

EDN: ORSGNM

УДК 662.611

## Methods of Burning Solid Fuel Mixtures in Power Plants (Review)

Andrei V. Zhuikov<sup>\*a, c</sup>,  
Anatoly I. Matiushenko<sup>a</sup>, Vladimir A. Kulagin<sup>a</sup>,  
Sergey G. Stepanov<sup>b</sup> and Petr N. Kuznetsov<sup>a, c</sup>

<sup>a</sup>*Siberian Federal University  
Krasnoyarsk, Russian Federation*

<sup>b</sup>*AO “SUEK-Krasnoyarsk”  
Krasnoyarsk, Russian Federation*

<sup>c</sup>*Institute of Chemistry and Chemical Technology,  
FIS KSC SB RAS  
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 09.03.2023, received in revised form 28.08.2023, accepted 11.09.2023

**Abstract.** The paper presents one of the most accessible ways to transition to resource-saving and environmentally safe generation of heat and electricity by coal-fired thermal power facilities, which consists in burning solid fuel mixtures. A review of the existing experience in the transfer of existing heat engineering equipment both in Russia and abroad is carried out, the main difficulties in the process of burning solid fuel mixtures are described in detail. The most effective mixtures in terms of their environmental performance are obtained on the basis of coal and biomass with its addition in terms of heat content of no more than 20 %. The combustion remains one of the most complex and unexplored processes, and during the joint combustion of several solid fuels, additional interactions occur that affect the main combustion characteristics, therefore, the paper separately considers the methods for studying the combustion process and equipment for experimental combustion of solid fuel mixtures.

**Keywords:** coal, biomass, fuel mixture, combustion, thermogravimetric analysis, resource saving, environmental safety.

**Acknowledgment.** The research was carried out with the support of the Krasnoyarsk Regional Foundation for the Support of Science and Scientific-Technical Activities in the framework of the project «Development of the concept of science and technology development of the Krasnoyarsk region» No. 2022112709166.

Citation: Zhuikov A. V., Matiushenko A. I., Kulagin V. A., Stepanov S. G., Kuznetsov P. N. Methods of burning solid fuel mixtures in power plants (review). J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2023, 16(7), 805–825. EDN: ORSGNM



© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

\* Corresponding author E-mail address: azhuikov@sfu-kras.ru

## Способы сжигания твердотопливных смесей в энергетических установках (обзор)

А. В. Жуйков<sup>а, в</sup>, А. И. Матюшенко<sup>а</sup>,  
В. А. Кулагин<sup>а</sup>, С. Г. Степанов<sup>б</sup>, П. Н. Кузнецов<sup>а, в</sup>

<sup>а</sup>Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, Красноярск  
<sup>б</sup>АО «СУЭК-Красноярск»

Российская Федерация, Красноярск

<sup>в</sup>Институт химии и химической технологии,  
ФИЦ КНЦ СО РАН  
Российская Федерация, Красноярск

**Аннотация.** В работе представлен один из наиболее доступных способов перехода к ресурсосберегающей и экологически безопасной выработке тепловой и электрической энергии угольными объектами теплоэнергетики, заключающийся в сжигании смесей топлив. Проведен обзор существующего опыта перевода действующего теплотехнического оборудования как в России, так и за рубежом, подробно описаны основные трудности в процессе сжигания твердотопливных смесей. Наиболее эффективные смеси по своим экологическим показателям получаются на основе угля и биомассы с ее добавлением по теплосодержанию не более 20 %. Горение остается одним из самых сложных и не исследованных процессов, а при совместном горении нескольких твердых топлив происходят дополнительные взаимодействия, которые влияют на основные характеристики горения, поэтому в работе отдельно рассмотрены методики исследований процесса горения и оборудование для проведения опытного сжигания твердотопливных смесей.

**Ключевые слова:** уголь, биомасса, топливная смесь, горение, термогравиметрический анализ, ресурсосбережение, экологическая безопасность.

**Благодарность.** Исследование осуществлено при поддержке КГАУ «Красноярский краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности» в рамках проекта «Разработка концепции научно-технологического развития Красноярского края» № 2022112709166.

Цитирование: Жуйков А. В. Способы сжигания твердотопливных смесей в энергетических установках (обзор) / А. В. Жуйков, А. И. Матюшенко, В. А. Кулагин, С. Г. Степанов, П. Н. Кузнецов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2023, 16(7). С. 805–825. EDN: ORSGNM

### 1. Введение

Переход к энергосберегающей и экологически безопасной выработке тепловой и электрической энергии и ужесточение требований к загрязнению окружающей среды создают новые вызовы к поиску энергоэффективных способов сжигания твердого ископаемого топлива на существующих объектах теплоэнергетики, большая часть которых была введена в эксплуатацию еще в прошлом столетии. В России основными источниками выбросов антропогенных парниковых газов являются объекты теплоэнергетики, поэтому к 2030 году принято решение снизить выбросы парниковых газов до 70 % относительно 1990 года, а к 2050 году разработать стратегию по их дальнейшему снижению [1, 2]. Существуют разные подходы для снижения вредных выбросов на объектах теплоэнергетики, но все они требуют огромных капиталовложений. Один

из энергоэффективных и экологически безопасных способов, отвечающий всем требованиям реалий, – использование природного газа. Однако к настоящему времени не все субъекты РФ оснащены магистральными газопроводами, что ограничивает возможности перехода на этот вид топлива. К примеру, уровень газификации Центрального федерального округа на 2019 год составлял 87 %, Уральского федерального округа – 69 %, а Сибирского федерального округа – всего 12 % [3], что обуславливает необходимость поиска новых путей решения проблемы сжигания твердого ископаемого топлива.

Для генерации тепловой и электрической энергии применяются котельные установки с разными топочными устройствами в зависимости от их назначения и типа топлива. Топочные устройства делятся на слоевые и камерные (вихревые). Основные топлива для котельных установок можно разделить на ископаемые и неископаемые. Ископаемые топлива – это торф, различные угли, сланцы, нефть, газ. К неископаемым топливам можно отнести биомассу и искусственные (альтернативные) виды топлива.

В данной работе рассмотрен один из распространенных и доступных подходов по ресурсосбережению и снижению вредных выбросов – перевод котлов, работающих на твердом ископаемом топливе, на сжигание твердотопливных смесей. Достоинства данного способа заключаются в возможности вовлечения в топливно-энергетический баланс неископаемых топлив с меньшей экологической опасностью при минимальной реконструкции существующего теплоэнергетического оборудования [4, 5].

## 2. Неископаемые виды твердого топлива

*2.1. Биомасса.* Биомасса относится к возобновляемым источникам энергии [6] и подразделяется по ее циклам жизни на годовую и круглогодичную (рис. 1). Применение возобновляемой биомассы в качестве добавочного топлива при сжигании углей улучшает показатели по выбросу парникового углекислого газа (углеродному следу), поскольку биомасса рассма-

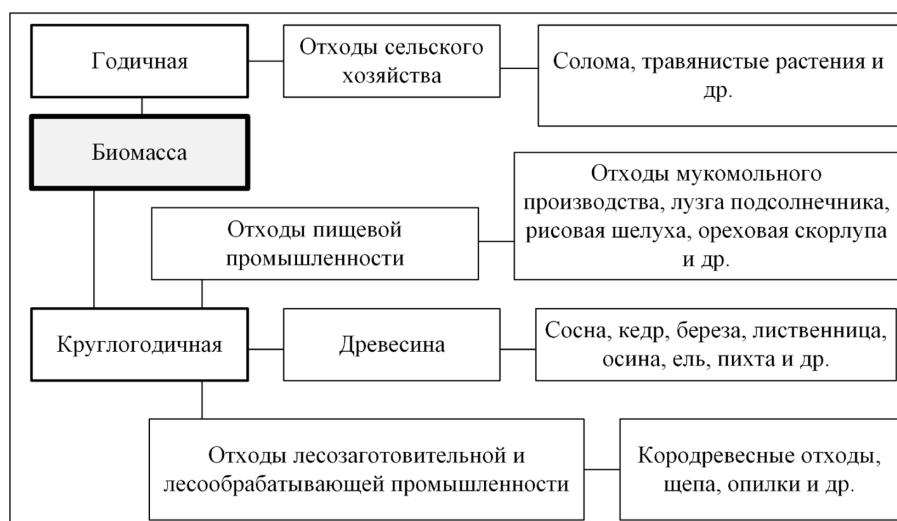


Рис. 1. Разновидности биомассы

Fig. 1. Varieties of biomass

тривается как углеродно-нейтральное топливо. Принимается, что при ее сжигании выделяется столько же  $\text{CO}_2$ , сколько поглощается из атмосферы в процессе ее биосинтеза. При сжигании биомассы снижаются также выбросы золы, оксидов серы, в некоторых случаях оксидов азота [7, 8]. Основным видом биомассы по своим теплотехническим качествам, доступности и объему являются отходы от лесозаготовительных и лесообрабатывающих предприятий. Годовой объем заготовки древесины в России составляет около 200 млн  $\text{м}^3$ , десятая часть (20–25 млн  $\text{м}^3$ ) приходится на отходы, которые возможно использовать в качестве топлива [9].

