

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 662.8.053.33

**ПЕХОТА**

**Александр Николаевич**

**ТВЕРДОЕ ТОПЛИВО НА ОСНОВЕ СМЕСИ  
ДРЕВЕСНЫХ И ВЯЗКИХ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ  
ДЛЯ ЛОКАЛЬНЫХ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ**

Автореферат диссертации

на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

Минск 2017

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

Научный руководитель **ХРУСТАЛЕВ Борис Михайлович**,  
академик НАН Беларуси, доктор техниче-  
ских наук, профессор, ректор Белорусского  
национального технического университета

Официальные оппоненты: **КАРНИЦКИЙ Николай Борисович**, док-  
тор технических наук, профессор, заведу-  
ющий кафедрой «Тепловые электрические  
станции» Белорусского национального тех-  
нического университета;  
**НОВОСЕЛЬЦЕВ Владимир Геннадьевич**,  
кандидат технических наук, доцент, заве-  
дующий кафедрой «Теплогазоснабжение и  
вентиляция» УО «Брестский государствен-  
ный технический университет»

Оппонирующая организация Республиканское унитарное предприятие  
«БЕЛНИПИЭНЕРГОПРОМ»

Защита состоится 31 мая 2017 г. в 15.00 часов на заседании совета  
по защите диссертаций Д 02.05.10 при Белорусском национальном техни-  
ческом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65,  
корп. 1, ауд. 202. Телефон ученого секретаря 265-64-21.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского наци-  
онального технического университета.

Автореферат разослан 28 апреля 2017 г.

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

Л. В. Нестеров

© Пехота А. Н., 2017

© Белорусский национальный  
технический университет, 2017

## Введение

Одна из основных задач устойчивого развития Республики Беларусь в области энергосбережения – 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 вторичных, местных сырьевых и нетрадиционных энергетических ресурсов для локальных систем теплоснабжения.

В нашей стране большое внимание уделяется развитию нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности. Это требует содержания и эксплуатации складов хранения нефтепродуктов, резервуарных парков, что приводит к повсеместному образованию технологических нефтесодержащих отходов, вязкие фракции которых из-за отсутствия доступных технологий приходится в большинстве случаев складировать. Только за последние пять лет объем таких образований превысил 1170 тыс. т.

По мере роста лесозаготовок и расширения деревообработки образуются древесные отходы, утилизация которых достигается получением твердого топлива (пеллеты, брикеты и т. п.), причем традиционные технологии по разным причинам позволяют использовать их только на 40–50 %.

Существующие отечественные и зарубежные технологии для переработки нефтесодержащих и древесных отходов в топливо, как правило, требуют дополнительных операций подготовки сырья, а получаемые новые виды топлива необходимо сжигать с помощью специального энергетического оборудования, что в конечном итоге не всегда экономически выгодно, хотя только подтвержденный энергетический ресурс нефтесодержащих отходов, ежегодно накапливающихся в Республике Беларусь, составляет более 300 тыс. ГДж. При этом за счет переработки неиспользуемых древесных отходов можно дополнительно получать не менее 2 млн м<sup>3</sup> древесного топлива.

Безусловный интерес представляет разработка технологии, обеспечивающей комплексное использование древесных и нефтесодержащих отходов в качестве топлива с приемлемым экологическим уровнем безопасности, применение которого позволит сэкономить первичные энергоресурсы, обеспечить топливом локальные системы теплоснабжения и удовлетворить внутренние потребности страны в местных видах топлива.

Именно поэтому для решения проблем использования нефтедревесных отходов весьма актуальными являются разработка технологии и определение оптимальных составов, обеспечивающих получение брикетированного твердого топлива на основе древесных отходов с использованием в качестве связующего вязких нефтесодержащих отходов, что имеет научную новизну и практическое значение для увеличения доли местных видов топлива, создания стабильной сырьевой базы для локальных систем теплоснабжения.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Связь работы с крупными научными программами, проектами и темами**

Тема диссертации соответствует целям и задачам ряда республиканских программ в области энергетики и энергосбережения: Государственной программы «Энергосбережение» на 2016–2020 гг., утвержденной постановлением Совета Министров Республики Беларусь № 248 от 28.03.2016, Концепции энергетической безопасности, утвержденной постановлением Совета Министров Республики Беларусь № 1084 от 23.12.2015, Указа Президента Республики Беларусь № 209 от 18.05.2015 «Об использовании возобновляемых источников энергии», Перечня проектных направлений фундаментальных, прикладных и научных исследований по разделу «Энергообеспечение, энергосбережение, энергоэффективные технологии», утвержденного постановлением Совета Министров Республики Беларусь № 585 от 19.04.2010, Республиканской программы энергосбережения на 2011–2015 гг., утвержденной постановлением Совета Министров Республики Беларусь № 1882 от 24.12.2010.

### **Цель и задачи исследования**

Цель исследования – разработать технологию производства твердого топлива для локальных систем теплоснабжения на основе смеси древесных и вязких нефтесодержащих отходов и оборудование для его получения с последующим внедрением.

Цель исследования достигалась решением следующих **задач**:

- исследовать проблемы использования в энергетических целях нетрадиционных видов топлива из смеси древесных и нефтесодержащих отходов, провести анализ структуры образования в Республике Беларусь нефтесодержащих и древесных отходов, пригодных для производства твердого топлива, определить алгоритм решения и установить эффективные методы, технологии и средства их переработки;
- разработать для локальных систем теплоснабжения твердое топливо на основе смеси древесных и вязких нефтесодержащих отходов с оптимальным компонентным составом, допускающим его сжигание в котлоагрегатах со слоевыми топками;
- разработать опытно-промышленную и передвижную установки для производства твердого топлива на основе смеси древесных и вязких нефтесодержащих отходов и исследовать влияние долей компонентного состава топлива и влажности прессуемой смеси на производительность;
- разработать технологию получения твердого топлива и составы с оптимальными характеристиками, обеспечивающие его сжигание в котлах со сло-

евыми топками локальных систем теплоснабжения без дополнительного переоборудования;

- определить физико-химические и механические характеристики, теплотворные свойства, влагопоглощение разработанного топлива, условия его хранения и транспортировки;

- провести экологическую оценку распространения выбросов вредных веществ при сжигании двухкомпонентного топлива методом математического моделирования;

- выполнить сравнительную оценку эффективности использования различных видов топлива на основе экономического расчета себестоимости твердого топлива по разработанной технологии.

#### **Объект и предмет исследования**

**Объект исследования** – смеси древесных (опилки деревообработки, измельченные лесосечные отходы) и вязких нефтесодержащих отходов (углеводородсодержащие нефтешламы, отработанные нефтепродукты).

**Предметом исследования** являются новый вид брикетированного твердого топлива для локальных систем теплоснабжения из смеси древесных и вязких нефтесодержащих отходов и технология получения (производства) брикетированного двухкомпонентного твердого топлива на их основе.

#### **Научная новизна** заключается:

- в разработке нового вида твердого топлива для локальных систем теплоснабжения на основе смеси нефтедревесных отходов с теплотой сгорания не менее 18 МДж/кг при доле нефтешламов от 22 до 27 % в брикете, удовлетворяющего экологическим требованиям при сжигании в слоевых топках;

- в результате исследования процесса брикетирования смеси древесных отходов и нефтешламов, осуществленного с использованием теории планирования эксперимента, установлено, что при получении разработанного твердого топлива производительность шнекового пресса при формовании брикетов в диапазоне изменения влажности прессуемой смеси от 30 до 50 % достигает максимального значения при влажности формуемой смеси, равной  $43,4 \pm 0,9$  %, в диапазоне изменения доли нефтешламов от 10 до 30 %;

- в определении технологических параметров производства двухкомпонентного твердого топлива с использованием выведенного уравнения регрессии в качестве целевой функции, позволяющей ограничивать приземную безразмерную концентрацию выбросов вредных веществ для двухкомпонентного брикетируемого твердого топлива на уровне от 0,9 до 1,0;

- в результате математического моделирования процесса распространения выбросов оксидов азота, диоксида серы, монооксида углерода и твердых частиц при сжигании разработанного двухкомпонентного твердого топлива для локальных систем теплоснабжения со слоевыми топками и нахождения

аналитических зависимостей максимальной приземной безразмерной концентрации выбросов от доли нефтесодержащих компонентов в брикетах установлено, что кривая зависимости для двухкомпонентного твердого топлива имеет минимум концентрации выбросов вредных веществ при доле нефтешламов, равной 0,13;

– в разработке, в отличие от существующих традиционных технологий брикетирования, принципиально новой технологии получения твердого топлива для локальных систем теплоснабжения, которая обеспечивает более высокую пожаробезопасность и экономичность за счет замены в технологической схеме брикетирования процесса сушки формуемой смеси на процесс сушки сформированных брикетов при температуре 60–110 °С;

– в определении оптимального состава твердого топлива для локальных систем теплоснабжения на основе смеси древесных и вязких нефтесодержащих отходов, при котором брикетирование осуществляется с влажностью смеси 42–45 % с последующей сушкой сформированных брикетов до влажности 10–20 %, в том числе в атмосферных условиях в теплый период года, что обеспечивает более высокую экономичность в отличие от традиционной технологической схемы брикетирования, требующей значительных энергетических затрат на предварительную подготовку сырья до необходимой влажности прессования 5–12 %.

