

На правах рукописи



ТАБАКАЕВ РОМАН БОРИСОВИЧ

**ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТВЁРДОГО КОМПОЗИТНОГО
ТОПЛИВА ИЗ НИЗКОСОРТНОГО ОРГАНИЧЕСКОГО СЫРЬЯ**

Специальность 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2015

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Заворин Александр Сергеевич

Официальные оппоненты: Лебедев Виталий Матвеевич – доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Омский государственный университет путей сообщения», профессор кафедры «Теплоэнергетика»

Алексеев Максим Валерьевич – кандидат физико-математических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, старший научный сотрудник лаборатории проблем теплопереноса

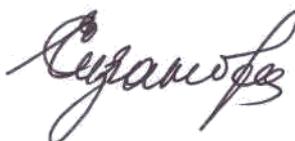
Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения РАН (ИК СО РАН)

Защита состоится 23 сентября 2015 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.099.07 при ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» по адресу: г. Красноярск, ул. Ленина, 70, ауд. А-204.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» <http://www.sfu-kras.ru>.

Автореферат разослан «__»_____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Сизганова Евгения Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Согласно принятой Правительством РФ государственной программе «Энергетическая стратегия России до 2030 года» должно осуществляться снижение использования природного газа в энергетике за счет увеличения доли угля. Затраты на транспортировку угля повышают его стоимость для регионов, не имеющих собственных разрабатываемых месторождений, более чем в 1,5 раза. Наиболее напряженная ситуация складывается в труднодоступных поселениях, имеющих децентрализованное энергоснабжение, логистика доставки топлива для которых существенно осложнена большими расстояниями перевозок, их многозвенностью и сезонностью завоза. В результате затраты на топливо в этих случаях являются главной составляющей расходов тепло- и электроснабжения.

Опыт других стран показывает, что потребность в топливе для подобных регионов может быть покрыта за счет вовлечения в топливно-энергетический баланс местного низкосортного сырья (торфа, бурого угля, биомассы и др.). Однако, низкие теплотехнические и прочностные характеристики такого сырья приводят к высоким эксплуатационным затратам при сжигании традиционными способами. В результате этого энергетическое использование низкосортного сырья встречается крайне редко.

В связи с изложенным решение проблемы вовлечения в топливно-энергетический баланс и повышение экономической эффективности использования местного низкосортного сырья представляется актуальной задачей научных исследований.

Настоящая работа выполнена при финансировании Министерством образования и науки РФ в рамках госзадания НИР (*тема 13.948.2014/К*), федеральных целевых программ «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы» (*ГК № 14.740.11.1295*) и «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы» (*ГК № 14.516.11.0078 при поддержке технологической платформы «Малая распределённая энергетика»*).

Целью диссертационной работы является разработка научно-технических основ теплотехнологии малотоннажной переработки низкосортного органического сырья в твёрдое композитное топливо (ТКТ), основанной на низкотемпературном пиролизе и предназначенной для объектов малой распределённой энергетике.

Исходя из поставленной цели работы, определены следующие **задачи исследований:**

- 1) сформировать базу данных теплотехнических характеристик низкосортного органического сырья наиболее крупных месторождений Томской области и отходов деревопереработки для оценки перспективы их энергетического использования;
- 2) на основе анализа известных способов термической переработки и формирования разработать теплотехнологию малотоннажной переработки низкосортного органического сырья в ТКТ, ориентированную на применение в районах с децентрализованным энергоснабжением;

3) разработать методические положения и лабораторную базу для экспериментальных исследований теплотехнологии;

4) осуществить в экспериментальных условиях переработку исследуемого сырья посредством низкотемпературного пиролиза и формование ТКТ для обоснования параметров теплотехнологии;

5) на основе обобщения результатов исследований предложить варианты практического использования исследованной теплотехнологии с экономической оценкой внедрения одного из вариантов на примере Томского региона.

Объект исследований – теплотехнология переработки низкосортного органического сырья.

Предмет исследований – параметры теплотехнологии малотоннажной переработки низкосортного органического сырья в твёрдое композитное топливо.

Методы исследований: физический эксперимент в лабораторных условиях; материальные и тепловые балансы; измерение теплотехнических и механических характеристик по методикам ГОСТ; газовая хроматография; статистическая обработка полученных результатов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1) сформирована база новых данных о теплотехнических характеристиках и свойствах продуктов теплотехнологической переработки низкосортного органического сырья Томской области (торфа месторождений Суховское, Аркадьевское, Кандинское, бурого угля Таловского месторождения, озёрного сапропеля Карасевского месторождения, щепы из различных древесных пород) применительно к энергетическому использованию;

2) на уровне изобретения разработаны три варианта теплотехнологии малотоннажной переработки низкосортного органического сырья в ТКТ:

– включающий предварительную термическую переработку сырья при температурах ниже 450 °С в полукокс и пиролизную смолу, формование на их основе ТКТ с последующей сушкой при 100-105 °С;

– отличающийся использованием в качестве связующего вещества раствора декстрина в пиролизном конденсате и температурой сушки ТКТ от 20 до 80 °С;

– отличающийся разделением получаемого при термопереработке пиролизного конденсата на пиролизную смолу и подсмольную воду и использованием раствора декстрина в подсмольной воде в качестве связующего вещества, при этом после сушки поверхность ТКТ для придания влагостойкости покрывают пиролизной смолой и повторно сушат при 20-40 °С;

3) на основе разработанных методических положений и реализующей их лабораторной базы впервые определены и обоснованы параметры оригинальной теплотехнологии, включающие температуру переработки исходного органического сырья, соотношения компонентов при формовании, температуру сушки ТКТ.

На защиту выносятся:

1) варианты теплотехнологии малотоннажной переработки низкосортного органического сырья в ТКТ, предназначенное для энергетического использования в топливосжигающих устройствах слоевого типа, и схема технологической линии для их реализации.

2) результаты экспериментальной апробации разработанной теплотехнологии на низкосортном органическом сырье, представляющем наиболее крупные месторождения Томской области (торф месторождений Суховское, Аркадьевское и Кандинское, бурый уголь Таловского месторождения, озёрный сапропель месторождения Карасевое) и отходы деревопереработки.

Достоверность результатов обеспечивается их удовлетворительной сходимостью при многократном воспроизведении в одних и тех же условиях и сопоставлением с данными других авторов; использованием аттестованных методик; применением откалиброванных и поверенных приборов и средств измерений; статистической обработкой экспериментальных данных и анализом погрешности измерений.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в том, что:

– сформированная база новых данных является основой для оценки эффективности теплотехнологической переработки низкосортного органического сырья Томской области в ТКТ или другого вида товарную продукцию энергетического назначения;

– запатентованные варианты исследованной теплотехнологии позволяют перерабатывать низкосортное органическое сырьё в высококалорийное ТКТ, подходящее для энергетического использования в широком диапазоне топливосжигающего оборудования слоевого типа;

– установленные параметры теплотехнологии пригодны к проектированию технологических линий малотоннажного производства ТКТ;

– предложена структурная схема малотоннажного производства ТКТ и реализующая её компоновочная схема технологической линии, удельная потребляемая электрическая мощность которой ниже, чем у аналогичных линий.

Реализация результатов работы:

– результаты выполненных исследований используются в ООО «Политехнологии» (г. Томск) на правах лицензионного соглашения;

– материалы выполненных исследований включены в образовательную практику по направлению «Энергетическое машиностроение» в Томском политехническом университете, по тематике диссертационной работы выполнено 13 выпускных квалификационных работ дипломированных специалистов.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на XVII и XVIII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (Томск, 2011-2012 гг.), международной молодёжной конференции «Энергосберегающие технологии» (Томск, 2011 г.), конференции с международным участием «VIII Всероссийский семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике» (Екатеринбург, 2013 г.), I-IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий» (Томск, 2010-2013 гг.), на научных семинарах кафедры парогенераторостроения и парогенераторных установок Томского политехнического университета (Томск, 2010-2014 гг.).

