых углей при нагреве. Основная потеря массы происходит на втором и третьем этапе процесса горения топлив (80–90%). Потеря массы на втором и третьем этапе (рис. 2 б) у балахтинского угля происходит в области более низких температур, а у черногорского угля в области более высоких температур.

Профиль горения черногорского угля (рис. 2 б) состоит из одного пика, в котором воспламенение и горение летучих плавно переходит в воспламенение и горение углеродного остатка. Профиль горения балахтинского угля (рис. 2 б) состоит из двух пиков, в первом происходит воспламенение и горение летучих переходящее в воспламенение и горение углеродной остатка. Во втором пике происходит догорание наиболее плотного углеродного остатка. Профили горения угольных смесей (рис. 2) смещаются в область более низких температур при увеличении массовой доли балахтинского угля. Профили кривых угольных смесей на втором и третьем этапах горения имеют по два пика, первый пик находится в температурной области соответствующей горению балахтинского угля 418–421 °С, а второй пик находится в температурной области горения черногорского угля 453–488 °С (табл.2). Разделение процесса горения у угольных смесей на две температурные области происходит за счет разной степени метаморфизма углей и разного их петрографического состава. Чем выше реакционность топлива, тем у него выше DTG_{max} и ниже T_{max} . При добавлении балахтинского угля к черногорскому углю происходит снижение DTG_{max} смесей, так как область горения разделяется на два пика DTG при этом происходит снижение T_{max2} в пике DTG , где происходит горение черногорского угля, демонстрируя зависимость увеличения реакционной способности угольных смесей от увеличения массовой доли балахтинского угля в смеси.

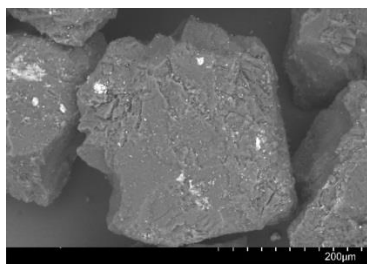
Таблица 2

Характеристики горения топливных образцов

	T_b , °С	T_{max1} , °С	T_{max2} , °С	T_b , °С	DTG_{max} , %/мин
100% ЧР	418	-	492	522	20,04
75%ЧР + 25%ЗБР	361	418	488	524	13,64
50%ЧР + 50%ЗБР	359	418	482	523	14,42
25%ЧР + 75%ЗБР	360	421	454	530	18,73
100% ЗБР	357	421	-	551	24,20

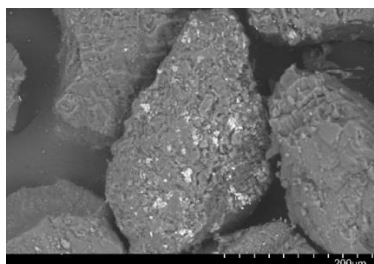
Черногорский уголь имеет высокую температуру воспламенения 418 °С по сравнению с балахтинским углем, температура воспламенения которого равна 357 °С. При добавлении балахтинского угля к черногорскому во всех угольных смесях температура воспламенения максимально приближена к температуре воспламенения балахтинского угля. Температура выгорания угольных смесей при увеличении доли балахтинского угля увеличивается.

Температура воспламенения углеродного остатка зависит от состояния поверхности топливной частицы. Наличие пор и трещин обеспечивает более глубокое проникновение кислорода в глубь самой частицы, обеспечивая более полное и быстрое ее выгорание. На рисунке 3 представлены изображения сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) угольных частиц. На поверхности угольной частицы черногорского угля (рис. 3а) видны поры и трещины, а также минеральные частицы (белые включения). На рисунке 3б изображена угольная частица балахтинского угля, пор и трещин на ее поверхности больше, чем у черногорского угля, также присутствуют минеральные частицы.