*2.2. Искусственные виды топлива.* Искусственные виды топлива – это топлива, которые прошли механическую, химическую или термическую обработку. Изначально это могут быть твердые ископаемые топлива, биомасса или другие углеродсодержащие органические вещества. К альтернативным топливам относят остатки сточных вод, органические отходы разных производств (гидролизный лигнин, нефтяной кокс, карбонизированные отходы, пивную дробину и др.), городские органические отходы (твердые бытовые отходы, древесные строительные отходы, бумажные отходы и др.) [10].

*2.3. Сравнение ископаемых видов топлив с неископаемыми.* В табл. 1 представлены теплотехнические показатели некоторых видов твердых ископаемых и неископаемых топлив. Для образцов биомассы, помеченных звездочкой, влажность приведена в расчете на аналитическую пробу, т.е. для воздушно-сухого состояния ( $W^a$ ). Биомасса и искусственные виды топлива имеют ряд отличий по сравнению с углем: повышенную влажность из-за ее гигроскопических свойств; разнообразную вариативность топливных частиц (форма, размеры); низкую плотность; высокое содержание летучих веществ; низкую температуру воспламенения; низкую зольность; низкое содержание азота и серы; высокое содержание кислорода и низкое содержание углерода; в отдельных случаях низкую теплоту сгорания; более высокую реакционную способность [11–13].

### **3. Методы и оборудование для исследования процессов сжигания твердотопливных смесей**

*3.1. Опытное сжигание в действующих котлах.* Опытно-промышленное сжигание непроектных топлив на действующих котлах позволяет получать полноценные теплотехнические данные, однако такие испытания достаточно затруднительны и дорогостоящи. Для проведения полного исследования необходимо приготовить значительное количество непроектного топлива, его подготовку и измельчение, а при сжигании смесей обеспечить эффективное смешивание топлив и подачу смеси в котел. Проведение испытаний на объекте теплоэнергетики позволяет комплексно решить многие инженерные задачи, связанные с этим процессом. По результатам опытных сжиганий определяются энергоэффективные пропорции топливной смеси, склонность смеси к зашлаковыванию топочных экранов, характер процесса горения, наличие срывов факела и возможность технико-экономических расчетов целесообразности применения данного непроектного топлива.

*3.2. Исследования на действующих котлах.* Причины перевода угольных ТЭЦ и котельных на непроектные топлива могут заключаться в ухудшении качества угля: в снижении теплоты сгорания, увеличении зольности, снижении выхода летучих веществ и, соответственно, реакционной способности, что может привести к нестабильной работе котла. Добавление высоко-реакционного топлива к менее реакционному может оказывать положительный эффект за счет

Таблица 1. Теплотехнический анализ топлив

Table 1. Thermal analysis of fuels

Топливо	Теплотехнический анализ				
	$W^r$ , %	$A^d$ , %	$V^{daf}$ , %	$Q_{s,}^{daf}$ , МДж/кг	$Q_i^r$ , МДж/кг
Бородинский бурый уголь	32,6	9,2	47,3	28,66	16,09
Балахтинский бурый уголь	20,8	6,2	44,6	29,33	20,49
Каа-хемский каменный уголь	3,3	6,8	47,5	33,94	29,56
Чаданский каменный уголь	3,0	8,0	37,5	35,79	30,76
Изыхский каменный уголь	20,0	15,9	39,2	31,85	22,00
Майрыхский каменный уголь	14,0	10,0	42,5	33,02	24,34
Аршановский каменный уголь	4,75	7,3	41,7	32,96	28,07
Черногорский каменный уголь	13,0	17,8	44,0	31,00	20,95
Карбонизат, полученный в процессе газификации из каа-хемского угля	0,7	16,2	11,5	33,52	27,57
Карбонизат, полученный в процессе газификации из чаданского угля	0,4	12,7	3,3	34,02	29,41
Карбонизат, полученный в процессе газификации из балахтинского угля	2,0	9,8	4,7	33,22	29,36
Карбонизат, полученный в процессе газификации из бородинского угля	0,4	8,6	8,3	33,62	29,61
Карбонизат, полученный в процессе газификации из черногорского угля	1,3	11,9	3,4	34,79	30,24
Остатки сточных вод (г. Красноярск)	34,7	62,3	80,3	21,45	7,0
Остатки сточных вод (г. Абакан)	35,2	56,8	83,7	22,71	5,1
Гидролизный лигнин	47,5	6,2	65,9	24,45	10,31
Торф (Красноярский край)	72,2	13,3	67,4	22,50	3,40
Картон	2,5*	10,5	85,1	17,68	14,29
Карбонизат, полученный в процессе газификации лиственницы (щепы)	1,7*	4,1	4,7	35,03	32,64
Пеллеты из лиственницы	8,0*	0,8	83,4	19,86	16,76
Пеллеты из гидролизного лигнина	19,0*	50,8	70,3	23,17	8,38
Брикеты из гидролизного лигнина	9,4*	52,1	72,0	23,09	9,39
КДО пихты	5,6*	3,0	79,0	21,69	18,54
КДО ели	9,0*	11,6	78,8	19,99	14,71
КДО березы	5,3*	1,8	80,2	22,36	19,42
КДО кедра	4,1*	1,6	76,4	19,90	17,56
КДО лиственницы	5,9*	1,7	77,3	20,01	17,26
Осина (опилки)	2,8*	0,2	83,0	19,15	17,26
Осина (кора)	6,3*	8,3	75,7	23,21	18,69
Сосновые опилки	2,8*	-	80,2	25,77	19,57
Пивная дробина (на основе солода)	59,4	5,2	78,7	21,66	6,32

\* $W^a$  – влажность аналитическая;  $W^r$  – влажность в рабочем состоянии;  $A^d$  – зольность в сухом состоянии;  $V^{daf}$  – содержание летучих веществ в расчете на сухое-беззольное топливо;  $Q_{s,}^{daf}$  – высшая теплота сгорания в расчете на сухое-беззольное топливо;  $Q_i^r$  – низшая теплота сгорания в рабочем состоянии, КДО – кородревесные отходы.

стабилизации факела, например, при сжигании антрацитов [14]. Другой причиной может быть исчерпание проектного топлива, что, например, произошло в топливно-энергетическом комплексе Украины в связи с прекращением добычи донецкого антрацита. Решение возникшей проблемы потребовало проведения исследований по сжиганию угольных смесей на основе антрацита, тощего угля и угля Южно-Африканской Республики в определенном соотношении [15].

*3.3. Отечественный опыт перевода действующих энергетических установок на сжигание твердотопливных смесей.* В России проведен ряд тепловых испытаний котлов, переведенных на сжигание твердотопливных смесей на действующих объектах теплоэнергетики. Тепловые испытания с целью улучшения технико-экономических показателей и снижения вредных выбросов были проведены на Железнодорожной ТЭЦ (Красноярский край), рассчитанной на сжигание бородинского бурого угля Канско-Ачинского угольного бассейна. Для увеличения теплоты сгорания и снижения зольности котлы БКЗ-160–1,4–5 с факельным сжиганием первоначально пытались перевести на сжигание низзолыного балахтинского бурого угля, теплота сгорания которого на 18 % выше, чем у проектного, но перевод не удался из-за высокой склонности балахтинского угля к шлакованию топочных экранов котлов. Было найдено оптимальное решение по переводу котлов на сжигание угольной смеси, состоящей из 50 % бородинского угля и 50 % балахтинского угля. Анализ работы данной ТЭЦ показал, что при сжигании указанной смеси увеличилась экономичность котлов, снизился расход топлива и количество золошлаковых отходов. Все эти характеристики привели к улучшению технико-экономических показателей ТЭЦ, а также к снижению вредных выбросов в виде мелкодисперсной золы [16, 17].

Переход с проектного топлива на сжигание смеси твердых топлив на основе угля и биомассы активно реализуется в России из-за изобилия не только разных видов ископаемых топлив, но и многочисленных видов неископаемых [18]. В работе [19] представлены результаты по повышению технико-экономических показателей работы Кумертауской ТЭЦ путем перевода котла ТП-14А, оснащенного низкотемпературной вихревой камерной топкой (спроектированной для сжигания бурого угля и природного газа), на сжигание смеси топлив на основе тюльганского бурого угля, лузги подсолнечника, поставляемой местными маслоэкстракционными заводами, и природного газа. Доля компонентов биомассы в смеси составляла 6–10 %. Увеличение доли лузги в топливной смеси было ограничено из-за высокой склонности к загрязнению поверхностей нагрева. Сжигание топливной смеси позволило увеличить КПД котлов и снизить расход природного газа.

Один из примеров энергосбережения был реализован на Иркутской ТЭЦ-6 с целью уменьшения затрат на доставку проектного топлива и утилизацию древесных отходов. Испытания проводились на котле БКЗ-320–140 ПТ, оснащенный камерной топкой с жидким шлакоудалением и рассчитанном на сжигание в качестве проектного топлива бородинского и назаровского бурых углей Канско-Ачинского угольного бассейна. В качестве непроектных топлив были выбраны ирбейский бурый уголь и кородревесные отходы (КДО). Для подачи КДО в котел была реконструирована система пылеприготовления. Топливная смесь состояла из 70 % угля и 30 % биомассы. Выявлен ряд сложностей при использовании биомассы, такие как подача, размол, транспортировка и хранение. Долгое хранение биомассы на топливном складе при выпадении обильных осадков значительно увеличивало ее влажность, что приводило к снижению сыпучих свойств и застраиванию в некоторых узлах тракта топливоподачи [20].