#### **Положения диссертационной работы, выносимые на защиту:**

– совокупность теоретического и экспериментального исследований, позволяющих предложить метод выбора параметров технологии при производстве брикетов разработанного твердого топлива на основе решения задачи максимизации производительности шнекового пресса с использованием найденного уравнения регрессии в качестве целевой функции и зависимости максимальной безразмерной концентрации выбросов (в качестве ограничения по экологическим требованиям до уровня от 0,9 до 1,0) от доли нефтесодержащего компонента в брикетах;

– результаты основанного на теории планирования эксперимента исследования процесса брикетирования смеси древесных отходов и нефтешламов, позволившие установить, что при получении разработанного твердого топлива для локальных систем теплоснабжения производительность шнекового пресса при формировании брикетов достигает максимального значения при влажности формуемой смеси, равной  $43,4 \pm 0,9$  %, в пределах изменения доли нефтешламов от 10 до 30 %; при этом в диапазоне влажности прессуемой смеси до 30 % и свыше 50 % получение качественного топлива не обеспечивается;

– анализ результатов математического моделирования процесса распространения выбросов оксидов азота, диоксида серы, монооксида углерода и твердых частиц при сжигании разработанного твердого топлива для локаль-

ных систем теплоснабжения со слоевыми топками котельной и нахождения аналитических зависимостей максимальной безразмерной концентрации  $q$  выбросов от доли  $x$  нефтесодержащей компоненты в брикетах, позволившие установить, что кривая зависимости  $q(x)$  для двухкомпонентного твердого топлива имеет минимум при доле нефтешламов, равной 0,13;

– технология получения твердого топлива на основе смеси древесных и вязких нефтесодержащих отходов для локальных систем теплоснабжения, которая в отличие от существующих традиционных технологий брикетирования обеспечивает более высокую пожаробезопасность и экономичность за счет замены в технологической схеме брикетирования процесса сушки компонентов топлива сушкой уже сформированных брикетов при температуре 60–110 °С.

#### **Личный вклад соискателя**

В получении всех научных результатов, представленных в диссертации, соискатель ученой степени принимал участие, совместно с руководителем работы академиком НАН Беларуси, доктором техн. наук, профессором Б. М. Хрустальевым выбрано научное направление и определены задачи исследования, разработаны составы и способ получения твердого топлива для локальных систем теплоснабжения, проведен комплекс теоретических и экспериментальных исследований, внедрены результаты в производство.

Лично соискателем разработаны устройства реализации технологии получения брикетированного многокомпонентного твердого топлива на основе нефтесодержащих отходов в виде опытно-промышленной установки по производству брикетированного твердого топлива на основе модернизированного прессы многокомпонентного топлива (ПМТ-1) и передвижной установки по переработке нефтесодержащих и древесных отходов (УПНДО-0,35), выполнено планирование эксперимента, проведены экспериментальные исследования как в лабораторных условиях, так и в условиях действующих промышленных предприятий, осуществлена обработка полученных опытно-промышленных и экспериментальных данных с использованием компьютерных программ, по результатам теоретических и экспериментальных исследований получены математические зависимости для расчетов оптимальных режимов и составов брикетированного твердого топлива, методика, позволяющая рассчитывать доли его компонентного состава, удовлетворяющего экологическим требованиям топливосжигающего оборудования со слоевыми топками локальных систем теплоснабжения. Разработаны технические условия ТУ ВУ 490319372.001–2005 с Извещением № 1 и 2 об изменении технических условий. Способ получения разработанного топлива и составы защищены патентами Национального центра интеллектуальной собственности Республики

Беларусь (№ 18130,18408, 18463). Произведен технико-экономический расчет себестоимости производства разработанного брикетированного двухкомпонентного твердого топлива и периода возврата капитальных затрат для опытно-промышленной установки с использованием ПМТ-1 и УПНДО-0,35.

Исследования выбросов от сжигаемого полученного твердого топлива выполнялись совместно с канд. техн. наук Ю. А. Пшеничным. Определение концентрационной составляющей эксергии осуществлялось совместно с доктором техн. наук, профессором В. Н. Романюком, доработка и корректировка ТУ ВУ 490319372.001–2005 с Извещением № 1 – совместно с канд. техн. наук В. Т. Полянковым. Результаты работы подтверждены патентами, справками и актами внедрения.

#### **Апробация результатов диссертационной работы**

Результаты работы доложены и обсуждены на следующих конференциях и семинарах:

Международной научно-практической конференции «Проблемы безопасности на транспорте» (секция «Энергетическая и экологическая безопасность транспорта») (Гомель, 2012);

11-й и 12-й международных научно-технических конференциях (Минск, 2013 и 2014);

IV Międzynarodowa Konferencja Naukowa “Społeczeństwo i gospodarka wobec wyzwań XXI wieku. Nauka na rzecz społeczeństwa 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).

#### **Опубликованность результатов диссертации**

Основные положения диссертации опубликованы в 19 научных работах, в том числе в семи статьях в рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК Республики Беларусь, девяти материалах конференций и тезисах докладов, трех патентах Республики Беларусь на изобретения.

#### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Полный объем диссертации – 157 страницы, в том числе рисунков – 41, таблиц – 15, приложений – 9. Список используемых источников состоит из 106 наименований. Список публикаций автора – 20 наименований.



## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **общей характеристике** работы обоснована научно-техническая проблема, определившая актуальность исследования получения твердого топлива для локальных систем теплоснабжения из смеси древесных и вязких нефтесодержащих отходов и технологии его производства, представлены основные положения, выносимые на защиту, отражена научная новизна и практическая значимость результатов работы.

В **первой главе «Проблемы использования в энергетических целях нетрадиционных видов топлива из древесных и нефтесодержащих отходов»** представлены обзор и анализ научно-технических, патентных и литературных сведений об образовании, утилизации нефтесодержащих (углеводородных) и древесных отходов. Отмечен большой вклад в разработку технологических процессов и решений данной проблемы исследования, который внесли отечественные и зарубежные ученые.

Аргументирована научно-техническая проблема, определившая актуальность исследования. Анализ мониторинга и статистических данных по образованию и использованию исследуемых отходов на территории Беларуси с 2008 г. показал общую тенденцию относительного снижения их переработки за счет роста объемов образования [4].

Показано, что существующие подходы не позволяют решить все проблемы утилизации вязких нефтесодержащих и древесных отходов. Анализ данных позволил определить, что одним из эффективных способов утилизации этих отходов является сжигание. Кроме того, для реализации процесса утилизации нефтесодержащих отходов используются только жидкие фракции с минимальным содержанием примесей и воды. Для получения твердого топлива на основе древесных отходов применяется древесина с содержанием влаги не более 5–12 % и жесткими требованиями к фракционному составу.

Обобщены сведения о различных технологиях переработки древесных и нефтесодержащих отходов с учетом отечественного и международного опыта. Рассмотрены достоинства и недостатки наиболее распространенных из них [4, 5].

Географическая разбросанность и многочисленность источников нефтесодержащих отходов, обладающих значительным энергообразующим потенциалом, обуславливает необходимость создания передвижных средств их переработки с целью получения твердого топлива на основе смеси древесных и вязких нефтесодержащих отходов для локальных систем теплоснабжения.

На основании проведенного анализа и в соответствии с определенными негативными факторами сформулированы цель, задачи и основные направления диссертационной работы.

Во **второй главе «Экспериментальная установка. Проведение эксперимента и статистический анализ результатов»** изложена методика проведения

исследований и описана экспериментальная установка, созданная для получения твердого топлива на основе смеси древесных и нефтесодержащих отходов.

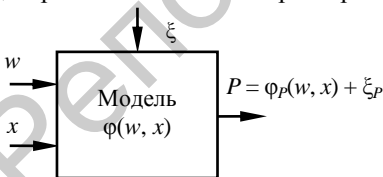
Цель проведения эксперимента – решение задач описания общих закономерностей и исследование совокупного влияния различных процессов, протекающих в установке при получении двухкомпонентного твердого топлива, а также оптимизации режима работы установки по производству этого топлива, позволяющего получать максимальную производительность топлива заданного качества при соблюдении регламентируемых требований к выбросам вредных веществ, образующихся при его сжигании.

Решение первой задачи связано с построением математической модели протекающего в установке технологического процесса. В диссертации, в силу сложности этого процесса, математическую модель строили на основе опытов. В работе использован один из наиболее эффективных методов реализации данной научной задачи, заключающийся в привлечении теории планирования эксперимента, позволяющей определить рациональные условия и условия проведения опытов, при которых полученные экспериментальные зависимости содержат надежную и достоверную информацию об объекте с минимальными затратами труда.

Предварительные опыты на установке для получения твердого топлива показали, что на ее производительность  $P$  наибольшее влияние оказывают массовая влажность смеси  $w$  и доля  $x$  нефтесодержащих веществ в формируемой смеси. Давление  $p$  прессования и температура  $T$  сырья во время эксперимента не изменялись.

Следовательно, анализ предварительной (априорной) информации позволил выявить входные и выходные параметры основного эксперимента.