Результаты диссертационной работы были представлены научным коллективом на международном Национальном конкурсе ассоциации изобретателей и произ-

водителей Франции (Париж, 2012 г. – золотая медаль), международной Петербургской технической ярмарке (Санкт-Петербург, 2011 г. – золотая медаль, 2012 г. – диплом), всероссийском конкурсе «Золотая медаль ITE Сибирская ярмарка» (Новосибирск, 2011 г. – серебряная медаль).

Публикации по работе: по теме диссертации опубликованы 20 научных работ, в том числе 5 статей в изданиях, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК при Министерстве образования и науки РФ для опубликования основных результатов диссертаций, 3 статьи, индексируемые Scopus, 3 статьи, индексируемые РИНЦ, 9 докладов в сборниках международных и всероссийских конференций; а также получено 2 патента РФ и зарегистрирована 1 заявка на изобретение.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследований, создании экспериментальной установки и разработке методик исследований. Автор непосредственно принимал участие в отборе проб исследуемого сырья на месторождениях совместно с ФГБНУ «Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа», проведении экспериментов и апробации результатов работы. Им единолично выполнена обработка экспериментальных данных, сделан анализ и сформулированы выводы.

Структура и объем диссертации: диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников (196 наименований) и трех приложений, содержит 144 страницы, 36 таблиц и 34 рисунка.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность продолжения поиска путей переработки местных ресурсов низкосортного сырья для энергетического использования, сформулирована цель диссертационной работы. Дается описание научных положений, выносимых на защиту, подчеркивается их обоснованность, новизна и практическая ценность.

В первой главе показано развитие исследований в области теплотехнологической переработки низкосортного сырья, значительный вклад в которое внесли Агроскин А.А., Григорьев В.А., Исламов С.Р., Казаков Е.И., Раковский В.Е., Чуханов З.Ф. и др. Описаны и обобщены характеристики наиболее распространенных видов низкосортного сырья. Изложены теоретические основы процесса теплотехнологической переработки твердого топлива. Рассмотрено влияние режимных параметров (включая температуру, скорость нагрева, размер частиц, давление и наличие катализаторов) на течение процесса и характеристики получаемых продуктов.

Описаны основы формования ТКТ и параметры (наличие влаги, размер частиц, температура), влияющие на его характеристики, а также приведены наиболее часто встречающиеся в промышленности виды связующих веществ.

Аналитический обзор теплотехнологий переработки низкосортного сырья в ТКТ показал, что основным недостатком малотоннажного производства является использование дорогого и энергозатратного прессового оборудования на стадии формовки. В результате производимое ТКТ имеет высокую себестоимость и соот-

ветственно неконкурентоспособно на топливно-энергетическом рынке ввиду того, что его стоимость, как правило, превышает стоимость привозного угля.

На основе проведенной систематизации и анализа сведений о состоянии вопроса поставлены задачи настоящего исследования.

Во второй главе рассматриваются характеристики перерабатываемого сырья и методические основы экспериментальных исследований. Приводится описание экспериментальной установки, реализующей теплотехнологическую переработку сырья, методик проведения экспериментов и обработки результатов.

Методическая структура исследований включает:

- определение теплотехнических характеристик и элементного состава исходного низкосортного сырья;
- проведение экспериментов по теплотехнологической переработке согласно специально разработанной методике и определение характеристик получаемых продуктов;
- исследование параметров формования ТКТ;
- определение теплотехнических характеристик и механические испытания ТКТ.

Исследованные теплотехнические характеристики низкосортного органического сырья Томской области приведены в таблице 1. В связи с потенциально высокими эксплуатационными затратами, неизбежными при энергетическом использовании высоковлажного и высокозольного топлива, данное сырье нецелесообразно сжигать традиционными методами.

Таблица 1 – Теплотехнические характеристики исследуемого сырья

Теплотехническая характеристика	Торф			Таловский уголь	Карасевский сапрпель	Древесная щепа
	Суховской	Аркадьевский	Кандинский			
Влажность W_t^r , %	59,6±0,4	38,2±0,4	72,8±0,4	51,0±0,4	67,0±0,4	45,0±0,4
Зольность A^d , %	39,5±0,8	31,5±0,7	9,1±0,2	25,9±0,6	38,4±0,8	0,6±0,2
Выход летучих веществ V^{daf} , %	69,3±2,0	71,0±2,0	71,6±2,1	63,2±1,8	84,8±2,4	91,8±2,6
Теплота сгорания Q^{daf} , МДж/кг	23,1	19,4	19,8	27,1	18,6	19,1
Низшая теплота сгорания Q_i^r , МДж/кг	4,2±0,2	7,3±0,2	3,1±0,2	8,6±0,2	2,1±0,2	9,3±0,2

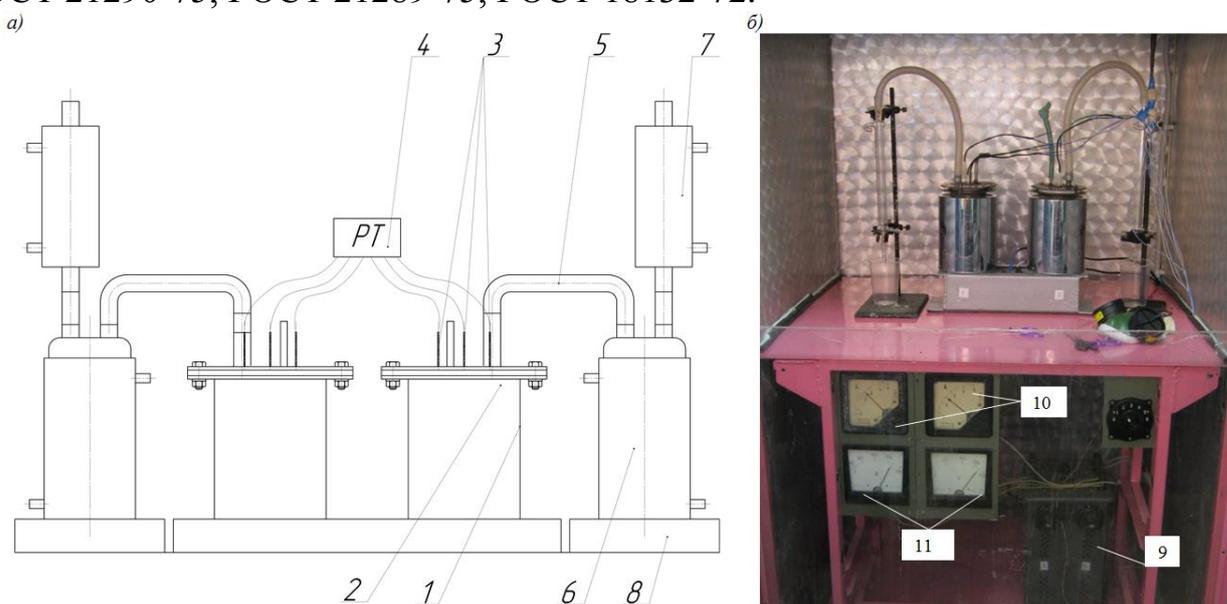
Установленные значения содержания углерода ($C^{daf} = 50,87-68,38$ %) и водорода ($H^{daf} = 5,25-6,28$ %) обуславливают достаточно высокую теплотворность горючей массы ($Q^{daf} = 18,6-27,1$ МДж/кг). Высокое содержание кислорода ($O^{daf} = 24,28-42,70$ %) указывает на возможность протекания экзотермических реакций при термическом разложении. Низкое содержание серы ($S^{daf} = 0,02-0,15$ %) является предпосылкой к получению энергетических продуктов, практически не наносящих вред окружающей среде выбросами топливных оксидов серы при их сжигании.

Исследование теплотехнических параметров теплотехнологии проводилось на экспериментальной установке (рисунок 1), позволяющей перерабатывать сырьё в интервале температур 200-500 °С при различной мощности нагрева (270-750 Вт).

При переработке составлялся материальный баланс выхода продуктов (полукокса, газа и пиролизного конденсата, представляющего собой смесь пиролизной смолы и подсмольной воды) и определялись их характеристики.

Формование ТКТ осуществлялось при помощи штамповочных форм.

