

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Объект авторского права
УДК 662.8.05

ПЕХОТА
Александр Николаевич

**МНОГОКОМПОНЕНТНОЕ ТВЕРДОЕ ТОПЛИВО
НА ОСНОВЕ МАЛОИСПОЛЬЗУЕМЫХ
ГОРЮЧИХ ОТХОДОВ
(ТЕОРИЯ. ТЕХНОЛОГИЯ. ПРОИЗВОДСТВО)**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени доктора технических наук
по специальности 05.14.04 – промышленная теплоэнергетика

Минск, 2023

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете.

Научный
консультант

ХРУСТАЛЁВ Борис Михайлович,
академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Теплогасоснабжение и вентиляция» Белорусского национального технического университета, г. Минск, заслуженный работник образования Республики Беларусь

Официальные
оппоненты:

ЖУРАВСКИЙ Геннадий Иванович,
доктор технических наук, главный научный сотрудник ГНУ «Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси», г. Минск;

БОЙКО Андрей Андреевич,
доктор технических наук, доцент, проректор по научной работе Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого, г. Гомель;

БЕРЕЗОВСКИЙ Николай Иванович,
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Горные машины» Белорусского национального технического университета, г. Минск

Оппонирующая
организация

Государственное научное учреждение «Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси», г. Минск

Защита состоится «15» июня 2023 г. в 14⁰⁰ на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.01 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65, корп. 2, ауд. 201. Телефон ученого секретаря (+375 17) 292-93-16, e-mail: bobich@bntu.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «10» мая 2023 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций,
кандидат технических наук, доцент



А. А. Бобич

© Пехота А. Н., 2023

© Белорусский национальный
технический университет, 2023

ВВЕДЕНИЕ

Необходимое условие устойчивого экономического развития любого государства в современном мире – улучшение качества жизни граждан, а также обеспечение населения и промышленности достаточным количеством энергетических и природных ресурсов, их рациональное использование.

Одной из основных задач устойчивого развития Республики Беларусь в области энергосбережения является снижение энергоемкости ВВП и увеличение доли местных и нетрадиционных видов топлива в общем балансе топливно-энергетических ресурсов (ТЭР). Анализ тенденций потребления ТЭР в разных государствах мира позволяет утверждать, что в перспективе ожидается повышение доли использования местных сырьевых и нетрадиционных вторичных горючих энергетических ресурсов [1, 45].

Развитие различных отраслей экономики страны, увеличение благосостояния наших граждан и рост потребления товаров неизбежно ведут к образованию отходов разных производств и жизнедеятельности человека с широким диапазоном морфологического состава, среди которого имеются различные виды горючих отходов, применение которых зачастую в других технологиях вызывает определенные трудности. Например, Беларусь располагает накопленными и образующимися малоиспользуемыми источниками энергии, которые можно вовлечь в энергобаланс как в ближайшие годы, так и в стратегической перспективе. По оценке специалистов РУП «БелНИЦ «Экология», республика обладает значительным потенциалом горючих отходов, подтвержденный энергетический ресурс которых ежегодно составляет по: образующимся коммунальным отходам – до 500 тыс. т у. т., отходам растениеводства – до 1,46, по углеводородсодержащим отходам – до 30 тыс. т у. т. При этом только за счет переработки неиспользуемых древесных отходов можно дополнительно получать не менее 1 млн т у. т. при общем потенциале доступных древесных отходов более 3 млн т у. т. В то же время одним из остро стоящих является вопрос эффективной утилизации коммунальных отходов, отходов избыточного ила городских очистных сооружений, промышленных и бытовых отходов, характеризующихся повышенной влажностью и высоким энергетическим потенциалом. Согласно Национальной стратегии по обращению с твердыми коммунальными отходами и вторичными материальными ресурсами в Республике Беларусь на период до 2035 года, запланировано до 2025 года обеспечить переработку, например, коммунальных отходов на уровне не менее 64 %, а к 2035 году – не менее 90 % [1, 4, 5, 8, 9, 17–20].

Именно поэтому для решения проблем использования горючих отходов различных производств весьма актуальными являются разработка технологии и определение оптимальных составов, обеспечивающих получение брикетированного многокомпонентного твердого топлива (МТТ) на основе

коммунальных, древесных и углеводородсодержащих отходов. Все это требует проведения исследований с целью определения закономерностей получения МТТ, что имеет практическое значение, которое позволит увеличить долю местных видов топлива, повысить экологическую безопасность регионов, создать стабильную топливную базу, что, в конечном счете, дополнительно обеспечит сокращение потребления первичных энергоресурсов и снизит объемы образования отходов различных производств.

В работе предложен новый концептуальный подход к рециклингу отходов, основанный на брикетировании влажных смесей структурно неоднородных горючих отходов различных производств, с оптимальным соотношением растительно-древесной биомассы, отходов коммунального происхождения и углеводородсодержащих отходов, что обеспечивает получение многокомпонентного твердого топлива, допускающегося к сжиганию в слоевых топках, работающих на твердом топливе по энергетическим, экологическим и технико-экономическим показателям.

Полученные в работе автором результаты впервые формируют научные знания в области подготовки и брикетирования влажных многокомпонентных смесей с использованием структурно неоднородных отходов различных производств, не нашедших технологического применения в других технологиях. Выполненные исследования позволили определить технологические и практические закономерности получения многокомпонентного топлива с использованием структурно неоднородных отходов различных производств, исследовать закономерности процесса подготовки и режимов брикетирования, а с применением методов дифференциально-термического анализа и комплексных лабораторных физико-химических исследований топлива определить основные факторы, влияющие на качество, теплоэнергетические характеристики и образование выбросов вредных веществ. Применение имитационного, компьютерного моделирования и проведение натуральных экспериментов, с использованием разработанного гидравлического и шнекового брикетизирующего оборудования, позволили разработать теоретические и технологические основы рециклинга малоиспользуемых горючих производственных и коммунальных отходов, апробировать полученные технические решения и внедрить их в производство.

Разработанная технология и оборудование решают проблемы рециклинга малоиспользуемых горючих отходов, что позволяет организовать безотходную систему применения горючих отходов различных производств, расширить номенклатуру местных видов топлива, улучшить экологическую обстановку за счет снижения объемов образования отходов, снизить себестоимость продукции и повысить конкурентоспособность за счет применения более дешевого по себестоимости многокомпонентного твердого топлива.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами), темами. Тема диссертации соответствует целям и задачам ряда республиканских программ в области энергетики и энергосбережения: Государственной программе «Энергосбережение» на 2021–2025 годы, утвержденной постановлением Совета Министров Республики Беларусь № 103 от 24.02.2021, Перечню приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы (Указ Президента Республики Беларусь № 156 от 07.05.2020) по разделу «Энергетика, строительство, экология и рациональное природопользование», Национальной стратегии по обращению с твердыми коммунальными отходами и вторичными материальными ресурсами в Республике Беларусь на период до 2035 года, утвержденной постановлением Совета Министров Республики Беларусь № 567 от 28.07.2017, Концепции Национальной стратегии устойчивого развития Республики Беларусь на период до 2035 года, утвержденной постановлением Совета Министров Республики Беларусь № 392 от 25.05.2018.

Цель и задачи исследования. *Целью* диссертационной работы является развитие теоретических основ и практических методов получения многокомпонентного твердого топлива с разработкой и обоснованием модели и технологии производства брикетированного топлива с применением в составе структурно неоднородных смесей горючих производственных и коммунальных отходов, малоиспользуемых или не нашедших технологического применения.

Для достижения поставленной *цели* требуется решение ряда *задач*:

– выполнить анализ состояния энерго- и ресурсосбережения и проблемы использования в энергетических целях вторичных ресурсов, исследовать и выявить резервы использования в энергетических целях нетрадиционных видов топлива с применением различных малоиспользуемых горючих отходов, определить структуры образования в Республике Беларусь углеводородсодержащих, коммунальных, древесных и сельскохозяйственных отходов, пригодных для производства твердого топлива, и эффективные методы подготовки и средства их переработки;

– усовершенствовать и внедрить технологию подготовки и брикетирования влажных многокомпонентных смесей с использованием структурно неоднородных производственных и коммунальных отходов, определить оптимальные соотношения компонентов в составе топлива по энергетическим, экологическим и технико-экономическим показателям;

– теоретически обосновать, усовершенствовать и внедрить новую конструкцию циклично-брикетирующего гидравлического оборудования, разработанного автором, обеспечивающую производство многокомпонентного

твердого топлива с использованием структурно неоднородных горючих производственных и коммунальных отходов;

– разработать математическую модель оптимизации работы оборудования и экспериментально исследовать с применением методов оптимизации и систематизации задач, определяющих теоретические зависимости и влияние долей компонентного состава топлива и влажности многокомпонентной смеси на процессы подготовки и брикетирования по параметрам, обеспечивающим оптимальные показатели производительности, характеристикам качества, предъявляемым к твердым топливам по теплоэнергетическим, экологическим и технико-экономическим критериям;

– определить закономерности, алгоритм расчета, основные параметры и количественные характеристики технологического процесса многокомпонентного брикетирования для создания имитационной модели воспроизводства эксперимента во времени с использованием логико-математического имитационного моделирования;

– экспериментально и теоретически выявить закономерности влияния соотношения компонентов состава МТТ на образование выбросов вредных веществ при сжигании с применением методов математического моделирования;

– разработать концепцию создания промышленного производства МТТ, обеспечивающего переработку горючих малоиспользуемых отходов с учетом химического и структурно неоднородного морфологического состава, теплофизических характеристик используемых отходов, определить экономическую эффективность создания производства МТТ и выполнить сравнительный анализ его применения с расчетом удельной стоимости по основным показателям.

Объект исследования – процесс брикетирования и создания инфраструктуры технологии производства твердого топлива на основе методов гидравлического и шнекового брикетирования многокомпонентной смеси с использованием древесно-растительных, коммунальных и вязких углеводородсодержащих горючих отходов.

Предметом исследования являются теория, технология и производство многокомпонентного твердого топлива на основе использования влажных смесей древесно-растительных (опилки деревообработки, измельченные лесосечные отходы, различные виды соломы), коммунальных (осадок сточных вод городских очистных сооружений) и вязких углеводородсодержащих отходов (нефтешламы, донные отложения мазутных резервуаров, отработанные насыщенные нефтепродуктами сорбенты).

Научная новизна диссертационного исследования заключается в концептуальном развитии одного из актуальных научных направлений, связанных с использованием вторичных энергетических ресурсов.

Полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований, разработанные технология брикетирования, оборудование, методики и практические рекомендации в совокупности имеют научную новизну

и позволяют максимально эффективным способом осуществлять возврат малоиспользуемых горючих отходов, не нашедших технологического применения в других технологиях, в реальный сектор экономики страны, что является значительным достижением по актуальному и приоритетному для Республики Беларусь направлению. Разработанные научно-технические основы по данному направлению позволяют повысить уровень переработки и использования горючих отходов в энергетических целях с совокупным обеспечением экономического, экологического и социального эффекта.

Основа полученных принципиально новых научных результатов заключается в следующем:

- в разработке автором энергоэффективно работающего брикетировочного оборудования (гидравлического марки ГБУМТ-1 и шнекового марки ПМТ-1), позволяющего получать топливные брикеты из смеси различных структурно неоднородных горючих производственных и коммунальных отходов путем формирования влажной смеси в брикеты с обеспечением критериев минимизации энергозатрат на производство и сушку топлива;

- в разработке принципиально новой технологической схемы брикетирования минимально влажной смеси различных горючих отходов, обеспечивающей экономически выгодную производительность и возможность использования структурно неоднородных горючих производственных и коммунальных отходов, что не достигается в традиционных технологических схемах получения топлива, а также определении научно обоснованных принципов оптимизации соотношения влажности и компонентного состава многокомпонентного твердого топлива, при которых обеспечиваются необходимые значения производительности, плотности и экологичности брикетируемого твердого топлива;

- в результатах научно-технической и практической обоснованности эксплуатационных теплотехнических показателей сушки многокомпонентного топлива, подтвердивших снижение на 15,2 % затрат энергии на сушку топлива, при оценке аналогичных затрат энергии в традиционных технологиях получения гранулированного и брикетированного топлива;

- в разработке и научном обосновании теоретических и практических принципов создания энергоэффективной технологии брикетирования и составов твердого топлива с использованием структурно неоднородных горючих производственных и коммунальных отходов, обеспечивающих при сжигании экологически допустимые параметры ПДК выбросов вредных веществ и высокую удельную теплоту сгорания МТТ, сопоставимую с калорийным эквивалентом условного топлива не менее 0,5;

- в обосновании состава вредных выбросов (NO , CO , SO_2 и твердых частиц), образующихся при сжигании разработанного многокомпонентного твердого топлива с учетом нормируемых показателей, элементарного состава рабочей массы и технических показателей топливосжигающей установки;

– в математическом обосновании и разработке имитационной модели технологического процесса производства многокомпонентного твердого топлива, позволяющей проводить имитационные эксперименты и определять основные параметры и количественные характеристики принципиально нового технологического процесса производства многокомпонентного твердого топлива;

– в получении эмпирической зависимости (уравнения регрессии) производительности брикетирующего оборудования и плотности получаемого топлива с учетом влияния структурно неоднородных горючих отходов в смеси и ее влажности, позволяющей оптимизировать параметры технологического регламента производства многокомпонентного твердого топлива и существенно развить технологические схемы переработки различных горючих отходов с целью снижения затрат на брикетирование горючих отходов и получение малозатратных топливно-энергетических ресурсов с использованием отходов.

Положения, выносимые на защиту:

– теоретические положения процесса брикетирования и определение оптимального состава смеси древесных, коммунальных и углеводородсодержащих отходов, реализованного с использованием теории планирования эксперимента, позволившие установить, что производительность шнекового брикетирующего оборудования при формовании брикетов разработанного многокомпонентного твердого топлива в диапазоне изменения влажности прессуемой смеси от 38 до 65 % достигает максимального значения при влажности формуемой смеси, равной $42,1 \pm 0,9$ %, в диапазоне изменения доли коммунальных отходов в виде осадка сточных вод от 31 до 50 % и доли углеводородсодержащих отходов в пределах 1–3 %;

– математическое обоснование и оптимизация режимов и параметров брикетирования многокомпонентных смесей с использованием имитационной модели технологического процесса производства многокомпонентного твердого топлива, реализованной в пакете автоматизации имитационного моделирования *GPSS World*, позволившей проводить численные эксперименты и определять основные параметры и качественные характеристики технологического процесса;

– научно обоснованные результаты исследования процесса брикетирования смеси древесных, коммунальных и углеводородсодержащих отходов, осуществленные с использованием теории планирования эксперимента и нейромоделирования в программе *Statistica 7*, позволившие установить зависимости получения оптимальных составов МТТ с учетом производительности гидравлической брикетирующей установки марки ГБУМТ-1 не менее 1,01 т/ч при плотности топлива $0,86$ т/м³ и влажности смеси, равной $39,1 \pm 0,9$ %, в диапазоне изменения доли коммунальных отходов в виде осадка сточных вод от 32,8–48,6 % и доли углеводородсодержащих отходов в пределах 3–7,9 %;

– методика определения технологических параметров производства многокомпонентного твердого топлива с использованием выведенного уравнения регрессии в качестве целевой функции, позволяющей ограничивать приземную безразмерную концентрацию выбросов вредных веществ для трехкомпонентного брикетированного твердого топлива на уровне от 0,815 до 1,0;

– математическая модель процесса образования вредных выбросов (NO , CO , SO_2 и твердых частиц) при сжигании разработанного многокомпонентного твердого топлива в слоевых топках и выявления аналитических зависимостей максимальной приземной безразмерной концентрации q выбросов от доли компонента в виде осадка сточных вод x_2 и доли углеводородсодержащей компоненты x_3 в брикетированном топливе, что позволило установить, что кривая зависимости $q(x)$ для многокомпонентного твердого топлива имеет минимум при доле осадка сточных вод в топливе, равной 0,36, и содержании углеводородсодержащих отходов 0,024;

– новая технология брикетирования, обеспечивающая снижение удельных энергетических затрат на сушку многокомпонентного твердого топлива на 15,2 % по сравнению с традиционными технологиями получения гранулированного и брикетированного топлива;

– имитационная модель технологического процесса производства многокомпонентного твердого топлива, позволившая определить оптимальное соотношение компонентов брикетированной массы при содержании в смеси осадков сточных вод не более 48 %, древесных отходов – не менее 49 % и отходов нефтепродуктов – не более 3 %, что обеспечивается влажностью брикетированной смеси в пределах 38–43 %, при которой часовая производительность установки по изготовлению твердого топлива будет оптимальной и составит не менее 1,01 т/ч при плотности топлива 0,86 т/м³ и удельной величине энергозатрат на его производство 29,7 кВт·ч на тонну топлива.