Входными параметрами (факторами) приняты влажность смеси  $w$  и доля  $x$  нефтесодержащих веществ в смеси, а выходным параметром (откликом системы) – производительность  $P$  установки, измеряемая в кг/ч. Производительность  $P$  одновременно является и параметром оптимизации процесса в установке.



**Рисунок 1. – Кибернетическое представление эксперимента**

При используемом подходе моделируется внешнее функционирование установки по принципу «черного ящика». На рисунке 1 представлена графическая интерпретация модели эксперимента, выбор критериев оптимизации и факторов, влияющих на производительность процесса влажного брикетирования, которые имеют следующие обозначения:  $w$ ,  $x$  – входные переменные (факторы);  $\xi$  – ошибка, помеха, вызываемая наличием случайных факторов;  $P$  – выходная переменная (отклик системы);  $\phi$  – оператор, моделирующий действие реальной системы;  $\phi_P$  – оператор, определяющий зависимость от-

При используемом подходе моделируется внешнее функционирование установки по принципу «черного ящика». На рисунке 1 представлена графическая интерпретация модели эксперимента, выбор критериев оптимизации и факторов, влияющих на производительность процесса влажного брикетирования,

клика системы  $P$  от факторов  $w$  и  $x$ ;  $\xi_p$  – ошибка при определении отклика  $P$ , вызванная наличием случайных факторов [4].

Математическая модель исследуемой системы формировалась по результатам эксперимента методом регрессионного анализа.

Количество факторов принималось равным 2 (двумерное факторное пространство). Для выбранных факторов была задана их область определения – совокупность значений, которые может принимать данный фактор. Важно, что массовая влажность  $w$  и доля  $x$  являются однозначно управляемыми и операциональными, т. е. регулируемыми в течение всего опыта факторами. Количество опытов  $N$  по плану определяется по формуле  $N = n^k$ , где  $n$  – число уровней (фиксированных значений фактора относительно начала его отсчета);  $k$  – число факторов.

В результате обработки экспериментальных данных определены дисперсия выходного параметра  $P$ , среднеквадратичные ошибки, доверительные интервалы, значение критерия Фишера  $F_p$ . Из результата сравнения значения  $F_p$  и табличного значения критерия Фишера  $F_t$  при 5%-м уровне значимости, числе степеней свободы  $f = 4$  следует, что представленная модель адекватна изучаемому процессу [14, 16].

В уравнении регрессии

$$P = b_0 + b_1 z_w + b_2 z_x + b_{12} z_w z_x + b_{21} z_w^2 + b_{22} z_x^2, \quad (1)$$

где,  $b_0, b_1, b_2, b_{12}, b_{21}$  и  $b_{22}$  – коэффициенты полинома при степенях  $z_w$  и  $z_x$ .

Произведя замену безразмерных факторов  $z_w$  и  $z_x$  исходными физическими величинами  $w$  и  $x$ , получим преобразованное уравнение регрессии

$$I(w, x) = \beta_0 + \beta_1 w + \beta_2 x + \beta_{12} wx + \beta_{21} w^2 + \beta_{22} x^2, \quad (2)$$

где  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_{12}, \beta_{21}$  и  $\beta_{22}$  – коэффициенты полинома при степенях  $w$  и  $x$ ,

$$\beta_0 = b_0 - \frac{b_1 w_0}{\Delta w} - \frac{b_2 x_0}{\Delta x} + \frac{b_{12} w_0 x_0}{\Delta w \Delta x} + \frac{b_{21} w_0^2}{\Delta w^2} + \frac{b_{22} x_0^2}{\Delta x^2}; \quad \beta_1 = \frac{b_1}{\Delta w} - \frac{b_{12} x_0}{\Delta w \Delta x} - \frac{2b_{21} w_0}{\Delta w^2};$$

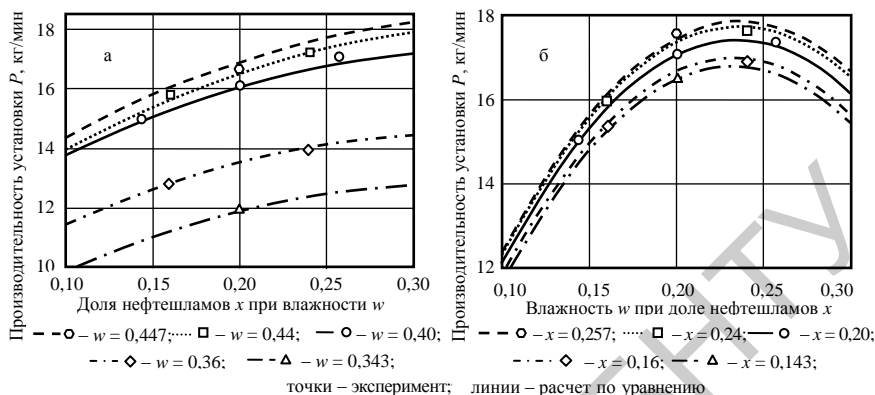
$$\beta_2 = \frac{b_2}{\Delta x} - \frac{b_{12} w_0}{\Delta w \Delta x} - \frac{2b_{22} x_0}{\Delta x^2}; \quad \beta_{12} = \frac{b_{12}}{\Delta w \Delta x}; \quad \beta_{21} = \frac{b_{21}}{\Delta w^2}; \quad \beta_{22} = \frac{b_{22}}{\Delta x^2}.$$

Уравнение регрессии на основе проведенных экспериментов получено в виде

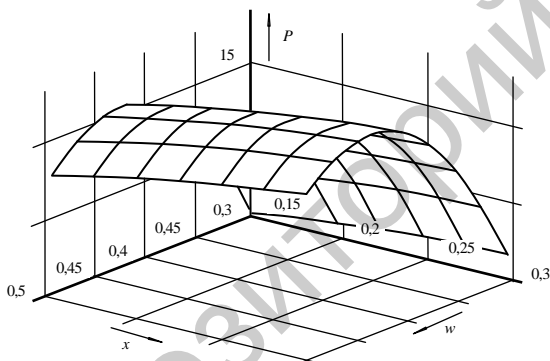
$$P(w, x) = -96 + 0,50 \cdot 10^2 w + 21,8x + 44,9wx - 0,59 \cdot 10^2 w^2 - 58x^2. \quad (3)$$

Зависимости производительности  $P$  установки от доли  $x$  нефтешламов и влажности  $w$  в прессуемой смеси показаны на рисунке 2.

Согласно построенным зависимостям, с ростом доли  $x$  нефтешламов в прессуемой смеси производительность  $P$  установки увеличивается, с повышением влажности  $w$  прессуемой смеси в диапазоне от 0,30 до 0,45 также возрастает, а от 0,45 до 0,60 – уменьшается.



**Рисунок 2.** – Графическое сравнение расчетных и экспериментальных данных для зависимости производительности от влажности (а) и доли нефтепродуктов (б)



**Рисунок 3.** – Зависимость производительности  $P$  от влажности  $w$  и доли нефтешламов  $x$  в трехмерной системе координат

В графической трехмерной системе координат на рисунке 3 представлена зависимость производительности  $P$  от влажности  $w$  и доли нефтешламов  $x$  согласно уравнению регрессии (3), представленному в виде поверхности [10].

В третьей главе «Математическое обоснование оптимизации распространения выбросов при сжигании брикетированного твердого топлива» приведены результаты математического моделирования распространения выбросов при сжигании двухкомпонентного топлива, определено влияние доли нефтешламов в разработанном твердом топливе на рассеяние выбросов из одиночного источника и приведены результаты математического моделирования распространения выбросов при сжигании твердого топлива на основе смеси древесных и вязких нефтесодержащих отходов для локальных систем теплоснабжения. Построение модели сжигания основывалось на методиках, изложенных в ТКП 17.08-01-2006 (02120) с Изменением № 1 и ОНД-86. В результате проведения экспериментального исследования процесса брикетирования получено уравнение регрессии и установлено, что

производительность этого процесса достигает максимального значения при влажности поступающей в шнековый пресс смеси  $43,4 \pm 0,9 \%$  в диапазоне изменения доли нефтешламов в ней от 10 до 30 %. В то же время с ростом доли нефтешламов в сформированном брикете прямо пропорционально увеличивается по линейному закону теплота его сгорания. Однако с повышением доли нефтешламов в брикете при его сжигании растет количество выбросов вредных веществ.

