



Китаев Сергей Васильевич

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ
ПОЛУЧЕНИЯ УГОЛЬНЫХ БРИКЕТОВ ВЫСОКОЙ
ПЛОТНОСТИ ТЕРМОХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ
ИЗ ДРЕВЕСНОЙ КОРЫ ОСИНЫ И СОСНЫ**

**05.21.03 – Технология и оборудование химической переработки биомассы
дерева; химия древесины**

05.02.02 – Машиноведение, системы приводов и детали машин

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет».

Научные руководители:	доктор технических наук, профессор, Сафин Рушан Гареевич доктор технических наук, доцент, Тунцев Денис Владимирович
Официальные оппоненты:	Юрьев Юрий Леонидович , доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный лесотехнический университет», заведующий кафедрой химической технологии древесины, биотехнологии и наноматериалов; Ермолаев Денис Васильевич , кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Казанского научного центра Российской академии наук, лаборатория энергетических систем и технологий, старший научный сотрудник
Ведущая организация:	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

Защита диссертации состоится в 13 часов 30 минут «16» апреля 2021 года на заседании диссертационного совета Д 212.080.14 на базе ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» по адресу: 420015, г. Казань, К. Маркса, д. 68, зал заседаний Ученого совета А-330.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписями, заверенными печатью, просим направлять по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68, зал заседания Ученого совета А-330, Ученый совет.

В отзыве указываются фамилия, имя, отчество, почтовый адрес, телефон и адрес электронной почты (при наличии), наименование организации и должность лица с указанием структурного подразделения, представившего отзыв (п.28 положения о присуждении ученых степеней), специальность по защите диссертации.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» и на сайте <http://www.kstu.ru/servlet/contentblob?id=352105>

Автореферат разослан «__» _____ 2021г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Зульфия Гаптеллахатовна
Саттарова

Общая характеристика работы

Актуальность работы. В Российской Федерации последние годы все активнее обсуждаются вопросы обеспечения устойчивости развития на основе бережливого расходования имеющихся ресурсов, рационального природопользования, экологической безопасности производства. Наиболее активно исследуются вопросы обеспечения рационального расходования природных ресурсов, энергосбережения и поиска новых источников энергии, экологической безопасности производства. Растительная биомасса представляет собой перспективный, экологически безопасный и альтернативный источник возобновляемой энергии. Основная задача, стоящая перед лесопромышленным комплексом – полное и рациональное использование отходов лесозаготовок и деревообработки.

Комплексное использование лесных ресурсов предусматривает утилизацию всей биомассы дерева, включая древесные отходы, которые могут служить сырьем для производства множества ценных веществ. К таким отходам относится древесная кора. Доля древесной коры составляет 11 – 19% от всего объема дерева и зависит от возраста и условий произрастания. Ежегодно объемы накопления древесной коры в Российской Федерации составляет 20 – 25 млн. т. Можно выделить следующие направления использования древесной коры: переработка на удобрения; использование в качестве топлива; использование в плитном производстве; получение экстрактивных веществ. Однако представленные методы не всегда экономически эффективны и не позволяют подвергнуть переработке весь объем образуемой древесной коры. На сегодняшний день проблема утилизации древесной коры остается нерешенной.

Одним из перспективных способов переработки растительной биомассы среди процессов термохимической конверсии является кондуктивный пиролиз. Данный метод термического разложения имеет низкие инвестиционные затраты и высокую энергетическую эффективность по сравнению с другими процессами переработки, особенно при производстве в малых масштабах. В процессе кондуктивного пиролиза растительного сырья доминирующим продуктом является угольный остаток, обладающий высокими прочностными свойствами и не требует связующего. Угольные брикеты, полученные по технологии кондуктивного пиролиза, могут стать экологически чистой заменой каменным углям.

На сегодняшний день вопросы, связанные с кондуктивным пиролизом растительного сырья, с целью получения угольных брикетов с высокими прочностными характеристиками мало изучены и требуют проведения научно-исследовательской работы.

Работа выполнялась в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук, № МК–2437.2019.11.

Степень разработанности темы.

Значительный вклад в развитие технологии термохимической конверсии древесины с получением жидкого топлива и древесного угля внесли следующие ученые: А.Н. Кислицын, В.Н. Пиялкин, Ю.Л. Юрьев, Н.И. Богданович,

Д.А. Понамарев, Р.Г. Сафин, А.Н. Грачев, Н.И. Никитин, А.В. Жидков, Ю.Д. Юдкевич, В.Н. Козлов, С. Briens, F. Berruti, R. Graham, M. Gronli, M.J. Antal, A.V. Bridgwater, M.G. Rasul, M.I. Jahirul и др. Несмотря на имеющийся значительный опыт и задел в существующей области, отсутствует технология переработки растительных отходов лесопромышленного комплекса в угольные брикеты с высокими прочностными характеристиками без использования связующего.

Целью работы является разработка технологии и оборудования переработки древесной коры в угольные брикеты высокой плотности методом кондуктивного пиролиза.