Личный вклад соискателя ученой степени. Основные теоретические и экспериментальные исследования, обобщенные в представленной работе, выполнены соискателем лично на созданных экспериментальных установках и внедренных опытно-промышленных образцах, а также реализованные на брикетированном оборудовании и электрогидравлической установке.

Основным соавтором ряда научных результатов, представленных в диссертации, и опубликованных статей по теме диссертационной работы является научный консультант академик НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор Б. М. Хрусталеv.

В проведении отдельных аналитических и экспериментальных исследований принимали участие кандидаты технических наук Ю. А. Пшеничнов, С. А. Филатов, Р. Н. Вострова, результаты совместного сотрудничества нашли отражение в написании ряда статей, научных отчетов и тезисов докладов.

Лично соискателем разработаны основные положения, подготовлены и проведены теоретические и экспериментальные исследования по подбору оптимального состава компонентов, выполнены моделирование, расчеты оптимальных режимов и составов брикетированного твердого топлива, а также расчеты и моделирование образования выбросов вредных веществ от сжигания многокомпонентного топлива, анализ и интерпретация результатов исследования, разработка новых составов МТТ, исследование свойств, оптимизация составов и технологии их получения, практическая апробация и применение новых видов топлива. По результатам исследования разработаны и зарегистрированы технические условия ТУ ВУ 490319372.002–2021 (рег. № 063905).

На всех этапах теоретических и практических исследований соискатель осуществлял формулировку моделей, подготовку и анализ исходных параметров, проведение численных исследований, анализ полученных результатов и их сопоставление с экспериментальными данными. Осуществлены обработка, верификация и проверка адекватности полученных опытно-промышленных и экспериментальных данных с использованием компьютерных программ базового *Microsoft Windows, Mathcad, Statistica 7* и т. п. Выполнены математическое обоснование и оптимизация режимов и параметров брикетирования многокомпонентных смесей с использованием имитационной модели (ИМ) технологического процесса опытно-промышленной установки, реализованной в пакете автоматизации имитационного моделирования *GPSS World*. Также проведены оценки погрешностей, устойчивости результатов моделирования, чувствительности откликов к изменениям входных параметров и сформулированы выводы.

Разработаны устройства для реализации технологии получения брикетированного МТТ с использованием производственных и коммунальных отходов в виде: опытно-промышленной установки по производству брикетированного твердого топлива на основе шнекового пресса многокомпонентного топлива (ПМТ-1); гидравлической брикетирующей установки циклического типа работы (ГБУМТ-1); передвижной установки по переработке отходов (УПНДО-0,35); установки электрогидравлической подготовки отходов (ЭГУПО-1); комплекса оборудования вспомогательного назначения.

Произведен технико-экономический расчет себестоимости производства разработанного МТТ и периода возврата инвестиций для опытно-промышленной установки с использованием гидравлической установки ГБУМТ-1.

Автором осуществлено внедрение результатов диссертационного исследования в образовательную деятельность, в организациях, осуществляющих проектирование, а также в производство на ряде предприятий Республики Беларусь и Сербии.

Результаты работы подтверждены патентами, заявками на изобретение, справками и актами внедрения.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов. Результаты работы доложены и обсуждены на: VI, IX–XII Международных научно-практических конференциях «Проблемы безопасности на транспорте» (секция «Энергетическая и экологическая безопасность транспорта») (Гомель: БелГУТ, 2012 и 2019–2022); II Международной научно-практической конференции «Трансграничное сотрудничество в области экологической безопасности и охраны окружающей среды» (Гомель: Гомельский обл. комитет природн. ресурсов и охраны окр. среды, БелГУТ, 2012); X Международной научно-практической конференции «Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии» (Гродно: ГрГУ, 2013); XI и XII Международных научно-технических конференциях (Минск, 2013, 2014); IV Międzynarodowa Konferencja Naukowa “Społeczeństwo i gospodarka w obywatelstwa XXI wieku. Nauka narzec zspoleczeństwa i biznesu” (Польша, Белостокский государственный политехнический университет, 2014); Международной научной конференции «Технология строительства и реконструкции» (Минск, 2015); Международной научно-практической конференции «Инновационные решения проблем экономики знаний Беларуси и Казахстана» (Минск: БНТУ, 2016); Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию Белорусского национального технического университета, 100-летию кафедры «Гидротехническое и энергетическое строительство, водный транспорт и гидравлика», 90-летию кафедры «Теплогасоснабжение и вентиляция» (Минск: БНТУ, 2020); II Международной научно-практической конференции «Научно-технический прогресс в жилищно-коммунальном хозяйстве» (Минск: Институт ЖКХ НАН Беларуси, 2020); республиканской бирже деловых контактов (Гомель, Центр научно-технической и деловой информации, 2020); II Международном научно-практическом семинаре «Европейские инновационные технологии в строительстве и инженерии окружающей среды» (совместный семинар, организованный Грузинским техническим университетом (Грузия) и Белостокским технологическим университетом (Польша), 2021); IV Международной научно-практической конференции ICER–2021 «Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания» (Брест: БрГТУ, 2021, 2022); Международных научно-технических конференциях «Инновационные технологии в водном, коммунальном хозяйстве и водном транспорте» (Минск: БНТУ, 2021, 2022).

Опубликованность результатов диссертации. Основные положения диссертации опубликованы в 52 научных работах, в том числе в 19 статьях в рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК Республики Беларусь, 26 материалах конференций, тезисах докладов и опубликованных материалах исследований, четырех патентах Республики Беларусь на изобретения, одной научной монографии, двух технических условиях на производство многокомпонентного топлива.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, восьми глав с краткими выводами по каждой главе, заключения, списка использованных источников, списка публикаций автора и приложений. Полный объем диссертации составляет 334 страницы. Основное содержание изложено на 229 страницах машинописного текста. Работа включает 99 иллюстраций на 27 страницах, 42 таблицы на 14 страницах, список использованных источников из 240 наименований на 16 страницах, список публикаций автора из 52 наименований на 6 страницах и 18 приложений, состоящих из 82 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В разделах **«Введение»** и **«Общая характеристика работы»** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, перечислены основные результаты, выносимые на защиту, показана их научная новизна и практическая значимость.

В первой главе **«Анализ состояния энергосбережения и проблемы использования в энергетических целях вторичных горючих энергетических ресурсов»** представлены обзор и анализ энергосбережения с учетом энергетической ситуации, роста численности населения, роста промышленного и сельскохозяйственного производства в мире и Республике Беларусь.

Рассмотрены структура топливно-энергетического комплекса Республики Беларусь и роль местных возобновляемых ресурсов в энергетическом балансе страны. Выполнен анализ ресурсно-сырьевой базы, пригодной для многокомпонентного брикетирования, и осуществлен мониторинг статистических данных по образованию и использованию исследуемых отходов на территории Беларуси. Впервые представлены систематизированные исторические аспекты возникновения и развития брикетирования (за последние 100 лет) на территории Белорусской ССР и современной Республики Беларусь [1].

Представлены обзор и анализ научно-технических, патентных и литературных сведений по проблематике, дана оценка предпосылкам развития производства многокомпонентного брикетирования [1, 2, 16–20].

Представлен стратегический путь развития энерго- и ресурсосбережения и улучшения экологической обстановки при использовании горючих ВЭР в целом по республике, а также рассмотрен и отмечен большой вклад в исследования видных белорусских и зарубежных ученых, исследователей и практиков [1, 5, 6, 11, 12, 51, 52].

По результатам анализа основных выявленных проблем переработки, не нашедших технологического применения горючих отходов сформулирована цель и определены задачи, решение которых необходимо для ее достижения. На рисунке 1 представлена структурно логическая схема исследования.

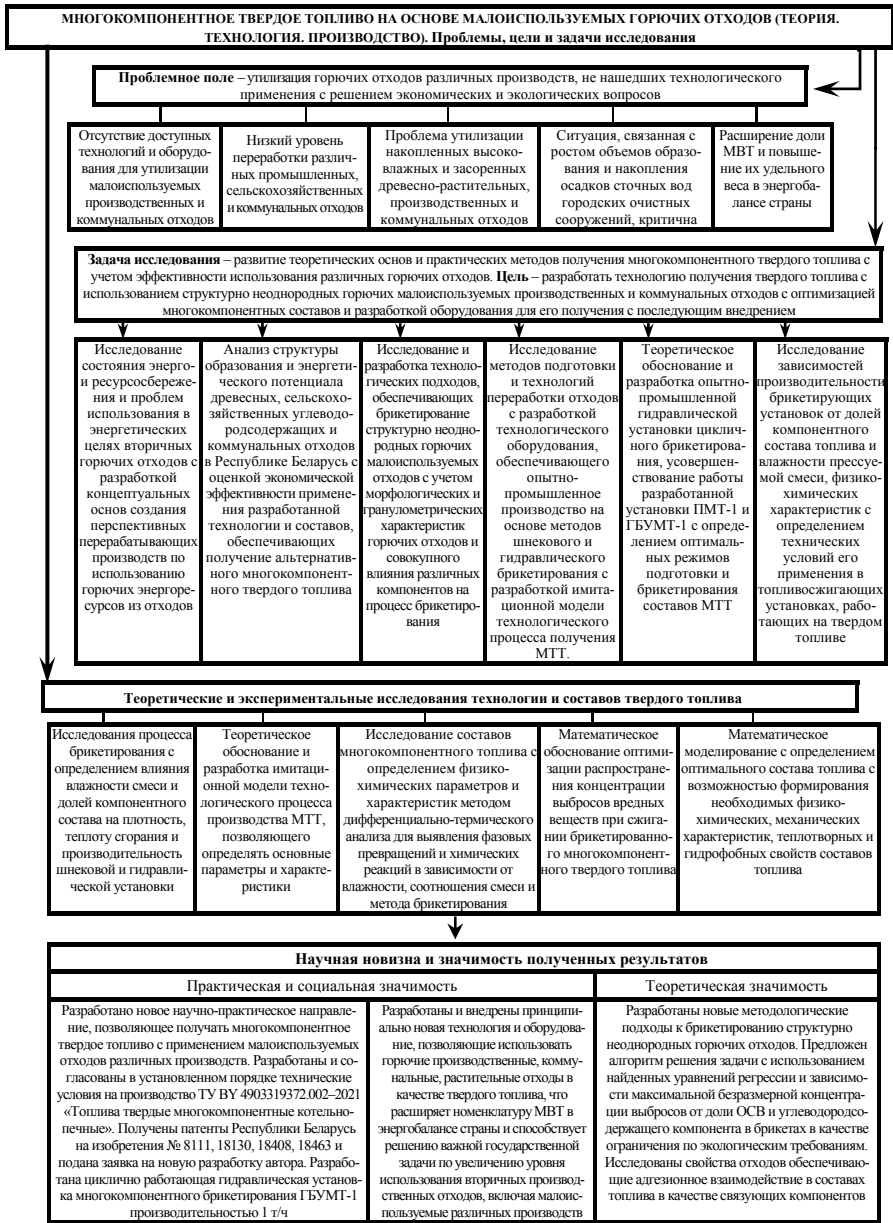


Рисунок 1 – Структурно-логическая схема диссертационной работы

Во второй главе «Технология и оборудование, применяемые для производства многокомпонентного твердого топлива» приведены сведения о разработанной технологической схеме производства МТТ с учетом основного комплекса технологического оборудования. Представлены устройство, основные характеристики и типы оборудования, необходимого для подготовки компонентов смеси к брикетированию, с учетом разработанного технологического процесса получения брикетированного МТТ [24]. Рассмотрены устройство и принцип работы установки с описанием технологии брикетирования (рисунок 2) с учетом этапов подготовки отходов (измельчение, удаление механических примесей, электрогидравлическая обработка), принципов дозирования и смешивания компонентов, особенности брикетирования массы в различные формы с образованием и без образования внутреннего сквозного продольного отверстия в формуемом брикете. Представлены основные подходы, используемые при сушке брикетов в естественных условиях и сушильной камере до регламентируемой влажности 20 %. Определены параметры брикетируемости смесей и их влияние на качественные характеристики брикета с применением структурно неоднородного гранулометрического состава отходов и влажности смеси в различных брикетирующих установках [1, 6, 10–13, 18, 20, 28–37, 43–46].

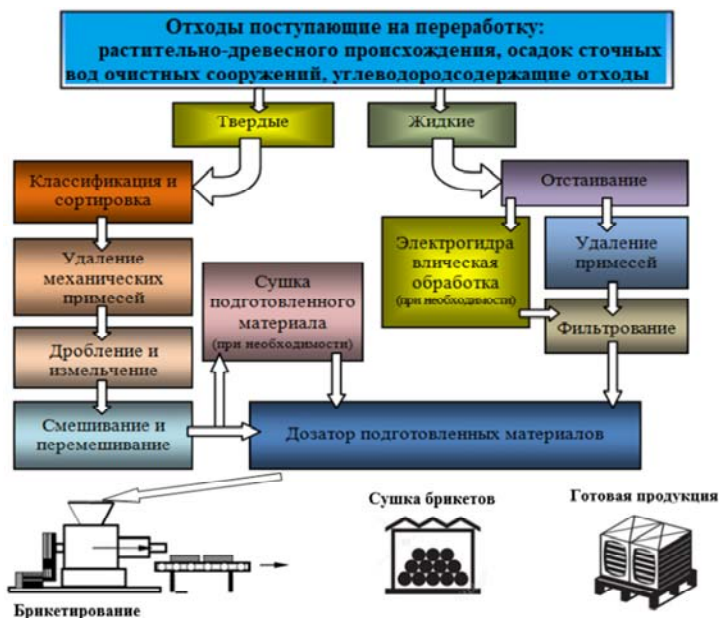
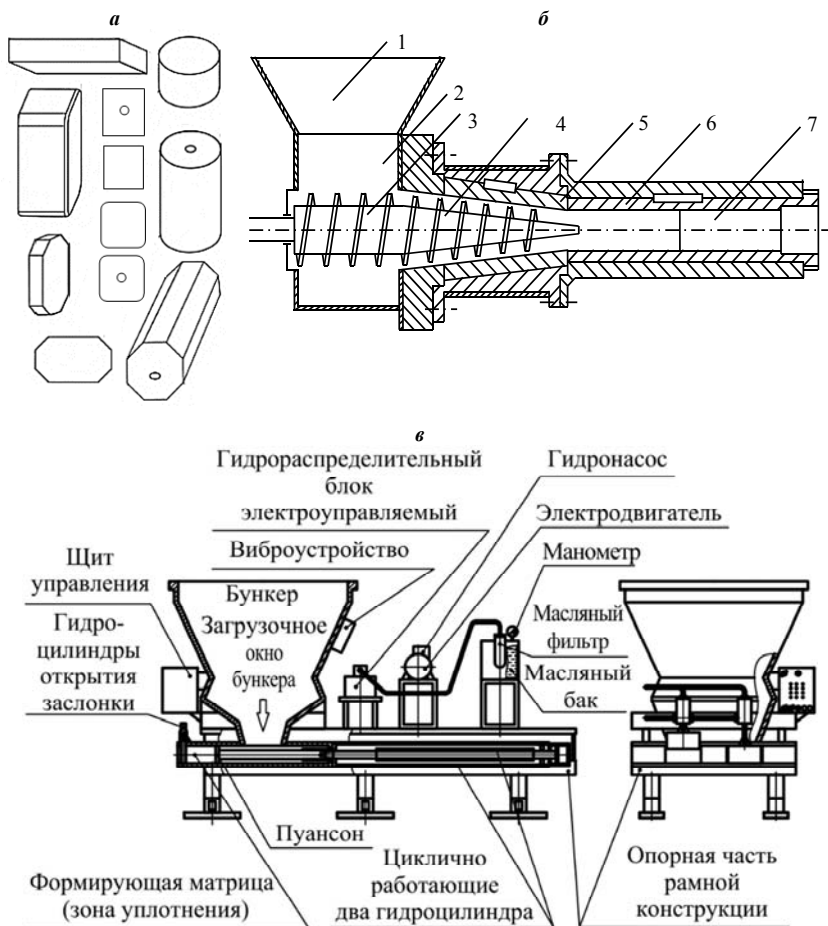


Рисунок 2 – Принципиальная технологическая схема получения МТТ

На рисунке 3 представлены виды форм получаемых брикетов (*a*), устройство основных рабочих органов шнековой (*б*) и циклично работающей гидравлической (*в*) брикетирующих установок, разработанных автором [1, 13].



a – виды форм брикетов, получаемых при брикетировании установками ПМТ-1 и ГБУМТ-1;

б – шнековая брикетирующая установка марки ПМТ-1:

1 – приемный бункер; 2 – камера; 3 – подающая часть шнека;

4 – прессующая часть шнека; 5 – уплотнительная коническая втулка;

6 – матрица-фильтра, придающая форму брикету; 7 – рабочий канал;

в – гидравлическая брикетирующая установка марки ГБУМТ-1

Рисунок 3 – Схема устройства брикетирующих установок и геометрические формы получаемого МТТ

В третьей главе «Проведение эксперимента, математическое моделирование и статический анализ результатов оптимизации» изложена методика проведения исследований и описана экспериментальная брикетировочная установка, созданная для получения многокомпонентного твердого топлива на основе смеси растительно-древесных, коммунальных и углеводородсодержащих отходов. В ходе проведения эксперимента выявлены общие принципы и закономерности процесса шнекового брикетирования многокомпонентных составов, в том числе при различной влажности смесей и разном соотношении компонентного состава. Исследовано совокупное влияние различных процессов, протекающих в установке при получении многокомпонентного твердого топлива, а также осуществлена оптимизация режимов работы установки по производству этого топлива.