а)

Рис. 3. Изображения СЭМ угольных частиц:
а) черногорский уголь; б) балахтинский уголь



б)

Fig. 3. Images of SAM of coal particles:
a) Montenegrin coal; b) Balakhtini coal

При смешивании двух разных углей необходимо учитывать проблему шлакования поверхности нагрева котлов. Оценка шлакующих свойств может быть проведена по минимальной доступной информации и основываться на техническом, элементном анализе и данных химического состава золы углей (табл.3). Основные характеристики влияющие на склонность топлива к шлакованию были рассчитаны по методике УралВТИ [21, 22]. Для оценки склонности шлакования черногорского и балахтинского углей определяется температура начала их шлакования $t_{\text{шл}}$, которая зависит от отношения компонентов кислого и основного состава основных оксидов, по следующей формуле:

$$t_{\text{шл}} = 945 + 7,77 \times K / O \quad (1)$$

где $K = \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$; $O = \text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$.

Таблица 3

Химический состав золы углей и их смесей

	100% ЧР	75%ЧР+25%ЗБР	50%ЧР+50%ЗБР	25%ЧР+75%ЗБР	100% ЗБР
SiO_2	42,57	42,72	42,68	42,61	42,76
Al_2O_3	34,31	19,46	24,41	29,35	14,51
TiO_2	1,01	0,84	0,91	0,96	0,79
CaO	6,03	20,81	15,88	10,96	25,74
Fe_2O_3	10,84	11,04	10,97	10,91	11,11
K_2O	0,89	0,82	0,84	0,86	0,79
MgO	3,69	3,55	3,61	3,65	3,51
Na_2O	0,67	0,76	0,73	0,71	0,79

Температура начала шлакования черногорского угля составила 1000 °С, температура начала шлакования балахтинского угля составила 965 °С, оба эти угля склонны к шлакованию топочных экранов, т.к. их $t_{\text{шл}} < 1050$ °С.

Склонность к образованию прочных железистых отложений P_{Fe} углей и угольных смесей определялась по формуле:

$$P_{\text{Fe}} = \frac{b_f - a_f}{\left[S_p^{\text{ash}} (b_v - a_v \cdot v^a) + \Delta S \right]} \quad (2)$$

где $\Delta S = 0,1 \cdot (0,831 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 - S_p^{\text{ash}})$; b_f , a_f , b_v , a_v – эмпирические коэффициенты, зависящие от марки угля; S_p^{ash} – содержание пиритной серы в пересчете на золу, %; v^a – это адиабатическая температура горения, °С; Fe_2O_3 – содержание железа в минеральной части, %.

Склонность к образованию загрязнений на базе активных щелочей P_{Na} углей и угольных смесей определяется по следующей формуле:

$$P_{\text{Na}} = 0,416 \cdot (\text{Na}_2\text{O})^{0,313} \quad (3)$$

где Na_2O – оксид натрия, %.

Склонность к образованию прочных сульфатно-кальциевых отложений P_{Ca} углей и угольных смесей применяется определения необходимой температуры газов на выходе из топки и определяется по формуле:

$$P_{\text{Ca}} = 0,5 \cdot (\text{CaO})^{0,22} - P_{\text{Na}} \quad (4)$$

где CaO – оксид кальция, %.

Индекс склонности углей к шлакованию топочных экранов R_s углей и угольных смесей рассчитывался по формуле:

$$R_s = 0,707 \cdot [P_{Fe}^2 + P_c^2]^{0,5} \quad (5)$$

где $P_c = 1 - 13,28 \cdot \frac{K/O}{(0,82 \cdot v^a - 945)}$.

На рисунке 4 а изображена зависимость P_{Fe} от массовой доли добавления балахтинского угля к черногорскому углю (β). Массовая доля свыше 50% балахтинского угля в угольной смеси может привести к увеличению площади занимаемой железистыми отложениями на экранных трубах в зоне активного горения, за счет высокого содержания пирита и низкой степени метаморфизма, что характерно для углей низкой степени метаморфизма (бурые и длиннопламенные угли).

Угрозы сульфатно-кальциевых отложений не наблюдается (рис. 4 б), показатель склонности находится в среднем ранге.

При увеличении массовой доли балахтинского угля в угольной смеси свыше 25% приведет к увеличению образований загрязнений топочных экранов активными щелочами (рис. 4 в).

