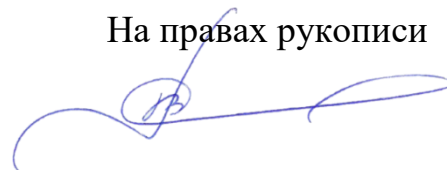


**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Российский химико-технологический университет
имени Д.И. Менделеева»**

На правах рукописи



Солодов Вячеслав Сергеевич

**Процесс получения твердого формованного топлива из отходов
химических производств**

2.6.12. Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева».

Научный руководитель: доктор химических наук, профессор **Черкасова Татьяна Григорьевна**, директор института химических и нефтегазовых технологий.

Официальные оппоненты:

Доктор химических наук, профессор **Патраков Юрий Федорович**, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН» (г. Кемерово), заведующий лабораторией.

Доктор химических наук, профессор **Гюльмалиев Агаджан Мирзоевич**, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева Российской академии наук, главный научный сотрудник.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет».

Защита состоится «15» сентября 2022 г. в 11:00 на заседании Диссертационного совета РХТУ 2.6.02 Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева».

(125047, г. Москва, Миусская пл., 9).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте https://www.muctr.ru/university/departments/ods/inhouse/inhouse_announcements/

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева».

Автореферат разослан:

Ученый секретарь диссертационного совета:

д.х.н., профессор Козловский Роман Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В топливно-энергетическом балансе России, как и в ряде других стран, заметная доля топлива приходится на каменный уголь и продукты из него.

Значительная часть угля идет на производство кокса – ценного энергоносителя и восстановителя металлов. В процессе технологических операций, связанных с получением кокса, образуется коксовая пыль. Применения коксовая пыль практически не находит из-за сложности с погрузкой и транспортировкой. Обычно коксовая пыль возвращается в шихту коксования в количестве 1% к массе шихты (что уменьшает объем полезной загрузки угольной шихты) или может быть переработана «на месте», путем применения разных методов уплотнения и фасовки (но это очень редко, из-за отсутствия проработки технологии, т. е. изначально не предусмотрено проектом завода). Из-за тонкодисперсного состояния и высокой зольности, коксовая пыль не пригодна к прямому использованию в доменном производстве и энергетике.

Объемы образования коксовой пыли достаточно велики и в среднем на одном коксохимическом предприятии могут достигать 18000-20000 т/год.

Проблема утилизации коксовой пыли для коксохимиков является весьма актуальной.

Традиционные методы брикетирования, разработанные для всего спектра каменных углей, малопригодны, а в большинстве не пригодны для коксовой пыли. Коксовая пыль, в силу своего состава, характеризуемого низким содержанием гуминовых кислот, смол и битуминозных веществ, брикетируется только при добавлении дорогостоящих связующих - битумов, каменноугольной смолы и т.п., значительно увеличивающих стоимость получаемых брикетов.

В настоящее время единого научно обоснованного подхода к выбору эффективного связующего и технологического регламента производства брикетов из коксовой пыли в России нет. В связи с этим исследования процесса брикетирования коксовой пыли является актуальной научно-практической задачей.

Работа выполнена в соответствии с планами научно-исследовательских работ Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева и в рамках базовой части и проектной части государственного задания №10.782.2014К, исследования также поддержаны федеральной программой «У.М.Н.И.К.» Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

Степень разработанности темы. Ранее проводились многочисленные исследования по брикетированию угольной пыли и древесных отходов с

органическими (меласса, каменноугольный пек, фусы и т. д.) и неорганическими (жидкое стекло, цемент и т. д.) связующими, нашедшие широкое применение в хозяйственно – бытовых целях для отопления жилых помещений посредством твердотопливных котлов и печей. Такие брикеты обладают низкой механической прочностью, в случае с угольной пылью значительными выбросами в атмосферы при их сжигании и высокой зольностью. В случае с древесными отходами, низкой теплотворной способностью. Все эти факторы ограничивают использование данных брикетов, пригодных лишь для бытового сектора энергетики.

Цель работы – разработка эффективного способа получения твердого формованного топлива из отходов химических производств – коксовой пыли со связующим.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

- разработка эффективного способа обогащения коксовой пыли;
- выбор связующего для получения твердого формованного топлива на основе коксовой пыли;
- выявление закономерностей изменения свойств получаемых топливных брикетов от условий их формования;
- изготовление опытной партии и испытание топливных брикетов на основе коксовой пыли со связующим в производственных условиях предприятия реального сектора экономики;
- оценка количества выбросов оксидов углерода, серы, азота при сжигании топливных брикетов на основе коксовой пыли со связующим.

Научная новизна:

1. Впервые показано, что использование метода масляной агломерации позволяет снизить зольность коксовой пыли в три раза за счет избирательной смачиваемости частиц пыли.
2. Впервые показана возможность утилизации промышленных отходов – коксовой пыли и некондиционного карбамида, за счет их уникальных свойств при взаимодействии друг с другом, с получением топливных брикетов с улучшенными эксплуатационными характеристиками.
3. В результате обработки экспериментальных данных взаимодействия коксовой пыли и карбамида впервые разработана математическая модель, позволяющая прогнозировать прочность получаемых брикетов в зависимости от применяемых технологических параметров процесса брикетирования коксовой пыли со связующим – некондиционным карбамидом.
4. Впервые показано, что при сжигании топливных брикетов, полученных из

коксовой пыли и некондиционного карбамида как связующего, происходит значительное (до 50%) снижение выбросов в атмосферу твердых веществ, NO_2 , SO_2 , наблюдаемое за счет реализации технологии селективного некаталитического восстановления.