В связи с этим были поставлены следующие задачи:

- провести анализ основ и современных технологий в области термохимического разложения коры древесины с целью получения угольного остатка с высоким выходом;
- разработать экспериментальное оборудование и методики проведения экспериментов по исследованию процессов, протекающих при кондуктивном пиролизе древесных отходов;
- провести экспериментальные исследования процесса кондуктивного пиролиза древесных отходов с определением материального баланса;
- определить основные физико-химические свойства и прочностные характеристики угольного остатка, полученного при кондуктивном пиролизе древесных отходов;
- определить рациональные режимные параметры процессов и конструктивные характеристики оборудования для промышленной реализации технологии переработки древесных отходов кондуктивным пиролизом;
- разработать технологические схемы и оборудование для промышленной реализации производственных процессов переработки древесных отходов кондуктивным пиролизом в угольные брикеты высокой плотности.

Научная новизна.

Работа содержит научную и методологическую базу для разработки технологии и высокоэффективного оборудования переработки древесных отходов в угольные брикеты высокой плотности кондуктивным пиролизом, а именно:

1. Разработана технология кондуктивного пиролиза древесных отходов, позволяющая получить угольные брикеты с высоким выходом (до 60 % по масс.) с высокими прочностными характеристиками и плотностью (1150 кг/м^3) без использования связующего.
2. Определены зависимости влияния давления при кондуктивном пиролизе на массовый выход, плотность, прочность на сжатие, сопротивление на сбрасывание угольных брикетов.
3. Получены результаты теплоты сгорания и зольности угольных брикетов, полученных при кондуктивном пиролизе древесины и коры осины и сосны.
4. На основе новых физических эффектов и явлений кондуктивного пиролиза созданы: установка для переработки растительного сырья в угольные брикеты (пат. 2732834) и установка переработки

органического сырья (пат. 2573034)

Практическая значимость.

Исследование процесса кондуктивного пиролиза древесных отходов позволило определить влияние вида перерабатываемого сырья и давления сжатия в процессе термического разложения на выход, плотность и прочностные характеристики получаемых угольных брикетов. Разработан экспериментальный стенд и методики проведения экспериментов, позволяющие моделировать процесс кондуктивного пиролиза в зависимости от вида и размера перерабатываемого сырья, температуры и давления процесса, времени термического разложения. Обоснована возможность применения угольных брикетов, полученных кондуктивным пиролизом древесных отходов, в качестве экологически чистой замены каменным углям. Создана установка для переработки растительного сырья в угольные брикеты, внедрение которой позволит получить значительный экономический эффект за счёт вовлечения древесных отходов.

Реализация работы.

Результаты проведенных исследований реализованы при создании конструкторских решений, при разработке методик расчета, конструкторской документации, паспортов и инструкций по эксплуатации созданного оборудования. Разработаны и приняты к изготовлению: установка для переработки растительного сырья в угольные брикеты (заявка на пат. 2020104630) и установка переработки органического сырья (пат. 2573034). Оборудование принято к внедрению на ООО НПО «ПОЛИТЕХНОЛОГИИ». Внедрение разработок позволит повысить рентабельность предприятия и создать на их базе энергонезависимые производства за счет эффективной переработки образующихся отходов и древесной биомассы.

Объекты и методы исследования.

В качестве объектов исследования применялись образцы угольных брикетов, полученные при кондуктивном пиролизе древесины и коры осины и сосны. Полученные угольные брикеты проверяли на содержание влаги, золы, летучих и нелетучего углерода по ГОСТ 33625-2015. Механические характеристики угольных брикетов определяли по ГОСТ 21289-75. Определение термической стойкости брикетов проводится в соответствии с ГОСТ 7714-75. Теплоту сгорания угольных брикетов определяли по методике в соответствии с ГОСТ 147-2013.

Достоверность полученных результатов.

Достоверность полученных результатов базируется на использовании научно обоснованных методик проведения экспериментальных исследований и теории обработки информации. Результаты испытаний и рекомендации подтверждаются большим объемом экспериментальных данных, полученных на современных и поверенных установках, имеющих сертификаты качества. Научные результаты согласуются с известными экспериментальными данными, а также результатами промышленной апробации.

Личный вклад автора.

Вклад автора заключается в постановке и решении задач теоретического, экспериментального и прикладного характера. Автором изготовлены

лабораторные установки, выполнены эксперименты. Автору принадлежат идеи опубликованных в соавторстве и использованных в диссертации работ.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Наиболее существенные результаты, выносимые на защиту, относятся к п.11 «Химия и технология пирогагенетических производств» паспорта специальности 05.21.03 «Технология и оборудование химической переработки биомассы дерева; химия древесины» и п.8 «Теория и методы создания машин и механизмов на основе новых физических эффектов и явлений» паспорта специальности 05.02.02 «Машиноведение, системы приводов и детали машин».

Основные положения, выносимые на защиту.

- Разработанная технология кондуктивного пиролиза древесных отходов, позволяющая получить угольные брикеты с высоким выходом (до 60 % по масс.) с высокими прочностными характеристиками и плотностью (1150 кг/м³) без использования связующего.
- Спроектированная конструкция экспериментального оборудования для исследования процесса кондуктивного пиролиза древесных отходов, а также разработанные методики проведения экспериментов и обработки экспериментальных данных.
- Результаты экспериментальных исследований, полученные при изучении процесса кондуктивного пиролиза древесных отходов.
- Схемы и конструкции разработанных промышленных установок для термохимической переработки растительных отходов лесопромышленного комплекса.