Общий недостаток исследований на действующих котлах – это локальный эксперимент относительно котла определенной мощности и при определенной технологии сжигания. Чаще всего таким испытаниям предшествуют исследования процесса горения смеси топлив с применением более доступных методик, позволяющих получать важные предварительные данные.

*3.4. Опытно-лабораторные стенды.* Данное оборудование широко применяется при исследовании процессов горения топлив, так как позволяет имитировать процесс горения топлива для любых типов энергетических установок в зависимости от цели исследования. Ниже приведем некоторые результаты, полученные с применением различных видов лабораторных установок. В работе [21] представлены результаты исследований условий и характеристик зажигания смеси низкорекционного каменного угля и высокорекционных сосновых опилок с помощью экспериментального стенда, оборудованного высокоскоростной видеокамерой, позволяющей установить временную зависимость зажигания. Установлено, что добавление 25–50 % высокорекционных топлив может снизить время зажигания на 25–35 %. Кинетика взаимодействия коксового остатка разных углей, коксового остатка древесины и угольных смесей была исследована с помощью установки с реактором кипящего слоя, соединенного с газоанализатором для измерения концентраций выделяющихся газов [22]. Результаты исследований и эффективность совместного сжигания углей и биомассы были подтверждены испытаниями на действующих антрацитовых котлах. Проведенные исследования процесса сжигания смеси угля и рисовой шелухи на кислородно-топливной установке мощностью 10 кВт, работающей под давлением и оборудованной газоанализатором, позволили определить влияние давления, температуры и соотношения компонентов в смеси на содержание вредных газов в продуктах горения [23]. В работе [24] исследовался процесс зажигания смесей на основе каменного угля, скорлупы арахиса, репрезентативной ксилановой гемицеллюлозы, целлюлозы и лигнина с помощью установки, оборудованной камерой сгорания, газовой горелкой и высокоскоростной видеокамерой. Установлено, что в процессе зажигания смесей могут проявляться синергетические эффекты. В работе [25] рассмотрено влияние состава смеси угля и соломы на размер зольных частиц, образующихся при сжигании смеси при температуре 1350 °С. Показано, что при сжигании смеси образуется более дисперсный зольный остаток.

Опытно-лабораторные стенды, предназначенные для исследования горения топлив и их смесей, оборудованные высокоскоростными видеокамерами и газоанализаторами, в большинстве предназначены для определения времени задержки зажигания топливных частиц [26–34]. Полученные результаты позволяют судить о реакционной способности топлив и определять содержание газообразных продуктов горения [35–37].

*3.5. Метод синхронного термического анализа.* Метод синхронного термического анализа получил широкое применение при исследовании процессов горения топлив, так как он совмещает возможности одновременного термогравиметрического анализа (TG/DTG) и дифференциального термического анализа (DTA), или дифференциальной сканирующей калориметрией (DSC). Термоанализаторы позволяют проводить исследования при различной скорости нагрева вещества как в окислительной среде (процесс горения), так и в инертной среде (процесс пиролиза). В современных термоанализаторах имеется возможность осуществлять анализ состава

образующихся летучих продуктов с помощью совмещенного масс-спектрометра или газового хроматографа. Результаты, полученные с помощью синхронного термического анализа, можно использовать при моделировании теплотехнических процессов горения. Основные характеристики, которые возможно определить по результатам термоанализа при горении смеси твердых топлив, представлены в табл. 2.

Таблица 2. Основные характеристики горения твердых топлив, определяемые с помощью синхронного термического анализа

Table 2. The main characteristics of the combustion of solid fuels, determined using synchronous thermal analysis

Основные характеристики	Обозначение и ед. изм.	Описание характеристик	Ссылки
Температура, при которой начинают выходить летучие вещества	$T_v, ^\circ\text{C}$	-	[38]
Максимальная скорость убыли массы	$DTG_{\max}, \%/ \text{мин}$	Максимальная скорость выделения летучих веществ, характеристика реакционной способности топлива	[38–77]
Температура, соответствующая максимальной скорости убыли массы	$T_{\max}, ^\circ\text{C}$	Характеристика реакционной способности топлива	[38–77]
Средняя скорость убыли массы	$DTG_{\text{mean}}, \%/ \text{мин}$	Соответствует средней скорости убыли массы от $T_i$ до $T_b$ (средняя скорость реакции)	[38, 40, 42–48, 52–64, 67, 68, 70, 71]
Температура, при которой происходит воспламенение коксового остатка	$T_i, ^\circ\text{C}$	1. Определяется по методу пересечения кривых	[[38, 40–42, 46, 47–49, 55, 57–59, 61–64, 68, 70–72, 74]
		2. Определяется по скорости убыли массы в начальный момент после удаления влаги (1 %/мин)	[51, 53, 53, 60, 67]
Температура, при которой завершается процесс горения	$T_b, ^\circ\text{C}$	1. Температура, при которой скорость убыли массы после последнего пика DTG снижается до 0,01 %/мин	[38, 61, 70]
		2. Температура, при которой общая убыль массы составила 98 %	[40–42, 53, 74]
		3. Определяется по методу пересечения кривых	[48, 49, 57–59, 62, 68, 71]
		4. Определяется по скорости убыли массы уменьшающейся до 1 %/мин после последнего пика DTG	[51, 54, 55, 60, 64, 67]
Средняя реакционная способность	$R = DTG_{\max} / T_{\max}, \text{мин } ^\circ\text{C}$	Рассчитывается по кривой DTG. $DTG_{\max}$ – пропорциональна реакционной способности; $T_{\max}$ – обратно пропорциональна реакционной способности	[64–66]
Индекс горения	$S = 10^6(DTG_{\max} / DTG_{\text{mean}} / T_i^2 T_b), \text{мин}^{-2} ^\circ\text{C}^{-3}$	Отображает характер всего процесса горения. Чем выше $S$ , тем выше эффективность сгорания топлива	[38, 40, 42–48, 52–64, 67, 68, 70, 71, 74–77]



Продолжение табл. 2.

Continuation of the Table 2

Основные характеристики	Обозначение и ед. изм.	Описание характеристик	Ссылки
Кинетические характеристики	Энергия активации $E$ , кДж/моль Предэкспоненциальный множитель $A$ , с <sup>-1</sup>	Определяются минимум для трех скоростей нагрева методами: Одзавы-Флинна-Уолла; Киссинджера-Акахиры-Суноза; Старинка; Фридмена	[38, 40, 41, 44, 45, 47, 50, 52, 56, 59, 73, 77]
		Определяются при одной скорости нагрева методом Коутса-Редферна	[49, 55–57, 59, 60, 62, 64, 67, 69, 72]
Максимальная интенсивность теплового потока	$DSC_{max}$ , МВт/мг	Соответствует максимальному экзотермическому эффекту в процессе горения	[57, 61, 68, 75]
Эффекты от взаимодействия компонентов смеси друг с другом в процессе их горения (синергетические эффекты)	$DTG_{расч} = \alpha_1 DTG_1 + \alpha_2 DTG_2$ , где $\alpha_1, \alpha_2$ – массовое количество первого и второго компонентов в смеси, причем $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ ; $DTG_1, DTG_2$ – скорость изменения массы первого и второго компонентов смеси	Определяются путем сопоставления экспериментальных значений DTG и расчетных значений DTG. При совпадении этих линий процесс горения смесей подчиняется принципам аддитивности, если кривые не совпадают, это означает, что происходит взаимосвязь между компонентами смеси, влияющая на основные характеристики горения	[38, 39, 42–45, 47, 50, 52–55, 60, 61, 64, 70, 72, 73, 74, 77]

3.6. *Использование стендовых котлов.* В работе [78] исследовали совместное горение торрефицированных древесных опилок хвойных пород и каменного угля в котле мощностью 1 МВт, оборудованном двухходовой топкой и вихревой горелкой, и анализатором для анализа уходящих газов. В котле установлены термоэлектрические датчики для измерения температуры, датчики для измерения давления и два монитора для наблюдения за профилем пламени. Установлено, что увеличение доли биомассы в смеси приводило к увеличению размеров топливных частиц из-за уменьшения эффективности измельчения, при этом горение смеси не отличалось от горения одного угля [79–86].

#### 4. Технология сжигания твердотопливных смесей в энергетических установках

4.1. *Предварительный анализ перевода на непроектные топлива энергетических установок.* При переводе теплоэнергетических объектов на непроектные топлива необходимо определение следующих показателей [87]:

- 1) теплотехнический и элементный анализ непроектного топлива;
- 2) анализ экологических показателей;
- 3) анализ золы на предмет золоулавливания и золоудаления;
- 4) анализ золы на склонность к шлакованию поверхностей нагрева, а также их абразивный износ;

- 5) анализ топлива на предмет размолоспособности, склонности к самовозгоранию и окислению;
- 6) анализ сыпучих свойств и условия смерзаемости топлива;
- 7) анализ возможности хранения топлива на открытом складе;
- 8) оценка условий и производительности топливо-приготовительного оборудования, а также тягодутьевых механизмов;
- 9) проведение опытного сжигания с учетом технико-экономических показателей работы котла.