Зависимость для максимальной безразмерной концентрации  $q$  выбросов в атмосферу при сжигании двухкомпонентного твердого топлива получена в виде [5, 9,12]

$$q(x_1) = \frac{0,1354AF_M n m \eta N}{H^2 \sqrt[3]{\alpha V_0 T_g N [Q_1 x_1 + Q_2 (1-x_1)]^2 \eta_k^2 \Delta T}} \times \\ \times \left[ (q(x_1) + q_{12}(x_1)) + q_2(x_1) + q_3(x_1) + q_4(x_1) \right], \quad (4)$$

где  $q_1(x_1)$  – функции, учитывающие выброс оксида азота,

$$q_1(x_1) = \frac{\beta_p}{C_{uNO_2}} \left( 1 - \frac{q_{41}}{100} \right) x_1 Q_1 \left[ H_{1,T} K_{1,T} \alpha_T \sqrt{\left( 1 - \frac{q_{41}}{100} \right) \frac{100N}{[Q_1 x_1 + Q_2 (1-x_1)] \eta_k} x_1 Q_1^3} \right] + \\ + \frac{\beta_p}{C_{uNO_2}} (1-x_1) Q_2 \left[ H_{2,T} K_{2,T} \alpha_T \sqrt{\frac{100N}{[Q_1 x_1 + Q_2 (1-x_1)] \eta_k} (1-x_1) Q_2^3} \right];$$

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

$$q_2(x_1) = \frac{20000}{C_{uSO_2}} [x_1 S_{1,r} + (1-x_1) S_{2,r}] (1-\eta_{s_1}) (1-\eta_{s_2});$$

$q_3(x_1)$  – функция, учитывающая выброс монооксида углерода,

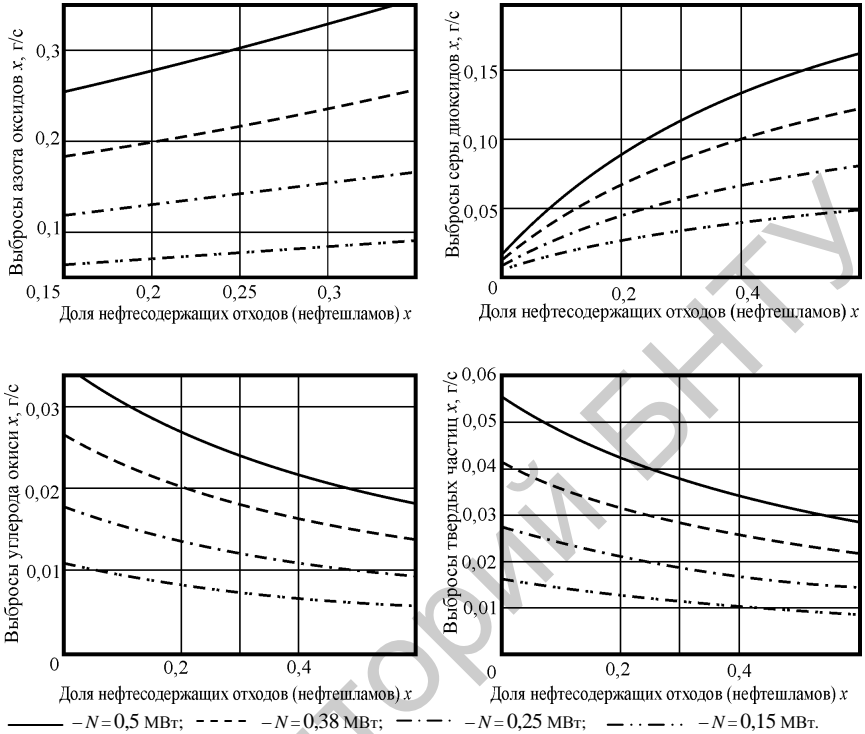
$$q_3(x_1) = \frac{x_1 C_{1,CO} + (1-x_1) C_{2,CO}}{C_{uCO}};$$

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

$$q_4(x_1) = \frac{10000}{C_{uPM}} \left[ x_1 (1-\eta_{l,c}) \left( \alpha_{1,ab} A_r + q_{1,ab} \frac{Q_1}{\tau} \right) \right] + \\ + \frac{10000}{C_{uPM}} \left[ (1-x_1) (1-\eta_{2,c}) \left( \alpha_{2,ab} A_r + q_{2,ab} \frac{Q_2}{\tau} \right) \right],$$

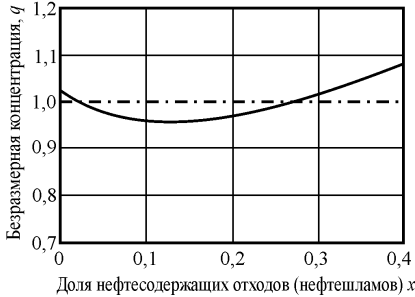
$\tau$  – безразмерная константа,  $\tau = 32,68$ .

Полученные аналитические зависимости вредных выбросов азота оксидов, серы диоксидов, углерода окиси, твердых частиц в единицу времени от доли нефтесодержащих отходов  $x$  в брикете для котельных мощностью 0,15; 0,25; 0,38 и 0,5 МВт представлены на рисунке 4.



**Рисунок 4.** – Зависимость изменения выбросов от доли нефтесодержащих отходов  $x$

Кроме того, полученная зависимость дает возможность определить и диапазон значений  $x$ , в котором выполняется условие  $q \leq 1$ . Так, решение уравнения  $q(x) = 1$  имеет при  $N = 0,5$  МВт два значения:  $x = 0,021$  и  $0,277$  (рисунок 5, значения  $x$ , при которых кривая графика пересекается с линией  $q = 1$ ). Это означает, что сжигание разработанного твердого топлива с долей нефтесодержащего компонента в брикете в диапазоне значений  $x$  от  $0,021$  до  $0,277$  удовлетворяет экологическим требованиям, так как в этом диапазоне концентрация  $q \leq 1$ . В результате математического моделирования процесса распространения выбросов оксидов азота, диоксида серы, монооксида углерода и твердых частиц при сжигании разработанного топлива в котлоагрегатах со словесными топками и нахождения аналитической зависимости (4) максимальной приземной безразмерной концентрации  $q$  вредных выбросов от доли нефтесодержащей компоненты  $x$  в брикетах установлено, что кривая зависимости  $q(x)$  для двухкомпонентного твердого топлива имеет минимум концентрации  $q$  вредных выбросов при доле нефтешламов, равной  $0,13$  [5, 8, 12, 13].



**Рисунок 5. – Кривая зависимости безразмерной концентрации  $q$  от доли нефтешламов  $x$  при мощности котла 0,5 МВт**

Учитывая то, что потребителя интересует энергетическая ценность топлива, а также влияние влажности и доли нефтесодержащих отходов на теплоту сгорания, в работе выполнен термодинамический анализ полученного топлива. Оценка энергетической ценности топлива связана с определением его эксергии, которая имеет три составляющие:

$$e = e_{pT} + e_r + e_k, \quad (5)$$

где  $e_{pT}$ ,  $e_r$ ,  $e_k$ , МДж/кг, – термомеханическая, реакционная и концентрационная составляющие эксергии потока топлива соответственно.

Составляющие эксергии определяются по формулам:

– термомеханическая составляющая эксергии

$$e_{pT} = \sum_{i=1}^J \omega_j \left( \int_{T_0}^T c_{pj}(T) dT - T_0 \int_{T_0}^T \frac{c_{pj}(T)}{T} dT \right), \quad (6)$$

где  $\omega_j$  – массовые доли компонентов твердого топлива;  $J$  – количество его компонентов;  $c_{pj}(T)$  – удельные массовые, изобарные теплоемкости компонентов в интервале температур  $T_0 - T$ , МДж/(кг·К);  $T_0$  и  $T$  – температура окружающей среды и твердого топлива соответственно, К;

– химическая составляющая эксергии

$$e_r = \sum_{i=1}^J \omega_j e_{\mu,j}, \quad (7)$$

где  $e_{\mu,j}$  – удельные массовые химические составляющие эксергии компонентов твердого топлива, в данном случае, удельные массовые химические составляющие эксергии древесных и нефтесодержащих отходов.

Химическая составляющая эксергии получаемого топлива рассчитывается по приближенным соотношениям. Для твердых топлив используем зависимость

$$e_{\mu} = Q_B^p (1 - w^p), \quad (8)$$

Таким образом, разработан метод выбора параметров технологии при производстве топливных брикетов, основанный на решении задачи максимизации производительности шнекового пресса в виде уравнения регрессии в качестве целевой функции и полученной зависимости максимальной безразмерной концентрации выбросов от доли нефтесодержащего компонента в брикетах в качестве ограничения по экологическим требованиям уровня максимальной безразмерной концентрации  $q$  выбросов в диапазоне от 0,9 до 1,0.

где  $Q_B^P$  – удельная массовая, высшая теплота сгорания твердого топлива на рабочую массу, МДж/кг. Может быть рассчитана по соотношению

$$Q_B^P = Q_H^P + 2,442[8,936H_c/100(1 - w^P/100)], \quad (9)$$

где  $H_c$  – массовая доля водорода в древесине, заданная на сухую массу;

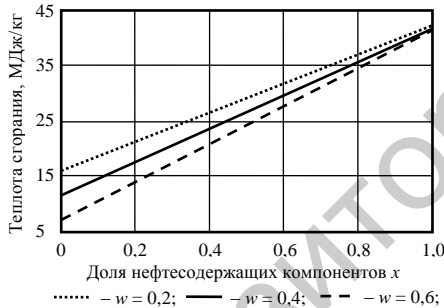
$Q_H^P$  – удельная массовая, низшая теплота сгорания твердого топлива на рабочую массу, МДж/кг. Для древесины может быть рассчитана по соотношению

$$Q_H^P = 18,42300 - 0,20935w^P, \quad (10)$$

где  $w$  – влажность древесины в долях на рабочую массу,  $w^P = 0,20-0,60$ .