Теплотехнические характеристики исходного сырья, продуктов теплотехнологической переработки и ТКТ определялись согласно ГОСТ Р 52917-2008, ГОСТ Р 52911-2008, ГОСТ 11022-95, ГОСТ 6382-2001. Теплота сгорания определялась на адиабатическом бомбовом колориметре АБК-1 согласно ГОСТ 147-95. Элементный состав исследовался на анализаторе Vario MicroCube. Качественный и количественный состав получаемого при теплотехнологической переработке газа определялся на газовом хроматографе Хроматэк-Кристалл 5000.2. Определение прочностных характеристик ТКТ и его водопоглощения проводилось согласно ГОСТ 21290-75, ГОСТ 21289-75, ГОСТ 18132-72.



а) – принципиальная схема, б) – вид в сборе;

1 – нагревательный элемент, 2 – реактор, 3 – система термопар, 4 – регистратор температуры, 5 – термостойкий шланг, 6 – конденсатор, 7 – холодильник, 8 – опора, 9 – автотрансформатор, 10 – амперметр, 11 – вольтметр

Рисунок 1 – Экспериментальная установка теплотехнологической переработки низкосортного сырья

В третьей главе приводятся результаты исследований параметров теплотехнологической переработки. Эксперименты заключались в нагреве сырья до 450 °С без доступа кислорода. Результатами исследований являются материальные балансы теплотехнологической переработки и характеристики конечных продуктов, на основании которых можно оценить техническую целесообразность переработки исследуемого сырья в ТКТ для последующего энергетического использования.

В результате составления материального баланса (таблица 2), погрешность измерений составляющих которого не превысила 8 %, установлено, что выход полукокса для всего спектра низкосортного сырья составляет 31,1-74,8 % (в пересчете на сухую массу). Кандинский торф и древесная щепка при переработке дают наименьшее количество полукокса (31,1-43,4 %), при этом выход пиролизного конденсата и

газа составляет соответственно 23,6-26,2 % и 30,4-45,3 %. Данное сырьё может представлять ценность как для изготовления ТКТ, так и для получения газа.

При определении характеристик продуктов теплотехнологической переработки отмечено, что полукокс практически не содержит влаги. При переработке большинства видов исследованного сырья полукокс характеризуется высокими значениями зольности ($A^d = 22,9-61,9$ %) и низким выходом летучих веществ ($V^{daf} = 12,7-29,6$ %), однако полукокс из древесной щепы, как и исходное сырьё, имеет низкую зольность ($A^d = 3,5$ %). Благодаря высокому содержанию углерода его теплота сгорания на сухую беззольную массу равна $Q^{daf} = 23,0-33,0$ МДж/кг, что в пересчете на рабочее состояние составляет для торфяных полукокс – 11,1-21,5 МДж/кг, угольного – 18,2 МДж/кг, сапропелевого – 10,0 МДж/кг, древесного – 31,9 МДж/кг.

Таблица 2 – Материальный баланс теплотехнологической переработки низкосортного сырья Томской области (относительно сухой массы, %)

Продукт \ Сырьё	Суховской торф	Аркадьевский торф	Кандинский торф	Таловский уголь	Карасевский сапропель	Древесная щепка
Полукокс	60,7±7,9	74,8±1,9	43,4±0,5	58,8±3,0	67,4±1,8	31,1±3,3
Пиролизный конденсат, в том числе:	20,3±1,6	12,0±0,7	26,2±2,4	19,0±1,5	14,1±2,4	23,6±4,4
– смола	3,9±0,6	4,8±1,0	6,3±1,3	8,2±1,0	4,6±0,8	следы
Газ	19,0±6,9	13,2±1,5	30,4±2,9	22,2±2,7	18,5±0,6	45,3±3,0

Благодаря высокому содержанию кислорода в исследуемом сырьё теплота разложения органической массы при теплотехнологической переработке имеет положительное значение (рисунок 2). Это объясняется тем, что часть горючих компонентов сырья вступает в химическую реакцию с содержащимся в нём кислородом, выделяя тепло. В результате окисления и декарбонирования минеральной массы сырья в полученном газе наблюдается высокое содержание балласта ($CO_2+N_2 = 36,18-45,22$ %).

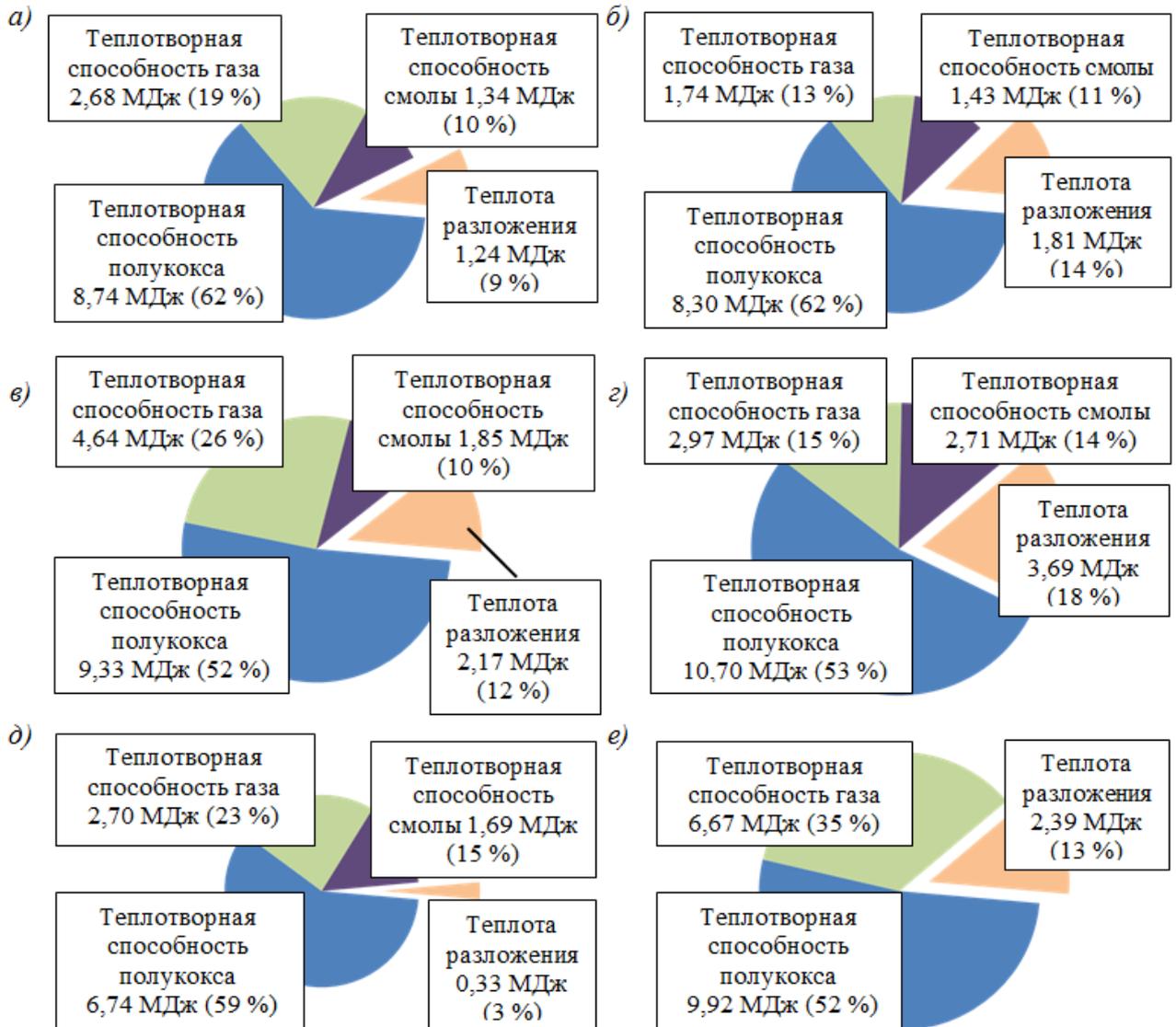
Для получения ТКТ ценность представляют полукокс и смола, являющиеся основой для формования. Получаемый при теплотехнологической переработке газ рассматривается в качестве побочного продукта. Несмотря на высокую долю содержания балласта, этот газ имеет теплоту сгорания 15,6-19,06 МДж/м³ (13,22-15,27 МДж/кг). Учитывая довольно высокое значение выхода газа (13,2-45,3 %) и его теплоту сгорания, целесообразно рассматривать газ в качестве средства для снижения затрат на собственные нужды при производстве ТКТ: тепло от сжигания газа может быть использовано для осуществления самого процесса теплотехнологии, а также для сушки исходного сырья и получаемого ТКТ. Возможны варианты, при которых тепла от сжигания полученного газа в совокупности с собственным теплом разложения будет достаточно для осуществления теплотехнологической переработки.