4.2. *Назначение твердотопливных смесей.* Применение твердотопливных смесей может быть направлено на решение следующих задач:

- снижение вредных выбросов при работе теплоэнергетического оборудования без изменения технико-экономических показателей;
- снижение вредных выбросов и улучшение технико-экономических показателей, например, за счет увеличения теплоты сгорания топлива и, соответственно, снижения его потребления;
- улучшение технико-экономических показателей при тех же показателях по вредным выбросам.

4.3. *Подготовка твердотопливной смеси для сжигания.* Перед сжиганием биомассы в смеси с углем из-за ее гидрофильных свойств желательна термическая обработка с целью удаления сорбированной влаги и повышения теплоты сгорания. Наиболее подходящий метод для обогащения биомассы, зарекомендовавший себя на практике, – торрефикация [11]. Сущность метода основана на термической обработке биомассы в реакторе в инертной среде при невысокой температуре 200–300 °С [11]. В этих условиях происходит частичное разложение в основном активных кислородсодержащих групп с выделением преимущественно воды и диоксида углерода. Получаемый продукт торрефикации обогащается углеродом, отличается лучшими теплотехническими характеристиками в сравнении с исходной биомассой, его выход составляет около 70 %. Исследования горения смесей на основе бурого угля и биомассы в исходном состоянии, биомассы торрефицированной при 275 °С, и биомассы, пирролизованной при 500 °С, показали, что термическая обработка биомассы приводит к уменьшению содержания серы и хлора и увеличению размера зольных частиц, что благоприятно для их улавливания специальными золоулавливающими устройствами [88].

Сжигание твердотопливных смесей на объектах теплоэнергетики связано с рядом практических трудностей, одна из которых – обеспечение оптимального соотношения компонентов в топливной смеси [89]. Смешение топлив осуществляется на топливном складе с применением специальных ленточных конвейеров, узлов пересыпки, качающихся питателей и другого оборудования [90]. Приготовленную в нужной пропорции твердотопливную смесь по ленточным конвейерам подают обычно в котлы со слоевым способом сжигания.

4.4. *Способы сжигания твердотопливных смесей.* Сжигание твердотопливных смесей подразделяется на прямое, раздельное и параллельное [91, 92]. Прямое сжигание подразумевает сжигание приготовленной смеси ископаемого и неископаемого топлив в топке котла. Примеры прямого сжигания представлены на рис. 1–6.

Раздельное сжигание включает получение из неископаемого топлива генераторного газа, который далее направляется на сжигание в котле совместно с ископаемым топливом. Данный

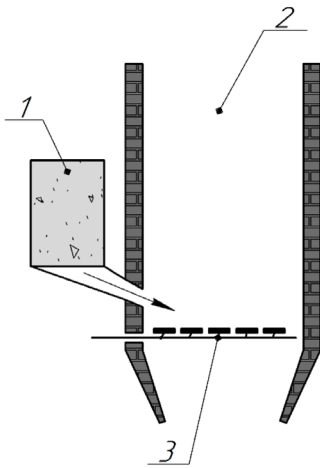


Рис. 2. Топка для слоевого сжигания твердотопливной смеси: 1 – бункер смешанного топлива; 2 – топка котла; 3 – колосниковая решетка

Fig. 2. Furnace for stratified combustion of solid fuel mixture: 1 – mixed fuel bunker; 2 – boiler furnace; 3 – grate

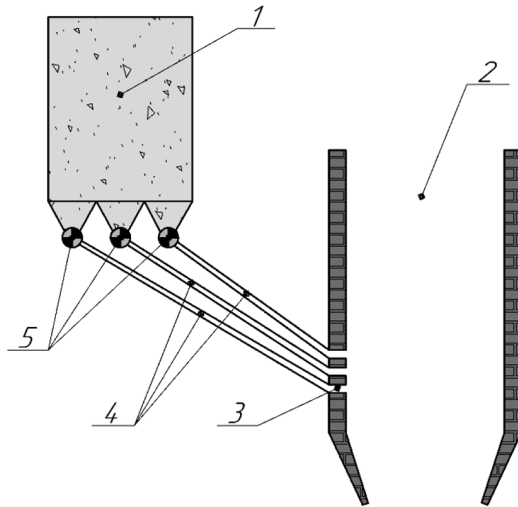


Рис. 3. Топка для факельного сжигания твердотопливной смеси с общим топливным бункером: 1 – бункер пыли; 2 – топка котла; 3 – горелки; 4 – пылепроводы; 5 – пылепитатели

Fig. 3. A furnace for flaring a solid fuel mixture with a common fuel bunker: 1 – dust bunker; 2 – boiler furnace; 3 – burners; 4 – dust pipelines; 5 – dust feeders

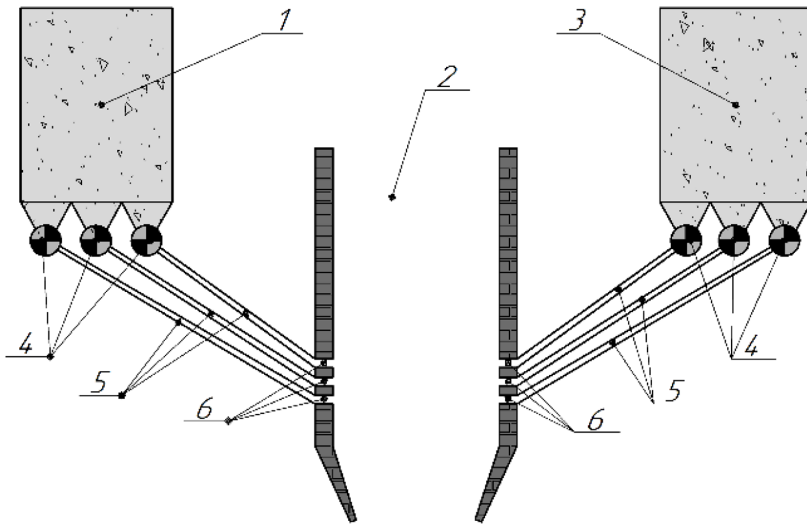


Рис. 4. Топка для факельного сжигания с двумя топливными бункерами: 1 – бункер пыли для ископаемого топлива; 2 – топка котла; 3 – бункер пыли для не ископаемого топлива; 4 – пылепитатели; 5 – пылепровода; 6 – горелки

Fig. 4. Flaring furnace with two fuel bunkers: 1 – dust bunker for fossil fuel; 2 – boiler furnace; 3 – dust bunker for non-fossil fuel; 4 – dust feeders; 5 – dust pipelines; 6 – burners

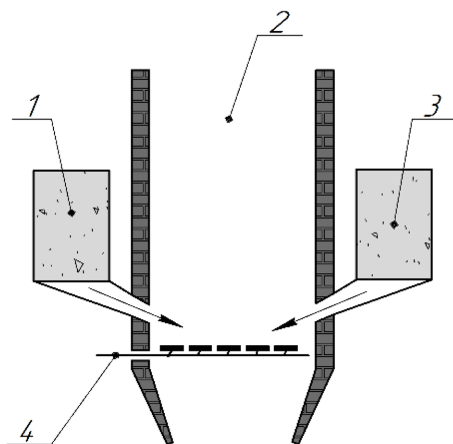


Рис. 5. Топка котла для слоевого сжигания с двумя топливными бункерами: 1 – бункер для ископаемого топлива; 2 – топка котла; 3 – бункер для неископаемого топлива; 4 – колосниковая решетка

Fig. 5. Boiler furnace for stratified combustion with two fuel bunkers: 1 – bunker for fossil fuel; 2 – boiler furnace; 3 – bunker for non-fossil fuel; 4 – grate

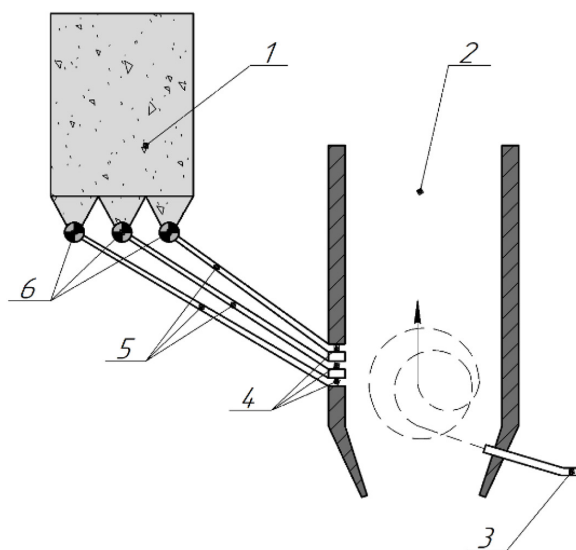


Рис. 6. Топка котла для факельного сжигания, оборудованная соплом нижнего дутья: 1 – бункер для твердотопливной смеси; 2 – топка котла; 3 – сопло нижнего дутья; 4 – горелки; 5 – пылепровода; 6 – пылепитатели

Fig. 6. Boiler furnace for flaring equipped with bottom blast nozzle: 1 – hopper for solid fuel mixture; 2 – boiler furnace; 3 – bottom blast nozzle; 4 – burners; 5 – dust pipelines; 6 – dust feeders

способ имеет ряд достоинств по сравнению с прямым сжиганием: возможность использования разных видов неископаемого топлива; значительно снижается образование отложений и коррозионный износ поверхностей нагрева. Из недостатков можно отметить дополнительные капиталовложения на установку газогенераторов, газопроводов, монтаж газовых горелок, устройств для удаления золы из газогенератора, другого оборудования.