Апробация работы.

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на: Международной научно-практической конференции «Актуальные направления научных исследований 21 века: теория и практика», г. Воронеж, 2014 г.; Международной научной экологической конференции «Проблемы рекультивации отходов быта, промышленного и сельскохозяйственного производства», г. Краснодар, 2015 г.; Международной школе-конференции для студентов, аспирантов и молодых ученых «Фундаментальная математика и ее приложения в естествознании», г. Уфа, 2016 г.; Международном научно-техническом симпозиуме «Современные энерго- и ресурсосберегающие технологии СЭТТ - 2017», Москва, 2017 г.; Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов (с международным участием), г. Москва, 2017 г.; Международной научно-практической конференции «Кулагинские чтения: техника и технология производственных процессов», г. Чита, 2018 г.; Международной научно-практической конференции «Инновационные процессы в современной науке, тенденции развития», г. Уфа, 2019 г.; Международной молодежной научной конференции «Юность и Знания – Гарантия Успеха – 2019», г. Курск, 2019 г.; Международной научно-технической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудования и материалы-2019», г. Казань, 2019 г.

Публикации.

По результатам выполненных исследований опубликовано 17 печатных работ, из которых 5 научные статьи в изданиях, рекомендуемых ВАК

Министерства науки и высшего образования РФ, 1 статья в изданиях, входящих в международную реферативную базу данных *Scopus*, 2 патента РФ на изобретение, 1 монография.

Объем и структура диссертационной работы.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Диссертационная работа изложена на 113 страницах машинописного текста, включающих 34 рисунка и 12 таблиц. Библиографический список включает 173 наименований цитируемых работ российских и зарубежных авторов.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, сформулирована цель и задачи исследования, представлена научная новизна и практическая значимость, дана общая характеристика работы.

В первой главе рассмотрена классификация, свойства и объем отходов древесной коры в Российской Федерации, представлены теоретические основы термической переработки древесной коры и особенности аппаратного оформления процесса получения угольных брикетов.

Во второй главе приводится описание экспериментального оборудования и методик проведения экспериментов.

Для исследования процесса кондуктивного пиролиза древесных отходов была разработана и изготовлена экспериментальная установка общий вид и схема которой представлены на рис 1.

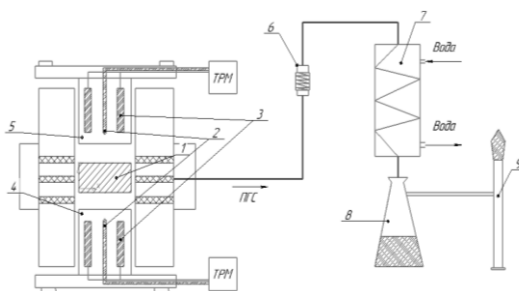


Рис. 1. Общий вид и схема экспериментальной установки получения угольных брикетов кондуктивным пиролизом древесных отходов

Экспериментальная установка получения угольных брикетов кондуктивным пиролизом древесных отходов включает: 1 – испытуемый образец, 2 – термопары, 3 – электронагреватели, 4 – нижний цилиндр, 5 – верхний цилиндр, 6 – клапан, 7 – конденсатор, 8 – приемник жидкого продукта, 9 – факел. Для исследования процесса быстрого кондуктивного пиролиза древесной коры, был выбран пресс марки Т61210.

Наиболее часто произрастающие породы дерева в РФ из хвойных – сосна, а из лиственных – осина. В связи с этим в качестве сырья для экспериментов была использована древесина и кора сосны и осины. Сырье подвергалось процессу сушки до влажности 10%. Лабораторная установка кондуктивного пиролиза растительного сырья работает следующим образом: перерабатываемое высушенное и измельчённое сырье массой 30 гр. помещается на нижний цилиндр реактора и запрессовывается верхним цилиндром. Давление прессования составляет от 0,5 до 3 тонны. Далее происходит нагрев материала до температуры 450 °С и выдержка при данной температуре не менее 20 мин. После чего происходит охлаждение полученного образца до 30 – 40 °С.

В качестве объектов исследования применялись образцы угольных брикетов, полученные при кондуктивном пиролизе древесины и коры осины и сосны. Полученные угольные брикеты проверяли на содержание влаги, золы, летучих и нелетучего углерода по ГОСТ 33625-2015. Механические характеристики угольных брикетов определяли по ГОСТ 21289-75. Определение термической стойкости брикетов проводится в соответствии с ГОСТ 7714-75. Теплоту сгорания угольных брикетов определяли по методике в соответствии с ГОСТ 147-2013.

В третьей главе представлены результаты исследований процесса кондуктивного пиролиза древесной коры и анализ свойств полученных угольных брикетов.

В ходе проведенных исследований процесса кондуктивного пиролиза древесины и коры сосны и осины были получены угольные брикеты цилиндрической формы диаметром 50 мм (рис. 2).



Рис. 2. Угольный брикет

Результаты исследований показали, что процесс кондуктивного пиролиза, применяемый на разработанном стенде, позволил достичь высокого значения выхода угля при переработке древесных отходов. На рис. 3 представлены результаты исследований влияния величины давления прессования, в процессе кондуктивного пиролиза, на массовый выход твердого продукта при температуре процесса 450 °С.