Шлакование топочных экранов зависит от склонности углей к образованию крепких первоначальных отложений P_{Fe} и теплового режима появления шлаковых отложений $t_{шл}$. Индекс R_s , изображенный на рис. 4 г, переходит в ранг – очень высокий, что свидетельствует о том, при увеличении массовой доли балахтинского угля в угольной смеси свыше 25% необходимо предусматривать дополнительные средства очистки топочных экранов в случае, если проектным топливом котлоагрегата является черногорский уголь.

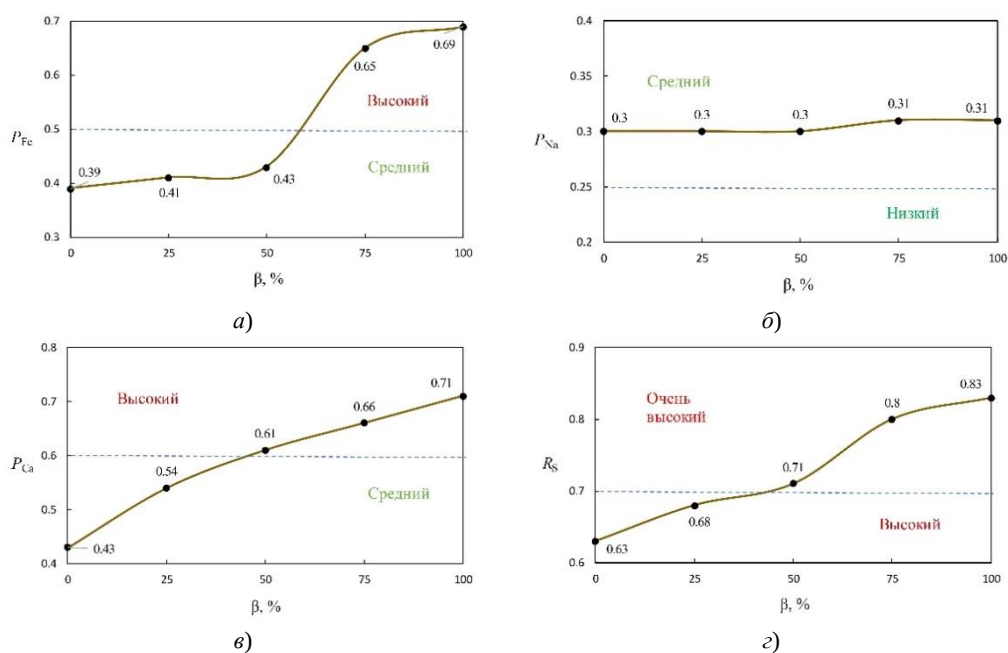


Рис. 4. Характеристики шлакуемости углей и их смесей: а) склонность к образованию прочных железистых отложений; б) склонность к образованию загрязнений на базе активных щелочей; в) склонность к образованию прочных сульфатно-кальциевых отложений; г) индекс склонности углей к шлакованию топочных экранов

Fig. 4. Characteristics of coal and coal mixtures: а) Propensity to form strong ferrous deposits; б) Active alkali-based impurities; в) Propensity to build strong sulfate-calcium deposits; г) Coal Slag Propensity Index

Закключение

Результаты выполненного исследования характеристик горения в рамках термического анализа (ТГ/ДТГ) черногорского, балахтинского углей и их смесей, позволили сформулировать следующие основные выводы:

1. Температура воспламенения коксового остатка балахтинского угля ($T_i = 357^\circ\text{C}$) ниже, чем температура воспламенения черногорского угля ($T_i = 418^\circ\text{C}$), а температура

выгорания балахтинского угля ($T_i = 551\text{ }^{\circ}\text{C}$) наоборот выше, чем у черногорского угля ($T_i = 522\text{ }^{\circ}\text{C}$).

2. При добавлении 25% балахтинского угля в угольную смесь, температура воспламенения смеси составляет $361\text{ }^{\circ}\text{C}$, а температура выгорания коксового остатка почти не изменяется. Дальнейшее увеличение массовой доли балахтинского угля в угольной смеси не влияет на температуру воспламенения и выгорания коксового остатка.