Параллельное сжигание подразумевает сжигание неископаемого топлива в отдельном котле, соединяются только паропроводы, если котлы паровые, или трубопроводы, если котлы водогрейные [93]. Из достоинств можно отметить отсутствие проблем с топливподготовкой и сжиганием твердотопливной смеси, так как имеется возможность установки котла, оборудованного слоевой топкой для сжигания биомассы без применения размалывающих мельниц, используя только дробилки. Недостатком являются дополнительные капиталовложения на строительство дополнительных котлов и теплоэнергетического оборудования для сжигания неископаемого топлива [94].

*4.5. Технологии прямого сжигания твердотопливной смеси.* Далее будут рассмотрены различные варианты прямого сжигания твердотопливных смесей. На рис. 2 представлена топка для слоевого сжигания твердотопливной смеси, которая подается из общего топливного бункера с помощью питателей на колосниковую решетку. Наиболее подходящие устройства для сжигания – это топки котлов с кипящим слоем (КС) и циркулирующим кипящим слоем (ЦКС). Достоинство ЦКС заключается в возможности сжигания низкокалорийного топлива с высокой влажностью и зольностью; использования технологии по частичному удалению  $\text{SO}_2$  путем до-

бавления известняка в кипящий слой [95, 96]. Переход на сжигание твердотопливных смесей не требует значительных капиталовложений, при этом обеспечиваются высокий КПД котла и низкие выбросы оксидов азота. Самая крупная теплоэлектростанция в Европе, использующая ЦКС-технологии сжигания топливной смеси с 10 % биомассы (Lagisza, Польша), имеет мощность 460 МВт. В Южной Корее технология ЦКС по сжиганию топливной смеси с 5 % биомассы используется на ТЭС «KOSPO» мощностью 2200 МВт [97].

Для котлов с факельным сжиганием требуется дополнительная топливоподготовка, включающая сушку и размол топлива. В случае если твердотопливная смесь подходит для размола в имеющихся в котельной мельничных установках, то уголь и неископаемые топлива подаются в систему топливоприготовления, а затем в бункер пыли, откуда смесь пылепитателями подается в топку котла (рис. 3). Также возможно использовать мельничные устройства, которые после размола твердотопливной смеси осуществляют подачу топлива в горелки котла.

В случае, когда топливный склад не оборудован вышперечисленным оборудованием или мельничные установки не подходят для размола биомассы, топливо в котельную может поступать со склада по разным ленточным конвейерам (отдельно уголь, отдельно биомасса). В этом случае компоненты топлив, подаваемые с помощью пылепитателей из отдельных топливных бункеров, смешивают внутри топки котла (рис. 4). Размер частиц мелкодисперсного топлива при факельном сжигании не должен превышать 250 мкм.

Наиболее практичный способ слоевого сжигания твердотопливных смесей используется в котлах, оснащенных отдельными топливными бункерами. На рис. 5 представлен пример топки котла, оборудованной двумя топливными бункерами и колосниковой решеткой. В этом случае топлива со склада подаются разными ленточными конвейерами в отдельные топливные бункеры и далее в котел. При этом не требуется особая топливоподготовка, а достижение нужного соотношения компонентов, входящих в твердотопливную смесь, происходит внутри топки котла путем настройки подачи топливных питателей.

Для факельного сжигания твердотопливных смесей желательно применение котлов, оборудованных устройством для низкотемпературного вихревого сжигания (рис. 6). Применение топок с вихревым сжиганием позволяет сжигать биомассу совместно с углем, несмотря на различие в их структуре и форме топливных частиц. Проведенное в ОАО ВТИ исследование по сжиганию твердотопливных смесей показало, что при добавлении к углю до 10 % биомассы выбросы углекислого газа снижаются на 22 %, при этом сохраняется КПД котла, но может уменьшаться КПД энергоблока в целом из-за увеличения затрат на электроэнергию на собственные нужды. Показано, что экономически целесообразно переходить на сжигание смеси твердых топлив на основе угля и неископаемого топлива в случае, если последнее является бесплатным отходом производств [98].

*4.6. Зарубежный опыт перевода действующих энергетических установок на сжигание твердотопливных смесей.* Технология совместного сжигания угля и биомассы (по состоянию на 2010 год) была успешно реализована во многих странах более чем на 150 энергетических установках с мощностью от 50 до 700 МВт [5]. В Польше переход на сжигание смесей на теплоэлектростанциях, работающих на твердом ископаемом топливе, начался с 2005 года [99, 100]. К 2016 году на прямое сжигание смесей было переведено не менее восьми крупных ТЭЦ мощностью от 263 до 2820 МВт. Для сжигания используются в основном котлы КС и ЦКС. Общая

доля вырабатываемой электрической и тепловой энергии в Польше путем сжигания твердо-топливных смесей на основе угля и биомассы на угольных теплоэлектростанциях является самой высокой среди всех технологий, использующих возобновленные источники энергии, и достигает 40 % от общей выработки энергии [100]. Подробный обзор технологий сжигания твердо-топливных смесей, результаты теплотехнического и элементного анализа неископаемых топлив, а также золы представлен в работе авторов из Технологического университета Суинберна (Австралия) и Исламского технологического университета (Бангладеш) [101].

### Заключение

1. Частичное вовлечение биомассы в топливно-энергетический баланс путем совместного сжигания с углем на объектах теплоэнергетики позволяет снизить объем потребления угля, а также вредные выбросы и улучшить показатели по выбросу парникового углекислого газа.

2. Биомассу следует рассматривать как бесплатные промышленные отходы (в основном отходы от лесоперерабатывающей промышленности), в этом случае ее стоимость будет зависеть только от дальности доставки до объектов теплоэнергетики.

3. Биомасса по сравнению с углем имеет ряд достоинств и недостатков. Биомасса относится к возобновляемым источникам энергии и имеет высокую реакционную способность, а из основных недостатков можно отметить повышенное содержание влаги, снижающее тепло-выделение.

4. Для сжигания биомассы наиболее подходит технология прямого сжигания, не требующая высоких капиталовложений для реконструкции действующего оборудования.

5. Перевод действующих объектов теплоэнергетики на совместное сжигание угля и биомассы за рубежом активно осуществляется начиная с 2000-х годов, в России это направление теплоэнергетики не получило активного развития.

### Список литературы / References

[1] Росляков П.В., Рыбаков Б.А., Савитенко М.А., Ионкин И.Л., Лунинг Б. Оценка возможностей снижения выбросов парниковых газов при сжигании топлив в котлах ТЭС и котельных. *Теплоэнергетика*, 2022, 9, 97–106 [Roslyakov P.V., Rybakov B.A., Savitenko M.A., Ionkin I.L., Luning B. Evaluation of the possibilities of reducing greenhouse gas emissions during the combustion of fuels in boilers of TPPs and boiler houses. *Thermal power engineering*, 2022, 9, 97–106 (in Rus.)]

[2] Макаров А.А. Сценарии и цена перехода к низкоуглеродной энергетике в России. *Теплоэнергетика*, 2022, 10, 5–16 [Makarov A.A. Scenarios and cost of transition to low-carbon energy in Russia. *Thermal power engineering*, 2022, 10, 5–16 (in Rus.)]

[3] Романова Т.Н. Современное состояние вопроса газификации природным газом. *Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура*, 2019, 10(1), 80–90 [Romanova T.N. The current state of the issue of gasification with natural gas. *Bulletin of PNIPU. Construction and architecture*, 2019, 10(1), 80–90 (in Rus.)]

[4] Sahu S.G., Chakraborty N., Sarkar P. Coal–biomass co-combustion: An overview. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 2014, 39, 575–586

[5] Al-Mansour F., Zuwala J. An evaluation of biomass co-firing in Europe. *Biomass & bioenergy*, 2010, 34, 620–629

[6] Zhou C., Liu G., Wanga X., Qi C. Co-combustion of bituminous coal and biomass fuel blends: Thermochemical characterization, potential utilization and environmental advantage. *Bioresour. Technol.*, 2016, 218, 418–427

[7] Алехнович А.Н., Богомолов В.В., Артемьева Н.В. Совместное факельное сжигание биомасс с углем. *Теплоэнергетика*, 2001, 2, 26–33 [Alekhovich A. N., Bogomolov V. V., Artem'eva N. V. Co-flaring of biomass with coal. *Thermal power engineering*, 2001, 2, 26–33 (in Rus.)]