Теоретическая значимость.

Теоретическая значимость работы состоит в том, что разработан способ обогащения коксовой пыли методом масляной агломерации, позволяющей существенно (в три раза) снизить зольность за счет избирательной смачиваемости частиц пыли.

Предложена математическая модель, устанавливающая влияние технологических параметров процесса брикетирования коксовой пыли со связующим – некондиционным карбамидом на прочность получаемых брикетов.

Представлено обоснование влияния карбамида в составе топливных брикетов при их сжигании на существенное (до 50%) снижение эмиссии твердых веществ, NO_x и SO_2 по сравнению с эмиссией этих веществ, образующихся в результате сжигания энергетического угля или кокса.

Практическая значимость.

Полученный в ходе проведения исследований опыт обогащения коксовой пыли методом масляной агломерации (Патент РФ №2468071) может быть использован на предприятиях реального сектора экономики для получения концентрата с низкой зольностью.

Проведенные промышленные испытания показали, что предложенные подходы к производству брикетов могут служить основой для их практического использования на коксохимических производствах и топливно-энергетических комплексах, что будет способствовать решению проблемы утилизации коксовой пыли.

Методы исследования. Исследования выполнены с помощью комплекса физико-химических методов: потенциометрия; метод масляной агломерации; гравиметрический метод; а также технический анализ кокса, пластометрия, методы исследований качественных характеристик брикетов и гранул. Определение технологических параметров ведения процесса проводили на разработанной экспериментальной установке по переработке отходов коксохимического производства в новые товарные продукты. Обработка экспериментальных данных осуществлялась с помощью методов математической статистики.

Реализация результатов исследования

1. Основные научные положения и выводы используются в учебном процессе при чтении дисциплин «Экология», «Экологическая безопасность» «Процессы и аппараты

защиты окружающей среды» для студентов и магистрантов, обучающихся по специальности «Техносферная безопасность» и «Химическая технология твердого топлива».

2. Опытно-промышленная партия топливных брикетов, полученных из коксовой пыли со связующим, испытана при плавке чугуна в ваграночном производстве ПАО «Кокс».

Положения, выносимые на защиту:

- применение процесса обогащения коксовой пыли методом масляной агломерации позволяет уменьшить содержание золы (A^d) в концентрате с 16,6 % масс. до 5 % масс.;
- использование некондиционного карбамида по сравнению с другими промышленными отходами (вторполимеры, парафины, битум) позволяет получать из коксовой пыли топливные брикеты высокого качества;
- математическая модель, учитывающая зависимость прочности получаемых брикетов от технологических параметров процесса брикетирования коксовой пыли со связующим – некондиционным карбамидом, адекватно отражает реальные условия получения топливных брикетов;
- замещение литейного кокса топливными брикетами, полученными из коксовой пыли со связующим, не приводит к отклонению от стандартного режима плавки и позволяет при этом снизить затраты на сырье на 6,4 %;
- сжигание топливных брикетов, полученных из коксовой пыли и некондиционного карбамида как связующего, приводит к значительному (до 50%) снижению выбросов в атмосферу твердых веществ, NO_2 , SO_2 .

Личный вклад автора состоит в поиске и анализе литературных данных по теме диссертации, участии в постановке цели и задач исследования, в разработке экспериментальных установок и проведении на них экспериментов, в обработке экспериментальных данных, в обобщении результатов и разработке аппаратурно-технологической схемы, формулировании положений и выводов данной работы.

Результаты исследований являются оригинальными и получены лично автором или при его непосредственном участии.

Достоверность полученных результатов, представленных в диссертационной работе, подтверждается использованием широкого комплекса современных физико-химических методов исследований с применением аттестованных приборов и апробированных методик измерения, обсуждением основных положений работы на научных конференциях и их публикации в рецензируемых научных журналах, правильности проведения эксперимента и хорошей сходимости опытных и расчетных данных, на отсутствии противоречий полученных результатов существующим

представлениям и теориям протекающих процессов.

Апробация работы. Основные результаты работы и отдельные ее положения были представлены на следующих международных и российских конференциях: VI, VII Всероссийских конференциях студентов и молодых ученых «Энергия молодых – экономике России». – Томск, 2005, 2006; X Международном симпозиуме студентов и молодых ученых имени академика М. А. Усова. – Томск, 2006.; 52 научно – практической конференции КузГТУ – Кемерово, 2007.; XV международной научно-практической конференции Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности. Кемерово, 2013; Международном экологическом форуме «Природные ресурсы Сибири и Дальнего Востока – взгляд в будущее». – Кемерово, 2013 г.; Всероссийской с международным участием научной конференции «Полифункциональные химические материалы и технологии». – Томск, 2013.; XI Международной научно-практической конференции «Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности». – Кемерово, 2013.; II Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы производства кокса и переработки продуктов коксования». – Кемерово, 2014; X всероссийской научно-практической конференции молодых ученых с международным участием «Россия молодая» – Кемерово, 2018; IV Всероссийской конференции «Химия и химическая технология: достижения и перспективы» – Кемерово, 2018; XXI Менделеевском съезде по общей и прикладной химии – Санкт-Петербург 2019; II Международном научно-техническом и инвестиционном форуме по химическим технологиям и нефтегазопереработке – Минск, Республика Беларусь 2019; The First Interregional Conference “Sustainable Development of Eurasian Mining Regions (SDEMR-2019)” – Kemerovo 2019; IVth International Innovative Mining Symposium – Kemerovo 2019.