3. Добавление свыше 25% балахтинского угля увеличивает индекс склонности углей к шлакованию топочных экранов и переводит из ранга высокий в очень высокий. При совместном сжигании двух этих углей необходимо усилить систему паровой и водяной очистки топочных экранов в котлах.

«Исследование выполнено при финансовой поддержке Красноярского краевого фонда науки в рамках проекта «Концепция развития теплоэнергетики Красноярского края»».

Литература

1. Zhou H., Bhattarai R., Li Y., et al. Towards sustainable coal industry: Turning coal bottom ash into wealth // Science of the Total Environment. 2022. V. 804, N149985. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149985>
2. Капустянский А.А. Исследование факельного сжигания непроектных бинарных угольных смесей в паровых котлах // Теплоэнергетика. 2017. №7. С. 83–90.
3. Росляков П.В., Зайченко М.Н., Мельников Д.А. и др. Использование углей для совместного сжигания с Эстонскими сланцами // Теплоэнергетика. 2016. №3. С. 34–42.
4. Гребеньков П.Ю., Козлов С.Г., Выхристюк М.Н. и др. Использование угля марки ЗБР на котлах БКЗ-160-1,4-5 с мельницами-вентиляторами и газовой сушкой // Электрические станции. 2016. №11. С. 13–18.
5. Yao H., He B., Ding G., et al. Thermogravimetric analyses of oxy-fuel co-combustion of semi-coke and bituminous coal // Appl. Therm. Eng. 2019. V. 156. pp. 708–721. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.04.115
6. Zheng S., Hu Y., Wang Z., et al. Experimental investigation on ignition and burnout characteristics of semi-coke and bituminous coal blends // J. Energy Inst. 2020. V. 93, N4. pp. 1373–1381. DOI: 10.1016/j.joei.2019.12.007
7. Santhosh Raaj S., Arumugam S., Muthukrishnan M., et al. Characterization of coal blends for effective utilization in thermal power plants // Appl. Therm. Eng. 2016. V.102. pp. 9–16. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.03.035
8. Ma L., Yu S., Chen X., et al. Combustion interactions in oxy-fuel firing of coal blends: An experimental and numerical study // J. Energy Inst. 2021. V. 94. pp. 11–21. doi: 10.1016/j.joei.2020.10.007
9. Wang H., Zhang J., Wang G., et al. Characteristics and kinetic analysis of co-combustion of brown coal and anthracite // J. Therm. Anal. Calorim. 2016. V. 126, N2. pp. 447–454. doi: 10.1007/s10973-016-5557-9
10. Niu, S.-L., Han, K.-H., Lu, C.-M. Characteristic of coal combustion in oxygen/carbon dioxide atmosphere and nitric oxide release during this process // Energy Convers. Manag. 2011. V.52, N1, pp. 532–537. doi: 10.1016/j.enconman.2010.07.028
11. Guo L., Zhai M., Wang Z., et al. Comparison of bituminous coal and lignite during combustion: Combustion performance, coking and slagging characteristics // J. Energy Inst. 2019. V. 92, N3. pp. 802–812. doi: 10.1016/j.joei.2018.02.004
12. Han J., Xiong Z., Zhao B., et al. A prediction of arsenic and selenium emission during the process of bituminous and lignite coal co-combustion // Chem. pap. 2020. V. 74, N7. pp. 2079–2089. doi: 10.1007/s11696-020-01058-9
13. Zhang L., Zou C., Wu D., et al. A study of coal chars combustion in $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ mixtures by thermogravimetric analysis // J. Therm. Anal. Calorim. 2016. V. 126, N2. pp. 995–1005. doi: 10.1007/s10973-016-5536-1
14. Khatami R., Levendis Y.A. An overview of coal rank influence on ignition and combustion phenomena at the particle level // Combust. Flame. 2016 V. 164. pp. 22–34. doi: 10.1016/j.combustflame.2015.10.031
15. Жуйков А.В. Матюшенко А.И., Кузнецов П.Н. и др. Термогравиметрический анализ горения каменных углей Республики Хакасия, сосновых опилок и их смесей // Журнал Сибирского федерального университета Серия: Техника и технологии. 2021. Т. 14. № 6. С. 611–622.
16. Glushkov D.O., Matiushenko A.I., Nurpeis A.E., et al. An experimental investigation into the fuel oil-free start-up of a coal-fired boiler by the main solid fossil fuel with additives of

brown coal, biomass and charcoal for ignition enhancement // *Fuel Process. Technol.* 2021. V. 223. N106986. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106986>.