В силу сложности и неизученности технологического процесса шнекового брикетирования многокомпонентных смесей, в составе которых используются структурно неоднородные горючие отходы, имеющие высокодисперсные смеси, избыточно насыщенные влагой, математическая модель построена на основе проведенных опытов, целью которых являлась оптимизация режима работы установки по производству многокомпонентного твердого топлива, позволяющего получать максимальное количество топлива в единицу времени (производительность) с оптимальной плотностью брикета.

На практике установлено, что на производительность получения брикета P и показатель качества в виде его плотности U наибольшее влияние оказывает содержание в формуемой смеси осадков сточных вод a , древесных отходов z и отходов нефтепродуктов c при массовой влажности смеси в пределах 38–43 %. Давление прессования и температура сырья во время эксперимента не изменяются. Входными параметрами являются: осадки сточных вод a ; древесные отходы z ; углеводородсодержащие отходы c в смеси. Выходными параметрами являются производительность получения брикета P и показатель его плотности U .

При используемом подходе моделируется внешнее функционирование установки по принципу «черного ящика». На рисунке 4 представлена графическая интерпретация модели эксперимента, выбор критериев оптимизации

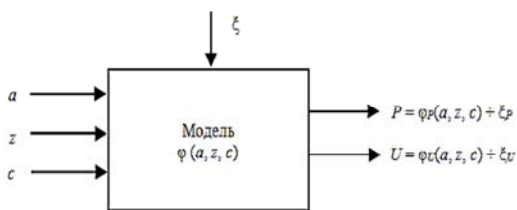


Рисунок 4 – Кибернетическое представление эксперимента

и факторов, влияющих на производительность и плотность при влажном брикетировании, которые имеют следующие обозначения: a , z , c – входные переменные (факторы); P , U – выходные переменные (отклики-системы); ξ – ошибка,

помеха, вызываемая наличием случайных факторов; φ – оператор, моделирующий действие реальной системы, определяющий зависимость отклика от факторов; ξ_P, ξ_U – ошибка измерения P, U , вызванная наличием случайных факторов; φ_P, φ_U – оператор, определяющий зависимость откликов P и U системы от факторов [13–17, 37, 39].

Использование ротатабельного планирования второго порядка позволило получить математическое описание протекающего в установке технологического процесса в виде уравнения множественной регрессии второго порядка. Для числа факторов $n = 3$ математическая модель будет иметь вид

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1x_2 + b_5x_1x_3 + b_6x_2x_3 + b_7x_1^2 + b_8x_2^2 + b_9x_3^2, \quad (1)$$

где $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$ – коэффициенты уравнения множественной регрессии.

Для удобства расчетов масштаб факторов выбираем так, чтобы значение верхнего уровня было равно +1, а нижнего –1. С этой целью делаем преобразование начала координат факторов и переходим к нормированному (стандартному) масштабу

$$x_i = \frac{(\tilde{x}_i - \tilde{x}_{i0})}{I}, \quad (2)$$

где x_i – нормированное значение; \tilde{x}_i – натуральное значение; \tilde{x}_{i0} – значение нулевого уровня; I – интервал варьирования, $I = |\tilde{x}_i - \tilde{x}_{i0}|$.

Использование ротатабельного планирования второго порядка позволило получить математическое описание протекающего в установке технологического процесса в виде уравнения множественной регрессии, определяющего зависимость производительности получения брикета от содержания в формуемой смеси осадков сточных вод, древесных отходов и отходов нефтепродуктов.

Оценки коэффициентов уравнения регрессии и их значимости приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Матрица расчета оценок коэффициентов уравнения регрессии и оценки их значимости

	Критерий Стьюдента: $f = 5, \alpha = 0,05, t_{кр} = 2,571$			
	x_0	x_1	x_2	x_3
b_i	-17,803	-0,3559	1,6582	-0,5296
t_i	227,061	7,257	33,814	10,799
Вывод	зн	зн	зн	зн

Коэффициенты b_{11} , b_{22} , b_{33} , b_{12} , b_{13} , b_{23} незначимы и были исключены из математической модели (1).

Уравнение регрессии, определяющее зависимость производительности получения брикета от содержания в формуемой смеси осадков сточных вод, древесных отходов и отходов нефтепродуктов, представлено в следующем виде:

$$y_1(x_1, x_2, x_3) = -17,80 - 0,356 x_1 + 1,66 x_2 - 0,53 x_3. \quad (3)$$

Модель является адекватной при выбранном уровне значимости $\alpha = 0,05$, так как $2,974 \leq F_{кр} = 5,05$.

Перейдем в этой формуле от безразмерных факторов x_1 , x_2 и x_3 к размерным a , z и c , подставив в уравнение выражение (2):

$$x_1 = \frac{a-43}{7}; x_2 = \frac{z-41}{6}; x_3 = \frac{c-2}{1}, \quad (4)$$

и получим математическую модель производительности получения брикета

$$P(a, z, c) = 9,1 - 0,05 a + 0,276 z - 0,53 c. \quad (5)$$

На рисунке 5 представлены зависимости производительности брикетирования P от процентного содержания в формуемой смеси осадков сточных вод a , древесных отходов z и отходов нефтепродуктов c в виде поверхностей в трехмерной системе координат.

Из данных, представленных на рисунке 5, следует, что с ростом процентного содержания в формуемой смеси древесных отходов z от 31 до 50 % производительность P экспериментальной брикетирующей установки для получения многокомпонентного твердого топлива увеличивается.

При увеличении в смеси процентного содержания осадков сточных вод a в диапазоне от 31 до 50 % происходит незначительное уменьшение (на 5 %) производительности установки.

Увеличение содержания в смеси отходов нефтепродуктов от 0,3 до 3,7 % также приводит к уменьшению производительности установки для получения многокомпонентного твердого топлива.

Для описания области оптимума использован рототабельный центральный композиционный план. Матрица планирования и результаты составления математической модели оценки показателя плотности брикета, расчет оценок коэффициентов уравнения регрессии с оценкой их значимости приведены в таблице 2.

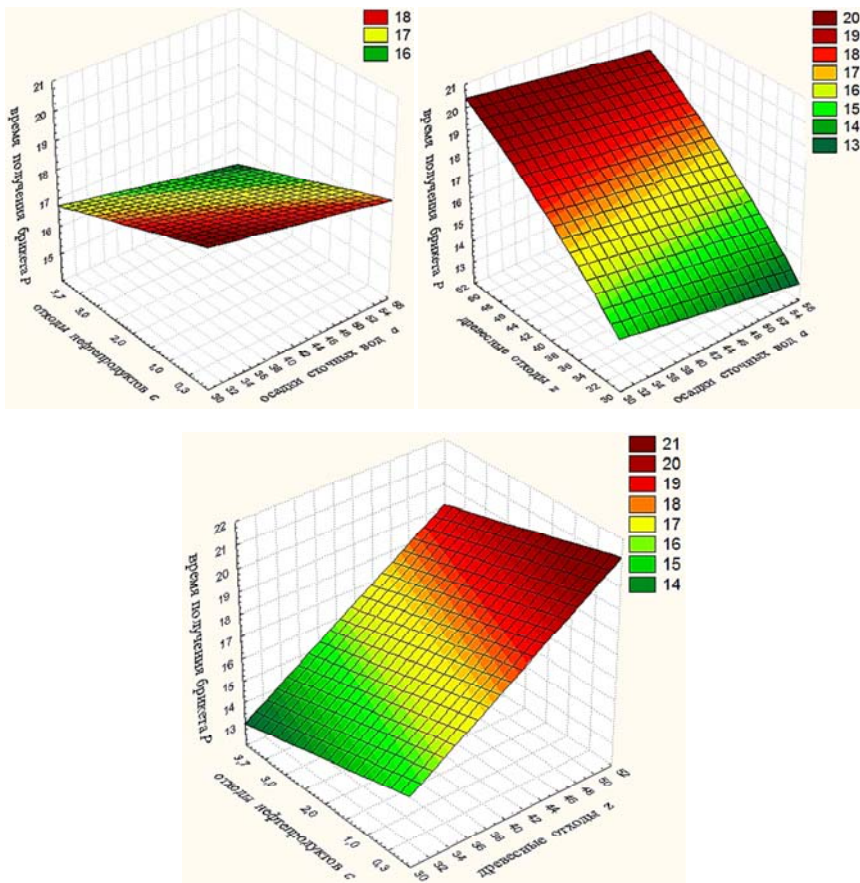


Рисунок 5 – Зависимость производительности получения брикета P от процентного содержания осадков сточных вод a , древесных отходов z и отходов нефтепродуктов c

Таблица 2 – Матрица расчета оценок коэффициентов уравнения регрессии и оценки их значимости

	Критерий Стьюдента $f = 5, \alpha = 0,05, t_{кр} = 2,571$									
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1^2	x_2^2	x_3^2	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3
b_i	0,90754	0,02779	0,03111	0,00052	-0,02931	-0,01247	-0,02257	0,03333	0,00714	-0,01667
t_i	209,33	10,58	11,84	0,20	11,59	4,93	8,93	10,61	2,27	5,31
Вывод	ЗН	ЗН	ЗН	ЗН	ЗН	ЗН	ЗН	ЗН	ЗН	ЗН

Все коэффициенты модели значимы.

Уравнение регрессии, определяющее зависимость плотности брикета от содержания в формуемой смеси осадков сточных вод, древесных отходов и отходов нефтепродуктов [15–17], представлено в следующем виде:

$$y_2(x_1, x_2, x_3) = 0,91 + 0,0278 x_1 + 0,0311 x_2 + 0,00050 x_3 - 0,0293 x_1^2 - 0,0125 x_2^2 - 0,0226 x_3^2 + 0,0333 x_1 x_2 + 0,0071 x_1 x_3 - 0,0167 x_2 x_3. \quad (6)$$

Модель является адекватной при выбранном уровне значимости $\alpha = 0,05$, так как $3,064 \leq F_{кр} = 5,05$.

Перейдем в этой формуле от безразмерных факторов x_1 , x_2 и x_3 к размерным a , z и c , подставив в уравнение выражение (2):

$$x_1 = \frac{a-43}{7}, \quad x_2 = \frac{z-41}{6}, \quad x_3 = \frac{c-2}{1},$$

и получим математическую модель показателя плотности брикета [15–17]:

$$U(a, z, c) = -0,734 + 0,02083 a + 0,00501 z + 0,1608 c - 0,000598 a^2 - 0,0003460 z^2 - 0,02257 c^2 + 0,000794 a z + 0,001020 a c - 0,002778 z c. \quad (7)$$

На рисунке 6 представлены полученные зависимости плотности брикета U от процентного содержания в формуемой смеси осадков сточных вод a , древесных отходов z и отходов нефтепродуктов c в виде поверхностей в трехмерной системе координат.

Из представленных зависимостей следует, что при увеличении в смеси процентного содержания осадков сточных вод a в диапазоне от 31 до 50 % и древесных отходов z от 31 до 50 % плотность брикета U повышается.

С ростом содержания в смеси отходов нефтепродуктов c в диапазоне от 0,3 до 1,7 % плотность брикета U увеличивается, а от 1,7 % до 3,7 % – уменьшается.

Анализ полученных зависимостей, представленных на рисунках 5 и 6, показывает, что достижение заданных параметров качества по плотности многокомпонентного топлива и производительности брикетирующей шнековой установки осуществляется за счет применения в составе древесных отходов в соотношении с диапазоном варьирования долей коммунальных отходов в виде осадка сточных вод от 31 до 50 % и долей углеводородсодержащих отходов в пределах 1–3 % при влажности формуемой смеси $42,1 \pm 0,9$ % [13, 15, 17].

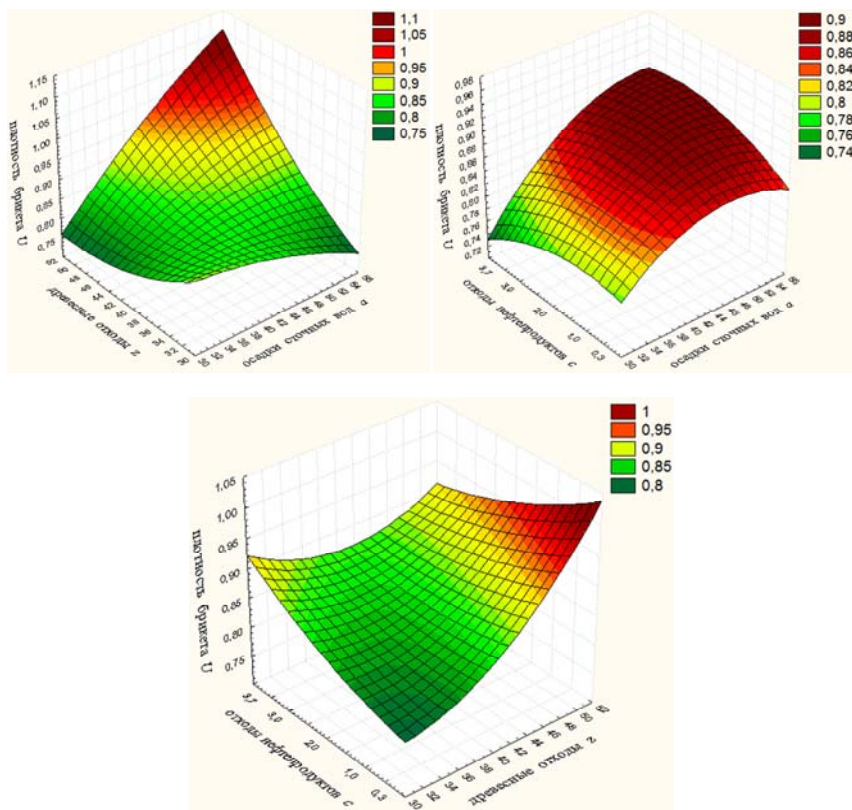


Рисунок 6 – Зависимость плотности брикета U от процентного содержания осадков сточных вод a , древесных отходов z и отходов нефтепродуктов c

В четвертой главе «Имитационная модель технологического процесса производства многокомпонентного твердого топлива» с целью получения возможности рассматривать различные варианты моделирования экспериментальными исследованиями, с учетом рабочих параметров технологического процесса производства МТТ, реализованного на опытно-промышленной установке, автором представлена модель технологического процесса, реализованная с применением теории имитационного моделирования.

Для моделирования технологического процесса по производству МТТ применен алгоритм расчета математической модели, реализованный в пакете автоматизации имитационного моделирования *GPSS World*. Блок-схема технологического процесса по производству твердого топлива, разработанная на основе работы промышленной установки, представлена на рисунке 7.

