

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

На правах рукописи



ТАБАКАЕВ РОМАН БОРИСОВИЧ

ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТВЁРДОГО КОМПОЗИТНОГО ТОПЛИВА ИЗ
НИЗКОСОРТНОГО ОРГАНИЧЕСКОГО СЫРЬЯ

05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
Заворин Александр Сергеевич

Томск – 2015

СОДЕРЖАНИЕ

	С.
Введение.....	4
Глава 1. Теплотехнологии низкосортного органического сырья для энергетического использования: состояние вопроса.....	13
1.1 Низкосортное органическое сырье	13
1.2 Процессы при теплотехнологической переработке твердого органического сырья.....	17
1.3 Процессы при формировании твердого композитного топлива.....	29
1.4 Теплотехнологии переработки низкосортного органического сырья.....	35
1.5 Постановка задач исследований	39
Глава 2. Методические основы экспериментальных исследований теплотехнологии переработки низкосортного органического сырья	41
2.1 Исследуемое органическое сырье.....	41
2.2 Экспериментальная установка теплотехнологической переработки.....	43
2.3 Методика проведения экспериментов.....	48
2.4 Обработка экспериментальных данных	54
Глава 3. Балансовые соотношения теплотехнологии переработки низкосортного органического сырья.....	59
3.1 Материальный баланс теплотехнологической переработки.....	59
3.2 Характеристики продуктов теплотехнологической переработки	60
3.3 Оценка погрешности измерений.....	63
3.4 Анализ результатов	64
3.5 Краткие выводы.....	65
Глава 4. Влияние условий теплотехнологии на свойства твердого композитного топлива для малой энергетики.....	67
4.1 Параметры формирования твердого композитного топлива	67
4.2 Влияние давления на формирование твердого композитного топлива	74
4.3 Параметры придания влагостойкости твердому композитному топливу	76
4.4 Анализ полученных результатов	77
4.5 Краткие выводы.....	79
Глава 5. Рекомендации к проектированию энергоэффективной технологической схемы малотоннажного производства твердого композитного топлива.....	80

5.1 Варианты теплотехнологии малотоннажной переработки низкосортного органического сырья	80
5.2 Инженерно-аппаратурное оформление энергоэффективной технологической схемы производства твердого композитного топлива.....	83
5.3 Методические рекомендации к расчету теплотехнологической линии.....	86
5.4 Технико-экономическая оценка внедрения (на примере Томской области).....	93
Заключение	97
Список использованных источников	99
Приложение А. Определение погрешности измерений	114
Приложение Б. Документы об использовании результатов работы	134
Приложение В. Тепловой расчет технологической линии малотоннажного производства ТКТ из торфа Кандинского месторождения Томской области	137

ВВЕДЕНИЕ

Среди различных используемых источников энергии органическому топливу принадлежит главная роль (более 94 % в масштабах всего мира) [1]. Наиболее распространенным видом органического топлива в теплоэнергетике является твердое, как правило, каменный и бурый уголь, запасы которого на территории России разрабатываются всего в нескольких регионах. Стоимость угля при доставке в регионы, не имеющие собственных запасов, существенно возрастает за счет транспортных расходов. По экспертным оценкам [2-5], затраты на транспортировку увеличивают стоимость топлива более чем в 1,5 раза и достигают 70-80 % от его конечной цены.

Наиболее напряженная ситуация складывается в удаленных и труднодоступных районах, имеющих низкую плотность населения, малую освоенность территорий и слабые транспортные связи с административными центрами. Согласно приведенным данным [6, 7] в России насчитывается свыше 30 тыс. населенных пунктов, расположенных в районах подобного рода, в которых проживает более 10 % населения страны. Энергоснабжение этих поселений осуществляется децентрализованно, в основном котельными на твердом топливе и дизель-генераторными станциями [8], логистика доставки топлива для которых существенно осложнена удаленностью пунктов назначения от основных транспортных магистралей, большими расстояниями перевозок, их многозвенностью и сезонностью завоза. В некоторые районы доставка возможна только воздушным или речным способами. В результате затраты на топливо являются главной составляющей расходов теплоснабжения, а экономически обоснованные тарифы на электроэнергию в некоторых районах достигают 68 руб./кВт·ч [9-11].

Более того, перегруженность железнодорожных путей и периодически возникающие на них аварии, как и взрывы и последующие долгосрочные восстановительные работы на угледобывающих шахтах, создают напряженную ситуацию и ставят под вопрос энергетическую безопасность не только удаленных и труднодоступных районов, но и целых регионов.

В начале 2000-х годов решение проблемы обеспечения регионов РФ энергоресурсами виделось в переводе котельного оборудования с твердого на более дешевый и экологически чистый вид топлива – природный газ. В результате перевода доля природного газа в энергетике РФ к 2008 году составила 53,1 % [12]. Однако, после того как государство изменило свою политику в отношении искусственного сдерживания низкого уровня цен на газ на внутреннем рынке, стоимость его кубического метра увеличилась в 3-4 раза и приблизилась к мировым показателям. Началась обратная тенденция – многие запроектированные на уголь и временно переведенные на газ ТЭЦ и ГРЭС возвратным образом были реконструированы для работы на более дешевом твердом топливе.