Публикации. Результаты исследований отражены в 28 публикациях: в 11 статьях в научных журналах, входящих в перечень Web of Science, Scopus и ВАК, 16 докладах и тезисах докладов научно-практических конференций, получены 5 патентов РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, литературного обзора, 5 глав, выводов, списка литературы, содержащего 167 наименований отечественных и зарубежных авторов и приложения. Объем диссертации составляет 138 стр., включая 20 рисунков и 23 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, показана

научная новизна полученных результатов и их практическая значимость, дана общая характеристика структуры работы.

В первой главе приведен анализ литературных источников по состоянию вопроса брикетирования углей и дисперсных материалов в мировой и отечественной промышленности и обоснованы задачи исследований. Подробно изложено значение процессов подготовки угольного топлива к окускованию. Показано, что коксовая пыль может использоваться в качестве сырья для получения качественного брикетированного топлива для энергетики и коксования.

Рассмотрены и проанализированы основные способы применения связующих материалов для брикетирования веществ. Показаны пути повышения технических характеристик брикетов, путем использования органических и неорганических связующих. На основании результатов анализа существующих технологий установлена возможность использования коксовой пыли для производства топливных брикетов и гранул с добавлением связующих веществ.

Во второй главе представлены характеристики использованных в исследовании материалов, описание экспериментальных установок для обогащения и брикетирования коксовой пыли, описаны методы экспериментальных исследований и обработки полученных результатов.

Обогащение коксовой пыли методом масляной агломерации. Для получения обогащенных коксовых концентратов коксовая пыль была обогащена на экспериментальной установке, основанной на методе масляной агломерации.

Брикетирование коксовой пыли со связующим. Полученный после обогащения концентрат коксовой пыли подвергался сушке горячим воздухом с температурой 200 °С в смесительном устройстве. После сушки концентрат передавался в приемный бункер, куда также дозирувалось разогретое связующее. В качестве связующего использовались: карбамид, вторичные полимеры, битум, парафин. Карбамид, вторичные полимеры, битум и парафин перед введением в концентрат разогревались: до 130 °С – карбамид, битум и парафин, более 200 °С - вторичные полимеры. Связующие добавлялись в количестве 2-15% от массы концентрата. Из бункера смесь коксовой пыли и разогретого связующего подавалась в смесительную машину-экструдерного типа, где происходила гомогенизация шихты. Готовая шихта подавалась на прессование в специальную пресс-форму. Давление прессования составляло 10-15 атм. Брикетирование осуществлялось как чистого концентрата, так и концентрата с добавлением связующего.

В третьей главе проведена оценка качества сырья для получения топливных брикетов, а также рассмотрен альтернативный способ утилизации коксовой пыли.

В таблице 1 приведена характеристика исходной коксовой пыли.

Таблица 1 – Технический анализ исходной коксовой пыли марки ПК-2

Коксовая пыль	W_a , % мас.	A^d , % мас.	V^{daf} , % мас.	S^d , % мас.	Q_v , ккал/кг
	4,8	16,62	0,85	0,4	7000

Из анализа методов утилизации и переработки, очевидно, что уплотнение является основной стадией технологии переработки коксовой пыли.

При обогащения коксовой пыли методом масляной агломерации выбран отход коксохимического производства – отработанное машинное масло с эксгаустанов. Характеристики отработанного машинного масла с эксгаустанов машинного зала коксохимических производств: кинематическая вязкость при 50° С – 20-35 мм²/с; массовая доля механических примесей – 0,008%; массовая доля воды – 0%; массовая доля фракций, выкипающих до 340°С – 0%; температура застывания фракций, выкипающих выше 340°С – -10 ÷ -15 °С; плотность при 20°С – 889-895 кг/м³.

Для оценки качества кокса с участием коксомасляного концентрата в шихте коксования для его получения составлено несколько вариантов шихт и проведены лабораторные коксования. В качестве исходной шихты использовалась технологическая шихта коксовой батареи № 3 ПАО «Кокс» (г. Кемерово). Кокс, полученный из шихты К.Б. № 3 на печи Николаева, по сравнению с производственным коксом характеризуется худшим качеством. Таким образом, добавление к шихте 5%



Рисунок 1 – Принципиальная аппаратурно-технологическая схема брикетирования коксовой пыли со

коксомасляного концентрата приводит к ухудшению качества кокса по причине отощения шихты.

В главе 4 представлена разработка технологического процесса брикетирования коксовой пыли со связующим, принципиальная технологическая схема

которого представлена на рисунке 1. Технологический процесс брикетирования коксовой пыли со связующим включает в себя следующие последовательно протекающие технологические стадии: подготовки коксовой пыли (обогащение методом масляной агломерации), смешения коксомасляного концентрата со связующим веществом (образование шихты), брикетирование шихты (получение брикета).

Разработка технологии обогащения коксовой пыли методом масляной агломерации.