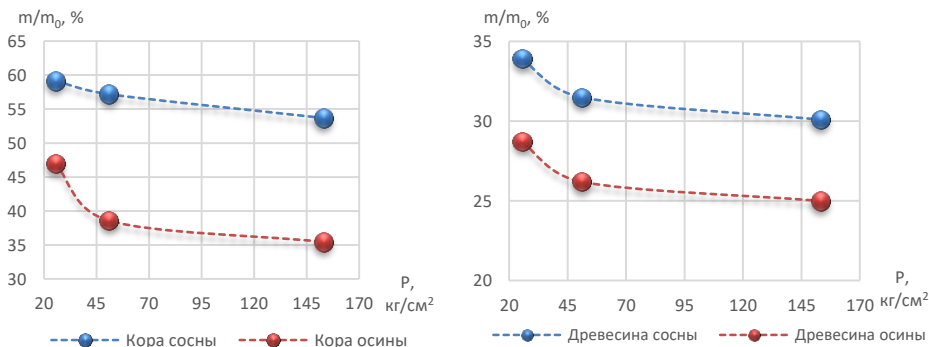


Рис. 3. Массовый выход угольных брикетов от давления прессования при кондуктивном пиролизе древесины и коры сосны и осины

Максимальное значение выхода угля – 60 % достигается при переработке коры сосны при давлении прессования 25 кг/см². При переработке коры осины это значение составляет 46 %. Однако, увеличение давления прессования ведет к незначительному снижению выхода твердого остатка. Объясняется данный эффект тем, что увеличение давления прессования приводит к увеличению объема пиролизных газов.

Исследования показывают, что выход твердого продукта при кондуктивном пиролизе древесной части ниже, чем при переработке коры. Наибольший выход твердого продукта показывает древесина сосны – 34%. Это значение при кондуктивном пиролизе древесины осины составляет 29%. Данный факт объясняется разным химическим составом древесиной части и коры. Содержания лигнина в коре выше, что приводит к повышению выхода твердого продукта.

Увеличение давления прессования в процессе кондуктивного пиролиза древесины сосны и осины так же ведет к незначительному снижению выхода твердого остатка, что и в случае с переработкой коры. В то же время увеличение величины давления прессования в процессе кондуктивного пиролиза позволяет повысить плотности получаемых угольных брикетов (рис. 4). Максимальное значение плотности – 1140 кг/см³ достигается при переработке древесины сосны при давлении прессования 153 кг/см². Наибольший рост значений плотности угольных брикетов наблюдается при увеличении давления при кондуктивном пиролизе от 20 до 60 кг/см² и в среднем он составляет 16 – 20%.

Результаты исследований механической прочности брикетов представлены в виде графических зависимостей на рис. 5. Согласно результатам исследований, угольный брикет, полученный при кондуктивном пиролизе, имеет высокие показатели сопротивления на сжатие. Максимальную прочность на сжатие показали образцы угольных брикетов из коры осины, разрушение образца произошло при давлении 495 кг/см². Графические зависимости прочностных характеристик полученного материала показывают возможность увеличения показателей сопротивления образца на сжатии при увеличении давления прессования в процессе кондуктивного пиролиза.

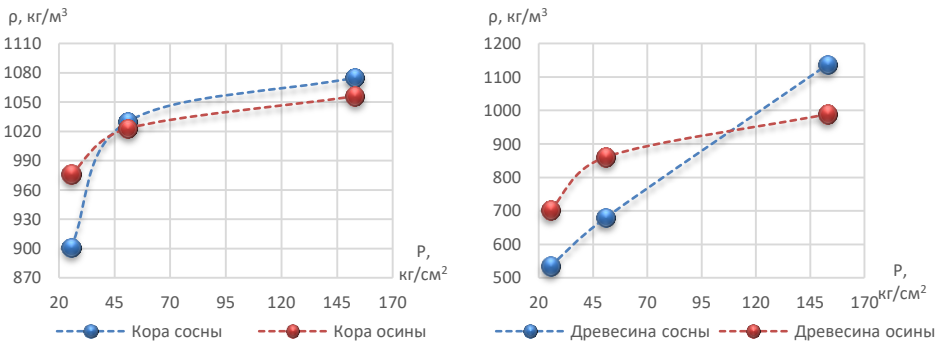


Рис. 4. Изменение плотности образцов в зависимости от давления прессования при кондуктивном пиролизе древесины и коры сосны и осины

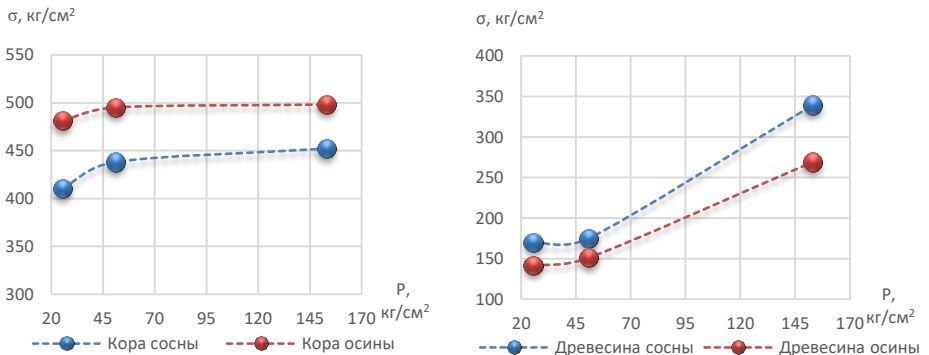


Рис. 5. Изменение прочности угольных брикетов на сжатии (сырье – древесина и кора осины и сосны)

В рамках проведенных исследований была проведена сравнительная оценка свойств угольных брикетов, полученных кондуктивным пиролизом древесной части и коры сосны и осины и природного коксового угля (рис. 6.)