[8] Biswas S., Sharma D.K. A review on the co-processing of biomass with other fuels sources. *Int. J. Green Energy*, 2021, 18, 793–811

[9] Ильющенко Д.А., Бирман А.Р., Локштанов Б.М., Орлов В.В., Гусева Т.А., Иванов В.А., Никифорова В.А. Технологии производства топливной щепы из лесосечных отходов при заготовке древесины 250–300 тыс.пл.м<sup>3</sup> в год. *Системы. Методы. Технологии*, 2021, 2(50), 175–184 [Ilyushenko D. A., Birman A. R., Lokshtanov B. M., Orlov V. V., Guseva T. A., Ivanov V. A., Nikiforova V. A. Technologies for the production of fuel chips from logging waste when harvesting wood 250–300 thousand square meters per year. *Systems. Methods. Technologies*, 2021, 2(50), 175–184 (in Rus.)]

[10] Saidur R., Abdelaziz E. A., Demirbas A., Hossain M. S., Mekhilef S. A review on biomass as a fuel for boilers. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 2011, 15(5), 2262–2289

[11] Рябов Г.А. Развитие технологий совместного сжигания угля и биомассы. *Энергетика за рубежом. Приложение к журналу «Энергетик»*, 2022, 3, 2–40 [Ryabov G. A. Development of co-combustion technologies for coal and biomass. *Energy abroad. Supplement to the magazine "Energetik"*, 2022, 3, 2–40 (in Rus.)]

[12] Кулагина Л.В., Штым К.А., Кириллова И.В. Совершенствование технологии производства тепловой энергии с использованием биомассы. *Информационные и математические технологии в науке и управлении*, 2022, 2(26), 104–114 [Kulagina L. V., Shtym K. A., Kirillova I. V. Improving the technology for the production of thermal energy using biomass. *Information and mathematical technologies in science and management*, 2022, 2(26), 104–114 (in Rus.)]

[13] Kulagina L., Yenutina T., Kirillova I. Increasing the energy efficiency and environmental safety of the operation of small-volume furnaces by adding a water-fuel mixture and organic components. *E 3S Web of Conferences*, 2021, 295, 02002

[14] Бесценный И.В., Бондзик Д.Л., Щудло Т.С., Дунаевская Н.И. Исследование синергетических эффектов при факельном сжигании угольных смесей. *Современная наука: идеи, исследования, результаты, технологии*, 2011, 3(8), 119–124 [Bestseny I. V., Bondzik D. L., Shchudlo T. S., Dunaevskaya N. I. Investigation of synergistic effects during flaring of coal mixtures. *Modern science: ideas, research, results, technologies*, 2011, 3(8), 119–124 (in Rus.)]

[15] Капустянский А.А. Исследование факельного сжигания непроектных бинарных угольных смесей в паровых котлах. *Теплоэнергетика*, 2017, 7, 83–90 [Kapustyansky A. A. Study of flaring of non-design binary coal mixtures in steam boilers. *Thermal power engineering*, 2017, 7, 83–90 (in Rus.)]

[16] Жуйков А.В., Карловский А.И., Матюшенко А.И., Гребеньков П.Ю., Козлов С.Г., Выхристюк М.Н., Логинов Д.А. Опыт факельного сжигания смеси бурых углей на Железногорской ТЭЦ. *Теплоэнергетика*, 2022, 5, 58–64 [Zhuykov A. V., Karlovskiy A. I., Matyushenko A. I., Greben'kov P. Y. U., Kozlov S. G., Vykhristyuk M. N., Loginov D. A. Experience in flaring a mixture of brown coals at the Zheleznogorsk CHPP. *Thermal power engineering*, 2022, 5, 58–64 (in Rus.)]

[17] Гребеньков П.Ю., Козлов С.Г., Выхристюк М.Н., Худяков И.А., Концевой А.А. Использование угля марки ЗБР на котлах БКЗ-160–1,4–5 с мельницами-вентиляторами и газовой сушилкой. *Электрические станции*, 2016, 11, 13–18 [Grebekov P. Yu., Kozlov S. G., Vykhristyuk M. N., Khudyakov I. A., Kontsevoi A. A. The use of 3BR grade coal on BKZ-160–1.4–5 boilers with fan mills and gas drying. *Power stations*, 2016, 11, 13–18 (in Rus.)]

[18] Дремичева Е.С. Использование твердотопливных композиций при совместном сжигании на объектах малой энергетики. *Промышленная энергетика*, 2021, 8, 48–56 [Dremicheva E. S. The use of solid fuel compositions for co-firing at small power facilities. *Industrial Energy*, 2021, 8, 48–56 (in Rus.)]

[19] Сосин Д.В., Литун Д.С., Рыжий И.А., Штегман А.В., Шапошников Н.А. Опыт сжигания лузги подсолнечника в пылеугольных котлах Кумертауской ТЭЦ. *Теплоэнергетика*, 2020, 1, 15–22 [Sosin D. V., Litun D. S., Ryzhiy I. A., Shtegman A. V., Shaposhnikov N. A. Experience in burning sunflower husks in pulverized coal boilers at the Kumertau CHP. *Thermal power engineering*, 2020, 1, 15–22 (in Rus.)]

[20] Кудряшова А.Н., Мехряков А.Д., Кочеткова О.Н. Особенности совместного сжигания угля и древесных отходов. *Системы. Методы. Технологии*, 2017, 1, 78–84 [Kudryashova A. N., Mekhryakov A. D., Kochetkova O. N. Features of joint combustion of coal and wood waste/ *Systems. Methods. Technologies*, 2017, 1, 78–84 (in Rus.)]

[21] Glushkov D.O., Matiushenko A.I., Nurpeiis A.E., Zhuikov, A.V. 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

[22] Бесценный И.В., Щудло Т.С., Дунаевская Н.И., Топал А.И. Исследование особенностей горения смесей коксов углей различной степени метаморфизма и коксов биомассы. *Теплоэнергетика*, 2013, 12, 4–8 [Bestsenyuy I. V., Shchudlo T. S., Dunayevskaya N. I., Topal A. I. Investigation of the combustion features of mixtures of coal cokes of various degrees of metamorphism and biomass cokes. *Thermal power engineering*, 2013, 12, 4–8 (in Rus.)]

[23] Liu Q., Zhong W., Yu A., Wang C-H. Co-firing of coal and biomass under pressurized oxy-fuel combustion mode: Experimental test in a 10 kWth fluidized bed: Nitrogen and sulfur pollutants, *J. Chem. Eng.*, 2022, 431(4), 133457

[24] Wang S., Zou C., Lou C., Yang H., Pu Y., Luo J., Peng C., Wang C., Li Z. Influence of the synergistic effects between coal and hemicellulose/cellulose/lignin on the co-combustion of coal and lignocellulosic biomass, *Fuel*, 2022, 311, 122585

[25] Wang X., Hu Z., Wang G., Luo X., Ruan R., Jin Q., Tan H. Influence of coal co-firing on the particulate matter formation during pulverized biomass combustion, *J. Energy Inst.*, 2019, 92(3), 450–458

[26] Glushkov D.O., Kuznetsov G. V., Chebochakova D. A., Lyakhovskaya O. E., Anufriev I. S., Shadrin E. Yu. Experimental study of coal dust ignition characteristics at oil-free start-up of coal-fired boilers, *Appl. Therm. Eng.* 2018, 142, 371–379

[27] Жуйков А.В., Глушков Д.О., Цепенек А.И., Плешко А.О. Интенсификация процесса воспламенения каменного угля путем добавления биомассы в условиях факельного сжигания. *Химия твердого топлива*, 2023, 5, 55–68 [Zhuikov A. V., Glushkov D. O., Tsepenok A. I.,



Pleshko A.O. Intensification of coal ignition process by adding biomass under flaring conditions. *Chemistry of solid fuels*, 2023, 5, 55–68 (in Rus.)]