На основе полученных результатов сделаны следующие выводы.

1) Теплотехнологическая переработка исследуемого сырья позволяет получить энергетически ценные продукты для формования ТКТ – пиролизную смолу и полукокс, практически не содержащие влаги и имеющие высокую теплоту сгорания.

2) Теплота разложения органической массы исследуемого сырья имеет положительное значение и составляет 0,33-3,69 МДж на 1 кг высушенного низкосортного сырья.

3) Газ, являющийся побочным продуктом в данной технологии, целесообразно использовать для снижения затрат на собственные нужды производства ТКТ.



а) – суховской торф; б) – аркадьевский торф; в) – кандинский торф; г) – таловский уголь; д) – озерный сапрпель; е) – древесная щепа

Рисунок 2 – Распределение потенциального тепловыделения между продуктами теплотехнологической переработки 1 кг высушенного низкосортного сырья

В четвертой главе приводятся результаты исследований параметров формования ТКТ. Согласно ГОСТ Р 54248-2010 в зависимости от размеров ТКТ делится на pellets и брикеты. В настоящей работе были исследованы следующие образцы ТКТ: pellets диаметром 20 мм и высотой 20 мм, брикеты диаметром 50 мм и высотой 50 мм.

В литературных источниках встречаются работы по использованию пиролизной смолы в качестве связующего вещества. Исследование этого варианта привело к решению, в котором ТКТ получают смешиванием пиролизной смолы с измельченным полукоксом. В этом случае соотношение полукокса и смолы состав-

ляет 1 : 1 (по массе). Последовательное увеличение концентрации полукокса до 3 : 2 приводит к тому, что формовочная смесь становится слишком сухой, связующего вещества не хватает и ТКТ не формируется без приложения усилий прессы. Увеличение содержания смолы до 3 : 2, наоборот, делает смесь слишком вязкой, не позволяя придать топливу твёрдую и устойчивую форму. После формовки ТКТ необходимо сушить при температуре 100-105 °С (более низкая температура сушки приводит к неполному затвердеванию смолы).

В результате переработки исследуемого сырья получено ТКТ с низшей теплотой сгорания 14,0-22,9 МДж/кг (таблица 3).

Таблица 3 – Характеристики ТКТ из полукокса и смолы

Характеристика \ Сырьё	Суховской торф	Аркадьевский торф	Кандинский торф	Таловский уголь	Карасевский сапропель
Зольность A^d , %	32,2±0,7	48,0±1,0	18,8±0,4	33,6±0,7	36,7±0,8
Выход летучих веществ V^{daf} , %	82,6±0,2	89,6±0,2	86,0±0,2	88,3±0,2	83,5±0,2
Теплота сгорания Q^{daf} , МДж/кг	26,1	26,9	28,2	30,0	27,6
Низшая теплота сгорания Q_i^r , МДж/кг	17,7±0,2	14,0±0,2	22,9±0,2	19,9±0,2	17,5±0,2
Прочность при сбрасывании, %	100±0	100±0	100±0	100±0	100±0

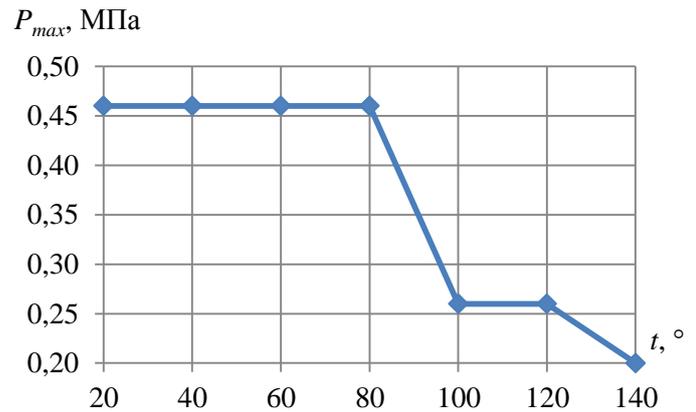
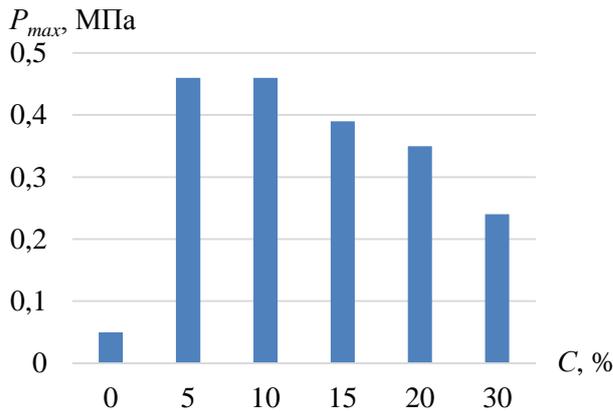
Древесина не может быть переработана вышеописанным способом, так как в пиролизном конденсате отсутствует необходимая составляющая – пиролизная смола.

Установленное значение соотношения пиролизной смолы и полукокса показывает, что выхода смолы из исследуемого сырья (таблица 2) недостаточно для переработки всего количества получаемого полукокса, в связи с чем необходимо добавление дополнительного связующего вещества. Данный способ может быть применён к отдельным видам низкосортного сырья.

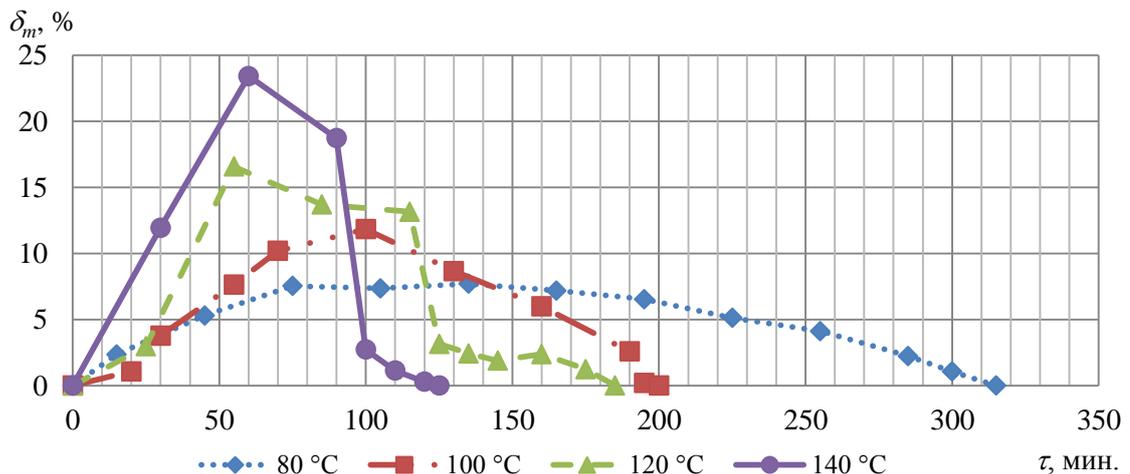
Эксперименты по тестированию в качестве связующего вещества раствора декстрина в пиролизном конденсате (при недостаточном выходе конденсат для подготовки связующего может быть разбавлен водой) позволили определить соотношение компонентов для формовки ТКТ и температуру сушки. При этом соотношение полукокса и связующего составляет 2 : 3. Содержание декстрина 5-10 % в пиролизном конденсате при формовке обеспечивает наибольшую прочность ТКТ на сжатие (рисунок 3), последовательное увеличение содержания декстрина приводит к снижению прочности топлива. С практической и экономической точки зрения для получения ТКТ целесообразно использовать связующее с минимальной концентрацией декстрина, поэтому в дальнейшем использовалось связующее с 5 %-ым его содержанием.