С целью определения наиболее эффективного реагента были проведены предварительные эксперименты обогащения коксовой пыли отработанным эксгаустерным маслом, топочным мазутом, газойлем. Экспериментальные данные представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Обогащение коксовой пыли различными реагентами

Название реагента	A^d , %	W^a , %	V^{daf} , %	Q_s^r , ккал/кг
Отработанное эксгаустерное масло	5,5-6,0	8,5-10,5	1,25-2,0	7250-7300
Топочный мазут	6,0-7,5	10,7-14,5	1,5-2,4	7000-7100
Газойль	7,5-8,5	12,2-16,0	1,6-2,8	6900-7050

Из данных таблицы видно, что наиболее приемлемым реагентом из использованных (по показаниям содержания зольности и теплоты сгорания) является отработанное машинное масло с эксгаустеров коксохимических производств. Повышение теплоты сгорания объясняется тем, что реагент, присутствующий в угольном концентрате, способствует повышению его значений. Данные экспериментов обогащения коксовой пыли разных марок методом масляной агломерации приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Данные экспериментов обогащения коксовой пыли разных марок методом масляной агломерации

Наименование показателей	Марки коксовой пыли		
	ПК-1	ПК-2	ПК-3
Зольность (A^d , % масс., не более)	4,8-5,0	5,5-6,0	6,1-8,5
Массовая доля общей влаги в рабочем состоянии топлива (W^a , % масс.)	9,0-10,0	8,5-10,5	9,5-12
Выход летучих (V^{daf} , %)	1,25-1,25	1,18-1,20	1,25-2,8
Теплота сгорания (Q_s^r , ккал/кг)	7255-7440	7250-7300	7050-7150

Полученные концентраты имеют зольность менее 10 мас. %, что говорит о допустимости использования их в технологии коксования и энергетике. Важно установить зависимость распределения зольности от среднего размера частиц исходной коксовой пыли в концентрате и перераспределения общей серы через зольность в исходной коксовой пыли и концентратах, т. к. она является нежелательной примесью при сжигании или коксовании. При обогащении коксовой пыли крупностью (0-1,0 мм) при расходе связующего реагента (отработанного машинного масла) 10% от массы исходной коксовой пыли в процессе масляной агломерации были получены низкозольные коксомасляные концентраты с выходом 82-84 масс.%. Зависимости зольности и сернистости концентрата от среднего размера частиц по фракциям представлены в таблице 4. Результаты анализа показали, что промежуточные фракции в концентрате коксовой пыли обладают наименьшей зольностью и сернистостью.

Данная закономерность распределения минеральной части коксовой пыли по фракциям обусловлена тем, что при применении процесса масляной агломерации происходит более полное разделение между органической и минеральной составляющими коксовой пыли. Так как размер минеральных частиц очень мал, происходит отделение породных частиц от крупных и средних фракций, переходящих в тонкие.

Разработка технологии брикетирования коксовой пыли.

После проведения обогащения коксовой пыли методом масляной агломерации, были проведены исследования на возможность получения прочных брикетов с добавлением связующего компонента и без него. Долевое участие связующего компонента составило 8 % масс. Прессование было использовано одноступенчатое с усилием 15 т/см². Результаты полученных испытаний представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Технические характеристики брикетов со связующим веществом

Наименование брикета	Физические испытания			Топливные характеристики		
	сжатие, кг/см ²	истирание, % содержание кусков размером >25 мм	сбрасывание % содержание кусков размером >25 мм	A ^d , % масс.	Q _в , ккал/кг	S ^d , % мас.
Брикет без связующего	10-14	74	84	5,5	7250	0,05
Коксовая пыль+карбамид	18-20	90	96	5,4	7600	0,05
Коксовая пыль+вторполимеры	50-60	99	99	6,4	7900	1,0-1,5
Коксовая пыль+битум	13-15	85	90	6,2	7400	0,3
Коксовая пыль+парафин	14-16	88	94	5,8	7100	0,8

Из полученных данных видно, что брикеты из концентрата без связующего по большинству характеристик имеют хорошие показатели, однако испытание на истирание показало их неустойчивость, что ограничивает транспортировку на дальние расстояния. Брикеты, изготовленные с помощью вторичных полимеров, имели наибольшую прочность, однако наличие во вторичных полимерах серы, значительно увеличило этот показатель в брикетах, что при их использовании может наносить вред экологии. Лучшими техническими характеристиками обладают брикеты с использованием карбамида в качестве связующего.

На рисунке 2 представлены зависимости прочностных характеристик от вида и концентрации связующего. Исходя из анализа зависимости истираемости брикетов от концентрации связующего, можно сделать вывод, что наиболее низкие показатели истираемости у брикетов, полученных с добавлением связующего в виде вторичных полимеров. Хорошие показатели истираемости проявили брикеты с добавлением карбамида в виде связующего.