Сравнительная оценка свойств угольных брикетов, полученных кондуктивным пиролизом древесной части и коры сосны и осины, и природного коксового угля показала, что по всем показателям сравнения угольные брикеты имеют лучшие показатели. Данное сравнение позволяет говорить, что угольные брикеты, полученные по технологии кондуктивного пиролиза древесных отходов, могут стать экологически чистой заменой коксовым углям.

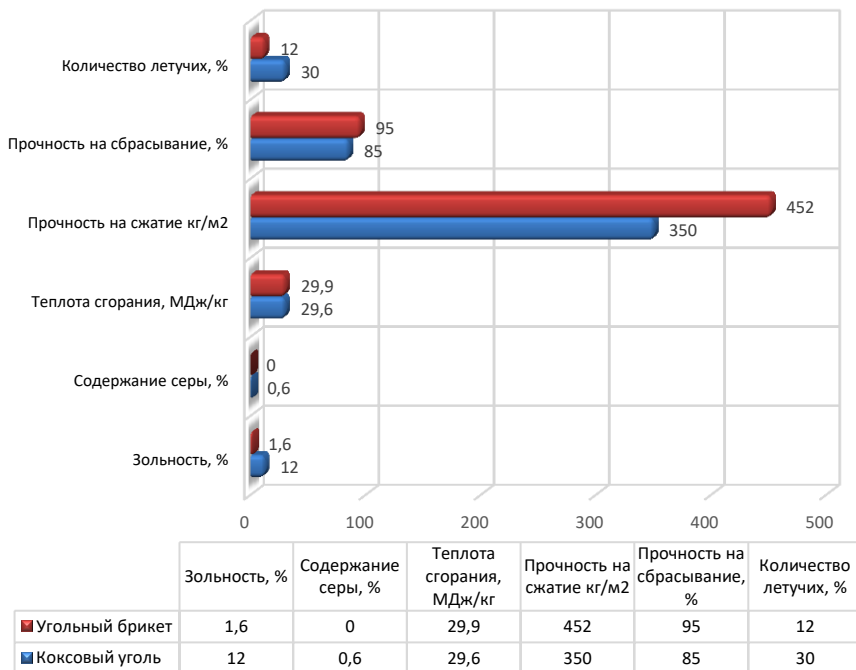


Рис. 6. Сравнение основных свойств коксового угля и полученных угольных брикетов

В четвертой главе представлено промышленная реализация результатов исследования.

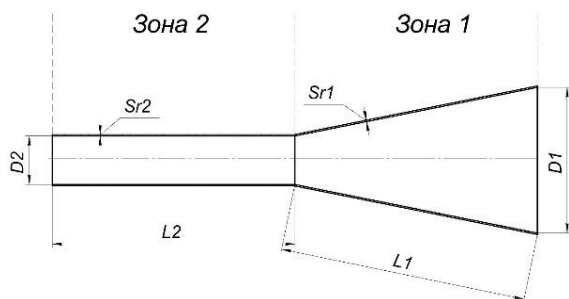


Рис. 7. Схема реактора кондуктивного пиролиза

Разработана инженерная методика расчета реактора кондуктивного пиролиза для переработки древесных отходов в угольные брикеты. Для упрощения расчета реактор кондуктивного пиролиза был условно разделен на две зоны: 1 – зона сужения и 2 – зона прокалики (рис 7).

Для каждой из зон были рассчитаны: толщина стенки реактора в зависимости от давления прессования сырья в процессе кондуктивного пиролиза (рис. 8) и величина температурного расширения стенки. Так же проведен расчет величины температурного расширения в зависимости от длины реактора кондуктивного пиролиза для зоны сужения и зоны прокалики.

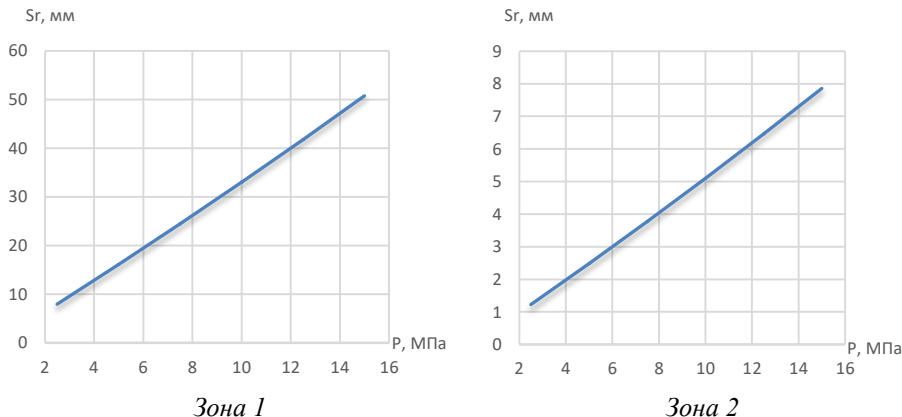


Рис. 8. Толщина стенки реактора в зависимости от давления прессования сырья в процессе кондуктивного пиролиза

Спроектирована и принята к изготовлению установка для переработки растительного сырья в угольные брикеты, которая защищена патентом РФ №2732834 (рис. 9).