Связующее, состоящее из декстрина и пиролизного конденсата, при воздействии давления вытесняется из штамповочной формы: в форме остается сухой полукокс без связующего, устойчивую твердую форму и прочность которому не удается придать прессованием с усилием вплоть до 30 МПа. Соответственно, изготовление ТКТ должно обеспечиваться посредством формовочного аппарата штамповочного типа. Плотность сырца ТКТ, сформованного из смеси полукокса и связующего, составляет 1400-1600 кг/м³.

Температура сушки при изготовлении пеллет на основе связующего из декстрина составляет от 20 до 80 °С (рисунок 4), брикетов – от 20 до 40 °С.



Более высокая температура сушки способствует интенсивному испарению влаги (рисунок 5), что приводит к образованию пор и трещин на поверхности, снижая механическую прочность ТКТ. Температурный интервал для изготовления пеллет позволяет производителю самостоятельно выбирать в его пределах температуру сушки. Для обеспечения более высокой производительности предпочтительна повышенная температура до 80 °С, которая позволяет сократить время сушки. Более низкая температура (20 °С) не требует дополнительных затрат на осуществление сушки, но увеличивает продолжительность пребывания пеллет на этой стадии производства, требует помещения большей площади для их высушивания.



Использование декстрина в составе связующего снижает зольность ТКТ по сравнению с основным продуктом (полукоксом) на 0,6-10,3 % (таблица 4). При переработке низкосортного сырья, полукоккс которого имеет низшую теплоту сго-

рания менее 16,8 МДж/кг, добавление декстрина позволяет повысить теплоту сгорания изготавливаемого ТКТ.

Таблица 4 – Характеристики ТКТ с декстриновым связующим

Характеристика \ Сырьё	Суховской торф	Аркадьевский торф	Кандинский торф	Таловский уголь	Карасевский сапрпель	Древесная щепа
Зольность A^d , %	40,7±0,9	51,6±1,1	19,1±0,4	32,1±0,7	47,1±1,0	2,9±0,1
Выход летучих веществ V^{daf} , %	20,9±0,2	15,5±0,2	19,4±0,2	10,6±0,2	16,5±0,2	13,1±0,2
Низшая теплота сгорания Q_i^r , МДж/кг	14,7±0,2	13,1±0,2	21,1±0,2	18,0±0,2	11,6±0,2	29,4±0,2
Прочность при сбрасывании, %	100±0	100±0	100±0	100±0	100±0	100±0

ТКТ с декстриновым связующим по своим теплотехническим характеристикам сопоставимо с каменными углями Кузнецкого бассейна ($W_t^r = 6,0-24,0$ %, $A^r = 10,2-39,5$ %, $Q_i^r = 14,4-25,3$ МДж/кг), поэтому его конкурентоспособность на топливно-энергетическом рынке будет определяться преимущественно ценовым фактором.

При сравнении характеристик ТКТ (таблица 3), полученного из полукокса и пиролизной смолы, и ТКТ на основе связующего с декстрином (таблица 4) можно отметить, что добавление смолы при формовке существенно улучшает теплотехнические характеристики ТКТ: зольность ТКТ со смоляным связующим на 0,3-10,4 % ниже зольности ТКТ с декстриновым, выход летучих веществ выше на 61,7-77,7 %, низшая теплота сгорания выше на 0,9-5,9 МДж/кг.

Испытания прочности на сбрасывание ТКТ (как полученного из смолы и полукокса, так и с добавлением декстрина) согласно ГОСТ 21289-75 продемонстрировали 100 %-ую устойчивость к разрушению: топливо способно выдержать операции загрузки и выгрузки при транспортировании, подаче в котел. Показатели механической прочности на сжатие ТКТ показывают возможность его штабельного складирования и хранения с небольшими потерями.

Испытания на водопоглощение показали отсутствие влагостойкости изготовленного ТКТ: происходит полное разрушение при длительном контакте с водой. Однако, нанесение пиролизной смолы на его поверхность и последующая сушка при температуре 20-40 °С позволяет обеспечить полную влагостойкость (водопоглощение по условию испытания ГОСТ 21290-75 равно нулю).

На основе полученных результатов сделаны следующие выводы.

1) Получение ТКТ из продуктов теплотехнологической переработки низкосортного сырья (полукокса и пиролизной смолы) без использования прессового оборудования возможно только для сырья с высоким выходом смолы. Параметры данной теплотехнологии: термическая переработка – низкотемпературный пиролиз (температура 400-450 °С), соотношение полукокса и смолы – 1 : 1, температура сушки ТКТ – 100-105 °С. Сырьё с низким выходом пиролизной смолы не может быть переработано данным способом.

2) Использование декстрина в качестве добавки к связующему веществу позволяет перерабатывать различные виды низкосортного сырья независимо от выхода продуктов теплотехнологической переработки. Параметры данной теплотехнологии: термическая переработка – низкотемпературный пиролиз (температура 400-450 °С), связующее – (5-10) %-ый раствор декстрина в пиролизном конденсате.

При этом соотношение полукокса и связующего должно составлять 2 : 3 (при недостаточном выходе пиролизного конденсата возможно его разбавление водой). Температура сушки для изготовления пеллет составляет от 20 до 80 °С, брикетов – не выше 40 °С.

3) Формование ТКТ должно осуществляться оборудованием штамповочного типа, исключая воздействие давления на формовочную смесь. При этом плотность сырца ТКТ, сформованного из смеси полукокса и связующего, составляет 1400-1600 кг/м³.

4) Нанесение пиролизной смолы на поверхность и последующая сушка при температуре 20-40 °С позволяют обеспечить полную влагостойкость ТКТ, тем самым снижая эксплуатационные затраты при его использовании и увеличивая привлекательность потребительских свойств.

В пятой главе изложены рекомендации к проектированию технологических линий по производству ТКТ, разработанные на основе установленных параметров теплотехнологии. Предложены варианты получения трех типов ТКТ из низкосортного органического сырья на основе:

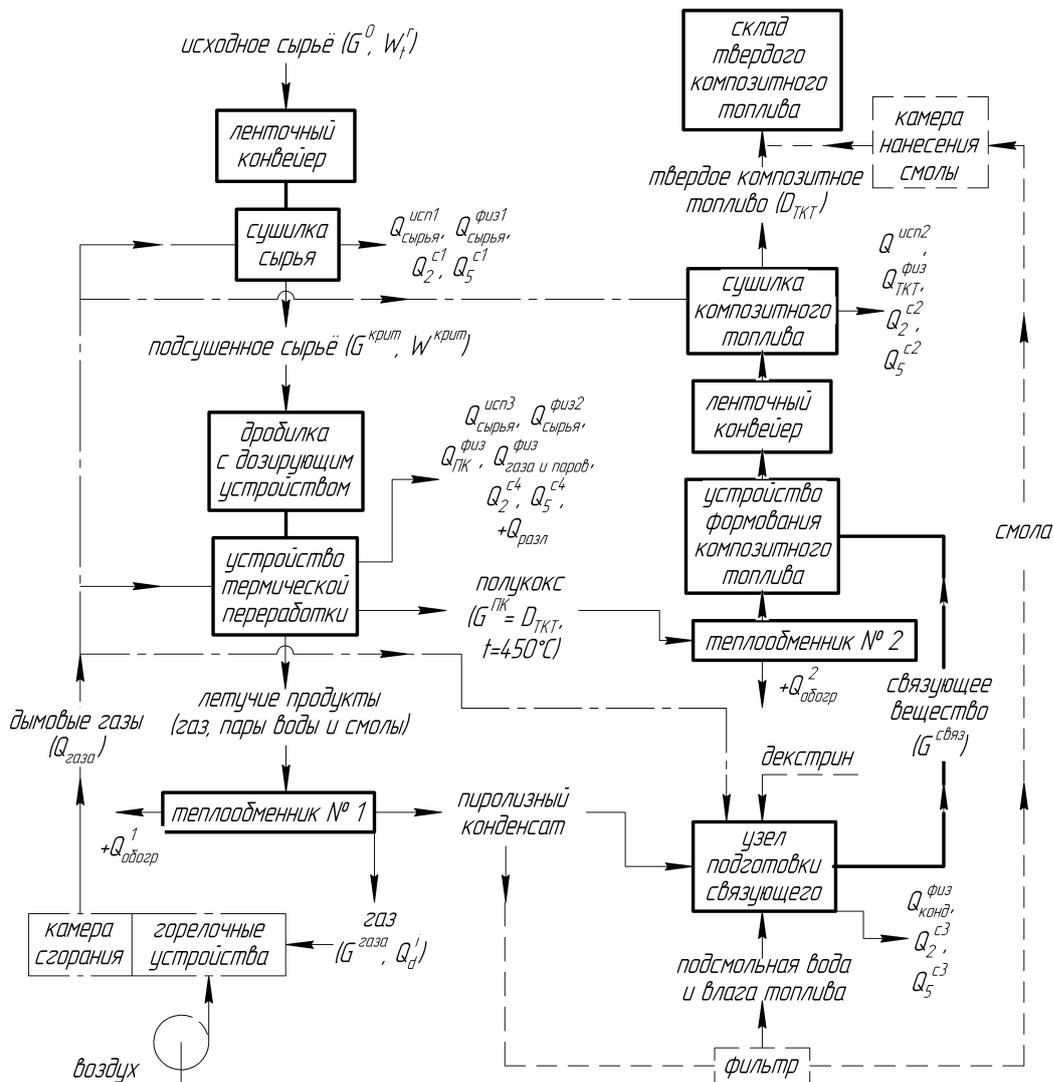
- полукокса и пиролизной смолы;
- полукокса и раствора декстрина в пиролизном конденсате (или воде);
- полукокса и раствора декстрина в пиролизном конденсате (или воде), с последующим нанесением смолы на поверхность.