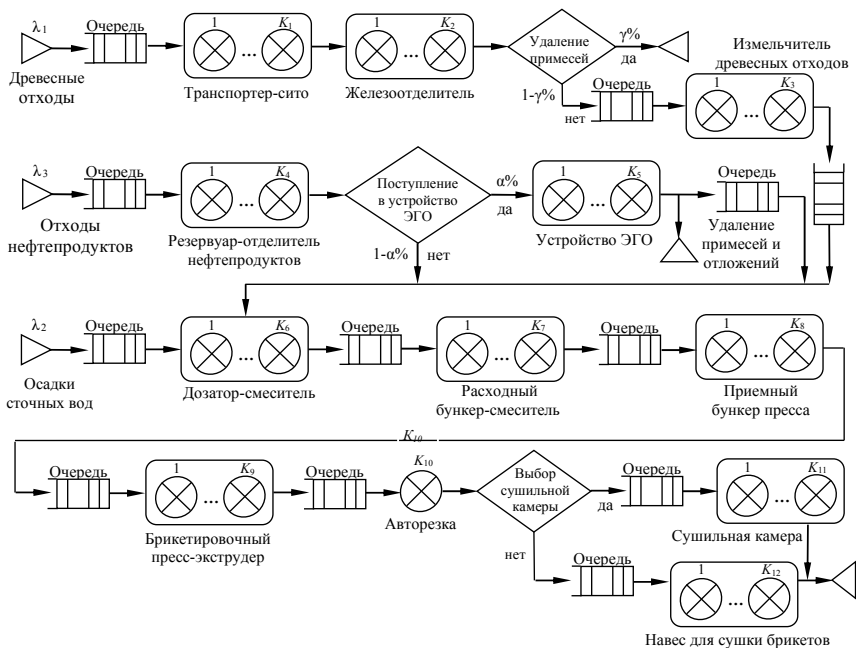


Рисунок 7 – Блок-схема технологического процесса, обеспечивающего производство многокомпонентного твердого топлива

Испытание ИМ технологического процесса по производству твердого топлива включало два этапа: верификацию и проверку адекватности. Параметрами модели X (которые можно изменять в ходе натуральных экспериментов) являются: 1) интенсивность λ_i поступления компонентов брикетируемой массы отходов: λ_1 – древесных, λ_2 – осадков сточных вод (ОСВ), λ_3 – углеводородсодержащих (УВС) отходов; 2) соотношение компонентов брикетируемой массы отходов: древесных (ρ_1 %), ОСВ (ρ_2 %) и углеводородсодержащих отходов (ρ_3 %).

Переменными модели G (которые можно измерять, но нельзя ими управлять, принимают значения, характерные только для данного объекта моделирования или условий его функционирования) являются: среднее время $t_i \pm \sigma_i$ выполнения работ технологического процесса оборудованием. Выходными характеристиками – откликами модели Y – являются статистики моделирования: коэффициенты загрузки оборудования (ψ_k); влажность брикетируемой массы при поступлении и в оборудовании (w_i); производительность установки (P).

В качестве показателей эффективности, определяющих цели моделирования, рассматриваются: влажность брикетируемой массы, производительность установки и оптимальное соотношение компонентов состава брикетируемой массы: ОСВ, древесных отходов и УВС отходов.

Для проверки адекватности проверяется гипотеза о близости средних значений каждого n -го отклика модели \bar{Y}_n известным средним значениям n -го отклика реального объекта $\bar{Y}_{Q_k}^*$. Проводят N_1 опытов на реальном объекте исследований – опытно-промышленной установке и формируют выборки значений $\{\bar{Y}_{Q_{nk}}^*\}$, $k = \overline{1, N_1}$. Выполняют N_2 опытов на имитационной модели системы и получают по тем же n -м откликам модели выборки значений $\{Y_{nk}\}$; $k = \overline{1, N_2}$. Обычно объемы выборок должны быть одинаковы ($N_1 = N_2$), в ряде случаев $N_1 > N_2$. По выборкам вычисляются оценки математического ожидания и дисперсии откликов модели и системы с помощью следующих соотношений:

$$\begin{aligned} \bar{Y}_{Q_k}^* &= \frac{1}{N_1} \sum_{k=1}^{N_1} Y_{Q_{nk}}^* ; D_n^* = \frac{1}{N_1 - 1} \sum_{k=1}^{N_1} (Y_{Q_{nk}}^* - \bar{Y}_{Q_k}^*)^2 ; \\ \bar{Y}_n &= \frac{1}{N_2} \sum_{k=1}^{N_2} Y_{nk} ; D_n = \frac{1}{N_2 - 1} \sum_{k=1}^{N_2} (Y_{nk} - \bar{Y}_n)^2 . \end{aligned} \quad (8)$$

Основой проверки гипотезы является разность $E_n = (\bar{Y}_n - \bar{Y}_{Q_n}^*)$, оценкой дисперсии которой будет

$$D_{an} = \frac{(N_1 - 1)D_n^* + (N_2 - 1)D_n}{N_1 + N_2 - 2} . \quad (9)$$

Величины E_n и D_{an} являются статистиками независимыми, поэтому можно использовать t -статистику:

$$t_n = (\bar{Y}_n - \bar{Y}_{Q_n}^*) \sqrt{\frac{N_1 N_2}{D_{an}(N_1 + N_2)}} . \quad (10)$$

При числе степеней свободы $\nu = N_1 + N_2 - 2$ и уровне значимости $\alpha = 0,05$ по таблицам распределения Стьюдента находят критическое значение ($t_{кр}$). Если выполняется неравенство $t_n \leq t_{кр}$, то гипотеза о близости средних значений n -го отклика модели и реального объекта принимается.

Только при близости откликов по всем компонентам векторов Y и \bar{Y}_Q^* можно говорить об адекватности модели и реального объекта.

Проверка адекватности имитационной модели технологическому процессу по производству твердого топлива проведена на реальных данных по статистике работы опытно-промышленной установки.

Для проверки адекватности проверена гипотеза о близости средних значений каждого отклика модели \bar{Y} известным средним значениям отклика реального объекта \bar{Y}^* . Проведено $N_1 = 5$ опытов на опытно-промышленной установке и сформирована выборка значений $\{Y_i^*\}$, $i = \overline{1,5}$. На имитационной модели проведено $N_2 = 5$ опытов, по откликам модели получены выборки значений $\{Y_i\}$; $i = \overline{1,5}$.

При числе степеней свободы $\nu = N_1 + N_2 - 2 = 8$ и уровне значимости $\alpha = 0,05$ по таблицам распределения Стьюдента определено критическое значение ($t_{кр} = 1,85$). Сравнивая каждое из значений t -статистики с $t_{кр} = 1,85$, при числе степеней свободы $\nu = N_1 + N_2 - 2 = 8$ и уровне значимости $\alpha = 0,05$, гипотеза о близости средних значений откликов модели и реальной опытно-промышленной установки принимается, так как $t_n \leq t_{кр}$. Таким образом, можно говорить об адекватности имитационной модели технологического процесса по производству твердого топлива и реального объекта – опытно-промышленной установки.

После завершения проверки адекватности ИМ технологического процесса по производству твердого топлива проведена оценка: погрешности имитации, обусловленной наличием в ИМ генераторов псевдослучайных чисел; длины переходного периода в модели, устойчивости результатов моделирования; чувствительности откликов ИМ к изменениям входных параметров модели.

Так, в результате исследования составов топлива получены уравнения регрессии, характеризующие степень влияния каждого компонента и их попарное сочетание на показатели производительности брикетирования и плотность получаемого топлива. Использование современных математических инструментов в виде модуля расчета смесей в разделе «Промышленная статистика» лицензионной программы *Statistica 7* позволило получить уравнения регрессии с учетом четырехфакторного анализа, учитывающего входные переменные – влажность смеси (w), ОСВ (a), древесные отходы (z), углеводородсодержащие отходы (c) [13–17, 37, 39]:

– уравнение регрессии для определения производительности P брикетирования в виде

$$P(w, a, z, c) = 5,082 w + 20,88 a + 20,69 z + 11,03 c + 15,11 w z + 19,50 w c, \text{ кг/мин}; \quad (11)$$

– уравнение регрессии для определения плотности U брикетированного топлива в виде

$$U(w, a, z, c) = 0,526 w + 0,922 a + 0,924 z + 0,5941 c, \text{ т/м}^3. \quad (12)$$

С использованием полученных уравнений регрессии построены поверхности отклика с применением метода Гиббса–Розебома и определены оптимальные пределы желаемого качества, позволяющие обеспечить высокие параметры соответствия твердого брикетированного топлива. Визуализация полученных моделей осуществлена с использованием функций электронных таблиц MSExcel и программы Statistica 7. На рисунках 8, 9 представлены зависимости производительности и плотности брикетов от долевого содержания компонентов.

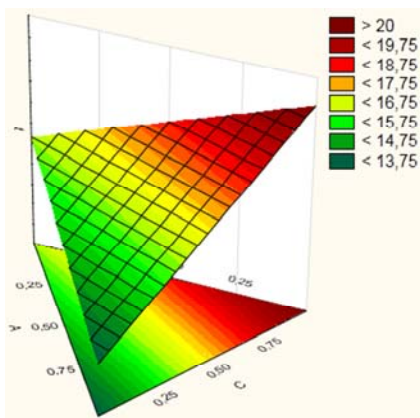


Рисунок 8 – Зависимость производительности установки брикетирования (кг/мин) от долевого содержания w (A), z (C), a (B)

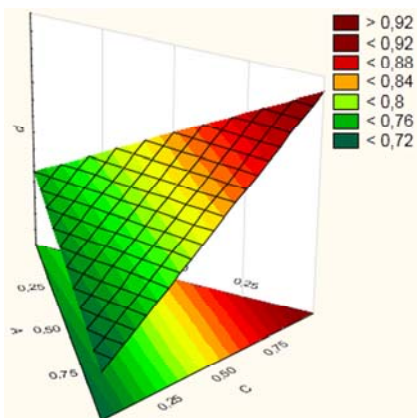


Рисунок 9 – Зависимость плотности брикетов (т/м³) от долевого содержания w (A), z (C), a (B)

В результате проведения имитационных экспериментов на разработанной ИМ технологического процесса брикетирования был выполнен подбор оптимальных соотношений многокомпонентных составов, определены максимальная производительность установки, плотность брикетирования топлива и энергозатраты на его производство. Совместный анализ полученных факторных зависимостей, представленных на рисунках 8 и 9, позволяет наглядно определить, что оптимальное соотношение компонентов брикетируемой массы при содержании в смеси осадков сточных вод не более 48 %, древесных отходов – не менее 49 % и отходов нефтепродуктов –

не более 3 %, обеспечивается оптимальной влажностью брикетируемой смеси в пределах 38–43 %, при которой часовая производительность установки по изготовлению твердого топлива будет не менее 1,01 т/ч, при плотности топлива 0,86 т/м³ и удельной величине энергозатрат на его производство 29,7 кВт·ч на тонну топлива. При этом наибольшее влияние на производительность брикетирования и плотность получаемого топлива оказывает содержание древесных отходов в составе МТТ [13–17].

На рисунке 10 представлены профили влияния компонентов топлива на полученные предсказательные значения и функции желательности.

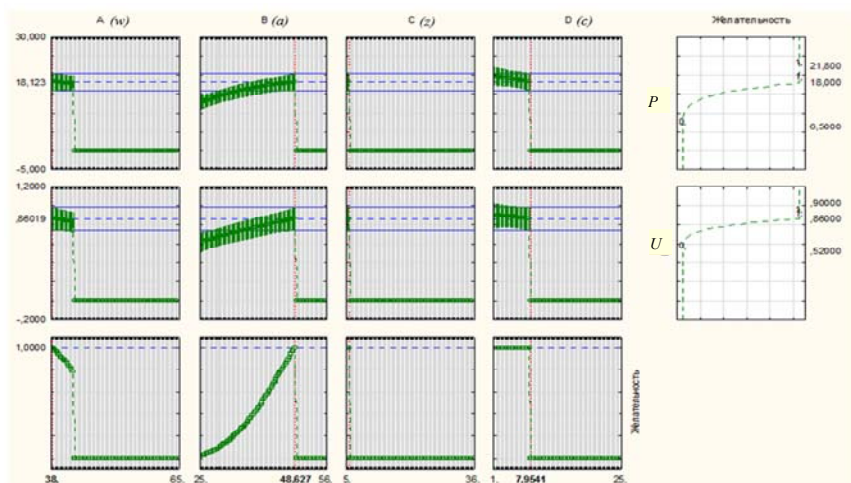


Рисунок 10 – Профили предсказательных значений и функции желательности, отражающие уровень оптимальных значений производительности P и плотности U

Полученные результаты исследования процесса брикетирования смеси древесных, коммунальных и углеводородсодержащих отходов и их анализ, осуществленный с использованием теории планирования эксперимента и нейромоделирования в программе *Statistica 7*, позволил установить, зависимости получения оптимальных составов МТТ с учетом производительности гидравлической брикетирующей установки марки ГБУМТ-1, составляющей не менее 1,01 т/ч, при плотности топлива 0,86 т/м³ и влажности смеси $39,1 \pm 0,9$ % в диапазоне изменения доли коммунальных отходов в виде осадка сточных вод от 32,8–48,6 % и доли углеводородсодержащих отходов в пределах 3–7,9 %.

Таким образом, впервые разработаны математическое обоснование и имитационная модель технологического процесса производства многокомпонентного твердого топлива, с использованием структурно неоднородных

отходов, позволяющие проводить имитационные эксперименты и определять основные параметры производительности, плотности, величины энергозатрат и характеристики технологического процесса [1, 13–20, 39, 40].

В пятой главе «**Расчет теплоэнергетической системы сушки многокомпонентного твердого топлива**» представлены теплотехнические расчеты, позволяющие выполнить сравнение удельных энергозатрат при традиционном сухом и многокомпонентном влажном способах брикетирования [1, 3, 7, 8, 11–15, 29, 30, 32, 33]. Традиционная технологическая схема брикетирования, например древесных отходов с применением технологии *Pini Kay* в условиях «горяче-сухого» брикетирования в шнековом экструдере, дана на рисунке 11.

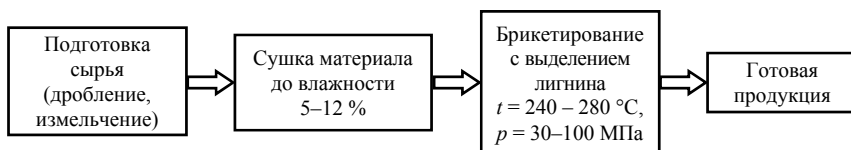


Рисунок 11 – Традиционная технологическая схема брикетирования (*Pini Kay*)

Исходя из представленной схемы технологического процесса, теории и практики «горячего» брикетирования, скорость формования ограничена скоростью процесса пластификации лигнина, а также требуемым временем нахождения топлива в процессе пластификации в обогреваемом канале под соответствующим давлением.

Принимая во внимание принципиальные особенности представленных технологических схем на рисунке 11 и 12, выполнен сравнительный расчет удельных энергозатрат на получение брикетированного твердого топлива с учетом традиционной технологии брикетирования *Pini Kay* и технологии многокомпонентного брикетирования [1].

Тепловой расчет сушки измельченного сырья древесных материалов выполнен с учетом применения прямоточной барабанной сушильной установки марки АВМ-0,65, которая часто используется в составе большинства технологических линий подготовки сырья к брикетированию и гранулированию твердого топлива. С учетом параметров влажности материала поступающего в сушильную установку (начальная влажность $W_1 = 45\%$ и конечная $W_2 = 12\%$), определены требуемые удельные энергозатраты на сушку измельченного сырья хвойных пород древесины, как наиболее часто используемой при брикетировании твердого топлива *Pini Kay*, которые составляют с учетом параметров окружающего воздуха, относительной влажности, температуры сырья и теплоемкости $q = 0,82$ МДж/кг.

Одной из особенностей разработанной технологии методом «холодно-влажного» брикетирования многокомпонентных смесей (рисунок 12) является

отсутствие затрат тепловой энергии в процессе брикетирования, так как связующим компонентом выступает не лигнин, содержащийся в структуре древесины и выделяемый при нагреве и повышенном давлении (t и P) на брикулируемый материал, а вязкие компоненты углеводород-содержащих отходов и мелкодисперсная органическая составляющая ОСВ [1, 11–15, 32, 33].