17. Алехнович А.Н., Богомолов В.В. Применение смесей углей на ТЭС для расширения топливной базы и решения вопросов экологии // *Электрические станции.* 2010. №4. С. 2–8.

18. Zheng S., Hu Y., Wang Z., Cheng X. Experimental investigation on ignition and burnout characteristics of semi-coke and bituminous coal blends // *J. Energy Inst.* 2020. V. 93. P. 1373. doi 10.1016/j.joei.2019.12.007

19. Bala-Litwiniak A, Zajemska M. Computational and experimental study of pine and sunflower husk pellet combustion and co-combustion with oats in domestic boiler // *Renew. Energy.* 2020. V. 162. P. 151. doi 10.1016/j.renene.2020.07.139

20. Богомолов А.Р., Петров И.Я, Жалмагамбетова У.К. Термический анализ углей казахстанских месторождений // *Теплоэнергетика.* 2020. №3. С. 24–32.

21. Алехнович А.Н., Богомолов В.В., Гладков В.Е. и др. Шлакование и образование отложений в газовом тракте котла // *Теплоэнергетика.* 1997. №3. С.64–68.

22. Алехнович А.Н., Талова В.М., Богомолов В.В. и др. Исследования энергетических углей методом химического фракционирования и оценка их загрязняющих свойств // *Теплоэнергетика.* 2001. №5. С. 55–63.

Авторы публикации

Жуйков Андрей Владимирович – заведующий учебно-научной лабораторией кафедры теплотехники и гидрогазодинамики, Сибирский федеральный университет.

Матюшенко Анатолий Иванович – д-р, техн. наук., профессор, заведующий кафедрой ИСЗИС, Сибирский федеральный университет.

Кулагин Владимир Алексеевич – д-р, техн. наук., профессор, заведующий кафедрой ТТиГД, Сибирский федеральный университет.

Логинов Дмитрий Александрович – Начальник отдела ООО Сибниуглеобогащение.

References

1. Zhou H, Bhattarai R, Li Y, et al. Towards sustainable coal industry: Turning coal bottom ash into wealth. *Science of the Total Environment.* 2022;804:149985. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149985>.

2. Kapustyanskii A.A. Study of flame combustion of off-design binary coal blends in steam boilers. *Thermal Engineering.* 2017; 64(7):534–541. DOI 10.1134/S0040601517070023.

3. Roslyakov PV, Zaichenko MN, Melnikov DA, et al. Use of coals for co-combustion with Estonian shale oil. *Thermal Engineering.* 2016;63(3):188–196. doi 10.1134/S0040601516030101.

4. Greben'kov PY, Kozlov SG, Vykhristyuk MN, et al. Use of 3BR Grade Coal in BKZ-160-1,4-5 Boilers with Mill-Fans and Gas Drying. *Power Technology and Engineering.* 2017; 51(1):13–18. doi 10.1007/s10749-017-0787-y.

5. Yao H, He B, Ding G, et al. Thermogravimetric analyses of oxy-fuel co-combustion of semi-coke and bituminous coal. *Appl. Therm. Eng.* 2019; 156:708–721. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.04.115.

6. Zheng S, Hu Y, Wang Z, et al. Experimental investigation on ignition and burnout characteristics of semi-coke and bituminous coal blends. *J. Energy Inst.* 2020; 93(4):1373–1381. doi: 10.1016/j.joei.2019.12.007.

7. Santhosh Raaj S, Arumugam S, Muthukrishnan M, et al. Characterization of coal blends for effective utilization in thermal power plants. *Appl. Therm. Eng.* 2016;102:9–16. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.03.035.