Принципиально производство ТКТ в схематичном виде можно представить следующим образом (рисунок 6). Низкосортное сырье поступает в сушилку, затем направляется в дробилку, где измельчается и дозированно поступает в устройство термической переработки (например, шнекового типа). В ходе нагрева из сырья выделяются летучие продукты (газ, пары смолы и подсмольной воды), которые отводятся в теплообменник 1, где посредством конденсации происходит их разделение. Газ подается в горелочные устройства, в которых смешивается с воздухом, и затем сжигается в камере сгорания. Тепло образующихся при этом дымовых газов направляется для обогрева устройства термической переработки, в сушилки сырья и ТКТ, а также в узел подготовки связующего.

Пиролизный конденсат в виде смеси смолы и подсмольной воды направляется в узел подготовки связующего. Полукокс из устройства термической переработки поступает в теплообменник 2 для охлаждения и затем в устройство формования ТКТ. В устройстве формования предусмотрен канал ввода связующего вещества, полученного в узле подготовки связующего. Далее ТКТ поступает в сушилку, а затем на склад готовой продукции.

При производстве влагостойкого ТКТ технологическая линия дополнительно оснащается фильтром пиролизного конденсата и камерой нанесения смолы.

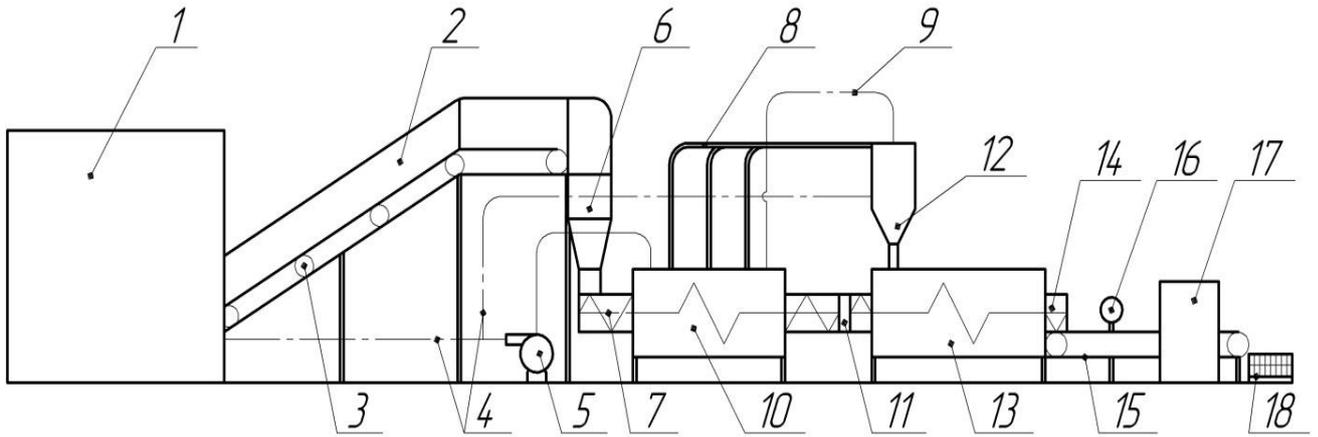
В качестве технической реализации малотоннажного производства разработана компоновочная схема технологической линии производства ТКТ (рисунок 7), удельная потребляемая электрическая мощность оборудования которой ниже, чем у других производителей, использующих прессовое оборудование или экструдер для формовки топлива.



- G^0 – расход сырья, кг/с; W_t^r – влажность сырья, %; $G^{\text{крит}}$ – расход сырья после предварительной сушки, кг/с; $W^{\text{крит}}$ – влажность сырья после предварительной сушки, %; $G^{\text{ПК}}$ – выход полукокса, кг/с; $G^{\text{связ}}$ – расход связующего вещества, кг/с; $D_{\text{ТКТ}}$ – производительность линии, кг/с; $G^{\text{газа}}$ – расход газа, кг/с; Q_a^i – теплота сгорания газа, кДж/кг; $Q_{\text{газа}}$ – тепло, полученное при сжигании газа, кВт; $Q_{\text{сырья}}^{\text{исп1}}$ – тепло, затрачиваемое на испарение влаги в процессе сушки исходного сырья до влажности $W^{\text{крит}}$, кВт; $Q_{\text{сырья}}^{\text{физ1}}$ – физическое тепло сырья после сушки, кВт; $Q_{\text{исп2}}$ – тепло, затрачиваемое на испарение влаги в процессе сушки ТКТ, кВт; $Q_{\text{ТКТ}}^{\text{физ3}}$ – физическое тепло ТКТ после сушки, кВт; $Q_{\text{сырья}}^{\text{исп3}}$ – тепло, затрачиваемое на испарение оставшейся влаги сырья, кВт; $Q_{\text{сырья}}^{\text{физ2}}$ – тепло, необходимое для нагрева сырья до 100 °С, кВт; $Q_{\text{ПК}}^{\text{физ3}}$ – тепло на теплотехнологическую переработку сырья при 450 °С, кВт; $Q_{\text{газа и паров}}^{\text{физ3}}$ – тепло летучих продуктов (газа, паров смолы и подсмольной воды), кВт; $Q_2^{c1}, Q_2^{c2}, Q_2^{c3}, Q_2^{c4}$ – потеря тепла с уходящими газами, кВт; $Q_5^{c1}, Q_5^{c2}, Q_5^{c3}, Q_5^{c4}$ – потеря тепла от наружного охлаждения, кВт; $Q_{\text{разл}}$ – тепло разложения органической массы сырья, кВт; $Q_{\text{обогр}}^1, Q_{\text{обогр}}^2$ – тепло охлаждающего теплоносителя на обогрев производственных площадей, кВт

Рисунок 6 – Структурная схема теплотехнологического производства ТКТ

На основе установленных параметров, заданной производительности, материальных и тепловых балансов, используемых в качестве исходных данных приведена методика расчета каждого элемента линии. Сделана технико-экономическая оценка организации производства 1,875 т/час (45 т/сутки) ТКТ на Кандинском торфяном месторождении, в результате которой определено, что:



1 – склад сырья, 2 – сушилка сырья, 3 – конвейер, 4 – трубопровод дымовых газов, 5 – дымосос, 6 – дробилка, 7 – шнековый транспортер, 8 – трубопровод летучих продуктов, 9 – трубопровод газа, 10 – камера сгорания, 11 – соединительная муфта, 12 – узел подготовки связующего, 13 – теплообменник, 14 – шнековый транспортер, 15 – конвейер, 16 – прижимной валок, 17 – штамповочный формовщик, 18 – вагонетка

Рисунок 7 – Компоновочная схема технологической линии малотоннажного производства ТКТ

1) при значении влажности исходного кандинского торфа менее 35 % процесс пиролиза может протекать автотермически за счет тепла разложения органической массы сырья, для этого необходимо лишь организовать предварительный розжиг торфа и теплоизолировать линию:

$$Q_{\text{разл}} - Q_{\text{сырья}}^{\text{физ2}} - Q_{\text{ПК}}^{\text{физ}} - Q_{\text{газа и паров}}^{\text{физ}} - Q_{\text{сырья}}^{\text{исп3}} \geq 0,$$

где $Q_{\text{разл}} = Q_{\text{разл}}^{\text{уд}} \cdot G_{\text{Т}}^{\text{сух}}$, кВт; $Q_{\text{разл}}^{\text{уд}}$ – удельная теплота разложения топлива, кДж/кг; $G_{\text{Т}}^{\text{сух}}$ – расход сухого сырья, кг/с; $Q_{\text{сырья}}^{\text{физ2}} = C_{\text{р}}^{\text{сырья}} \cdot G_{\text{Т}}^{\text{сух}} \cdot (100 - t_0)$, кВт; $C_{\text{р}}^{\text{сырья}}$, $C_{\text{р}}^{\text{ПК}}$, $C_{\text{р}}^{\text{газа}}$, $C_{\text{р}}^{\text{п.конд}}$ – соответственно теплоемкости сырья, полукокса, газа, паров пиролизного конденсата, кДж/(кг·К); t_0 – температура сырья после сушилки, °С; $Q_{\text{ПК}}^{\text{физ}} = C_{\text{р}}^{\text{ПК}} \cdot \left(\frac{G_{\text{Т}}^{\text{сух}} + G_{\text{ПК}}}{2} \right) \cdot (t^{\text{к}} - 100)$, кВт; $t^{\text{к}}$ – конечная температура переработки сырья, °С; $Q_{\text{газа и паров}}^{\text{физ}} = C_{\text{р}}^{\text{газа}} \cdot G_{\text{Т}}^{\text{сух}} \cdot W^{\text{газа}} \cdot (t^{\text{к}} - t^{\text{н.в.г.}}) + C_{\text{р}}^{\text{п.конд}} \cdot G_{\text{Т}}^{\text{сух}} \cdot W^{\text{конд}} \cdot (t^{\text{к}} - 100)$, кВт; $W^{\text{газа}}$ – массовый выход газа (относительно сухой массы исходного сырья); $t^{\text{н.в.г.}}$ – температура начала выхода газа, °С; $W^{\text{конд}}$ – массовый выход пиролизного конденсата (относительно сухой массы исходного сырья); $Q_{\text{сырья}}^{\text{исп3}} = (G^{\text{крит}} - G_{\text{Т}}^{\text{сух}}) \cdot r$, кВт; r – удельная теплота парообразования, кДж/кг.

Вывод о возможности автотермического протекания процесса низкотемпературного пиролиза подтверждается исследованиями А.В. Казакова, А.Н. Субботина и Р.Н. Кулеша.

2) тепла от сжигания газа, получаемого в процессе термической переработки, достаточно для осуществления сушки ТКТ, подготовки связующего (разогрев пиролизного конденсата до 70 °С) и компенсации потерь в окружающую среду:

$$Q_{\text{газа}} - Q_2^{c1} - \sum_{i=2}^4 Q_2^{ci} - \sum_{i=1}^4 Q_5^{ci} - (Q_{\text{сырья}}^{\text{исп1}} + Q_{\text{сырья}}^{\text{исп2}}) - (Q_{\text{сырья}}^{\text{физ1}} + Q_{\text{ТКТ}}^{\text{физ}} + Q_{\text{конд}}^{\text{физ}}) > 0,$$

где $Q_{сырья}^{исп1} = (G^0 - G^{крит}) \cdot r$, кВт; $Q^{исп2} = (G_{ТКТ}^0 - D_{ТКТ}) \cdot r$, кВт; $G_{ТКТ}^0 = G^{ПК} + G^{связ}$ – производительность ТКТ на выходе из устройства формования, кг/с; $Q_{сырья}^{физ1} = C_p^{сырья} \cdot G_T^{сух} \cdot (t_0 - t_{о.с.})$, кВт; $t_{о.с.}$ – начальная температура сырья, °С; $Q_{ТКТ}^{физ} = C_p^{ТКТ} \cdot G_T^{сух} \cdot (t_c - t_{ф.у.})$, кВт; $C_p^{ТКТ} \approx C_p^{ПК}$ – теплоемкость ТКТ, кДж/(кг·К); t_c – температура сушки (зависит от вида ТКТ), °С; $t_{ф.у.}$ – температура ТКТ на выходе из формовочного устройства, °С; $Q_{конд}^{физ} = C_p^{конд} \cdot G_T^{сух} \cdot W^{конд} \cdot (70 - t_{м.о.})$, кВт; $C_p^{конд}$ – теплоемкость пиролизного конденсата, кДж/(кг·К); $t_{м.о.}$ – температура пиролизного конденсата на выходе из теплообменника, °С.

Посредством программного обеспечения «Project Expert 7» проведен расчет показателей экономической эффективности производства ТКТ для оптимистичного и пессимистичного сценариев на период пять лет. Результаты расчета показали, что для достижения значения модифицированной внутренней нормы рентабельности (MIRR) 30 % цена ТКТ за тонну при оптимистичном сценарии должна составлять 3 400 рублей, при пессимистичном – 4 180 рублей.

Стоимость ТКТ (Pini&Kay, Nestro, Ruf, пеллеты и др.), представленных в настоящее время на рынке, составляет от 5 500 до 12 000 рублей за тонну. Если рассматривать этих производителей в качестве основных конкурентов, то экономическая эффективность теплотехнологической переработки низкосортного сырья в ТКТ согласно разработанной теплотехнологии становится очевидна.

В приложении приведены расчеты погрешности измерений, документы об использовании результатов, тепловой расчет малотоннажного производства ТКТ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулированы нижеследующие выводы.

1. Установленные теплотехнические характеристики низкосортного сырья (торфа, бурого угля и сапропеля) наиболее крупных месторождений Томской области и древесной мелочи в отходах деревоперерабатывающих предприятий, материальный баланс и характеристики продуктов теплотехнологической переработки позволили сформировать базу новых данных, пригодную для оценки возможности получения ТКТ или другого вида товарной продукции. База данных позволяет судить о том, что большинство видов сырья пригодно для переработки в ТКТ. Кандинский торф и древесная щепа представляет ценность как для изготовления ТКТ, так и для получения газа.

2. На уровне изобретения разработаны три варианта теплотехнологии малотоннажной переработки низкосортного органического сырья. В экспериментальных исследованиях, выполненных на основе разработанных методических положений и их лабораторной реализации, определены параметры теплотехнологии.

2.1. В варианте получения ТКТ из полукокса и пиролизной смолы, используемой в качестве связующего, соотношение полукокса и смолы составляет 1 : 1 (по массе) при температуре сушки ТКТ 100-105 °С. Данный способ переработки подходит только для сырья, обладающего выходом смолы, сопоставимым с выходом полукокса.

2.2. Для изготовления ТКТ из полукокса и связующего на основе декстрина, растворенного в собственном пиролизном конденсате (или воде), использование 5-10 %-го раствора декстрина позволяет получать ТКТ с наиболее высокими прочностными характеристиками. Соотношение полукокса и связующего составляет 2 : 3. Температура сушки ТКТ при изготовлении пеллет составляет от 20 до 80 °С, брикетов – не выше 40 °С.