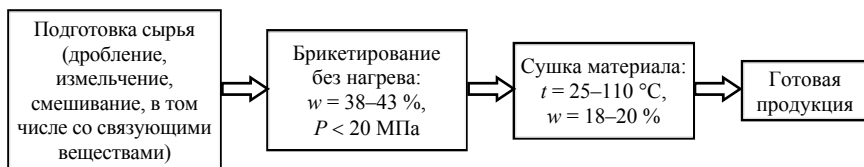
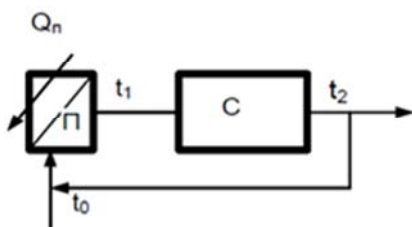


Рисунок 12 – Разработанная технологическая схема брикетирования МТТ



П – подогреватель; С – сушильная камера
Рисунок 13 – Схема конвективной сушильной установки

Использование технологии «холодно-влажного» брикетирования позволяет осуществлять сушку брикета в теплое время года в естественных атмосферных условиях, под навесом, без дополнительных затрат энергии. В холодное время года – в конвективно-радиационной сушилке, периодического действия схема которой представлена на рисунке 13. Работа теплогенератора осуществляется с применением некондиционных

отходов, образующихся при брикетировании и выполнении технологических операций связанных с транспортировкой в пределах производства и сушишкой брикулируемого многокомпонентного твердого топлива [10–13].

С учетом параметров транспортной влажности сформованного многокомпонентного состава, при которых начальная влажность $W_1 = 38\%$ и конечная $W_2 = 20\%$, определены удельные энергозатраты (нетто) на сушку, приведенные к 1 кг высушенного материала, которые составили $q = 0,71$ МДж/кг. Сравнительный анализ показал, что использование технологии получения многокомпонентного брикетирования влажных смесей на 15 % меньше аналогичных затрат при «горяче-сухом» брикетировании опилок древесины хвойных пород с применением технологии *Pini Kay*.

С учетом технологических особенностей конвективной сушильной установки выполнен расчет общих расходов теплоты на сушку, который имеет тепловой потенциал, составляющий 366,9 МДж, или 52 кг у. т. за смену, за счет экономии тепловой мощности при рециркуляции теплоты.

При этом утилизация тепловых ВЭР посредством введения в сушильную камеру конвективно-радиационного потока теплоты отходящих газов обусловливает снижение общего времени сушки с 16 до 12 ч, что обеспечивает 25 % дополнительной экономии топлива [10–13].

В шестой главе **«Определение основных факторов, влияющих на качество и теплоэнергетические характеристики многокомпонентного топлива»** приведены результаты исследований, позволивших выявить наиболее значимые параметры, влияющие на технологические условия подготовки смеси и брикетирование, физико-химические свойства и теплоэнергетические характеристики многокомпонентного твердого топлива.

Для определения качественных параметров выполнены исследования с использованием современного лабораторного оборудования на соответствие МТТ действующим стандартам: СТБ 2055, СТБ 1867, а также межгосударственным стандартам ГОСТ 32975.2, ГОСТ 32985, ГОСТ 32988, ГОСТ 32977, ГОСТ 33106, ГОСТ 33516, ГОСТ 27313, ГОСТ 33255, ГОСТ 33256, ГОСТ 33103.3, ГОСТ 33103.6, ГОСТ 33103, ГОСТ Р 54248, ГОСТ Р 55115, ГОСТ Р 55523 в «НИИ физико-химических проблем» БГУ.

Вместе с тем, учитывая неизученность применения ОСВ в многокомпонентных составах в качестве топлива, проведен ряд дополнительных исследований с применением: атомно-абсорбционного спектрометра марки МГА-915М по методике МВИ.МН 33-69-2010, разработанной РУП «ЦНИИКИВР» (БелГУТ); дериватографа MOM-1500 (Венгрия), методом дифференциально-термического анализа (ИТМО имени А. В. Лыкова НАН Беларуси); ИК-спектрометрии («ИММПС имени В. А. Белого» НАН Беларуси). При этом лабораторным исследованиям подверглись не только сбрикетированные многокомпонентные составы, но и зола, образующаяся от их сжигания.

Анализ всех полученных результатов исследований показал хорошую сличаемость лабораторных исследований с использованием различных методов оценки. Так, с применением наиболее иллюстрирующей термодинамические и эксергетические процессы методики дифференциально-термического анализа (ДТА) выявлены фазовые превращения и химические реакции, протекающие в многокомпонентном топливе при нагревании по термическим эффектам, сопровождающим эти изменения. На основании полученных кривых термографии выполнены стехиометрические расчеты и вычисления процентного содержания различных веществ в составе топлива [14, 16, 17, 20, 23, 37, 39, 47, 48].

На рисунках 14, 15 представлены дериватограммы термического анализа МТТ, изготовленного согласно ТУ ВУ 490319372.002–2021 «Топлива твердые многокомпонентные котельно-печные», которые прошли государственную регистрацию в научно-производственном РУП «БелГИСС»

(№ 063905 от 20.12.2021), где красная линия – потеря веса; синяя – дифференцированная потеря веса (скорость потери); зеленая – ДТА выделения или поглощения теплоты в процессе исследования.

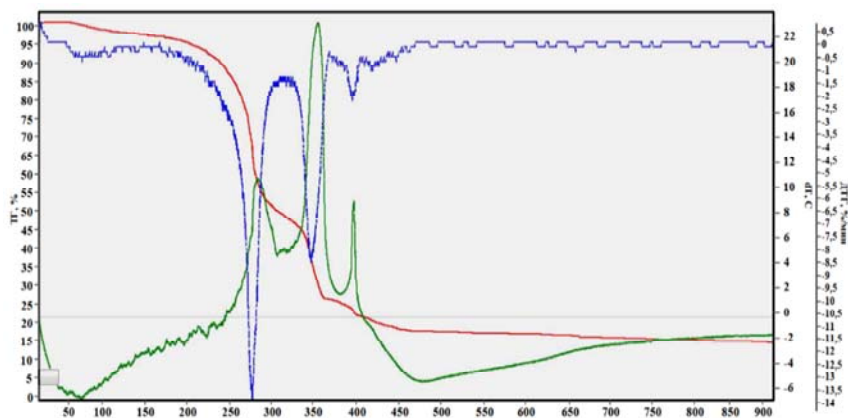


Рисунок 14 – Дериватограмма двухкомпонентного топлива марки МКУ1-1с

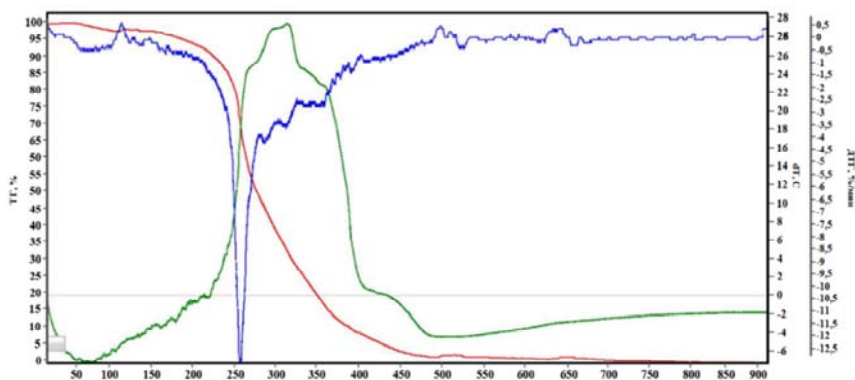


Рисунок 15 – Дериватограмма многокомпонентного топлива марки МКУ3-1с

Результаты термического анализа терморазложения многокомпонентного топлива марки МКУ1-1с (древесные опилки – 50 %, ОСВ очистных сооружений – 50 %) представлены на рисунке 14. Процесс начинается с испарения свободной влаги в пределах 7 %, что заметно по потере массы при достижении максимальной температуры 78 °С. Далее при температуре около 260 °С начинается интенсивная деструкция основных компонентов

топлива и отмечается первое эндотермическое изменение реакции горения при температуре 320 °С.

В результате образуется ступенчатое изменение реакции горения в интервале 260–320 °С, сопровождаемое выделением основной массы летучих веществ и потерей 50 % массы топлива. При этом наблюдаются еще два эндотермических изменения реакции горения, указывающих на прохождение вторичного пиролиза топлива в интервалах $t = 350\text{--}380$ °С, с потерей 20 % массы. Далее при $t = 400\text{--}420$ °С происходит дополнительная потеря 5 % массы летучих продуктов. Зольность этого топлива составила 18 % [14, 17, 29].

В состав исследуемого топлива марки МКУ3-1с (рисунок 15) включены: древесные опилки – 33 %; ОСВ очистных сооружений – 60 %; нефтешламы – 7 %.

Согласно полученной дериватограмме, процесс испарения свободной влаги начинается с возрастанием начальной t и при достижении ею 73 °С испарение заканчивается, в то же время потеря массы на этом участке составила 5 %. В интервале $t = 220\text{--}250$ °С начинается интенсивная деструкция основных компонентов топлива и отмечается эндотермическое изменение реакции горения с возрастанием температуры до $t = 327$ °С. Далее в результате термохимической реакции образуется ступенчатое изменение реакции горения в интервале $t = 260\text{--}330$ °С, сопровождаемое выделением основной массы летучих веществ и потерей 75 % массы топлива. Больше эндотермических изменений реакции горения не наблюдается, что свидетельствует о полном дожиге и хороших показателях качества разработанного топлива. Зольность топлива составила 20 %, что ожидаемо, учитывая сложный состав ОСВ и неизбежное наличие минеральных веществ [14, 17, 29, 39].

Учитывая низкий уровень изученности многокомпонентного топлива с использованием отходов различных производств в части определения параметров и характеристики веществ, образующихся в золе, были проведены исследования минерального остатка золы, образующейся от их сжигания. На рисунке 16 представлены исследования ИК-спектроскопии образцов зольного остатка многокомпонентного топлива марка МКУ1-1с с применением соотношения смеси: 50 % – ОСВ; 50 % – древесные опилки.

Данные исследования показали, что в результате сгорания топлива происходит химическое преобразование одних соединений в другие, отображаемые спектром поглощения и пропускания (разные пики). Отображаемые спектры поглощения и пропускания характеризуются групповыми частотными колебаниями связей и функциональных групп в исследуемых соединениях золы, что позволило получить информацию о дожиге карбонизированных компонентов состава многокомпонентного топлива, а также выявить разрушение (отсутствие) неароматических и ароматических веществ в составе золы.

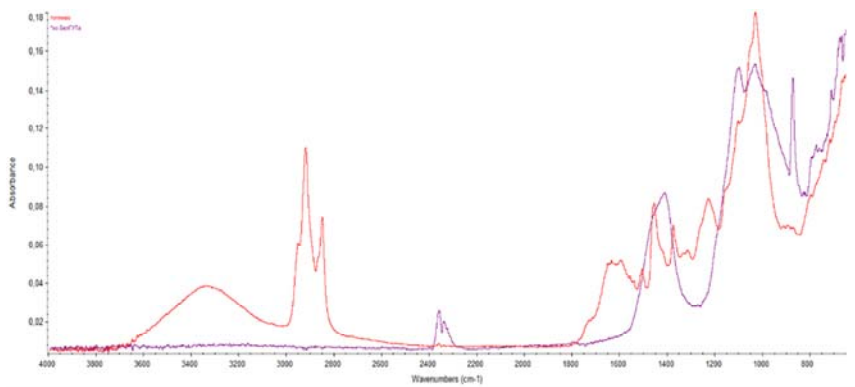
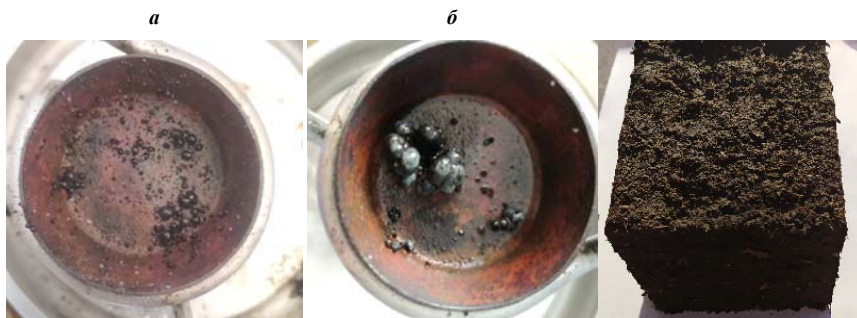


Рисунок 16 – График сравнения методом наложения ИК-спектрограмм золы, образовавшейся от сжигания многокомпонентного топлива марки МКУ1-1с

Исследования различных разработанных марок МТТ позволили определить, что зольность топлива при использовании ОСВ может достигать нормируемых показателей при условии включения в его состав относительно чистых отходов. Так, добавление к ОСВ при брикетировании древесных опилок в объеме не менее 33 % позволяет получать твердое топливо с содержанием зольности, не превышающим нормируемый показатель 20 % (рисунки 17, 18).



а – 33 % ОСВ и 67 % древесных опилок;
б – 100 % ОСВ
Рисунок 17 – Вид золы после сжигания топлива

Рисунок 18 – Вид МТТ марки МКУ1-1с

По результатам исследования выявлены наиболее значимые параметры, влияющие на механическую прочность и объемный вес при брикетировании, которые представлены на рисунках 19, 20 [1, 38].

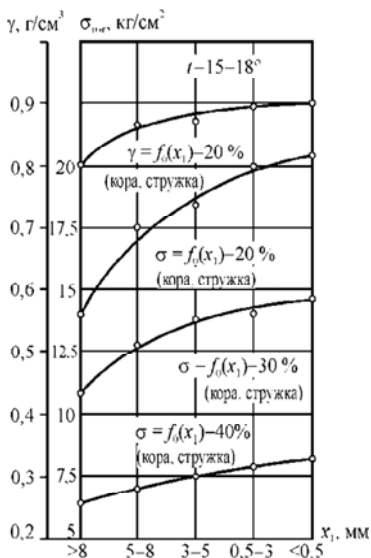


Рисунок 19 – Влияние частиц древесных отходов в различных соотношениях с однородными компонентами на механическую прочность и плотность брикета

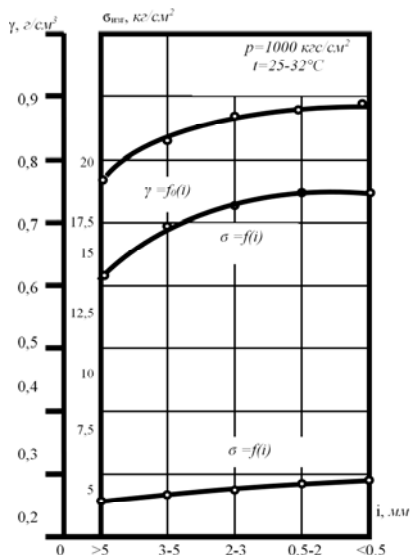


Рисунок 20 – Влияние размера частиц древесных отходов в смеси с нефтесодержащими компонентами на прочность и плотность брикета

Например, при получении многокомпонентного топлива, содержащего 48 % осадков сточных вод, 49,6 % древесных опилок (древесная фракция с измельченными частицами размером 0,5–5,0 мм), 2,4 % углеводородсодержащих отходов, достигается значение плотности γ в пределах 0,89 г/см³. При этом содержание осадка сточных вод в количестве 32,8–48,6 % позволяет получать топливо с характеристиками, соответствующими требованиям действующих ГОСТов на твердые топлива при меньших давлениях брикетирования, что в целом упрощает конструкцию применяемых брикетирующих устройств, снижает износ матрицы и энергоемкость установки при пересчете затрат на единицу продукции.

В седьмой главе «**Математическое моделирование распространения выбросов при сжигании многокомпонентного твердого топлива**» приведены результаты математического моделирования распространения выбросов вредных веществ при сжигании многокомпонентных составов твердого топлива, применяемого для сжигания в локальных системах теплоснабжения, определено влияние долей углеводородсодержащих, древесных и коммунальных отходов в разработанном топливе на распространение выбросов из одиночного источника. Построение модели сжигания

основывалось на методиках, изложенных в ТКП 17.08-01–2006 (02120) с изменениями и ОНД-86, ЭкоНиП 17.01.06-001–2017. Определена зависимость для максимальной безразмерной концентрации выбросов в атмосферу при сжигании многокомпонентных составов твердого топлива с использованием в составе древесных, углеводородсодержащих и коммунальных отходов [7, 19, 25, 27, 33, 38].