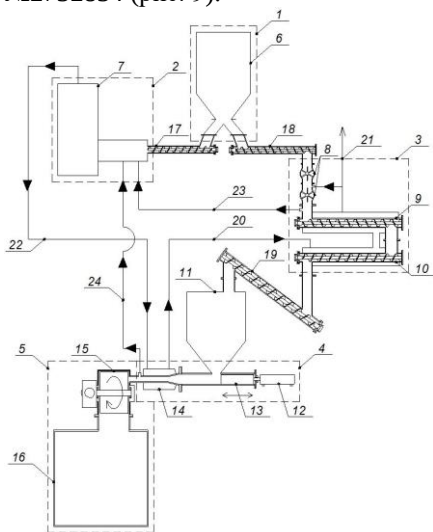


Рис. 9. Схема установки для переработки растительного сырья в угольные брикеты

питателями 8 для обеспечения герметичности подачи сырья в зону сушки 3, а остаточная часть отработанных топочных газов 22 сбрасывается в атмосферу. Часть измельченного растительного сырья шнековым транспортером 17 из приемного бункера 6 поступает в зону подготовки теплоносителя 2, которая выполнена в виде теплогенератора, снабженного топочной камерой 7. Теплогенератор работает как на газообразном (пиролизные газы 24, образующиеся при пиролизе), так и на твердом топливе (часть сырья,

Установка работает следующим образом: измельченное до размеров 20–25 мм растительное сырье из приемного бункера 6 шнековым транспортером 18 подается в зону сушки сырья 3, проходя через секторные питатели 8. Сушка сырья осуществляется в последовательно установленных шнековых транспортерах, в начале в 9, а затем в 10. Шнековые транспортеры 9 и 10 обогреваются отработанными топочными газами 20, поступающими из зоны пиролиза 4, температура топочных газов в шнековом транспортере 10 составляет 250–180 °С, а в шнековом транспортере 9 составляет менее 180 °С. Часть отработанных топочных газов 21 после шнекового транспортера 9 направляется в пространство между секторными

поступающая из зоны подготовки-приемки сырья 1). Теплоноситель в виде топочных газов 22 из теплогенератора, снабженного топочной камерой 7, направляется в зону пиролиза 4, которая выполнена в виде кондуктивного реактора, состоящего из обогреваемой трубы 14, имеющий сужение по диаметру, через которую проходит уплотняемое гидроцилиндром 12 с плунжером 13 высушенное и подогретое сырье, которое поступает из приемного бункера-накопителя 11. При этом бункер-накопитель наполняется высушенным и подогретым сырьем транспортируемым шнековым транспортером 19 из зоны сушки сырья 3. Рабочая температура в реакторе кондуктивного пиролиза составляет 450 °С, которая позволяет достичь полного обугливания уплотняемого сырья, давление уплотнения создаваемое гидроцилиндром 12 с плунжером 13 достигает до 100 кг/см². Из зоны пиролиза 4 готовые брикеты удаляются транспортером револьверного типа 15, при движении которого готовые угольные брикеты охлаждаются до температуры 20–30 °С и сбрасываются в приемный бункер готового продукта 16.

Спроектирована и принята к изготовлению установка переработки органического сырья (пат. 2573034) (рис. 10).

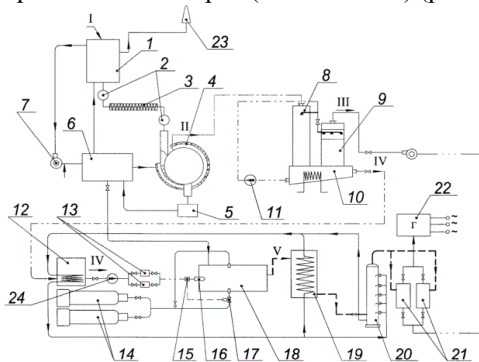


Рис. 10. Схема установки переработки органического сырья

Пиролиз растительного сырья осуществляют следующим образом. Органическое сырье I, прошедшее соответствующую подготовку (очищенная от посторонних предметов, измельченная), загружают в сушильный бункер 1, где подвергают конвективной сушке разбавленным топочным газом при температуре 160 – 200 °С до влажности сырья 10 %. Затем с помощью дозатора 2 и шнековым питателем 3 подают в реактор пиролиза барабанного типа 4, где проводится термохимическое разложение растительного сырья в диапазоне температур 450 – 520 °С и давления 500 – 1000 Па с образованием парогазовой смеси и угля. Уголь собирают в приемнике 5, затем направляют в топку 6. Полученные топочные газы используют для нагревания реактора пиролиза 4 и газификатора 18, после чего их смешивают с воздухом до температуры 160–200 °С с помощью вентилятора 7. Пройдя через сушильный бункер 1 и обеспечив сушку сырья, они выбрасываются в атмосферу через дымовую трубу 23. Парогазовую смесь II направляют в конденсатор, состоящий из распылительной колонны 8 и насадочной колонны 9, где в результате конденсации охлажденной пиролизной жидкостью, подаваемой насосом 11, при температуре 30 – 40 °С отделяют жидкий продукт IV, который собирают в приемной ванне 10, а затем подают в резервуар 12 для дальнейшего использования. Несконденсированный пиролизный газ направляют на очистку в рукавные фильтры 21.