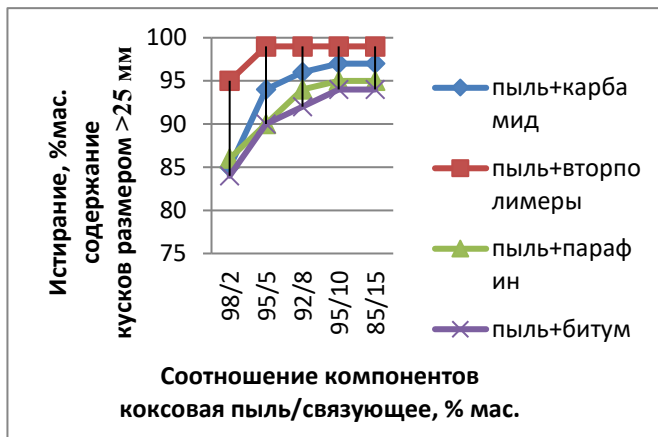


Рисунок 2 – Зависимость истираемости брикетов от концентрации связующего

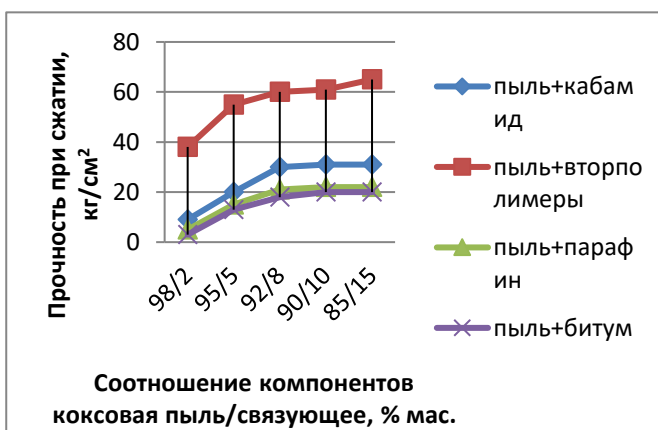


Рисунок 3 – Зависимость прочности брикета со связующим (карбамидом) при сжатии

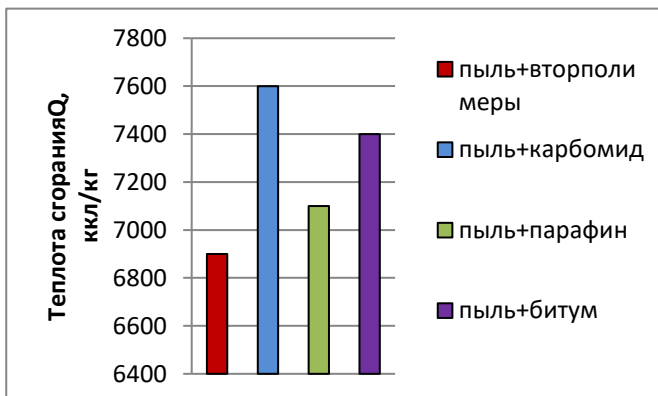


Рисунок 4 – Зависимость теплоты сгорания от вида связующего вещества

На рисунке 3 представлена зависимость прочности брикета со связующим при сжатии. Наибольший рост показателя прочности происходит при концентрации связующего от 2% до 8%, далее показатель остается неизменным. В случае применения в виде связующего вторполимеров и после 8% концентрации связующего прочность продолжает заметно увеличиваться.

В результате анализа зависимостей показателей истираемости и прочности брикетов от концентрации связующего можно сделать вывод, что оптимальные значения имеет брикет с добавлением связующего в виде карбамида.

Важнейшим параметром при производстве топливных брикетов является показатель теплоты сгорания брикета. На рисунке 4 представлена зависимость теплоты сгорания топливных брикетов от вида связующего вещества. Наибольшей калорийностью характеризуются топливные брикеты, полученные с использованием связующего в виде вторполимеров и карбамида.

Процесс утилизации

тонкодисперстных углеродсодержащих отходов направлен не только на получение нового товарного вида топлива и экономию природных ресурсов, но и на улучшение экологической обстановки путем рационального использования вторичных материальных ресурсов. Необходимо детально изучить те компоненты, которые выделяются из топливного брикета в процессе термической деструкции при сжигании. В таблице 6 представлены данные технического анализа полученных брикетов.

Таблица 6 – Результаты технического анализа топливных брикетов

Виды брикетов	A ^d , % мас.	S ^d , % мас.	V ^{daf} , % мас.	W ^a , % мас.	Q _в , ккал/кг
брикет+карбамид	5,4	0,05	1,25	2,8	7600
брикет+вторполимеры	6,4	0,8 – 1,0	1,48	2,5	6900
брикет+битум	6,2	0,1	1,65	2,2	7400
брикет+парафин	5,8	0,5	1,30	2,3	7100
Нормы технического регламента	Не более 15	Не более 0,5	-	-	Более 3000

В рамках данной работы выявлена зависимость прочности на сжатие от концентрации связующего компонента в виде некондиционного карбамида для топливных брикетов из коксовой пыли, полученных на установке со смесительным узлом экструдерного типа с подогревом. Лабораторные испытания проводились на опытной установке со смесительным узлом экструдерного типа с подогревом. Смесь коксовой пыли с карбамидом подавалась с температурой 120 – 150 °С через

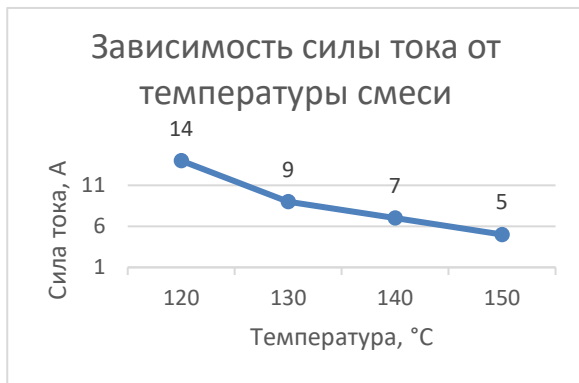


Рисунок 5 – Зависимость силы тока двигателя от температуры смеси коксовой пыли с карбамидом

температуре 150 °С достигает минимального значения. Учитывая, температуру плавления карбамида (133 °С), можно предположить, что при нагреве выше этой температуры карбамид переходит в жидкое состояние и начинает работать как смазка, уменьшая силу трения и, соответственно, силу тока на двигателе.