Методику расчета трехкомпонентного состава твердого топлива предлагается осуществлять следующим образом.

Зная расчетную нагрузку котла, на котором планируется производить сжигание многокомпонентного топлива, КПД котла (η_k), количество компонентов в топливе ($k = 3$), а также их долевое соотношение ($x_1 + x_2 + x_3$) и низшую рабочую теплоту сгорания каждого компонента ($Q_1 + Q_2 + Q_3$), определяем низшую рабочую теплоту сгорания МТТ следующим образом:

$$Q_t = Q_1 x_1 + Q_2 x_2 + Q_3 x_3; \quad (13)$$

$$N = \frac{1}{100} \cdot (Q_1 x_1 + Q_2 x_2 + Q_3 x_3) B \eta_k, \quad (14)$$

где x_1 – доля древесных отходов; x_2 – доля ОСВ; x_3 – доля углеводородсодержащих отходов.

Определяем расчетный расход многокомпонентного твердого топлива при максимальной нагрузке котла, кг/с:

$$B = \frac{100N}{Q_t \eta_k} \cdot \frac{1}{100} Q_1 x_1 B \eta_k + \frac{1}{100} Q_2 x_2 B \eta_k + \frac{1}{100} Q_3 x_3 B \eta_k; \quad (15)$$

$$B = \frac{100N}{[Q_1 x_1 + Q_2 (1 - (x_1 + x_3)) + Q_3 (1 - (x_1 + x_2))] \eta_k}. \quad (16)$$

Получив значения максимального расчетного расхода МТТ при сгорании, определим максимальную приземную безразмерную концентрацию q вредного вещества при выбросе газовой смеси из одиночного точечного источника с круглым устьем; с учетом технических параметров топливосжигающей установки используем формулу [1, 49].

$$q = \frac{AGfn_e m_e \eta_e}{C_u H^2 \sqrt[3]{V_1 \Delta T}}. \quad (17)$$

Учитывая, что по мере увеличения доли опилок безразмерная концентрация q будет уменьшаться, достигая минимального значения, используем для расчета безразмерной максимальной приземной концентрации вредных веществ, образующихся при сгорании трехкомпонентного твердого топлива, формулу:

$$q(x_1, x_2) = \frac{0,1354 A f n_e m_e \eta_e N}{H^2 \sqrt[3]{\alpha V_0 T_g N [Q_1 x_1 + Q_2 x_2 + Q_3 (1 - x_1 - x_2)]^2} \eta_k^2 \Delta T} \times \\ \times [((q_{11}(x_1) + q_{12}(x_1)) + q_2(x_1) + q_3(x_1) + q_4(x_1)) + \\ + ((q_{21}(x_2) + q_{22}(x_2)) + q_2(x_2) + q_3(x_2) + q_4(x_2))]. \quad (18)$$

Преобразуем полученную формулу (18)

$$q(x_1, x_2) = \\ = \frac{0,1354 A f n_e m_e \eta_e N}{H^2 \sqrt[3]{\alpha V_0 T_g N \left[\sum_{i=1}^2 Q_i x_i + Q_3 \left(1 - \sum_{i=1}^2 x_i \right) \right]^2} \eta_k^2 \Delta T} \left(\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 q_{ij}(x_i) + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=2}^4 q_j(x_i) \right), \quad (19)$$

где $q_1(x_1, x_2)$ – функция, учитывающая выброс оксида азота:

$$q_{i1}(x_i) = \frac{\beta_p}{C_{uNO_x}} x_i Q_i \left[H_{1,T} K_{1,T} \alpha_T \sqrt[3]{\left(1 - \frac{q_{41}}{100} \right) \frac{100 N}{\left[\sum_{i=1}^2 Q_i x_i + Q_3 \left(1 - \sum_{i=1}^2 x_i \right) \right] \eta_k}} x_i Q_i^3 \right], \quad i=1,2;$$

$$q_{12}(x_1) = \frac{\beta_p}{C_{uNO_x}} x_2 Q_2 \left[H_{1,T} K_{1,T} \alpha_T \sqrt[3]{\frac{100 N}{\left[\sum_{i=1}^2 Q_i x_i + Q_3 \left(1 - \sum_{i=1}^2 x_i \right) \right] \eta_k}} x_2 Q_2^3 \right];$$

$$q_{22}(x_2) = \frac{\beta_p}{C_{uNO_x}} \left(1 - \sum_{i=1}^2 x_i \right) Q_3 \left[H_{3,T} K_{3,T} \alpha_T \sqrt[3]{\frac{100 N}{\left[\sum_{i=1}^2 Q_i x_i + Q_3 \left(1 - \sum_{i=1}^2 x_i \right) \right] \eta_k}} \left(1 - \sum_{i=1}^2 x_i \right) Q_3^3 \right];$$

где $q_2(x_1, x_2)$ – функция, учитывающая выброс диоксида серы:

$$q_2(x_1, x_2) = \frac{20000}{C_{uSO_2}} \left[\sum_{i=1}^2 S_{i,r} x_i + S_{3,r} \left(1 - \sum_{i=1}^2 x_i \right) \right] \prod_{i=1}^2 (1 - \eta_{si}) \left(1 - \sum_{i=1}^2 \eta_{si} \right);$$

где $q_3(x_1, x_2)$ – функция, учитывающая выброс оксида углерода:

$$q_3(x_1, x_2) = \frac{\sum_{i=1}^2 C_{i,CO} x_i + C_{2,CO} \left(1 - \sum_{i=1}^2 x_i \right)}{C_{uCO}};$$

где $q_4(x_1, x_2)$ – функция, учитывающая выброс твердых частиц:

$$q_4(x_1, x_2) = \frac{10000}{C_{uPM}} \left[\sum_{i=1}^2 x_i (1 - \eta_{i,c}) \left(\alpha_{i,ab} A_{ir} + q_{i,ab} \frac{Q_i}{\tau} \right) + \left(1 - \sum_{i=1}^2 x_{i,c} \right) (1 - \eta_{3,c}) \left(\alpha_{3,ab} A_{2r} + q_{3,ab} \frac{Q_3}{\tau} \right) \right].$$

Полученные аналитические зависимости вредных выбросов оксидов азота, диоксидов серы, окиси углерода, твердых частиц в единицу времени от доли древесных отходов x_1 и осадков сточных вод x_2 в брикете для различных значений мощности N котельной показаны на рисунке 21.

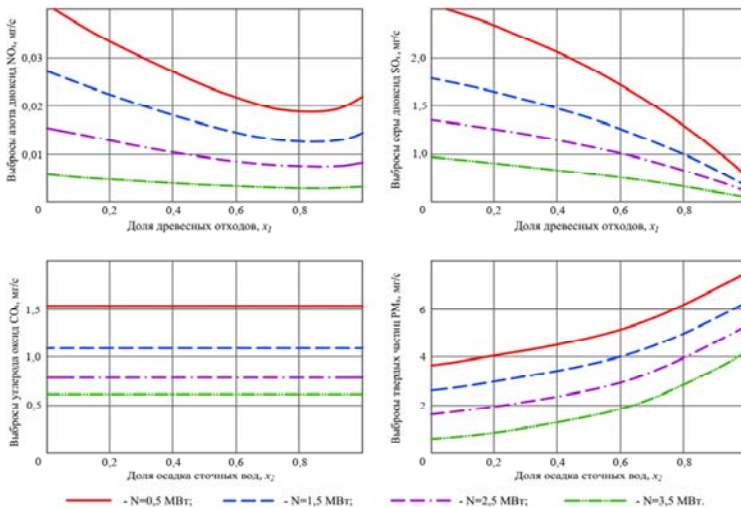


Рисунок 21 – Зависимость изменения выбросов от доли ОСВ и древесных отходов

При этом определено, что относительная приземная концентрация оксида углерода при высотах трубы $H = 40, 35, 30, 20$ м для мощностей котлов $N = 0,5-3,5$ МВт не изменяется с ростом доли ОСВ и уменьшением древесных опилок.

Так, согласно моделированию и в соответствии с построенным графиком безразмерной концентрации q выбросов вредных веществ, представленным на рисунке 22, определено, что при различных соотношениях доли древесных опилок x_1 и доли осадка сточных вод x_2 (с сохранением постоянной доли x_3 углеводородсодержащих отходов, равной 0,024) за счет увеличения высоты дымовой трубы (в данном случае до 40 м) можно обеспечивать нормированное содержание вредных веществ в выбросах при сжигании МГТ в котлах с $N < 4,5$ МВт.

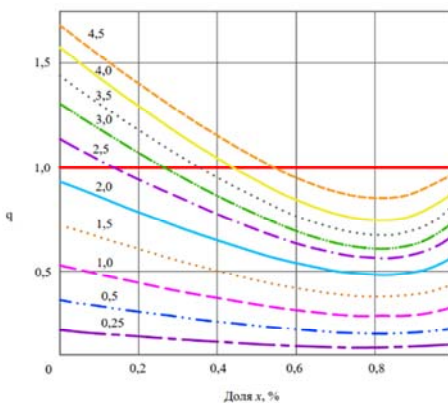


Рисунок 22 – Графические результаты моделирования безразмерной концентрации q для выбросов котла с различными параметрами мощности

Так, математическое моделирование процессов распространения вредных выбросов (NO , CO_2 , SO_2 и твердых частиц), образующихся при сжигании в слоевых топках разработанного многокомпонентного твердого топлива, и нахождение аналитических зависимостей максимальной приземной безразмерной концентрации q выбросов от доли компонента в виде осадка сточных вод x_1 и доли углеводородсодержащей компоненты x_3 в брикетированном топливе, позволило установить, что кривая зависимости $q(x)$ для трехкомпонентного твердого топлива имеет минимум при доле осадка сточных вод в топливе, равной 0,36, и содержании углеводородсодержащих отходов 0,024 [33, 38].

Кроме того, полученная зависимость дает возможность определять минимум концентрации вредных выбросов и диапазон значений доли углеводородсодержащих и коммунальных отходов, при котором выполняется условие соблюдения регламентируемых выбросов, допустимых при сжигании твердых видов топлива, что позволяет ограничивать приземную безразмерную концентрацию выбросов вредных веществ для трехкомпонентного брикетированного твердого топлива на уровне от 0,815 до 1,0 [1, 33, 38].

В восьмой главе **«Концепция создания эффективного производства и определение экономических показателей организации производства»**

многокомпонентного топлива», посвященной описанию концептуальных вопросов создания производства по переработке горючих отходов в многокомпонентное топливо [17, 19], выполнен экономический анализ разработанного метода производства твердого топлива, представлены результаты технико-экономических расчетов себестоимости производства брикетированного МТТ с использованием гидравлической брикетировочной установки.

Внедрение технологии многокомпонентного брикетирования и создание производств на ее основе обеспечит получение твердого топлива, а также позволит увеличить уровень использования местных видов горючих отходов различного происхождения, не востребованных в других технологиях. На рисунке 23 представлена структурно-технологическая схема концептуального потока вторичных отходов, обеспечивающая рециклинг малоиспользуемых горючих отходов в качестве твердого топлива.

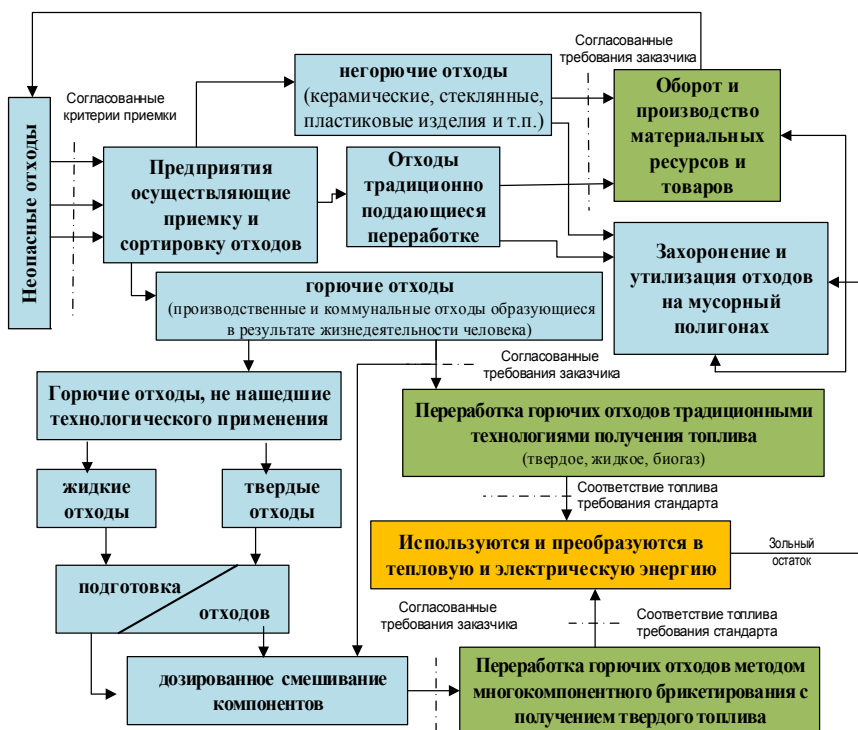


Рисунок 23 – Структурно-технологическая схема концептуального потока отходов, обеспечивающая эффективное использование отходов в качестве твердого топлива

Экономическая оценка себестоимости производства МТТ с использованием основных критериев экономической эффективности и полученных теплотехнических характеристиках качества брикетированного твердого топлива, показала, что цена твердого многокомпонентного топлива, произведенного в соответствии с разработанным ТУ ВУ 490319372.002–2021 «Топлива твердые многокомпонентные котельно-печные» [50], в соответствии с расчетами себестоимости производства с использованием древесных отходов, осадка сточных вод и нефтесодержащих отходов, составляет 74,01 руб./т, или 28,9 \$ США.

При отпускной цене на МТТ (ОДО «ТеплоБел»), определенной на 10 % ниже стоимости 1 т дров в поленице (кругляк), составляет 124,70 руб./т, окупаемость производственной установки – 21,1 месяца (при 2-сменном режиме работы; установка монтируется в существующем здании) [33, 38].

Оценка теплотехнических параметров различных видов твердого топлива с учетом их стоимости в Республике Беларусь, по состоянию на июль-август 2022 года, представлена в таблице 3.

Таблица 3 – Расчет удельной стоимости твердых видов топлива с учетом плотности и теплоты сгорания

Вид твердого топлива	Теплота сгорания топлива, ккал/кг	Цена твердого топлива, руб./т	Плотность твердого топлива, кг/м ³	Удельная теплота сгорания, ккал/т	Удельная стоимость топлива, руб./ккал
Твердое топливо МКУ 3-1с, $W = 15\%$	4330	124,7	0,82	3 550	0,036
Дрова поленик (кругляк), $W = 15\%$	2900	138,6	0,38	1102	0,126
Дрова колотые, $W = 15\%$	2900	200,0	0,38	1102	0,182
Торфбрикет (навалом), $W < 16\%$	3600	119,5	0,45	1620	0,074
Топливный брикет <i>RUF</i> , $W = 12\%$	4100	350,0	1,0	4100	0,085
Топливный брикет <i>Pini Kay</i> , $W = 9\%$	4490	340,0	1,2	5388	0,063
Топливные гранулы, $W = 7,7\%$	4570	380,0	1,2	5 484	0,069
Уголь бурый марки Б-2	4177	260,0	1,2	5 012	0,052
Уголь антрацит марки АМ	6200	600,0	1,5	9300	0,064

Примечание – Цена образована по средней оптовой стоимости.

Анализ данных, приведенных в таблице 3, показывает, например, что топливные гранулы и брикеты типа *RUF* и *Pini Kay*, бурый уголь марки 2БР по теплотехническим характеристикам находятся в одном диапазоне теплоты сгорания, при этом стоимость многокомпонентного твердого топлива «МКУ 3-1с» в среднем в 1,7 раза ниже рыночной стоимости этих

видов топлива. При сравнении удельной теплоты сгорания МТТ и традиционных видов топлива с учетом их плотности и низшей теплоты сгорания определено, что разработанная технология позволяет получать топливо с использованием горючих отходов соответствующее калорийному топливному эквиваленту условного топлива не менее 0,5. Иллюстративные материалы (рисунок 24) дают представление об основных технологических процессах, осуществляемых при производстве МТТ.