2.3. При получении влагостойкого ТКТ соотношение полукокса и связующего с 5-10 %-ым содержанием декстрина в воде составляет 2 : 3. Температура сушки ТКТ при изготовлении пеллет составляет от 20 до 80 °С, брикетов – не выше 40 °С. Нанесение смолы на поверхность топлива и последующая сушка при температуре 20-40 °С обеспечивает полную влагостойкость.

3. Разработанные методические положения и лабораторная база позволили комплексно исследовать теплотехнологию, экспериментальным путем установив температуру переработки исходного органического сырья, материальные и тепловые балансы, соотношения компонентов при формовании, температуру сушки ТКТ.

4. В результате экспериментальной апробации разработанной теплотехнологии на низкосортном органическом сырье Томской области получено ТКТ с теплотой сгорания:

- на основе полукокса и пиролизной смолы – от 14,0 до 22,9 МДж/кг;
- на основе полукокса и декстринового связующего – от 11,6 до 29,4 МДж/кг.

5. Составлена схема теплотехнологического производства ТКТ, на основе которой разработана малотоннажная технологическая линия с удельной потребляемой электрической мощностью оборудования ниже, чем у аналогичных линий. Предложена методика расчета линии и дана технико-экономическая оценка целесообразности организации производства ТКТ на Кандинском торфяном месторождении.

РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Заворин А.С., Казаков А.В., **Табакоев Р.Б.** Экспериментальные предпосылки к технологии производства топливных брикетов из торфа // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – № 4. – С. 18–22.

2. **Табакоев Р.Б.**, Казаков А.В., Заворин А.С. Перспективность низкосортных топлив Томской области для теплотехнологического использования // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – № 4. – С. 41–46.

3. **Табакоев Р.Б.**, Заворин А.С., Казаков А.В., Черемисин И.Г. Теплотехнология переработки низкосортного топлива в высококалорийные топливные брикеты // Энергосбережение и водоподготовка. – 2014. – № 6. – С. 29–33.

4. **Табакоев Р.Б.**, Казаков А.В., Заворин А.С. Твёрдое композитное топливо из низкосортного сырья (технологический аспект) // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – № 4. – С. 56–64.

5. **Табакоев Р.Б.**, Казаков А.В., Заворин А.С. Разработка инженерно-аппаратурного оформления энергосберегающей технологической схемы производства твердого композитного топлива из низкосортного сырья // Химическая технология. – 2015. – № 6 – С. 363–369.

Индексируемые Scopus:

6. **Tabakaev R.B.**, Gergelizhiu P.S., Kazakov A.V., Zavorin A.S. Biomass recycling heat technology and energy products // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2014. – Vol. 66. – P. 1–4, article number 012052 (индексирована в базах Scopus и WoS).

7. Kazakov A.V., **Tabakaev R.B.**, Novoseltsev P.Y., Astafjev A.V. Low-temperature conversion of low-grade organic raw, part 1 (technical aspects) // MATEC Web of Conferences. – 2014. – Vol. 19. – P. 1–4, article number 01014 (индексирована в базе Scopus).

8. Zavorin A.S., **Tabakaev R.B.**, Novoseltsev P.Y., Astafjev A.V. Low-temperature conversion of low-grade organic raw, part 2 (economic aspects) // MATEC Web of Conferences. – 2014. – Vol. 19. – P. 1–5, article number 01015 (индексирована в базе Scopus).

Индексируемые РИНЦ:

9. Казаков А.В., Заворин А.С., Новосельцев П.Ю., **Табакоев Р.Б.** Малая распределенная энергетика России: совместная выработка тепло- и электроэнергии // Вестник науки Сибири. – 2013. – № 4. – С. 13–18.

10. Перепечко Л.Н., Фидлер Е.А., Варнаков С. Н., Зеленков П.В., Слизников В.В., Шипилова К.О., Колесникова К.А., Левихина А.В., Зеленская С.И., Казакова О.А., **Табакоев Р.Б.**, Сафонов А.И. Инновационный потенциал российско-китайского научно-технического сотрудничества в области энергетических технологий // Всероссийский журнал научных публикаций. – 2013. – № 5. – С. 46–48.

11. **Табакоев Р.Б.**, Заворин А.С. Твердое композитное топливо из низкосортного сырья // Новости теплоснабжения. – 2015. – № 5. – С. 36–38. Электронный ресурс: http://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=2931 (дата обращения 29.04.2015 г.).

В сборниках трудов конференции:

12. **Табакоев Р.Б.**, Казаков А.В., Заворин А.С., Николаева В.И., Павлов Е.И. Предпосылки к получению облагороженных топливных брикетов из торфа // Теплофизические основы энергетических технологий: сб. науч. трудов Всерос. научно-практ. конф. с международным участием. – Томск: Изд. ТПУ, 2010. – С. 245-248.

13. Воропаев С.А., **Табакоев Р.Б.**, Кефер А.Е. Исследование некоторых видов низкосортного топлива применительно к технологии брикетирования // Современные техника и технологии: Сб. трудов XVII Междунар. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: ТПУ, 2011. – Т. 3. – С. 191-192.

14. Плахова Т.М., Должина А.Д., **Табакоев Р.Б.** Исследование теплового эффекта пиролиза торфа // Современные техника и технологии: Сб. трудов XVII Междунар. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: ТПУ, 2011. – Т. 3. – С. 249-250.

15. Казаков А.В., **Табакоев Р.Б.**, Плахова Т.М. Влияние связующих веществ на прочностные свойства топливных брикетов из торфа // Теплофизические основы энергетических технологий: сб. науч. трудов II Всерос. научно-практ. конф. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – С. 222-225.

16. **Табакоев Р.Б.**, Зубрицкая Я.А., Чесноков Д.В., Зайцев А.С. Связь степени метаморфизма низкосортных топлив и характеристик их топливного газа // Теплофи-

зические основы энергетических технологий: сб. науч. трудов III Всерос. научно-практ. конф. с междунар. участием. – Томск: Изд-во ТПУ, 2012. – С. 240-243.

17. **Табакаев Р.Б.**, Казаков А.В., Гегелижиу П.С. Влияние температуры колонки хроматографа на анализ пиролизных газов // Теплофизические основы энергетических технологий: сб. науч. трудов III Всерос. научно-практ. конф. с международным участием. – Томск: Изд-во ТПУ, 2012. – С. 154-158.

18. **Табакаев Р.Б.**, Зубрицкая Я.А., Гегелижиу П.С. Тестирование технологии термической переработки древесных отходов // Теплофизические основы энергетических технологий: сб. науч. трудов III Всерос. научно-практ. конф. с международным участием. – Томск: Изд-во ТПУ, 2012. – С. 187-190

19. **Табакаев Р.Б.**, Казаков А.В., Баскакова А.С., Уваров Е.А. Теплотехнологическая переработка биомассы Томской области применительно к энергетическому использованию // Теплофизические основы энергетических технологий: сб. науч. трудов IV Всерос. научно-практ. конф. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – С. 290-294.

20. Казаков А.В., **Табакаев Р.Б.**, Скопинцев И.М. Оценка целесообразности теплотехнологической переработки местных низкосортных топлив Томской области в топливные брикеты // Теплофизика и энергетика: сб. тезисов докладов VIII Всерос. семинара вузов по теплофизике и энергетике. – Екатеринбург: УрФу, 2013. – С. 77.

Патенты и заявки

1. Пат. 2458974 Россия. МПК С10L5/14; С10L5/28. Способ получения топливных брикетов из низкосортного топлива / А.С. Заворин, А.В. Казаков, **Р.Б. Табакаев** и др.; заяв. 08.06.2011; опубл. 20.08.2012. – 7 с.: ил.

2. Пат. 2484125 Россия. МПК С10L5/44; С10L5/14; С10L5/26; С10F7/06. Способ изготовления топливных брикетов из биомассы / **Р.Б. Табакаев**, А.С. Заворин, А.В. Казаков и др.; заяв. 16.04.2012; опубл. 10.06.2013. – 7 с.: ил.

3. Заявка на пат. 2014152382 Россия. С10L 5/32; С10L 5/44; С10F 7/06. Способ получения влагостойкого композитного топлива из торфа / А.С. Заворин, А.В. Казаков, **Р.Б. Табакаев**; заяв. 23.12.2014.