Для выдачи рекомендаций по ведению технологического процесса, необходимо также оценить прочность топливных брикетов, полученных при разных температурах. Был проведен второй этап эксперимента, где оценивалась прочность брикетов и температура смеси коксовой пыли с карбамидом. Зависимость прочности брикетов от температуры смеси показана на рисунке 6.

питательный бункер. В ходе испытания было отмечено, что при колебаниях температуры подаваемой смеси изменяется нагрузка на двигатель. В связи с этим принято решение произвести замеры силы электрического тока, подаваемого на двигатель при разной температуре подаваемой смеси. Результаты замеров представлены на рисунке 5.

Установлено, что с увеличением температуры смеси сила тока двигателя снижается и при

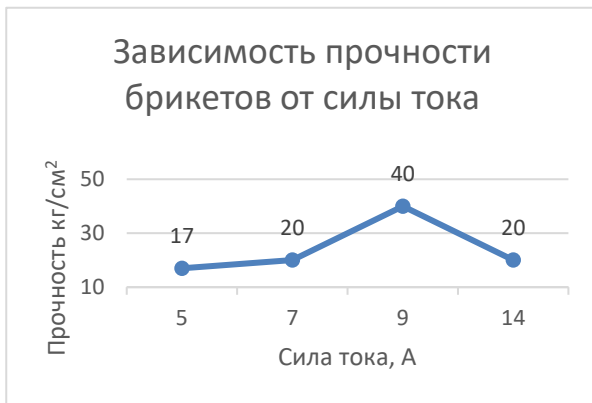


Рисунок 6 – Зависимость прочности брикетов от температуры смеси коксовой пыли с карбамидом.

карбамида, в связи с чем происходит худшее перемешивание.

Таким образом, для получения прочных топливных брикетов из коксовой пыли с добавлением связующего в виде некондиционного карбамида, процесс смешения необходимо вести при температуре 130°C.

Для исследования влияния технологических факторов получения топливного брикета из коксовой пыли (давление прессования (P), концентрация карбамида (C), используемого в качестве связующего, и температура смешивания коксовой пыли и связующего (T)) на прочность получаемого брикета были проведены эксперименты по плану полного факторного эксперимента.

Математическая модель имеет вид:

$$\tilde{Y} = \begin{cases} \tilde{Y}_1(P, C, T) & \text{if } T < 140^{\circ}\text{C} \\ \tilde{Y}_2(P, C, T) & \text{if } T \geq 140^{\circ}\text{C} \end{cases}$$

где

$$\tilde{Y}_1 = -52,8 - 2,59 \cdot P - 1,85 \cdot C + 0,43 \cdot T + 0,13 \cdot P \cdot C + 0,024 \cdot P \cdot T + 0,017 \cdot C \cdot T - 0,0005 \cdot P \cdot C \cdot T$$

$$\tilde{Y}_2 = 56,9 + 5,2 \cdot P + 3,9 \cdot C - 0,35 \cdot T + 0,51 \cdot P \cdot C - 0,03 \cdot P \cdot T - 0,02 \cdot C \cdot T - 0,003 \cdot P \cdot C \cdot T.$$

Полученное уравнение регрессии удовлетворительно описывает зависимость прочности брикета от давления прессования, концентрации карбамида, используемого в качестве связующего, и температуры смешивания коксовой пыли и связующего в ходе изготовления брикетов. Показано, что в области низких температур самое сильное влияние на прочность брикета оказывают концентрация карбамида и давление прессования, которые применяются при получении брикета, а в области высоких температур самое сильное влияние оказывает температура, при которой происходит смешивание коксовой пыли и связующего (карбамида).

Максимальная прочность брикетов достигается при 130 °С. Снижение температуры смеси при брикетировании приводит к ее загустеванию и неравномерному распределению связующего по брикету, что, в свою очередь, приводит к снижению прочности брикета. Увеличение температуры смеси до 150 °С также приводит к снижению прочности брикета, что обуславливается высокой текучестью

На фабрике брикетирования компании ООО «Кузбрикетуголь», используя полученные в ходе исследования рекомендации, было произведено 10 т коксовых брикетов, которые были испытаны при плавке чугуна в вагранке РМЦ ПАО «Кокс».

Показано, что введение до 20 % брикетов в вагранку взамен кокса не приводит к отклонению от стандартного режима плавки, а затраты на сырье при этом снижаются на 6,4 %.

В пятой главе показана возможность получения из коксовой пыли и некондиционного карбамида как связующего агента топливных брикетов, при сжигании которых эмиссия твердых веществ, NO_x , SO_2 снижается до 50%.

Одной из причин выбора некондиционного карбамида в виде связующего для брикетов стала возможность восстановления NO_x в процессе горения. Для проверки предположения о возможности восстановления NO_x в процессе горения брикетов на первом этапе проведен расчет выбросов загрязняющих веществ при сжигании угля марки СС, кокса и кокса совместно с карбамидом. Результаты расчетов состава выбросов представлены в таблице 7. По результатам проведенных расчетов видно, что добавление некондиционного карбамида позволяет снизить содержание оксидов азота в дымовых газах на 40%.