Удельная массовая, высшая теплота сгорания нефтешламов  $Q_B^P$ , входящая в соотношение (8), может быть определена из данных свойств нефтешламов. Известно, что значение  $Q_B^P$  для нефтешламов находится на уровне 42 МДж/кг.

Концентрационной составляющей эксергии многокомпонентного твердого топлива можно пренебречь, поскольку ее величина находится в пределах погрешности определения химической составляющей эксергии топлива [2, 6].



**Рисунок 6. – Изменение эксергии разработанного топлива в зависимости от влажности  $w$  и доли нефтешламов  $x$**

Полученные зависимости эксергии брикетированного топлива от доли нефтесодержащих компонентов (нефтешламов) при различной влажности приведены на рисунке 6. Полученные результаты (рисунок 6) востребованы при оценке термодинамической эффективности установок при переходе на разработанное двухкомпонентное твердое топливо на базе современного метода термодинамического анализа – эксергетического метода. Они позволяют учесть влияние состава двухкомпонентного брикетированного твердого топлива на изменение его эксергии, что помогает прогнозировать термодинамическую эффективность перехода к его применению и обеспечивать на стадии производства необходимые характеристики [6, 15].

**В четвертой главе «Технология производства двухкомпонентного твердого топлива для локальных систем теплоснабжения»** приведены результаты исследований и описан разработанный технологический процесс производства твердого топлива на основе нефтешламовой смеси, его составов, свойств и результаты испытаний, определены оптимальные условия хранения, транспортировки. Предварительные и экспериментальные исследования процесса прессования проводились на созданной опытно-промышленной установке. В качестве иллюстрации на рисунке 7 схематично приведена информация, дающая представление об основном комплексе



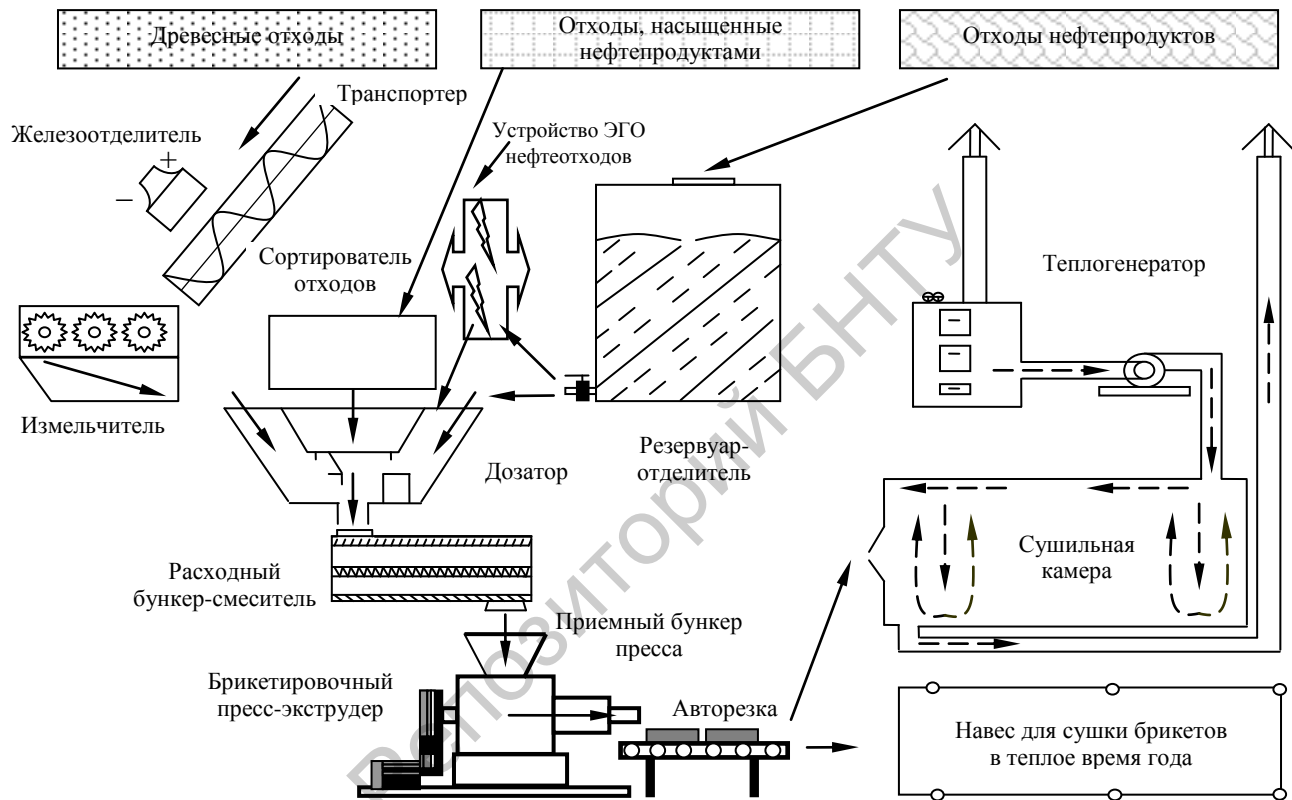
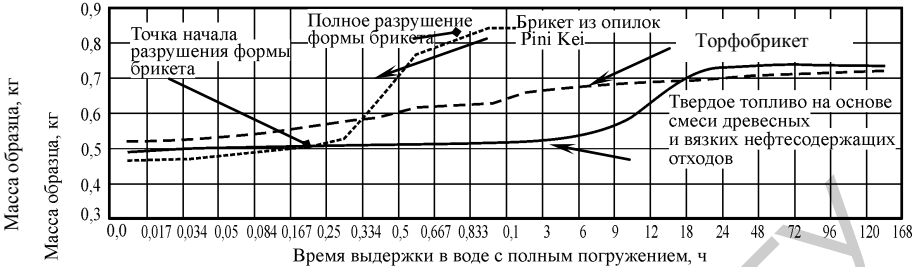


Рисунок 7. – Схема опытно-промышленной установки

технологического оборудования опытно-промышленной установки, которое позволяет обеспечивать технологический процесс получения брикетированного топлива. Он включает следующие этапы: подготовку отходов (измельчение, удаление механических примесей и т. п.); дозирование компонентов и перемешивание до однородного состояния; прессование массы при давлении 20 МПа с образованием внутреннего сквозного продольного отверстия в формуемом брикете при  $w$  смеси 42–45 %; сушку в естественных условиях или сушильной камере  $t - 110 \rightarrow 60$  °С до влажности 10–20 %. Выявлено, что изменение и усовершенствование технологической схемы процесса производства твердого топлива с использованием влажного брикетирования позволяет применять смесь древесного сырья в виде опилок, в том числе насыщенных нефтепродуктами, с основным гранулометрическим составом частиц 0,1–5,0 мм в соотношении не менее 70 % и вязкие нефтесодержащие отходы – не более 30 %. В древесном сырье допускается наличие мелких древесных частиц и коры размером до 10 мм в объеме не более 20 % [18, 19].

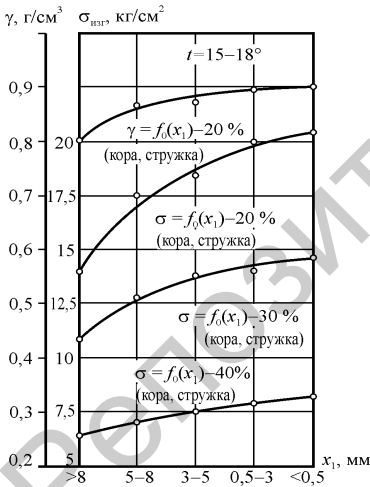
В опытно-промышленной установке при использовании нефтесодержащих отходов, насыщенных веществами различного происхождения, применяется устройство электрогидравлической обработки (ЭГО), позволяющее уменьшать содержание серы и механических примесей в виде окалины, стружки, песка и т. п., что в целом обеспечивает допустимое содержание серы и зольности в физико-химическом составе производимого топлива на экологически необходимом уровне. Сущность работы этого устройства состоит в том, что накопленная в конденсаторах емкостью до 1500 мкф электрическая энергия преобразуется в импульсные (искровые, кистевые) высоковольтные электрические разряды длительностью не более 200 мкс в среде нефтесодержащих отходов, находящихся между электродами, за счет чего создается высокое давление. В соответствии с ранее проведенными исследованиями, давление этих разрядов достигает 50–190 МПа. Оно используется для механического воздействия на материал при его подготовке, что позволяет, задавая определенные параметры разрядов, производить в среде обрабатываемых нефтесодержащих отходов, очистку, эмульгацию, деэмульгацию, разделение и др. [7].

Оценивая полученные результаты исследований свойств получаемого твердого топлива, установлено, что вязкие нефтесодержащие отходы выполняют ряд функций: во-первых, обеспечивают формируемую при брикетировании смесь связующим компонентом, а во-вторых, придают пластичность прессуемой массе при изготовлении брикетов. Также их наличие позволяет увеличивать до необходимого (задаваемого) уровня теплотворность получаемого топлива [5, 13]. В высушенном топливе они обеспечивают достаточные гидрофобные свойства; оно способно на протяжении 6–9 часов проточивать влагонасыщенный в воде, которое за этот период не превысило 10,6–13,9 %, что, безусловно, способствует сохранению заданных качественных показателей при его хранении (рисунок 8) [5, 7].