Рисунок 24 – Иллюстрации основных технологических процессов при производстве многокомпонентного топлива

Полученные результаты, на примере расчета себестоимости топлива марки «МКУ 3-1с» с использованием осадков сточных вод, свидетельствуют об экономической целесообразности внедрения производства многокомпонентного твердого топлива.

В приложениях приведены копии документов, подтверждающих практическое применение результатов диссертационной работы, разработанной технологии брикетирования и оборудования (акты производственных испытаний, апробации и внедрения), новизну технических решений (патенты и заявка на изобретение, технические условия на производство МТТ), адекватность результатов компьютерного моделирования разработанной имитационной модели технологического процесса, а также протоколы испытаний исследованных составов многокомпонентного топлива.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработаны теоретические положения процесса брикетирования и определения оптимального компонентного состава смеси древесных, коммунальных и вязких углеводородсодержащих отходов, осуществленного с использованием теории планирования эксперимента, позволившие установить, что при получении разработанного многокомпонентного твердого топлива производительность шнекового брикетирующего оборудования в диапазоне изменения влажности прессуемой смеси от 38 до 65 % достигает максимального значения при влажности формуемой смеси, равной $42,1 \pm 0,9$ %, в диапазоне изменения доли коммунальных отходов в виде осадка сточных вод от 31 до 50 % и доли углеводородсодержащих отходов в пределах 1–3 % [1, 10, 12, 13, 15–21, 30–34, 37, 39, 43].

2. Впервые разработаны математическое обоснование и имитационная модель технологического процесса производства многокомпонентного твердого топлива с использованием отходов со структурно неоднородным морфологическим составом, позволяющая проводить эксперименты и определять основные параметры и количественные характеристики технологического процесса [1, 13–21, 19, 39, 40].

3. Полученная имитационная модель технологического процесса производства многокомпонентного твердого топлива позволила определить оптимальное соотношение компонентов брикетируемой смеси: осадков сточных вод – не более 48 %, древесных отходов – не менее 49 %, отходов нефтепродуктов – не более 3 %. Это обеспечивает оптимальную влажность брикетируемой смеси в пределах 38–43 %, при которой производительность установки по изготовлению твердого топлива будет оптимальной и составит не менее 1,01 т/ч при плотности топлива $0,86 \text{ т/м}^3$ и удельной величине энергозатрат на его производство 29,7 кВт·ч на тонну топлива [1, 15–20, 30–33].

4. Экспериментально установлены, по результатам исследований процесса брикетирования смеси древесных, коммунальных и углеводородсодержащих отходов, осуществленных с использованием теории планирования эксперимента и нейромоделирования в программе *Statistica 7*, зависимости получения составов многокомпонентного твердого топлива с учетом производительности гидравлической брикетирующей установки марки ГБУМТ-1 не менее 1,01 т/ч при плотности топлива $0,86 \text{ т/м}^3$ и влажности смеси, равной $39,1 \pm 0,9$ %, в диапазоне изменения доли коммунальных отходов в виде осадка сточных вод от 32,8–48,6 % и доли углеводородсодержащих отходов в пределах 3–7,9 % [1, 10–13, 16, 17, 26–29, 31, 33, 34, 39].

5. Разработанная новая технология брикетирования влажной смеси обеспечивает снижение удельных энергозатрат на сушку многокомпонентного

твердого топлива на 15,2 % по сравнению с традиционными технологиями получения гранулированного и брикетированного топлива [1, 13, 16, 17].

6. Разработанная и апробированная методика расчета, определяющая технологические параметры производства трехкомпонентного твердого топлива с использованием уравнения регрессии в качестве целевой функции, позволяет ограничивать приземную безразмерную концентрацию выбросов вредных веществ для трехкомпонентного брикетируемого твердого топлива на уровне от 0,815 до 1,0 [1, 19, 35, 38, 39].

7. Математическое моделирование процесса распространения вредных выбросов (NO , CO , SO_2 и твердых частиц), образующихся при сжигании разработанного трехкомпонентного твердого топлива, с нахождением аналитических зависимостей максимальной приземной безразмерной концентрации q выбросов от доли компонента в виде осадка сточных вод x_2 и доли углеводородсодержащей компоненты x_3 в брикетированном топливе, позволило установить, что кривая зависимости $q(x)$ для трехкомпонентного твердого топлива имеет минимум при доле осадка сточных вод в топливе, равной 0,36, и доле содержания углеводородсодержащих отходов 0,024 [1, 13, 16–21, 35, 38, 39].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Разработанные технология производства многокомпонентного твердого топлива с использованием установки циклического гидравлического брикетирования марки ГБУМТ-1 и методика расчета выбросов вредных веществ трехкомпонентного топлива могут использоваться проектными организациями при проектировании и реконструкции производств, на которых образуются горючие коммунальные и промышленные отходы, что обеспечивает повышение уровня использования вторичных энергоресурсов, реализуя принципы полного рециклинга отходов, а также предприятиями, вовлеченными в систему сбора и переработки вторичных материальных ресурсов с целью получения на их основе твердого топлива с приемлемыми теплотехническими, экологическими и экономическими показателями [1, 13, 16–21, 41–49].

2. По результатам исследований разработаны и зарегистрированы в уполномоченном органе технические условия ТУ ВУ 4903319372.002–2021 «Топлива твердые многокомпонентные котельно-печные», позволяющие производить и использовать разработанные составы твердого топлива для сжигания в бытовых топках, котлах и промышленных котельных [17–21, 47–49].

3. Разработанная технология подготовки и брикетирования многокомпонентных структурно неоднородных смесей позволяет получать твердое топливо с высокими гидрофобными свойствами, что обеспечивает снижение затрат на герметичную упаковку и необходимость строительства специализированных складов с приемлемыми условиями хранения при

использовании таких видов топливных брикетов, как *Pini Kay*, *RUF*, *Nestro* [1, 8–10, 12–21, 29–38, 42–46].

4. Разработанная технология «холодно-влажного» брикетирования многокомпонентной смеси потребляет затрат энергии на сушку на 15,2 % меньше, чем при использовании традиционных технологий изготовления гранулированного и брикетированного топлива [1, 13, 16, 22, 27–29].

5. Экономическая эффективность от внедрения разработанной технологии производства многокомпонентного твердого топлива заключается в получении энергоресурсов, стоимость которых в 1,8–2,6 раза ниже рыночной стоимости аналогичных видов гранулированного и брикетированного топлива типа *RUF*, *Nestro* и *Pini Kay* и бурого угля марки 2БР с учетом теплотехнических характеристик, а срок окупаемости производства многокомпонентного твердого топлива с использованием установки марки ГБУМТ-1 – 21,1 месяца [2, 4, 5, 10, 13, 16–21].

6. Результаты исследования, полученные автором, используются в учебном процессе в УО «БелГУТ» на практических занятиях, в дипломном проектировании, магистерских и диссертационных работах в качестве основного и дополнительного материала в образовательном процессе по дисциплинам «Основы эколого-энергетической устойчивости производства» и «Основы энергосбережения» очной и заочной форм обучения, а также при подготовке студентов по специальности 1-43 01 06 «Энергоэффективные технологии и энергетический менеджмент».

7. Технологические решения и полученные результаты диссертационной работы позволили осуществить рециклинг накопленных и длительно хранившихся производственных отходов, не нашедших ранее технологического применения в виде: донных отложений мазутных резервуаров (Филиал «Гомельские тепловые сети» РУП «Гомельэнерго», ОАО «Гомельдрев», г. Речица и др.); отходов древесно-растительного происхождения, нефтешламов и коммунальных отходов (КУП «Спецкоммунтранс», г. Гомель, ОДО «ТеплоБел», г. Речица и др.), осадков сточных вод городских очистных сооружений (ОДО «ТеплоБел», г. Речица, *Alfa dirkt* 2020, г. Суботица, Сербия), при модернизации на стадии проектирования (ООО «Гефлис», КПУП «Гомельводоканал»). По результатам опытно-промышленных испытаний топливо, изготовленное по ТУ ВУ 490319372.002–2021, допускается к применению на твердотопливных котлах мощностью до 4,5 МВт, производимых на предприятии СООО «КОМКОНТ» [9, 12–14, 17–20, 44–50].

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монографии

1 Пехота, А. Н. Многокомпонентное твердое топливо : монография / А. Н. Пехота; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2021. – 243 с.

Статьи в журналах, включенных в перечень ВАК

2 Пехота, А. Н. Многокомпонентное топливо на основе древесных отходов – одно из направлений решения задач энергосбережения / А. Н. Пехота // Вестн. Белорус. гос. ун-та тр-та. Наука и транспорт. – 2010. – № 1. – С. 121–122.

3 Хрусталеv, Б. Многокомпонентное твердое топливо на основе малоиспользуемых отходов / Б. Хрусталеv, А. Пехота // Энергетика и ТЭК. – 2011. – № 11. – С. 16–19.

4 Пехота, А. Н. Использование вторичных ресурсов в энергетическом балансе – дополнительный резерв энергосбережения и обеспечения стабильной сырьевой топливной базы / А. Н. Пехота // Вестн. Брест. гос. ун-та. Водохозяйственное стр-во, теплоэнергетика и геоэкология. – 2011. – № 2. – С. 53–55.

5 Хрусталеv, Б. М. Технология эффективного использования углеводородсодержащих отходов в производстве многокомпонентного твердого топлива / Б. М. Хрусталеv, А. Н. Пехота // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2016. – Т. 59, № 2. – С. 122–140.

6 Хрусталеv, Б. М. Композиционное твердое топливо на основе вторичных горючих отходов / Б. М. Хрусталеv, А. Н. Пехота // Энергоэффективность. – 2016. – № 4. – С. 38–42.

7 Хрусталеv, Б. М. К вопросу применения эксергетического метода термодинамического анализа при оценке и разработке энергоиспользования в промышленных теплотехнологиях / Б. М. Хрусталеv, В. Н. Романюк, А. Н. Пехота // Энергетическая стратегия. – 2017. – № 1. – С. 50–56.

8 Хрусталеv, Б. М. Твердое топливо из углеводородсодержащих, древесных и сельскохозяйственных отходов для локальных систем теплоснабжения / Б. М. Хрусталеv, А. Н. Пехота // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2017. – Т. 60, № 2. – С. 147–158.

9 Использование элементов масляных фильтров в энергоресурсосбережении / Б. М. Хрусталеv, А. Н. Пехота, Нгуен Тху Нга, Ву Минь Фап // Энергетическая стратегия. – 2019. – № 6. – С. 39–43.

10 Твердое топливо на основе отходов малоиспользуемых горючих энергоресурсов / Б. М. Хрусталеv, А. Н. Пехота, Нгуен Тху Нга, Ву Минь Фап // Наука и техника. – 2021. – Т. 20, № 1. – С. 58–65.

11 Вакуумный пневмотранспорт для производственных и коммунально-бытовых компонентов / А. Н. Пехота, Б. М. Хрусталеv, В. Д. Акельев, А. А. Михальченко // Наука и техника. – 2021. – Т. 20, № 2. – С. 142–149.

12 Multicomponent Solid Fuel Production Technology Using Waste Water / A. N. Pekhota, B. M. Khroustalev, Vu Minh Phap, V. N. Romaniuk, E. A. Pekhota, R. N. Vostrova, Nguyen Thuy Nga // Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc. – 2021. – V. 64, № 6. – P. 525–537.

13 Пехота, А. Н. Определение эффективности параметров брикетирования и сушки многокомпонентных составов твердого топлива / А. Н. Пехота, Б. М. Хрусталеv // Энергетическая стратегия. – 2022. – № 2. – С. 34–38.

14 Пехота, А. Н. Исследование термоаналитическими методами энергетических свойств брикетированного многокомпонентного топлива / А. Н. Пехота, С. А. Филатов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2022. – Т. 65, № 2. – С. 143–155.

15 Пехота, А. Н. Исследование энергетических характеристик многокомпонентного твердого топлива с использованием горючих малоиспользуемых коммунальных и производственных отходов / А. Н. Пехота // Наука и техника. – 2022. – Т. 21, № 2. – С. 164–174.

16 Пехота, А. Н. Эффективное использование твердых коммунальных отходов в энергетических целях: особенности *MSF*-технологии // Энергоэффективность. – 2022. – № 5. – С. 27–32.

17 Пехота, А. Н. Оценка эффективности технологии многокомпонентного брикетирования топлива с использованием осадков сточных вод / А. Н. Пехота, Б. М. Хрусталеv // Промышленная энергетика. – 2022. – № 6. – С. 40–50.

18 Применение многокомпонентного топлива в пескосушильных установках локомотивных депо / Б. М. Хрусталеv, А. Н. Пехота, Р. Н. Вострова, Ю. А. Пшеничнов // Вестн. Белор. гос. ун-та тр-та. Наука и транспорт. – 2022. – № 1 – С. 79–83.

19 Технология производства *MSF*-топлива – направление, обеспечивающее переход к циркулярной экономике / Б. М. Хрусталеv, А. Н. Пехота, Р. Н. Вострова, Е. А. Пехота // Наука и техника. – 2022. – Т. 21, № 4. – С. 340–348.

20 Пехота, А. Н. Использование углеводородсодержащих отходов в технологии многокомпонентного брикетирования твердого топлива / А. Н. Пехота, Б. М. Хрусталеv // Промышленная энергетика. – 2022. – № 9. – С. 53–61.

Материалы конференций

21 Пехота, А. Н. Перспективы производства твердого многокомпонентного топлива / А. Н. Пехота // Проблемы безопасности на транспорте : материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ ред. В. И. Сенько. – Гомель, 2012. – С. 239–240.

22 Пехота, А. Н. Экологическая безопасность утилизации нефтесодержащих отходов / А. Н. Пехота, Ю. А. Пшеничных // Проблемы безопасности на транспорте : материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ ред. В. И. Сенько. – Гомель, 2012. – С. 240–241.

23 Хрусталеv, Б. М. Энергоэффективное многокомпонентное твердое топливо на основе малоиспользуемых отходов / Б. М. Хрусталеv, А. Н. Пехота // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 11-й Междунар. науч.-техн. конф. : в 4 т. / Белорус. нац. техн. ун-т – Минск, 2013. – Т. 1. – С. 146.

24 Хрусталеv, Б. М. Исследование и разработка многокомпонентных составов топлива с возможностью их использования в котельных в качестве МВТ / Б. М. Хрусталеv, А. Н. Пехота // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 12-й Междунар. науч.-техн. конф. : в 4 т. – Минск : БНТУ, 2014. – Т. 1. – С. 151.

25 Пехота, А. Н. Экологическая безопасность сжигания двухкомпонентного твердого топлива / А. Н. Пехота, Ю. А. Пшеничных // Трансграничное сотрудничество в области экологической безопасности и охраны окружающей среды : материалы II Междунар. науч.-практ. конф. / Гомельский обл. комитет природн. ресурсов и охраны окр. среды, Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины, Белорус. гос. ун-т тр-та. ; редкол. О. Г. Акушко. – Гомель, 2012. – С. 201–203.

26 Пехота, А. Эффективное использование углеводородсодержащих промышленных отходов при создании топлива / А. Пехота, Е. Пехота // “Spoleczeństwo i gospodarka wobec wyzwań XXI wieku. Nauka narzeczeństwa i biznesu” : IV Międzynarodowa Konferencja Naukowa / Белостокский гос. политех. ун-т – Белосток, 2014. – С. 334–344.

27 Пехота, А. Н. Планирование эксперимента на установке для получения твердого многокомпонентного топлива на основе нефтедревесных отходов / А. Н. Пехота, Ю. А. Пшеничных // Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии : материалы X Междунар. науч.-техн. конф., Гродно, 15–16 окт. 2013 г. / НАН Беларуси [и др.]; редкол. : А. И. Свириденко (гл. ред.) [и др.]. – Минск : Беларуская навука, 2014. – С. 359–363.

28 Хрусталеv, Б. М. Оптимизация параметров технологии производства брикетов на основе нефтесодержащих и древесных отходов / Б. М. Хрусталеv, А. Н. Пехота, Ю. А. Пшеничнов // Инновационные решения проблем экономики знаний Беларуси и Казахстана : сб. материалов науч.-практ. конф., Минск 13 окт. 2016 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Беларус. нац. техн. ун-т, Научно-технологич. парк БНТУ Политехник – Минск : БНТУ, 2016. – С. 89–90.