8. Ma L, Yu S, Chen X, et al. Combustion interactions in oxy-fuel firing of coal blends: An experimental and numerical study. *J. Energy Inst.* 2021; 94:11–21. doi: 10.1016/j.joei.2020.10.007.

9. Wang H, Zhang J, Wang G, et al. Characteristics and kinetic analysis of co-combustion of brown coal and anthracite. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2016; 126(2):447–454. doi: 10.1007/s10973-016-5557-9.

- 10.Niu S-L, Han K-H, Lu C-M. Characteristic of coal combustion in oxygen/carbon dioxide atmosphere and nitric oxide release during this process. *Energy Convers. Manag.* 2011; 52(1):532–537. doi: 10.1016/j.enconman.2010.07.028.
- 11.Guo L, Zhai M, Wang Z, et al. Comparison of bituminous coal and lignite during combustion: Combustion performance, coking and slagging characteristics. *J. Energy Inst.* 2019; 92(3):802–812. doi: 10.1016/j.joei.2018.02.004.
- 12.Han J, Xiong Z, Zhao B, et al. A prediction of arsenic and selenium emission during the process of bituminous and lignite coal co-combustion. *Chem. pap.* 2020;74(7):2079–2089. doi: 10.1007/s11696-020-01058-9.
- 13.Zhang L, Zou C, Wu D, et al. A study of coal chars combustion in O₂/H₂O mixtures by thermogravimetric analysis. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2016;126(2):995–1005. doi: 10.1007/s10973-016-5536-1.
- 14.Khatami R, Levendis YA. An overview of coal rank influence on ignition and combustion phenomena at the particle level. *Combust. Flame.* 2016;164:22–34. doi: 10.1016/j.combustflame.2015.10.031.
- 15.Zhuikov AV, Matyushenko AI, Kuznetsov PN, et al. Thermogravimetric Analysis of the Combustion of Khakassia Coal, Pine Sawdust and their Blends. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies* 2021;14(6):611–622. doi: 10.17516/1999-494X-0338.
- 16.Glushkov DO, Matiushenko AI, Nurpeiis AE, et al. An experimental investigation into the fuel oil-free start-up of a coal-fired boiler by the main solid fossil fuel with additives of brown coal, biomass and charcoal for ignition enhancement. *Fuel Process. Technol.* 2021; 223(106986). <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106986>.
- 17.Alekhnovich AN, Bogomolov VV. Use of coal blends at thermal power plants. *Power Technology and Engineering.* 2010;44(3):213–219. doi 10.1007/s10749-010-0167-3
- 18.Zheng S, Hu Y, Wang Z, et al. Experimental investigation on ignition and burnout characteristics of semi-coke and bituminous coal blends. *J. Energy Inst.* 2020;93:1373. doi 10.1016/j.joei.2019.12.007.
- 19.Bala-Litwiniak A, Zajemska M. Computational and experimental study of pine and sunflower husk pellet combustion and co-combustion with oats in domestic boiler. *Renew. Energy.* 2020; 162:151. doi 10.1016/j.renene.2020.07.139.
- 20.Bogomolov AR, Petrov IY, Zhalmagambetova UK. Thermal Analysis of Coals from Kazakhstan Deposits. *Thermal Engineering.* 2020;67(3):165–172. doi 10.1134/S0040601520030015.
- 21.Alekhnovich AN, Bogomolov VV, Gladkov VE, et al. Slagging and deposition formation in the gas channel of a boiler. *Teploenergetika.* 1997;3:64–68.
- 22.Alekhnovich AN, Talova VM, Bogomolov VV, et al. Investigations of power-generating coals by the method of chemical fractionation and an estimate of their fouling properties. *Thermal Engineering.* 2001;48(5):401–409.

Authors of the publication

Andrey V. Zhyukov - Siberian Federal University.

Anatoly I. Matyushenko - Siberian Federal University.

Vladimir A. Kulagin - Siberian Federal University.

Dmitry A. Loginov - OOO Sibnii and Glebobobstep.

Получено

15.08.2022г.

Отредактировано

29.08.2022г.

Принято

07.09.2022г.