[28] Sarroza A.C., Bennet T.D., Eastwick C., Liu H. Characterising pulverised fuel ignition in a visual drop tube furnace by use of a high-speed imaging technique, *Fuel Process. Technol.*, 2017, 157, 1–11

[29] Xu S., Liu J., Cao W., Li Y., Cao W. Experimental study on the minimum ignition temperature and combustion kinetics of coal dust/air mixtures, *Powder Technol.*, 2017, 317, 154–161

[30] Cao W., Cao W., Peng Y., Qiu S., Miao N., Pan F. Experimental study on the combustion sensitivity parameters and pre-combusted changes in functional groups of lignite coal dust, *Powder Technol.*, 2015, 283, 512–518

[31] Addai E.K., Gabel D., Kamal M., Krause U. Minimum ignition energy of hybrid mixtures of combustible dusts and gases, *Process Saf. Environ. Prot.*, 2016, 102, 503–512

[32] Wu D., Norman F., Verplaetsen F., Van den Bulck E. Experimental study on the minimum ignition temperature of coal dust clouds in oxy-fuel combustion atmospheres, *J. Hazard. Mater.*, 2016, 307, 274–280

[33] Ajrash M.J., Zanganeh J., Moghtaderi B. Experimental investigation of the minimum auto-ignition temperature (MAIT) of the coal dust layer in a hot and humid environment, *Fire Saf. J.*, 2016, 82, 12–22

[34] Joshi K.A., Raghavan V., Rangwala A.S. An experimental study of coal dust ignition in wedge shaped hot plate configurations, *Combust. Flame*, 2012, 159(1), 376–384

[35] Ye B., Zhang R., Cao J., Lei K., Liu D. The study of co-combustion characteristics of coal and microalgae by single particle combustion and TGA methods, *J. Energy Inst.*, 2020, 93, 508–517

[36] Li H., Chi H., Han H., Hu S., Song G., Wang Y., He L., Wang Y., Su S., Xiang J. Comprehensive study on co-combustion behavior of pelletized coal-biomass mixtures in a concentrating photothermal reactor, *Fuel Process. Technol.*, 2021, 211, 106596

[37] Moon C., Sung Y., Ahn S., Kim T., Choi G., Kim D. Effect of blending ratio on combustion performance in blends of biomass and coals of different ranks, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 2013, 47, 232–240

[38] Yang Z., Bai M., Han T., Bai X., Tang X., Duan E., Kang A., Zheng Z., Cheng F. Application potential of antibiotic fermentation residue for co-combustion with coal: Thermal behavior, gaseous products, and kinetics, *Fuel*, 2023, 335, 126953

[39] Ларина О.М., Синельщиков В.А., Сычев Г.А. Термогравиметрический анализ топливных смесей из биомассы и высокозольных углесодержащих отходов. *Теплофизика высоких температур*, 2020, 5(58), 782–788 [Larina O.M., Sinelshchikov V.A., Sychev G.A. Thermogravimetric analysis of fuel mixtures from biomass and high-ash coal-containing waste. *Thermophysics of High Temperatures*, 2020, 5(58), 782–788 (in Rus.)]

[40] Zhang X., Li Y., Zhang X., Ma P., Xing X. Co-combustion of municipal solid waste and hydrochars under non-isothermal conditions: Thermal behaviors, gaseous emissions and kinetic analyses by TGA–FTIR, *Energy*, 2023, 265, 126373

[41] Fan Y., Yu Z., Fang S., Lin Y., Lin Y., Liao Y., Ma X. Investigation on the co-combustion of oil shale and municipal solid waste by using thermogravimetric analysis, *Energy Convers Manag*, 2016, 117, 367–374

- [42] Li X., Miao W., Lv Y., Wang Y., Gao C., Jiang D. TGA-FTIR investigation on the co-combustion characteristics of heavy oil fly ash and municipal sewage sludge, *Thermochim Acta*, 2018, 666, 1–9.
- [43] Ni Z., Song Z., Bi H., Jiang C., Sun H., Qiu Z., He L., Lin Q. The effect of cellulose on the combustion characteristics of coal slime: TG-FTIR, principal component analysis, and 2D-COS, *Fuel*, 2023, 333, 126310
- [44] Chen Z., Chen Z., Liu J., Zhuang P., Evrendilek F., Huang S., Chen T., Xie W., He Y., Sun S. Optimizing co-combustion synergy of soil remediation biomass and pulverized coal toward energetic and gas-to-ash pollution controls, *Sci. Total Environ.*, 2023, 857, 159585
- [45] Armakan S., Civan M., Yurdakul S. Determining co-combustion characteristics, kinetics and synergy behaviors of raw and torrefied forms of two distinct types of biomass and their blends with lignite, *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2022, 147(22), 12855–12869
- [46] Wang C., Wang F., Yang Q., Liang R. Thermogravimetric studies of the behavior of wheat straw with added coal during combustion, *Biomass & bioenergy*, 2009, 33(1), 50–56
- [47] Nie Y., Deng M., Shan M., Yang X. Evaluating the impact of wood sawdust and peanut shell mixing ratio on co-combustion performance, *Fuel*, 2022, 324, 124667
- [48] Zhuikov A.V., Glushkov D. O., Kuznetsov P. N., Grishina I. I., Samoilo A. S., Ignition of two-component and three-component fuel mixtures based on brown coal and char under slow heating conditions, *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2022, 147, 11965–11976
- [49] Yang Z., Zhang S., Liu L., Li X., Chen H., Yang H., Wang X. Combustion behaviours of tobacco stem in a thermogravimetric analyser and a pilot-scale fluidized bed reactor, *Bioresour. Technol.*, 2012, 110, 595–602
- [50] Liang W., Jiang C., Wang G., Ning X., Zhang J., Guo X., Xu R., Wang P., Ye L., Li J., Wang C. Research on the co-combustion characteristics and kinetics of agricultural waste hydrochar and anthracite, *Renew. Energy*, 2022, 194, 1119–1130
- [51] Wang C., Wang C., Tang G., Zhang J., Gao X., Che D. Co-combustion behaviors and NO formation characteristics of semi-coke and antibiotic filter residue under oxy-fuel condition, *Fuel*, 2022, 319, 123779
- [52] Ye L., Zhang J., Xu R., Ning X., Zhang N., Wang C., Mao X., Li J., Wang G., Wang C. Co-combustion kinetic analysis of biomass hydrochar and anthracite in blast furnace injection, *Fuel*, 2022, 316, 123299
- [53] Xiao Z., Wang S., Luo M., Cai J. Combustion characteristics and synergistic effects during co-combustion of lignite and lignocellulosic components under oxy-fuel condition, *Fuel*, 2022, 310, 122399
- [54] Rago Y.P., Collard F.-X., Görgens J.F., Surroop D., Mohee R. Co-combustion of torrefied biomass-plastic waste blends with coal through TGA: Influence of synergistic behavior, *Energy*, 2022, 239, 121859
- [55] Liu Y., Tan W., Liang S., Bi X., Sun R., Pan X. Comparative study on the co-combustion behavior of torrefied biomass blended with different rank coals, *Biomass Conv. Bioref.*, 2022
- [56] Yu D., Chen M., Wei Y., Niu S., Xue F. An assessment on co-combustion characteristics of Chinese lignite and eucalyptus bark with TG-MS technique, *Powder Technol.*, 2016, 294, pp. 463–471
- [57] Жуйков А.В., Фетисова О.Ю., Глушков Д.О. Термический анализ процесса горения бурого угля, сосновых опилок, картона и их смесей. *Химия твердого топлива*, 2022, 4, 54–61

[Zhuikov A. V., Fetisova O. Yu., Glushkov D. O. Thermal analysis of the combustion process of brown coal, pine sawdust, cardboard and their mixtures. *Chemistry of solid fuels*, 2022, 4, 54–61(in Rus.)]

[58] Cong K., Zhang Y., Han F., Li Q. Influence of particle sizes on combustion characteristics of coal particles in oxygen-deficient atmosphere, *Energy*, 2019, 170, 840–848

[59] Yurdakul S., Gurel B., Varol M., Gurbuz H., Kurtuluş K. Investigation on thermal degradation kinetics and mechanisms of chicken manure, lignite, and their blends by TGA, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2021, 28(45), 63894–63904

[60] Xinjie L., Shihong Z., Xincheng W., Jinai S., Xiong Z., Xianhua W., Haiping Y., Hanping C. Co-combustion of wheat straw and camphor wood with coal slime: Thermal behaviour, kinetics, and gaseous pollutant emission characteristics, *Energy*, 2021, 234, 121292

[61] Li W., Huang Y., Xie J., Lang L., Bu W., Jiang Y., Wang Y., Yin X. Assessment of Flammulina velutipes residue as potential fuels for co-combustion with pine sawdust from characteristics of combustion process, flue gases and ashes, *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, 2021, 158, 105156

[62] Sezer S., Kartal F., Ozveren U. The investigation of co-combustion process for synergistic effects using thermogravimetric and kinetic analysis with combustion index, *Therm. Sci. Eng. Prog.*, 2021, 23, 100889

[63] Liu H., Zhang S., Feng S., Jia C., Guo S., Sun B., Wang Q. Combustion characteristics and typical pollutant emissions of corn stalk blending with municipal sewage sludge, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2021, 28(8), 9792–9805

[64] Chen L., Wen C., Wang W., Liu T., Liu E., Liu H., Li Z. Combustion behaviour of biochars thermally pretreated via torrefaction, slow pyrolysis, or hydrothermal carbonisation and co-fired with pulverised coal, *Renew. Energy*, 2020, 161, 867–877

[65] Miranda M.T., Arranz J.I., Roman S., Rojas S., Montero I., Lopez M., Cruz J. A. Characterization of grape pomace and pyrenean oak pellets, *Fuel Process. Technol.*, 2011, 92(2), 278–283

[66] Ghetti P., Ricca L. Thermal analysis of biomass and corresponding pyrolysis products, *Fuel*, 1996, 75(5), 565–573

[67] Guo Q., Cheng Z., Chen G., Yan B., Hou L., Ronsse F. Optimal strategy for clean and efficient biomass combustion based on ash deposition tendency and kinetic analysis, *J. Clean. Prod.*, 2020, 271, 122529

[68] Zhuikov A.V., Mokhired A.P., Tarasov I.V., Nazirov R.A., Zyryanov M.A. Combustion Characteristics of Larch Sawmill Wastes and Their Partial Gasification Products, *Coke Chem.*, 2022, 65(9), 412–417.