**Рисунок 8. – График изменения массы различных видов твердого топлива при увлажнении**

Преимуществом разработанной схемы брикетирования является исключение возможности самовоспламенения нефтесодержащих отходов при брикетировании топлива за счет отсутствия необходимости нагрева формуемой смеси до 240–280 °С, как, например, при производстве брикетов *Pini Kei*. Сушку сформованного топлива производят в сушильных камерах при температуре от 110 °С с понижением до 60 °С, а в теплое время года – под навесами при температурах атмосферного воздуха.



**Рисунок 9. – Влияние размера частиц древесных отходов на механическую прочность и плотность брикетов**

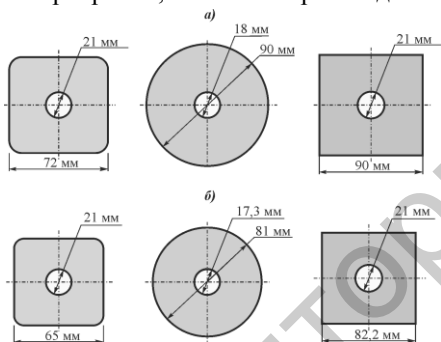
Размеры и внешний вид образцов твердого топлива показаны на рисунке 10.

Исследовано влияние геометрической формы брикетов на производительность установки. Так, при брикетировании компонентного состава определено, что наибольшая ее производительность (1,020 т/ч) достигается

По результатам исследования выявлены наиболее значимые параметры, влияющие на технологические условия подготовки смеси и гранулометрический состав при прессовании давлением  $p = 20$  МПа с варьированием доли  $x_1$  частицами различного размера. Определено, что увеличение доли в составе  $x_1$  частиц с размером до 10 мм в объеме более 20 % при брикетировании нефтесодержащей смеси твердого топлива приводит к снижению прочностных характеристик топлива (рисунок 9), а использование древесной фракции с размером частиц 0,5–5,0 мм позволяет достигать значения плотности  $\gamma$  в пределах 0,89 г/см<sup>3</sup>. Твердое топливо на основе смеси древесных и вязких нефтесодержащих отходов, полученное разработанным способом, зарегистрировано в национальном центре интеллектуальной собственности Республики Беларусь (патент Республики Беларусь на изобретение № 18408 [17]).

при прессовании брикетов круглой формы. Производительность снижается при получении брикетов прямоугольной формы на 37 %, квадратной – на 7,6 %, а квадратной с закругленными краями – на 4,3 % [4, 11].

На основании результатов теоретических и практических исследований и в соответствии с техническими нормативно-правовыми актами разработаны технические условия ТУ ВУ 490319372.001–2005 с Извещением № 1 и 2 об изменении технических условий, прошедшие согласование в установленном законодательством порядке [20]. Изготовленные промышленные партии в соответствии с ТУ прошли испытания с участием представителей Гомельского областного управления по надзору за рациональным использованием топливно-энергетических ресурсов, предприятий КУП «Речицаводоканал» и ОДО «ТеплоБел» с целью оценки качественных показателей хранения, транспортировки, сжигания произведенного твердого топлива.



**Рисунок 10. – Размеры сформованных (а) и высушенных (б) брикетов твердого топлива различных геометрических размеров и формы**

Исследование зольности, влажности, теплоты сгорания, содержания серы в процессе проведения испытаний с целью определения и контроля статистически достоверных результатов проводилось в лабораториях на образцах с применением идентичных методов.

Межлабораторные исследования проб выполнялись в соответствии с ГОСТ 27314, ГОСТ 11022, ГОСТ 8606 и ГОСТ 147 с участием аккредитованной территориальной лаборатории (Аттестат № ВУ/112.02.1.00432) с составлением актов отбора проб, актов приемки и протоколов испытаний.

В процессе исследований установлена зависимость производительности  $P$  от геометрической формы брикета. Так, по отношению к круглой форме она изменяется снижением на 37 % для прямоугольной формы, для квадратной – на 7,6 %, а для квадратной с закругленными краями – на 4,3%. Это позволило определить наиболее эффективную форму – в виде квадрата с закругленными краями.

Результаты испытаний показали, что транспортировка россыпью обеспечивает максимальную гибкость логистических операций при минимальных затратах с использованием самосвалных транспортных средств, позволяющих осуществлять быструю разгрузку и оборачиваемость транспорта. Места погрузки-выгрузки должны быть оборудованы навесами, препятствующими затеканию дождевых осадков.

Определено, что упаковка в контейнеры биг-бэг удобна при транспортировке, обеспечивает защиту топлива от внешних воздействий и позволяет использовать простые технические средства при погрузочно-разгрузочных работах (кран, кран-балка, автопогрузчик, манипулятор). Складирование контейнеров в штабель не должно превышать три ряда.

При этом упаковка в мешки является мелкой расфасовкой и более трудоемкой по сравнению с другими ее видами. Максимальная масса упаковки в полиэтиленовые мешки составляет 35 кг, в бумажные – 20 кг.

Разработанная передвижная установка марки УПНДО-0,35 прошла регистрацию в РУП «Бел НИЦ «Экология» Министерства природных ресурсов в реестре оборудования и технологий по переработке отходов под номером 2287 [7]. Полученные составы твердого топлива зарегистрированы в государственном центре каталогизации продукции и допущены к реализации потребителям. Технологическая схема получения брикетированного топлива на основе нефтешламов, смеси отработанных нефтепродуктов, донных отложений мазутных резервуаров и древесных отходов внедрена на предприятии ОДО «ТеплоБел». Разработанный способ уже позволил утилизировать производственные отходы, не нашедшие технологического применения, что дало возможность осуществить рециклинг более 170 т нефтесодержащих отходов на предприятиях ОАО «Гомельдрев» при строительстве завода по производству плиты МДФ/ХДФ, ОАО «Птицефабрика «Рассвет», РДУП «Гомельский завод «Эталон», ОАО «Гомельский ДСК», Филиал «Гомельские тепловые сети» РУП «Гомельэнерго» и др.

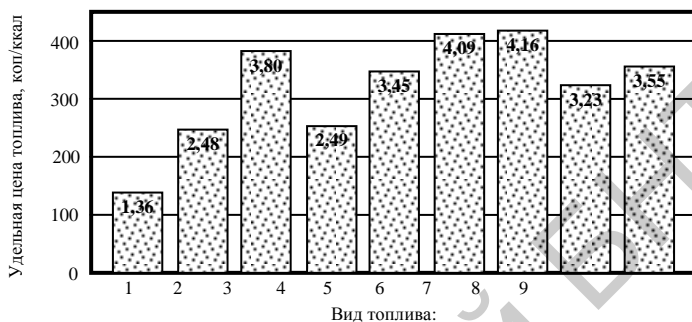
В ходе лабораторных испытаний определены следующие характеристики брикетированного твердого топлива из нефтедревесных отходов, образующихся на предприятиях: теплотворная способность – 18,13 кДж (4330 ккал/кг) при влажности 10,6 %; зольность не более – 8,57 %; содержание серы – не более 0,77 % и др. На основании полученных данных и в соответствии с назначением топливо допущено к применению в бытовых топках, котлах и промышленных котельных, что согласовано с Министерством природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь [1, 3].

По результатам выполненных исследований разработаны и проходят согласование новые технические условия ТУ ВУ 490319372.002–2017, включающие в себя новые марки топлива с использованием многокомпонентных составов из насыщенных нефтепродуктами отходов 4- и 3-го классов опасности.

**В пятой главе «Расчет экономической эффективности производства твердого топлива на основе смеси древесных и вязких нефтесодержащих отходов», посвященной экономическому анализу предлагаемого способа производства, представлены результаты выполненных технико-экономических расчетов себестоимости производства брикетированного топлива с использованием передвижной установки марки УПНДО-0,35 и опытно-промышленной установки с прессом ПМТ-1. В расчете используется соотношение компонентов топлива, изложенное в ТУ ВУ 490319372.001–2005 с изменениями № 1 и 2, а также принят двухсменный режим работы.**

В результате технико-экономических расчетов были определены: себестоимость топливных брикетов – 47,93 руб./т, отпускная цена топливных брикетов – 59 руб./т, период возврата капитальных затрат – 30 месяцев для установки с прессом ПМТ-1 и 26,4 месяца для установки УПНДО-0,35.

Сравнение удельных цен различных видов топлива представлено на рисунке 11.