Пиролиз растительного сырья осуществляют следующим образом. Органическое сырье I, прошедшее соответствующую подготовку (очищенная от посторонних предметов, измельченная), загружают в сушильный бункер 1, где подвергают конвективной сушке разбавленным топочным газом при температуре 160 – 200 °С до влажности сырья 10 %. Затем с помощью дозатора 2 и шнековым питателем 3 подают в реактор пиролиза барабанного типа 4, где

Жидкий продукт из резервуара 12 через фильтры 13 с помощью насоса 24 нагнетают в форсунку газификатора 16. Жидкий продукт пиролиза газифицируют при температуре 1000 – 1200 °С и давлении 100 – 300 кПа в присутствии кислорода в количестве 25 – 40 % мас. Для осуществления процесса газификации подают кислород в газификатор 18 из баллонов 14. Количество кислорода (25 – 40 % мас.), подаваемого на процесс газификации, дозируют автоматическими регуляторами соотношения 15 и 17. Полученный генераторный газ V, имеющий температуру 1000 – 1200 °С, направляют в теплообменник 19 для охлаждения. Нагретую в теплообменнике 19 воду используют для предварительного нагрева пиролизной жидкости в резервуаре 12 до температуры 60 – 70 °С. Последующее охлаждение генераторного газа осуществляют в полном скруббере 20. Очистку генераторного газа ведут в рукавных фильтрах 21. После очистки генераторный газ и несконденсированный пиролизный газ подают в генератор электрической энергии 22.

Внедрение разработок позволит повысить рентабельность предприятий и создать на их базе энергонезависимые производства за счет эффективной переработки образующихся отходов и древесной биомассы.

В приложении техническая документация, схемы и чертежи исследовательского оборудования, дипломы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненных автором исследований в диссертации решена задача переработки древесной коры кондуктивным пиролизом в угольные брикеты высокой плотности, имеющая важное хозяйственное значение.

Работа соответствует приоритетным направлениям развития науки, технологии и техники в Российской Федерации, утвержденным Указом Президента Российской Федерации от 7 июля 2011 года №899, п. 8 «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика».

Основные результаты по работе:

1. Проведен анализ современных технологий в области термохимического разложения коры древесины с целью получения угольного остатка с высоким выходом. Разработана технология кондуктивного пиролиза древесных отходов, позволяющая получить угольные брикеты с высоким выходом (до 60 % по масс.) с высокими прочностными характеристиками и плотностью (1150 кг/м³) без использования связующего.

2. Разработан лабораторный стенд и методики проведения исследований, позволившие получить продукт термического разложения, определить материальный баланс процесса, идентифицировать профили давления и температуры при кондуктивном пиролизе древесных отходов.

3. Определены зависимости влияния давления при кондуктивном пиролизе на массовый выход, плотность, прочность на сжатие, сопротивление на сбрасывание угольных брикетов. Получены данные по теплоте сгорания и зольности угольных брикетов, полученных при кондуктивном пиролизе древесины и коры осины и сосны. Проведен сравнительный анализ основных свойств угольных брикетов и коксового угля.

4. Определены модуль упругости и коэффициент температурного расширения материала реактора кондуктивного пиролиза.

5. Разработана инженерная методика расчета реактора кондуктивного пиролиза.

6. Создана установка для переработки растительного сырья в угольные брикеты (пат. 2732834) и установка переработки органического сырья (пат. 2573034)

7. По результатам исследований разработаны и приняты к внедрению в производство технологические схемы и аппаратурное оформление процесса кондуктивного пиролиза древесных отходов на предприятии ООО НПО «ПОЛИТЕХНОЛОГИИ». Внедрение разработок позволит повысить рентабельность предприятия и создать на их базе энергонезависимые производства за счет эффективной переработки образующихся отходов и древесной биомассы.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

Статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК

1. Тунцев, Д.В. Переработка лигнина термическим способом / Д.В. Тунцев, Р.Г. Сафин, А.Р. Арсланова, Р.Г. Хисматов, С.В. Китаев // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. - №16. – С.279-282.

2. Тунцев, Д.В. Утилизация отработанных деревянных шпал / Д.В. Тунцев, Р.Г. Сафин, С.В. Китаев, М.Р. Хайруллина, Э.К. Хайруллина // Лесной вестник. – 2017. – №2. – С. 70-75.