[69] Hillig D.M., Pohlmann J.G., Manera C., Perondi D., Pereira F.M., Altafini C.R., Godinho M. Evaluation of the structural changes of a char produced by slow pyrolysis of biomass and of a high-ash coal during its combustion and their role in the reactivity and flue gas emissions, *Energy*, 2020, 202, 117793

[70] Guo F., He Y., Hassanpour A., Gardy J., Zhong Z. Thermogravimetric analysis on the co-combustion of biomass pellets with lignite and bituminous coal, *Energy*, 2020, 197, 117147

[71] Жуйков А.В., Глушков Д.О. Характеристики совместного горения бурого угля и сухих остатков сточных вод в условиях неизотермического нагрева. *Химия твердого топлива*, 2022, 5, 45–51 [Zhuikov A. V., Glushkov D. O. Characteristics of co-combustion of brown coal and dry wastewater residues under non-isothermal heating conditions. *Chemistry of solid fuels*, 2022, 5, 45–51 (in Rus.)]

[72] Isaac K., Bada S. O. The co-combustion performance and reaction kinetics of refuse derived fuels with South African high ash coal, *Heliyon*, 2020, 6(1), e03309

- [73] Chen C., Huang Y., Yang S., Qin S., Chen F. Effect of oxygen enriched atmospheres on combustion of bagasse, coal and their blends by thermogravimetric analysis. *J. Environ. Chem. Eng.*, 2020, 8, 104398
- [74] Chen C., Qin S., Chen F., Lu Z., Cheng Z. Co-combustion characteristics study of bagasse, coal and their blends by thermogravimetric analysis, *J. Energy Inst.*, 2019, 92, 364–369
- [75] Liu X., Chen M., Wei Y. Assessment on oxygen enriched air co-combustion performance of biomass/bituminous coal, *Renew. Energy*, 2016, 92, 428–436
- [76] Liu Z., Li W., Zhang Y., Wang J., Orndorff W., Pan W-P. Influence of biomass on coal combustion based on thermogravimetry and Fourier transform infrared spectroscopy, *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2015, 122, 1289–1298
- [77] Chen J., Liu J., He Y., Huang L., Sun S., Sun J., Chang K., Kuo J., Huang S., Ning X. Investigation of co-combustion characteristics of sewage sludge and coffee grounds mixtures using thermogravimetric analysis coupled to artificial neural networks modeling, *Bioresour. Technol.*, 2017, 225, 234–245
- [78] Alobaid F., Busch J-P., Stroh A., Strohle J., Epple B. Experimental measurements for torrefied biomass Co-combustion in a 1 MWth pulverized coal-fired furnace, *J. Energy Inst.*, 2020, 93, 833–846
- [79] Andersen K.H., Frandsen F.J., Hansen P.F.B., Wieck-Hansen K., Rasmussen I., Overgaard P., Dam-Johansen K. Deposit formation in a 150 MWe utility PF-Boiler during co-combustion of coal and straw, *Energy and Fuels*. 2000, 14(4), 765–780
- [80] Hughes E.E., Tillman D.A. Biomass cofiring: status and prospects 1996. *Fuel Process. Technol.*, 1998, 54(1–3), 127–142
- [81] Vekemans O., Laviolette J., Chaouki J. Co-combustion of coal and waste in pulverized coal boiler, *Energy*, 2016, 94, 742–754
- [82] Drosatos P., Nikolopoulos N., Karampinis E., Grammelis P., Kakaras E. Comparative investigation of a co-firing scheme in a lignite-fired boiler at very low thermal-load operation using either pre-dried lignite or biomass as supporting fuel, *Fuel Process. Technol.*, 2018, 180, 140–154
- [83] Росляков П.В., Зайченко М.Н., Мельников Д.А., Верещетин В.А., Attikas Raivo. Использование углей для совместного сжигания с эстонскими сланцами. *Теплоэнергетика*, 2016, 3, 34–42 [Roslyakov P.V., Zaychenko M.N., Mel'nikov D.A., Vereshchetin V.A., Attikas Raivo. Use of coals for co-firing with Estonian oil shale. *Thermal power engineering*, 2016, 3, 34–42 (in Rus.)]
- [84] Sankar G., Santhosh Kumar D., Balasubramanian K.R. Computational modeling of pulverized coal fired boilers – A review on the current position, *Fuel*, 2019, 236, 643–665
- [85] Swieboda T., Krzyzyska R., Bryszewska-Mazurek A., Mazurek W., Czaplinski T., Przygoda A. Advanced approach to modeling of pulverized coal boilers for SNCR process optimization – review and recommendations, *Int. J. Thermofluids*, 2020, 7–8, 100051
- [86] Smith J.D., Suo-Antilla A., Sreedharan V. Transient LES based CFD modeling of coal-biomass co-firing combustion, *Fuel Process. Technol.*, 2019, 193, 187–196
- [87] Майданик М.Н., Вербовецкий Э.Х., Тугов А.Н. Предварительная оценка возможности перевода котлов тепловых электрических станций на сжигание альтернативного угля. *Теплоэнергетика*, 2021, 9, 33–42 [Maidanik M.N., Verbovetsky E. Kh., Tugov A.N. Preliminary assessment of the possibility of transferring boilers of thermal power plants to burning alternative coal. *Thermal power engineering*, 2021, 9, 33–42 (in Rus.)]

[88] Magalhaes D., Kazanc F. Influence of biomass thermal pre-treatment on the particulate matter formation during pulverized co-combustion with lignite coal, *Fuel*, 2022, 308, 122027

[89] Dafnomilis I., Lodewijks G., Junginger M., Schott D. L. Evaluation of wood pellet handling in import terminals, *Biomass & Bioenergy*, 2018, 117, 10–23

[90] Матюшенко А.И., Жуйков А.В., Землянский Н.А., Логинов Д.А. Проблемы перевода угольных ТЭЦ на непроектные топлива. *Промышленная энергетика*, 2022, 4, 36–43 [Matyushenko A. I., Zhuikov A. V., Zemlyansky N. A., Loginov D. A. Problems of conversion of coal-fired thermal power plants to non-design fuels. *Industrial Energy*, 2022, 4, 36–43 (in Rus.)]

[91] Karampinis E., Grammelis P., Agraniotis M., Violidakis I., Kakaras E. Co-firing of biomass with coal in thermal power plants: technology schemes, impacts, and future perspectives, *Wiley Interdiscip. Rev. Energy Environ.*, 2014, 3, 384–399

[92] Li K., Zeng Y. Corrosion of heat exchanger materials in co-combustion thermal power plants, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 2022, 161, 112328

[93] Basu P., Butler J., Leon M. A. Biomass co-firing options on the emission reduction and electricity generation costs in coal-fired power plants, *Renew. Energy*, 2011, 36, 282–288

[94] Agbor E., Zhang X., Kumar A. A review of biomass co-firing in North America, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 2014, 40, 930–943

[95] Рябов Г.А. Обзор результатов зарубежных и отечественных исследований в области использования технологии сжигания твердых топлив в циркулирующем кипящем слое. *Теплоэнергетика*, 2021, 2, 41–60 [Ryabov G. A. Review of the results of foreign and domestic research in the field of using the technology of combustion of solid fuels in a circulating fluidized bed. *Thermal power engineering*, 2021, 2, 41–60 (in Rus.)]

[96] Yu Q., Wang Y., Le Q. V., Yang H., Hosseinzadeh-Bandbafha H., Yang Y., Sonne C., Tabatabaei M., Lam S. S., Peng W. An Overview on the Conversion of Forest Biomass into Bioenergy, *Front. Energy Res.*, 2021, 9, 684234

[97] Рябов Г.А. Совместное сжигание биомассы и ископаемых топлив – путь к декарбонизации производства тепла и электроэнергии (Обзор). *Теплоэнергетика*, 2022, 6, 17–32 [Ryabov G. A. Co-firing of biomass and fossil fuels is a way to decarbonise heat and power generation (Review). *Thermal power engineering*, 2022, 6, 17–32 (in Rus.)]

[98] Долгушин И.А., Рябов Г.А., Седлов А.С. Исследование и совершенствование схемы ТЭС с котлом ЦКС в целях повышения эффективности и улучшения экологических показателей. *Энергетик*, 2014, 8, 33–36 [Dolgushin I. A., Ryabov G. A., Sedlov A. S. Research and improvement of the TPP scheme with a CFB boiler in order to increase efficiency and improve environmental performance. *Energetik*, 2014, 8, 33–36 (in Rus.)]

[99] Iglinski B., Buczkowski R., Cichosz M., Piechota G., Kujawski W., Plaskacz M. Renewable energy production in the Zachodniopomorskie Voivodeship (Poland)(Review), *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 2013, 27, 768–777

[100] Piwowar A., Dzikuć M. Outline of the economic and technical problems associated with the co-combustion of biomass in Poland, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 2016, 54, 415–420

[101] Bhuiyan A. A., Blicblau A. S., Sadrul Islam A. K. M., Naser J. A review on thermo-chemical characteristics of coal/biomass co-firing in industrial furnace, *J. Energy Inst.*, 2018, 91, 1–18