Таблица 7 – Расчетный состав выбросов при сжигании твердых топлив

Выбросы, т/год	Уголь СС $Q_H=25,2$ МДж/кг $A=18,6$ % $S=0,6$ %	Кокс $Q_H=28,5$ МДж/кг $A=11,5$ % $S=0,4$ %	Кокс+ карбамид
Расход топлива	500	500	500
Твердые вещества	24,18	14,95	14,95
Оксид углерода (II)	11,91	13,47	13,47
Оксиды азота в пересчете на NO_2	2,27	2,56	1,54
Диоксид серы	5,4	3,6	3,6

На втором этапе исследований проведен эксперимент по сжиганию этих же твердых топлив в трубчатой печи с замером образующихся при этом выбросов. Готовились три пробы: энергетический уголь марки СС, металлургический кокс и топливные брикеты из коксовой пыли с 8% мас. связующего агента некондиционного карбамида. Пробы в количестве 10 г. были поочередно помещены в трубчатую печь. В печи симитирован процесс сжигания топлива в промышленных котлах, с постоянной температурой 1000 °С и коэффициентом избытка воздуха 1,7. Замеры содержания вредных компонентов дымового газа проводились универсальным многокомпонентным газоанализатором «ПРОТОН». Результаты замеров компонентного состава дымового газа приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Экспериментальный состав выбросов при сжигании твердых топлив

Выбросы	Количество выбросов, кг/год на 1 тонну топлива		
	Энергетический уголь марки СС	Кокс металлургический	Брикеты топливные
Твердые вещества	50,9	31,14	28,64
Монооксид углерода	26,48	29,60	28,60
Оксиды азота в пересчете на NO ₂	8,82	9,94	4,26
Диоксид серы	7,56	5,04	4,38

Таким образом, при сжигании пробы топливных брикетов снижение количества вредных компонентов дымового газа, по сравнению с пробами энергетического угля марки СС и кокса металлургического, а также происходит снижение содержания NO_x в дымовом газе в результате селективного некаталитического восстановления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рассматриваемой работе предложена технология обогащения методом масляной агломерации, позволяющая эффективно производить разделение минеральной и органической части сырья. А также показана возможность брикетирования коксовой пыли с применением связующего вещества – некондиционный карбамид, выбранного из числа отходов действующих химических производств. Данный вид связующего прочно связывает частицы коксовой пыли в брикете и не увеличивает при этом зольность брикетов. Полученные брикеты имеют высокие показатели прочностных характеристик, при сжигании таких брикетов значительно снижаются выбросы оксидов азота и оксидов серы. Разработанная в настоящей работе технология позволяет утилизировать промышленные отходы с получением востребованного товарного продукта в виде качественного, экологически привлекательного топлива с низкой себестоимостью.

Проведенные исследования подтверждают возможность эффективной утилизации промышленных отходов с получением востребованного товарного продукта в виде качественного и экологически привлекательного топлива с низкой себестоимостью. Результаты диссертационного исследования рекомендуются для использования предприятиями.

Дальнейшее изучение процесса получения твердого формованного топлива из отходов химических производств может быть связано с исследованием возможности увеличения прочности получаемых брикетов, в том числе за счет использования углей спекающихся марок, с целью использования таких брикетов в металлургических и энергетических технологиях. Представляет также в дальнейшем практический и

научный интерес рассмотрение создания композитного топлива на основе коксовых брикетов посредством введения других компонентов и связующих.

ВЫВОДЫ

1. Разработан способ обогащения коксовой пыли методом масляной агломерации, позволяющий уменьшить содержание золы (A^d) в концентрате с 16,6 % масс. до 5 % масс.
2. Из ряда промышленных отходов: вторполимеры, парафины, битум, некондиционный карбамид, последний оказался наилучшим для использования в качестве связующего при получении из коксовой пыли брикетов с учетом комплекса показателей для брикетов таких как прочность на истирание, прочность при сжатии, прочность на сбрасывание, зольность, содержание серы, теплота сгорания, выход летучих веществ, влажность.
3. Разработана математическая модель влияния технологических параметров процесса брикетирования коксовой пыли со связующим – некондиционным карбамидом, на прочность получаемых брикетов. Данная модель адекватно отражает реальные условия получения топливных брикетов, характеризуется удовлетворительными значениями коэффициента детерминации и может быть использована для прогнозирования механических характеристик топливных брикетов, получаемых из коксовой пыли в смеси с карбамидом.
4. Опытные-промышленные испытания, проведенные при плавке чугуна в ваграночном производстве ПАО «Кокс», с использованием партии коксовых брикетов, полученных из коксовой пыли со связующим в соответствии с разработанной технологией, показали возможность замещения до 20% литейного кокса без отклонения от стандартного режима плавки, позволяя при этом снизить затраты на сырье на 6,4 %.
5. Использование коксовых брикетов, полученных из коксовой пыли со связующим, в топливно-энергетических комплексах в качестве топлива взамен энергетического угля позволит при практически неизменном количестве выбросов CO, значительно (до 50%) сократить выбросы в атмосферу твердых веществ, NO₂, SO₂.

Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

в переводной версии журнала, входящей в Web of Science:

1. **V. S. Solodov**, T. G. Cherkasova, S. P. Subbotin, E. V. Vasileva, A. V. Nevedrov, A. V. Papin Research of strength characteristics of briquettes from coke dust pjsc «koks» // Coke and Chemistry. 2019. №9 – P. 39–41.

в переводной версии журнала, входящей в Web of Science:

2. **V. S. Solodov**, T. G. Cherkasova, S. P. Subbotin, E. V. Vasileva, S. E. Wagner, A. V. Nevedrov, A. V. Papin Analysis of possibility of application of briquettes from coke breeze in cupola production of pjsc «koks» // Coke and Chemistry. 2019. №10 – P. 18–20.

в переводной версии журнала, входящей в Web of Science:

3. A. V. Shelenkov, N. S. Manin, **V. S. Solodov**, S. E. Vagner, A. A. Mikhaylova Experience of using of a coal of s. d. tikhov mine in the source of raw materials of pjsc «koks» // Coke and Chemistry. – 2019. № 2. P. 9-15.

в переводной версии журнала, входящей в Web of Science:

4. I. S. Vetoshkina, **V. S. Solodov**, S. P. Subbotin, E. V. Vasileva, T. G. Cherkasova, A. V. Nevedrov Obtaining high-tech products from coal tar // Coke and Chemistry. 2019. № 2. P. 51-54.

в переводной версии журнала, входящей в Web of Science:

5. I. S. Vetoshkina, **V. S. Solodov**, T. G. Cherkasova, S. P. Subbotin, E. V. Vasileva, A. V. Nevedrov Thermal dissolution of the coals of the raw material base of pjsc «koks» in the environment of anthracene faction of coal tar // Coke and Chemistry. 2019. № 6. P. 28-31.

в переводной версии журнала, входящей в Web of Science:

6. A.P. Kozlov, S.P. Subbotin, **V.S. Solodov**, T.G. Cherkasova, A.G. Pimonov, Dependence of the softening temperature of coal pitch on the conditions of coal-tar distillation // Coke and Chemistry. 2021. № 2. P. 73-79

Патенты:

7. Папин А. В., **Солодов В. С.**, Косинцев В. И., Сечин А. И., Черкасова Т. Г., Игнатова А. Ю., Неведров А. В., Макаревич Е. А. Способ брикетирования коксовой пыли // Патент на изобретение RU 2468071 10.10.2013.

8. Папин А. В., **Солодов В. С.**, Косинцев В. И., Сечин А. И., Игнатова А. Ю., Неведров А. В., Жбырь Е. В., Макаревич Е. А. Способ обогащения угольного шлама и угля // Патент на изобретение RU 2468071 26.10.2011.

9. Папин А. В., Игнатова А. Ю., **Солодов В. С.**, Черкасова Т. Г., Неведров А. В. Топливный брикет // Патент на изобретение RU 2560186 20.08.2015.

10. Папин А. В., Игнатова А. Ю., Неведров А. В., Черкасова Т. Г., **Солодов В. С.**, Злобина Е. С. Углекоксовый топливный брикет // Патент на изобретение RU 2592846 27.07.2016

11. Папин А. В., Игнатова А. Ю., **Солодов В. С.**, Косинцев В. И., Маланова Н. В., Сечин А. И., Яворовский Н. А., Журавков С. П., Бошенятов Б. В., Ковалев О. В. Способ получения микродисперсных систем // Патент на изобретение RU 2597318 10.09.2016

Публикации в других научных изданиях:

12. **Солодов В.С.**, Ветошкина И.С., Черкасова Т.Г., Субботин С.П., Васильева Е.В., Неведров А.В. Изучение возможности получения сырья для производства углеродных материалов методом термического растворения углей «Нефтехимия – 2019»: сборник тезисов II Международного научно-технического и инвестиционного форума по химическим технологиям и нефтегазопереработке – Минск, Республика Беларусь 2019.

13. Субботин С. П., Ветошкина И. С., Колмаков Н. Г., **Солодов В. С.**, Черкасова Т. Г., Неведров А. В., Папин А. В., Васильева Е. В. Разработка метода получения высокотехнологичных продуктов из каменноугольной смолы // сборнике тезисов XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии – Санкт-Петербург 2019 (Scopus).

14. **Солодов В.С.**, Корниенко И.Л. Математическая модель влияния температуры смешения коксовой пыли с карбамидом на прочность топливных брикетов. «Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте (иитма-2020)»: сборник материалов IV Международной научно-практической конференции с онлайн-участием. Кемерово, 2020. С. 223-226.

15. **Солодов В.С.**, Корниенко И.Л. Корреляционный анализ зависимости прочности топливного брикета от температуры смеси коксовой пыли с карбамидом. «Информационно-телекоммуникационные системы и технологии»: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. Кемерово, 2020. С. 262-263.

16. Черкасова Т.Г., Субботин С.П., Черкасова Е.В., Неведров А.В., Тихомирова А.В., Козлов А.П., Папин А.В., **Солодов В.С.** Комплексная переработка угля и отходов углепереработки с выделением компонентов с высокой добавленной стоимостью. «Эколого-экономические и технологические аспекты устойчивого развития Республики Беларусь и Российской Федерации»: сборник статей III Международной научно-технической конференции: в 3 т.. Минск, 2021. С. 165-170