3. Тунцев, Д.В. Исследование процесса быстрого термокондуктивного пиролиза древесной коры и торфа / Д.В. Тунцев, Р.Г. Сафин, С.В. Китаев, А.М. Касимов, А.Р., Шакиров // Деревообрабатывающая промышленность. - 2018. - №3. –С. 34-39.

4. Тунцев, Д.В. Переработка древесной коры в угольные брикеты высокой прочности / Д.В. Тунцев, Р.Г. Сафин, С.В. Китаев, М.Р. Хайруллина, М.В., Хузеев // Деревообрабатывающая промышленность. - 2019. - №4. –С. 78-85.

5. Тунцев, Д.В. Технология переработки отходов лесной отрасли в угольные брикеты высокой прочности / Д.В. Тунцев, М.Р. Хайруллина, С.В. Китаев, Г.И. Игнатьева // Деревообрабатывающая промышленность. - 2020. - №4. –С. 69-76.

Статьи, опубликованные в журналах, входящих в базу данных SCOPUS и Web of Science

6. Tuntsev, D.V. Production of pyro-fuel by fast conductive pyrolysis of pinewood / D.V. Tuntsev, A.R. Shaikhutdinova, S.V. Kitaev // Biofuels, 2019. DOI:10.1080/17597269.2019.1665296

Патенты

7. Патент № 2573034. РФ, МПК C10B 47/30, C10B53/00. Способ термической переработки органосодержащего сырья / Д. В. Тунцев, Р.Г. Хисматов, Р.Г. Сафин, Н.Ф. Тимербаев, А.М. Касимов, С.В. Китаев, А.Р. Арсланова; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КНИТУ». – №2014138052/05. заявл. 19.09.2014, опубл. 20.01.2016. Бюл. №2.

8. Патент № 2732834. РФ, МПК C10L 5/44, C10B47/28 Установка для переработки растительного сырья в угольные брикеты / Д. В. Тунцев, М.Р. Хайруллина, Р.Г. Хисматов, Р.Г. Сафин, С.В. Китаев; заявитель и

патентообладатель ФГБОУ ВО «КНИТУ». – №2020104630. заявл. 31.01.2020, опубл. 24.09.2020. Бюл. №27.

Монография

9 Китаев, С.В. Разработка технологии и оборудования получения угольных брикетов высокой плотности термохимическим методом из древесной коры осины и сосны / С.В. Китаев, Д.В. Тунцев, Р.Г. Сафин, Р.Г. - Казань: Изд-во АН РТ, 2020. – 84 с. – ISBN 978-5-9690-0797-0

Публикации в других изданиях

10. Тунцев, Д.В. Получение пиротоплива быстрым кондуктивным пиролизом древесины сосны / Д.В. Тунцев, Р.Г. Сафин, С.В. Китаев, Г.Р. Арсланова // Ремонт, восстановление, модернизация. - 2019. - №10. –С.21-25.

11. Тунцев, Д.В. Термическая переработка биомассы лигнина / Д.В. Тунцев, С.В. Китаев, А.Р. Арсланова, И.С. Романчева, А.С. Савельев // Международная научно-практическая конференция «Актуальные направления научных исследований 21 века: теория и практика»: сб. тез. докл. № 5 ч.4 - Воронеж, 2014. - С. 344 – 348.

12. Тунцев, Д.В. Технология и оборудование для электроэнергетического использования древесных отходов / Д.В. Тунцев, С.В. Китаев, Н.Ф. Тимербаев, М.Р. Хайруллина, // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2017. - №1-2. –С.102-107.

13. Тунцев, Д.В. Переработка древесных отходов в уголь высокого качества / Д.В. Тунцев, С.В. Китаев, М.Р. Хайруллина, Л.Ш. Асаева // VI Международный научно-технический Симпозиум «Современные энерго- и ресурсосберегающие технологии СЭТТ - 2017»: сб. тез. докл. - Москва, 2017. – С. 43-46.

14. Тунцев, Д.В. Установка термической переработки органосодержащего сырья / Д.В. Тунцев, С.В. Китаев, Э.Е. Антипова, А.Р. Шакиров // 10 Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов: сб. тез. докл. - Москва, 2017. – С. 296-299

15. Тунцев, Д.В. Исследование прочностных характеристик угольных брикетов из древесной коры / Д.В. Тунцев, С.В. Китаев, А.Р. Ахметов, М.Р. Хайруллина // международная научно-практической конференции «Инновационные процессы в современной науке, тенденции развития»: сб. тез. докл. ч1- Уфа, 2019. - С. 94-98.

16. Тунцев, Д.В. Исследование процесса переработки древесной коры в угольные брикеты высокой прочности / Д.В. Тунцев, С.В. Китаев, Ф.Н. Бадрутдинов, М.Р. Хайруллина // 6-й Международная молодежная научная конференция «Юность и Знания – Гарантия Успеха – 2019» сб. тез. докл. том 4 – Курск, 2019. - С. 7-9.

17. Тунцев, Д.В. Экспериментальная установка переработки древесного материала в угольные брикеты высокой прочности / Д.В. Тунцев, С.В. Китаев, Н.А. Дубинина, М.Р. Хайруллина // 6-й Международная молодежная научная конференция «Юность и Знания – Гарантия Успеха – 2019» сб. тез. докл. том 4 – Курск, 2019. - С. 42-44.