1 – полученное топливо «Марка-2» при  $w = 15\%$ ; 2 – дрова (кругляк) при  $w = 15\%$ ; 3 – дрова колотые при  $w = 15\%$ ; 4 – торфобрикет при  $w$  не более  $16\%$ ; 5 – топливный брикет типа *RUF* при  $w = 12\%$ ; 6 – топливный брикет типа *Pini Kei* при  $w = 9\%$ ; 7 – топливные гранулы при  $w = 7,7\%$ ; 8 – уголь бурый марки Б-2; 9 – уголь антрацит марки АМ

**Рисунок 11. – Сравнение удельных цен различных видов топлива**

Сравнение представленных данных показывает, что экономическая эффективность от использования произведенного топлива в 1,82 раза выше, чем, например, от применения дров (кругляка). Дополнительное экономическое преимущество и социальное значение производства брикетированного топлива связаны с тем, что в соответствии с системой нормирования отходов в местах их образования, а также снижения экологического воздействия на окружающую среду собственник вязких нефтесодержащих отходов вынужден по мере роста объемов накопления сдавать их, компенсируя при этом часть стоимости затрат по переработке. Таким образом, стоимость готовой продукции может существенно снижаться, а при полной компенсации затрат, топливо с «нулевой» ценой может использоваться на социальных объектах в целях частичного сокращения расходов государства на их содержание [7].

Внедрение разработанной технологии производства брикетированного твердого топлива на основе смеси нефтедревесных отходов позволяет сокращать энергетические затраты предприятий, использующих первичные виды твердого топлива в локальных системах теплоснабжения, а также реализовывать систему минимизации образующихся отходов путем их переработки в энергоресурсы с низкой товарной себестоимостью. При этом улучшается экологическая обстановка за счет стабилизации или снижения объемов отходов производства, экономятся валютные средства на закупку импортного оборудования и технологий, создаются дополнительные рабочие места, что в целом приобретает особое значение в современных условиях.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. На основе теории планирования эксперимента исследования процесса брикетирования смеси древесных отходов и нефтешламов установлено, что при получении разработанного твердого топлива для локальных систем теплоснабжения производительность шнекового пресса при формировании брикетов достигает максимального значения при влажности формируемой смеси, равной  $43,4 \pm 0,9$  %, в пределах изменения доли нефтешламов от 10 до 30 %; при этом в диапазоне влажности прессуемой смеси до 30 % и выше 50 % получение качественного топлива не обеспечивается [7, 10, 11, 14, 16, 17–19].

2. Математическое моделирование процесса распространения выбросов оксидов азота, диоксида серы, монооксида углерода и твердых частиц при сжигании разработанного топлива в котлоагрегатах со слоевыми топками позволило установить аналитические зависимости максимальной безразмерной концентрации  $g$  выбросов от доли  $x$  нефтесодержащей компоненты в брикетах. Установлено, что кривая зависимости  $g(x)$  для двухкомпонентного твердого топлива имеет минимум концентрации вредных веществ при доле нефтешламов, равной 0,13 [4, 8, 9, 12, 13, 16].

3. Предложен алгоритм решения задачи максимизации производительности шнекового пресса с использованием найденного уравнения регрессии в качестве целевой функции и зависимости максимальной безразмерной концентрации выбросов от доли нефтесодержащей компоненты в брикетах в качестве ограничения по экологическим требованиям уровня максимальной безразмерной концентрации в диапазоне от 0,9 до 1,0 [4, 11, 14, 15].

4. Разработана принципиально новая технология брикетирования твердого топлива на основе смеси древесных и вязких нефтесодержащих отходов, которая в отличие от существующих обеспечивает более высокую пожаробезопасность и экономичность за счет замены в технологической схеме брикетирования процесса сушки при подготовке и формировании топлив на процесс сушки уже сформированных брикетов при температуре 60–110 °С [1, 3, 5, 6, 12, 16].

5. Проведен эксергетический анализ полученного твердого топлива, позволяющий учитывать изменение его эксергии в зависимости от влажности и доли нефтешламов [2, 4, 6, 11, 15].

## Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Разработанные установка с прессом ПТМ-1 и методика расчета выбросов вредных веществ двухкомпонентного топлива могут использоваться проектными организациями для модернизации предприятий, на которых образуются древесные, вязкие нефтесодержащие отходы, насыщенные нефтепродуктами опилки, в целях повышения уровня использования вторичных отходов, обеспечивая «замкнутый цикл», а также обществами, вовлеченными в систему сбора и переработки вторичных ресурсов для получения из них топлива с приемлемыми экологическими показателями.

2. Разработанная технология производства двухкомпонентного твердого топлива, реализованная в передвижной установке УПНДО-0,35, может применяться предприятиями отраслевой принадлежности для ликвидации накопленных ранее отходов, не нашедших технологического применения, а также поддержания нормированных лимитов (объемов) древесных и вязких нефтесодержащих отходов в местах их образования.

3. По результатам исследований разработаны защищенные патентами на изобретения способ получения топлива и составы из смеси древесных и вязких нефтесодержащих отходов, технические условия ТУ ВУ 4903319372.001–2005 «Топливо твердое многокомпонентное. Технические условия», изменения № 1 от 01.02.2009 и № 2 от 05.03.2014, позволяющие производить и использовать твердое топливо для сжигания в бытовых топках, котлах и промышленных котельных [17–20].

4. Разработаны и внедрены промышленная установка производительностью 1 т/ч по готовым брикетам в ОДО «ТеплоБел» и передвижная установка производительностью 350 кг/ч, которая прошла регистрацию в реестре оборудования по переработке отходов РУП «БелНИЦ Экология» [1, 3, 7, 8, 9, 15, 16].

5. Результаты диссертационной работы уже позволили утилизировать производственные отходы, не нашедшие технологического применения, что дало возможность осуществить рециклинг более 170 т вязких нефтесодержащих отходов на предприятиях ОАО «Гомельдрев» при строительстве завода по производству плиты МДФ/ХДФ, ОАО «Птицефабрика «Рассвет», РДУП «Гомельский завод «Эталон», ОАО «Гомельский ДСК», Филиал «Гомельские тепловые сети» РУП «Гомельэнерго» и др. [9, 12–14].

6. Экономическая эффективность использования разработанного топлива в локальных системах теплоснабжения в 1,82 раза выше, чем, например, от применения дров, окупаемость производства твердого топлива с использованием установки марки УПНДО-0,35 составляет 26,4 месяца, а опытно-промышленной установки ПМТ-1 – 30 месяцев [2, 4, 5, 10, 13, 16].



## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в изданиях согласно перечню ВАК

1. Пехота, А. Н. Многокомпонентное топливо на основе древесных отходов – одно из направлений решения задач энергосбережения / А. Н. Пехота // Вестник Белорусского государственного университета транспорта. Наука и транспорт : науч.-произв. журнал. – 2010. – № 1. – С. 121–122.

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

3. Пехота, А. Н. Использование вторичных ресурсов в энергетическом балансе – дополнительный резерв энергосбережения и обеспечения стабильной сырьевой топливной базы / А. Н. Пехота // Вестник Брестского государственного университета. Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. – 2011. – № 2. – С. 53–55.

4. Хрусталеv, Б. М. Технология эффективного использования углеводородсодержащих отходов в производстве многокомпонентного твердого топлива / Б. М. Хрусталеv, А. Н. Пехота // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2016. – Т. 59, № 2. – С. 122–140.

5. Хрусталеv, Б. М. Композиционное твердое топливо на основе вторичных горючих отходов / Б. М. Хрусталеv, А. Н. Пехота // Энергоэффективность : ежемесячный науч.-практ. журнал. – 2016. – № 4. – С. 18–22.

6. 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 : науч.-практ. журнал. – 2017. – № 1. – С. 50–56.

7. 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.

### Материалы конференций

8. 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 : БелГУТ, 2012. – С. 239.

9. Пехота, А. Н. Экологическая безопасность утилизации нефтесодержащих отходов / А. Н. Пехота, Ю. А. Пшеничников // 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 : БелГУТ, 2012. – С. 240–241.

10. 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. – Минск : БНТУ, 2013. – Т. 1. – С. 146.

11. Хрусталеv, Б. М. Исследование и разработка многокомпонентных составов топлива с возможностью их использования в котельных в качестве MBT / 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.

12. Пехота, А. Н. Экологическая безопасность сжигания двухкомпонентного твердого топлива / А. Н. Пехота, Ю. А. Пшеничников // 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, М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2012. – С. 201–203.

13. Пехота, А. Н. Эффективное использование углеводородсодержащих промышленных отходов при создании топлива / А. Н. Пехота. IV Międzynarodowa Konferencja Naukowa «Społeczeństwo i gospodarka wobec wyzwań XXI wieku. Nauka na rzecz społeczeństwa i biznesu» (Польша, Белостокский государственный политехнический университет, 2014). – С. 71.

### **Тезисы докладов**

14. Пехота, А. Н. Планирование эксперимента на установке для получения твердого многокомпонентного топлива на основе нефтешреvesных отходов / А. Н. Пехота, Ю. А. Пшеничников // Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии : тез. докл. X Междунар. науч.-техн. конф., Гродно, 15–16 окт. 2013 г. / НАН Беларуси [и др.] ; редкол. : А. И. Свиридюнок (гл. ред.) [и др.]. – Гродно : ГрГУ, 2013. – С. 184.

15. Хрусталеv, Б. М. Энергоэффективное многокомпонентное твердое топливо на основе нефтешреvesных отходов / Б. М. Хрусталеv, А. Н. Пехота // Технология строительства и реконструкции : тез. докл. Междунар. науч. конф. / Минск, 24–25 нояб. 2015 г. – Минск : БНТУ, 2015. – С. 126.