29 Хрусталеv, Б. М. Энергоэффективное топливо на основе нефтедревесных отходов / Б. М. Хрусталеv, А. Н. Пехота // Технология строительства и реконструкции TCR-2015: сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 24–25 нояб. 2015 г. / НАН Беларуси [и др.]; под ред. Б. М. Хрусталева, С. Н. Леоновича – Минск : БНТУ, 2017. – С. 26–31.

30 Хрусталеv, Б. М. Перспективы использования отработанных фильтров, насыщенных нефтепродуктами/ Б. М. Хрусталеv, А. Н. Пехота // Проблемы безопасности на транспорте : материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Беларус. ж. д., Беларус. гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2019. – С. 320–322.

31 Пехота, А. Н. Исследование теплотехнических свойств брикетов на основе осадков сточных вод городских очистных сооружений / А. Н. Пехота, Р. Н. Вострова, В. Н. Грибанов // Научно-технический прогресс в жилищно-коммунальном хозяйстве : материалы II Междунар. науч.-техн. конф. : в 2 т. – Минск : Институт ЖКХ НАН Беларуси, 2020. – Т. 2. – С. 99–108.

32 Хрусталеv, Б. М. Комплексная реализация возможностей получения твердого топлива с использованием отходов / Б. М. Хрусталеv, А. Н. Пехота // Вода. Газ. Тепло 2020 : материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 100-летию Белорусского нац. техн. ун-та, 100-летию кафедры «Гидротехническое и энергетическое строительство, водный транспорт и гидравлика», 90-летию кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция», Минск, 8-10 окт. 2020 г. / М-во образования Респ. Беларусь [и др.]. – Минск : БНТУ, 2020. – С. 4–7.

33 Хрусталеv, Б. М. Подготовка отходов с применением электрогидравлической установки / Б. М. Хрусталеv, А. Н. Пехота // Вода. Газ. Тепло 2020 : материалы междунар. науч.-техн. конф., посвященной 100-летию Белорусского нац. техн. ун-та, 100-летию кафедры «Гидротехническое и энергетическое строительство, водный транспорт и гидравлика», 90-летию кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция», Минск, 8–10 окт. 2020 г. / М-во образования [и др.]. – Минск : БНТУ, 2020. – С. 7–12.

34 Пехота, А. Н. Брикетирование многокомпонентных составов топлива на основе нефтесодержащих отходов / А. Н. Пехота, Б. М. Хрусталеv //

Проблемы безопасности на транспорте : материалы X Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 26-27 ноября 2020 г. : в 5 ч. / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2020. – Ч. 4. – С. 111–113.

35 Пехота, А. Н. Экологические аспекты развития транспортировки отходов с применением пневмотранспорта / А. Н. Пехота, А. А. Михальченко // Проблемы безопасности на транспорте: материалы X Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 26–27 ноября 2020 г. : в 5 ч. / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп.; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2020. – Ч. 4. – С. 108–111.

36 Вострова, Р. Н. Осадки сточных вод – компонент для изготовления брикетов / Р. Н. Вострова, А. Н. Пехота / Водоснабжение, химия и прикладная экология : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 22 марта 2021 г. / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. Е. Ф. Кудиной. – Гомель, 2021. – 19–22 с.

37 Пехота, А. Н. Технологические особенности применения брикетировочного оборудования при утилизации осадка сточных вод в качестве MSF-топлива / А. Н. Пехота, Б. М. Хрусталева, Р. Н. Вострова // Европейские инновационные технологии в строительстве и инженерии окружающей среды : материалы II Междунар. науч.-практ. семинара, Тбилиси, 28–30 июля 2021 г. / Груз. технич. ун-т., Белостокский технологич. ун-т. – Тбилиси, 2021– С. 103–113.

38 Пехота, А. Н. Энергоресурсосбережение при утилизации отработанных элементов топливных фильтров машин и механизмов // А. Н. Пехота, Б. М. Хрусталева // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XI Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 25–26 ноября 2021 г. : в 2 ч. / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2021. – Ч. 1. – С. 241–242.

39 Хрусталева, Б. М. Использование электрогидравлической обработки при подготовке к брикетированию коммунальных отходов решает проблемы переработки горючих отходов / Б. М. Хрусталева, А. Н. Пехота // Инновационные технологии в водном, коммунальном хозяйстве и водном транспорте : материалы Республ. науч.-техн. конф., Минск, 20–21 мая 2021 г. / М-во образования Респ. Беларусь [и др.]. – Минск : БНТУ, 2021. – 4–8 с.

40 Хрусталева, Б. М. Технологические аспекты получения твердого топлива на основе осадка сточных вод очистных сооружений / Б. М. Хрусталева, А. Н. Пехота, Е. А. Пехота // Инновационные технологии в водном, коммунальном хозяйстве и водном транспорте : материалы II Республ. науч.-техн. конф., Минск, 28–29 апреля 2022 г. / М-во образования Респ. Беларусь [и др.]. – Минск : БНТУ, 2022. – С. 13–17.

41 Хрусталеv, Б. М. Особенности расчета ПДК загрязняющих веществ от сжигания многокомпонентного топлива / Б. М. Хрусталеv, А. Н. Пехота // Инновационные технологии в водном, коммунальном хозяйстве и водном транспорте : материалы II Республ. науч.-техн. конф., Минск, 28–29 апреля 2022 г. – Минск : БНТУ, 2022. – С. 8–12.

42 Термоаналитический анализ брикетированного многокомпонентного топлива / Б. М. Хрусталеv, А. Н. Пехота, С. А. Филатов // Инновационные технологии в водном, коммунальном хозяйстве и водном транспорте : материалы II Республ. науч.-техн. конф., Минск, 28–29 апреля 2022 г. / М-во образования Респ. Беларусь [и др.]. – Минск : БНТУ, 2022. – С. 4–7.

43 Пехота А. Н. Брикетирование осадка сточных вод на очистных сооружениях канализации / А. Н. Пехота, Р. Н. Вострова, Е. А. Пехота // ICER-2022 Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания : сб. тр. V Междунар. науч.-практ. конф. посвященной 50-летию кафедры природопользования, Брест, 26–28 окт. 2022 г. : в 2 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, Брестский гос. техн. ун-т. – Брест : БрГТУ, 2022. – Ч. 2. – С. 173–178.

Тезисы докладов

44 Пехота, А. Н. Использование отходов процесса очистки сточных вод при изготовлении топливных брикетов / А. Н. Пехота, Р. Н. Вострова // Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания : сб. тез. докл. IV Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 55-летию Брест. гос. техн. ун-та и 50-летию ф-та инженерных систем и экологии, Брест, 7–8 октября 2021 г. / Брест. гос. техн. ун-т; редкол.: А. А. Волчек [и др.]; науч. ред. А. А. Волчек, О. П. Мешик. – Брест : БрГТУ, 2021. – 128 с.

Патенты

45 Топливный брикет : пат. ВУ 8111 / А. Н. Пехота – Оpubл. 30.04.2012.

46 Способ получения топлива твердого многокомпонентного : пат. ВУ 18408 / А.Н. Пехота, Б.М. Хрусталеv. – Оpubл. 30.08.2014.

47 Состав для брикетирования топлива многокомпонентного : пат. ВУ 18463 / А.Н. Пехота, Б.М. Хрусталеv. – Оpubл. 30.08.2014.

48 Состав для брикетирования топлива многокомпонентного : пат. ВУ 18130 / А.Н. Пехота, Б.М. Хрусталеv. – Оpubл. 30.04.2014.

Нормативно-технические документы

49 Топливо твердое многокомпонентное. Технические условия: ТУ ВУ 490319372.001–2005. – Введ. 18.04.2005 с Извещением № 1 и 2 об изменении технических условий. – Минск : Комитет по стандартизации, метрологии и сертификации при Совете Министров Республики Беларусь, рег. номер 019066 от 18.04.2005. – 8 с.

50 Топлива твердые многокомпонентные котельно-печные. Технические условия: ТУ ВУ 490319372.002–2021. – Введ. 18.02.2022. – Минск : Комитет по стандартизации, метрологии и сертификации при Совете Министров Республики Беларусь, рег. номер 063905 от 20.12.2021. – 27 с.

Опубликованные материалы исследований

51 Пехота, А. Н. Твердое топливо на основе смеси древесных и вязких нефтесодержащих отходов для локальных систем отопления эксплуатации : дис. ... канд. техн. наук. – Минск : БНТУ, 2017. – 157 л.

52 Пехота, А. Н. Многокомпонентное брикетирование горючих промышленных отходов / А. Н. Пехота, Б. М. Хрусталеv // Каталог перспективных разработок и инновационных предложений : Биржи деловых контактов материалы 2020 / Респ. предприятие «Центр науч.-техн. и деловой инф.». – Гомель : 2020. – С. 48–52.

РЭЗІЮМЭ

Пяхота Аляксандр Мікалаевіч

Шматкампанентнае цвердае паліва на аснове малавыкарыстоўваемых гаручых адходаў (Тэорыя. Тэхналогія. Вытворчасць)

Ключавыя словы: цвердае паліва, асадак сцекавых вод, драўняныя адходы, вуглевадародзмяшчальныя адходы, гаручыя ВЭР, мясцовыя віды паліва, брыкетаванне, рэсурсазберажэнне, экалогія, брыкет.

Мэта працы: развіццё тэарэтычных асноў і рэалізацыя практычных метадаў атрымання шматкампанентнага цвердага паліва на аснове малавыкарыстоўваемых вытворчых і камунальных адходаў. Удасканаленне элементаў тэхналагічнага працэсу за кошт прымянення мадэлявання шматкампанентнымі складамі, выкарыстання ў складзе паліва злучных кампанентаў на аснове адходаў з выкарыстаннем распрацаваных тэхналогіі і брыкетавальнага абсталявання.

Метады даследавання і выкарыстаная апаратура: даследаванні ўплыву тэхналагічных фактараў на працэс брыкетавання праводзілі ў адпаведнасці з тэорыяй планавага эксперыменту і імітацыйнага мадэлявання аптымізацыяй тэхналагічнага працэсу шматкампанентнага брыкетавання. Статыстычную апрацоўку вынікаў эксперыментаў ажыццяўлялі ў асяроддзі пакетаў *Math Cad*, *Statistica 7* і *GPSS World*. Фізіка-механічныя ўласцівасці, хімічны склад, тэрмічнае раскладанне рэчываў, цеплавыя рэакцыі і энергетычныя паказчыкі цвердага паліва вызначалі ў адпаведнасці са стандартамі ў акрэдытаваных аналітычных лабараторыях.

Навуковая навізна атрыманых вынікаў: распрацавана матэматычная мадэль працэсу вільготнага брыкетавання сумесі асадка сцекавых вод, вуглевадародзмяшчальных і драўняных адходаў, якая ўлічвае сукупны ўплыў на прадукцыйнасць і шчыльнасць паліва з улікам факторных залежнасцяў, якія забяспечваюць аптымальныя суадносіны доляў кампанентнага складу з улікам вільготнасці сумесі, тэмпературы, ціску, памеру часціц драўняных адходаў. Вызначаны фазавыя прэкручэнні, дынаміка энталпіі і хімічныя рэакцыі, якія праходзяць у шматкампанентным паліве пры тэрмічным раскладанні. Атрыманы матэматычныя ўраўненні, якія апісваюць канцэнтрацыі выкідаў пры спальванні трохкампанентнага цвердага паліва ў залежнасці ад долі асадка сцекавых вод і вуглевадародзмяшчальных адходаў у яго складзе.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: распрацаваны тэхнічныя ўмовы на атрыманне і выкарыстанне шматкампанентнага цвердага паліва.

Галіна прымянення: у якасці мясцовага віду цвердага паліва для катлоў з пластовымі топкамі, якія спажываюць цвердае паліва.

РЕЗЮМЕ

Пехота Александр Николаевич

Многокомпонентное твердое топливо на основе малоиспользуемых горючих отходов (Теория. Технология. Производство)

Ключевые слова: твердое топливо, осадок сточных вод, древесные отходы, углеводородсодержащие отходы, горючие ВЭР, местные виды топлива, брикетирование, ресурсосбережение, экология, брикет.

Цель работы: развитие теоретических основ и реализация практических методов получения многокомпонентного твердого топлива на основе малоиспользуемых производственных и коммунальных отходов. Усовершенствование элементов технологического процесса за счет применения моделирования многокомпонентными составами, использования в составе топлива связующих компонентов на основе отходов с использованием разработанных технологий и брикетировочного оборудования.

Методы исследования и использованная аппаратура: исследования влияния технологических факторов на процесс брикетирования проводили в соответствии с теорией планирования эксперимента и имитационного моделирования оптимизацией технологического процесса многокомпонентного брикетирования. Статистическую обработку результатов экспериментов осуществляли в среде пакетов *MathCad*, *Statistica 7* и *GPSS World*. Физико-механические свойства, химический состав, термическое разложение веществ, тепловые реакции и энергетические показатели твердого топлива определяли в соответствии со стандартами в аккредитованных аналитических лабораториях.

Научная новизна полученных результатов: разработана математическая модель процесса влажного брикетирования смеси осадка сточных вод, углеводородсодержащих и древесных отходов, учитывающая совокупное влияние на производительность и плотность топлива с учетом факторных зависимостей, обеспечивающих оптимальное соотношение долей компонентного состава с учетом влажности смеси, температуры, давления, размера частиц древесных отходов. Определены фазовые превращения, динамика энтальпии и химические реакции, протекающие в многокомпонентном топливе при термическом разложении. Получены математические уравнения, описывающие концентрации выбросов при сжигании трехкомпонентного твердого топлива в зависимости от доли осадка сточных вод и углеводородсодержащих отходов в его составе.

Рекомендации по использованию: разработаны технические условия на получение и использование многокомпонентного твердого топлива.

Область применения: в качестве местного вида твердого топлива для котлов со слоевыми топками, работающих на твердом топливе.

SUMMARY

Pekhota Alexander Nikolaevich

Multicomponent solid fuel based on little-used burning waste (Theory. Technology. Production)

Keywords: solid fuel, sewage sludge, wood waste, hydrocarbon-containing waste, combustible of Secondary Energy Resources [SER], local fuels, briquetting, resource saving, ecology, briquette

Objective of the work: development of theoretical foundations and implementation of practical methods for obtaining multicomponent solid fuels based on little-used industrial and municipal waste. Improvement of the elements of the technological process through the use of modeling with multicomponent compositions, the use of binder components based on waste in the fuel composition using the developed technology and briquetting equipment.

Research methods and equipment used: studies of the influence of technological factors on the briquetting process have been carried out in accordance with the theory of experiment planning and simulation modeling by optimizing the technological process of multicomponent briquetting. Statistical processing of the experimental results have been performed in the environment of the packages MathCad, Statistica 7 and GPSS World. Physical and mechanical properties, chemical composition, thermal decomposition of substances, thermal reactions and energy performance of solid fuels have been determined in accordance with standards un accredited analytical laboratories.

Scientific novelty of the obtained results: a mathematical model of the process of wet briquetting of a mixture of sewage sludge, hydrocarbon-containing and wood-waste has been developed, taking into account the cumulative effect on fuel productivity and density, considering factorial dependences that provide the optimal ratio of the proportions of the component composition with respect to the moisture content of the mixture, temperature, pressure, size particles of wood waste. Phase transformations, enthalpy dynamics, and chemical reactions occurring in a multicomponent fuel during thermal decomposition have been determined. Mathematical equations have been obtained that describe the concentration of emissions from the combustion of three-component solid fuel depending on the proportion of sewage sludge and hydrocarbon-containing waste in its composition.

Recommendations for use: specifications for the production and use of multicomponent solid fuels have been developed.

Application area: as a local type of solid fuel for solid fuel boilers with layered furnaces.

Научное издание

ПЕХОТА
Александр Николаевич

**МНОГОКОМПОНЕНТНОЕ ТВЕРДОЕ ТОПЛИВО
НА ОСНОВЕ МАЛОИСПОЛЬЗУЕМЫХ
ГОРЮЧИХ ОТХОДОВ
(ТЕОРИЯ. ТЕХНОЛОГИЯ. ПРОИЗВОДСТВО)**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени доктора технических наук
по специальности 05.14.04 – промышленная теплоэнергетика

Подписано в печать 05.05.2023. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Цифровая печать.
Усл. печ. л. 3,02. Уч.-изд. л. 3,16. Тираж 80. Заказ 389.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.