16. Хрусталеv, Б. М. Оптимизация параметров технологии производства брикетов на основе нефтесодержащих и древесных отходов / Б. М. Хрусталеv, А. Н. Пехота, Ю. А. Пшеничнов // Материалы международной научно-практической конференции «Инновационные решения проблем экономики знаний Беларуси и Казахстана». – Минск : БНТУ, 2016. – С. 89–90.

### **Патенты**

17. Способ получения топлива твердого многокомпонентного : пат. 18408 Респ. Беларусь, МПК С 10 L 5/48, С 10 L 5/06, С 10 L 5/36 / А. Н. Пехота, Б. М. Хрусталеv ; заявитель Пехота Александр Николаевич; Хрусталеv Борис Михайлович (BY). – № а 20120656 ; заявл. 25.04.12 ; опубл. 30.08.14 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2014. – № 3. – С. 174.

18. Состав для брикетирования топлива многокомпонентного : пат. 18463 Респ. Беларусь МПК С 10 L 5/04, С 10 L 5/48 / А. Н. Пехота, Б. М. Хрусталеv; заявитель Пехота Александр Николаевич; Хрусталеv Борис Михайлович (BY). – № а 20120655 ; заявл. 25.04.12 ; опубл. 30.08.14 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2014. – № 3. – С. 207.

19. Состав для брикетирования топлива многокомпонентного : пат. 18130 Респ. Беларусь МПК С 10 L 5/44, С 10 L 5/48 / А. Н. Пехота, Б. М. Хрусталеv; заявитель Пехота Александр Николаевич; Хрусталеv Борис Михайлович (BY). – № а 20120676 ; заявл. 30.04.12 ; опубл. 30.04.14 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2014. – № 2. – С. 124.

### **Нормативно-технические документы**

20. 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.

## РЭЗЬЮМЭ

Пяхота Аляксандр Мікалаевіч

### Цвёрдае паліва

на аснове сумесі драўняных і вязкіх нафтаўтрымліваючых адходаў  
для лакальных сістэм цеплазабеспячэння

**Ключавыя словы:** цвёрдае паліва, нафтаўтрымліваючыя адходы, драўняныя адходы, другасныя гаручыя адходы, мясцовыя віды паліва, брыкетаванне, энергаэфектыўнасць, рэсурсазберажэнне, экалогія, лакальныя сістэмы цеплазабеспячэння.

**Мэта работы:** усталяваць заканамернасці фарміравання цвёрдага паліва на аснове сумесі драўняных і вязкіх нафтаўтрымліваючых адходаў. Усталяваць аптымальны склад паліва, які задавальняе энергетычныя і экалагічныя патрабаванні, што прад'яўляюцца да спальвання цвёрдага паліва ў котлаагрэгатах, распрацаваць тэхналогію і абсталяванне для яго вытворчасці.

**Метады даследавання і выкарыстаная апаратура:** даследаванні ўплыву тэхналагічных фактараў на працэс брыкетавання праводзілі ў адпаведнасці з тэорыяй планавання эксперыменту. Статыстычную апрацоўку вынікаў эксперыментаў ажыццяўлялі ў асяроддзі пакетаў Statgrafics і MathCad. Фізіка-механічныя ўласцівасці, хімічны склад паліва вызначалі ў адпаведнасці з стандартамі ў акрэдытаваных аналітычных лабараторыях.

**Навуковая навізна атрыманых вынікаў:** у выніку эксперыментальных даследаванняў распрацавана матэматычная мадэль працэсу вільготнага брыкетавання сумесі нафтадраўняных адходаў, якая ўлічвае сукупны ўплыў на прадукцыйнасць шнековай прэсавай устаноўкі розных фактараў: долі ў сумесі нафтазвязваючага кампанента, вільготнасці сумесі, памеру часціц, ціску. Атрымана аптымальная паслядоўнасць тэхналагічных аперацый, якая дазваляе вырабляць цвёрдае паліва шляхам прасочвання вільготнай фармовачнай масы шнековым прэсам пад ціскам 20 МПа. Атрыманы матэматычныя ўраўненні, якія апісваюць канцэнтрацыі выкідаў пры спальванні дзвухкампанентнага цвёрдага паліва ў залежнасці ад долі нафташламаў у яго складзе. Усталявана залежнасць эксэргіі дзвухкампанентнага цвёрдага паліва ад яго вільготнасці і долі нафташламаў.

**Рэкамендацыі па выкарыстанні:** распрацаваны тэхнічныя ўмовы на атрыманне і выкарыстанне чатырох марак шматкампанентнага цвёрдага паліва.

**Галіна прымянення:** у якасці мясцовага віду цвёрдага паліва для лакальных сістэм цеплазабеспячэння і на прадпрыемствах, якія спажываюць цвёрдае паліва.

## РЕЗЮМЕ

**Пехота Александр Николаевич**

### **Твердое топливо на основе смеси древесных и вязких нефтесодержащих отходов для локальных систем теплоснабжения**

**Ключевые слова:** твердое топливо, нефтесодержащие отходы, древесные отходы, вторичные горючие отходы, местные виды топлива, брикетирование, ресурсосбережение, экология, локальные системы теплоснабжения, энергоэффективность.

**Цель работы:** установить закономерности формирования твердого топлива на основе смеси древесных и вязких нефтесодержащих отходов. Установить оптимальный состав топлива, удовлетворяющий энергетическим и экологическим требованиям, предъявляемым к сжиганию твердого топлива в котлоагрегатах, разработать технологию и оборудование для его производства.

**Методы исследования и использованная аппаратура:** исследования влияния технологических факторов на процесс брикетирования проводили в соответствии с теорией планирования эксперимента. Статистическую обработку результатов экспериментов осуществляли в среде пакетов Statgrafics и MathCad. Физико-механические свойства, химический состав топлива определяли в соответствии со стандартами в аккредитованных аналитических лабораториях.

**Научная новизна полученных результатов:** в результате экспериментальных исследований разработана математическая модель процесса влажного брикетирования смеси нефтесодержащих отходов, учитывающего совокупное влияние на производительность шнековой прессующей установки различных факторов: доли в смеси нефтесвязывающего компонента, влажности смеси, размера частиц, давления. Получена оптимальная последовательность технологических операций, позволяющая производить твердое топливо путем продавливания влажной формовочной массы шнековым прессом под давлением 20 МПа. Получены математические уравнения, описывающие концентрации выбросов при сжигании двухкомпонентного твердого топлива в зависимости от доли нефтешламов в его составе. Установлена зависимость эксергии двухкомпонентного твердого топлива от его влажности и доли нефтешламов.

**Рекомендации по использованию:** разработаны технические условия на получение и использование четырех марок двухкомпонентного твердого топлива.

**Область применения:** в качестве местного вида твердого топлива для локальных системы теплоснабжения и на предприятиях, потребляющих твердое топливо.

## SUMMARY

Pekhota Alexander

### **Solid Boiler and Furnace Fuel Based on Wood and Viscous Oil-Containing Wastes and Technology for Its Production**

**Keywords:** solid fuel, oil-containing wastes, wood wastes, secondary combustible wastes, local fuel, briquetting, energy efficiency, resource conservation, ecology.

**Objective:**

- to establish regularities in formation of multi-component solid boiler and furnace fuel based on wood and viscous oil-containing wastes;
- to determine optimal composition of the fuel that meets energy and environmental requirements specified for combustion of solid fuel in boiler units;
- to develop technology and equipment for its production.

**Investigation methods and equipment:** investigations on influence of technological factors on briquetting process have been executed in accordance with an experimental design theory. Statistical processing of experimental data has been carried out in the medium of Statgrafics and MathCad packages. Physical and mechanical properties, chemical composition of the fuel has been determined in accordance with the standards of accredited analytical laboratories. As a result of experimental investigations, experimental studies the

**Scientific novelty of the obtained results:** A mathematical model for wet briquetting process of oil and wood waste mixture. The process takes into account a cumulative impact of various factors on capacity of a screw pressing unit: proportion of oil-binding agent in the mixture, mixture moisture, particle size, pressure. An optimal sequence of technological operations has been obtained and it makes possible to produce solid fuel by forcing through wet molding material while using a screw press under a pressure of 20 MPa. Mathematical equations describing concentrations of emissions due to combustion of multi-component solid boiler and furnace fuel according to proportion of oil sludge in its composition. A dependence of multi-component solid boiler and furnace fuel exergy on moisture and oil sludge proportion has been ascertained in the paper .

**Recommendations for use:** Technical specifications for obtaining and usage of four multi-component solid fuel grades have been developed in the paper.

**Application field:** The proposed fuel can be used as a local type of solid fuel at enterprises with a high level of viscous oil-containing and wood wastes which are not technologically applied.

Научное издание

**ПЕХОТА**

**Александр Николаевич**

**ТВЕРДОЕ ТОПЛИВО НА ОСНОВЕ СМЕСИ  
ДРЕВЕСНЫХ И ВЯЗКИХ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ  
ДЛЯ ЛОКАЛЬНЫХ СИСТЕМ ТЕПЛОАБЖЕНИЯ**

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

Подписано в печать 28.04.2017. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,27. Тираж 90. Заказ 383.

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.