Стоит отметить, что в мировой практике в топливно-энергетическом балансе большинства экономически развитых стран использование газа для производства электроэнергии и тепла составляет не более 20-25 % [5]. Среди этих стран наблюдается общая тенденция к переходу на использование в энергетике нетрадиционных возобновляемых энергетических ресурсов, что подтверждается процессом коренного пересмотра энергетических стратегий. Более чем в 73 странах мира уже приняты такие программы [13-16], по результатам выполнения которых доля использования возобновляемых источников энергии в энергетике стран Европейского союза в период 2010-2035 годов должна увеличиться как минимум в 2 раза: с 840 т у.т. в 2010 году до 1680 т у.т. в 2035 году [17, 18]. В некоторых странах ЕС для достижения этой цели разработан ряд мер, на государственном уровне обязывающих энергопроизводителей увеличивать долю использования возобновляемых ресурсов в качестве топлива. Несоблюдение этих мер карается огромными штрафами.

В связи со всем вышеперечисленным Правительство РФ разработало энергетическую стратегию России на период до 2030 года, согласно которой существенная роль отводится снижению доли газа в потреблении первичных топливно-энергетических ресурсов, развитию использования новых возобновляемых источников энергии и энергоносителей, вовлечение в топливно-энергетический баланс местных возобновляемых ресурсов – низкосортного сырья. В соответствии с «Основными направлениями государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии» целевым ориентиром является увеличение относительного объема производства и потребления электроэнергии с использованием возобновляемых источников, в результате чего к 2030 году плановый объем ввода новых генерирующих мощностей на базе возобновляемых источников должен составить почти 41 ГВт, а уровень выработки электроэнергии – не менее 80-100 млрд кВт·ч в год [12]. Для достижения поставленной цели государственная политика будет предусматривать:

«...рациональное применение мер государственной поддержки развития возобновляемой энергетики;

разработку комплекса мер по государственной поддержке промышленности и научных институтов для обеспечения отрасли возобновляемых источников энергии российским оборудованием, комплектующими и передовыми технологиями;

восстановление и поддержку развития производства местных источников топлива, создание тепловых электростанций и котельных, работающих на этих источниках (торф, отходы лесной и деревообрабатывающей промышленности), в том числе в труднодоступных и удаленных регионах;

повышение эффективности обогащения и переработки местных ресурсов на основе совершенствования применяемых технологий и оборудования;

создание условий для выработки энергии на базе использования городских бытовых отходов;

развитие малой энергетики в зоне децентрализованного энергоснабжения за счет повышения эффективности использования местных энергоресурсов, развития электросетевого хозяйства, сокращения объемов потребления завозимых светлых нефтепродуктов...» [12].

Традиционные способы сжигания топлива в энергетических целях в применении к низкосортному сырью, такому как торф, бурый уголь, сапрпель, биомасса, связаны с рядом определенных трудностей – существующее котельное оборудование не приспособлено к использованию высоковлажных и высокозольных топлив: осложняется работа пылеприготовительных устройств, топочно-горелочного комплекса, пароперегревательных, экономайзерных и воздухоподогревательных поверхностей нагрева, снижается надежность работы дымососов, золоуловителей, системы гидрозолоудаления и котлоагрегата в целом, а также увеличиваются затраты на ремонт [19-22]. К тому же низкая прочность и хрупкость торфа и некоторых видов биомассы приводят к высокой величине провала при слоевом сжигании. В результате энергетическое использование низкосортного сырья в настоящее время сопровождается высокими эксплуатационными затратами и в связи с чем встречается крайне редко.

При этом, оставаясь не задействованным, низкосортное сырьё создает потенциальную опасность возникновения природных пожаров: по данным 2010 года торфяные пожары нанесли экономике России ущерб на более чем 85 млрд рублей; в 2011 году было зарегистрировано 32 тысячи лесных пожаров на площади 2,3 млн га, пострадали 199 населенных пункта в 19 регионах [23].

Современный подход к энергетическому использованию низкосортного сырья [19-22, 24-26] предполагает его сжигание традиционными прямыми способами или с предварительной теплотехнологической переработкой. Методы прямого сжигания низкосортного сырья на данный момент достаточно хорошо изучены. Они основаны на использовании обычных паросиловых циклов для выработки тепловой или электрической энергии. Методы теплотехнологической переработки можно разделить на физические и термические [24]. Первые из них не затрагивают структуру основной горючей части топлива и включают такие процессы облагораживания, как обогащение путём удаления влаги или части минеральных примесей из сырья (подсушивание, десульфация и др.). Вторые предусматривают частичную или полную деструкцию органического сырья путем его нагрева в определенных условиях (газификация, пиролиз, каталитическая конверсия), в результате которых получают различные виды энергетических продуктов (горючий газ, полукоксы, композитное топливо).

К современным способам энергетического использования, позволяющим эффективно перерабатывать низкосортное сырье, можно отнести сжигание в кипящем слое [27-30], применение низкотемпературных вихревых топок [31-33], конверсию [34-44] или каталитическое сжигание [45-48]. Однако перечисленные способы требуют, как минимум, значительных капиталовложений для замены или модернизации имеющегося на данный момент котельного оборудования, что приводит к длительным срокам окупаемости. Сложившаяся ситуация показывает, что необходимо продолжать искать пути переработки низкосортного топлива для эффективного энергетического использования.

На сегодняшний день наиболее перспективным направлением для объектов «малой» энергетики видится переработка низкосортного сырья в твердое композитное топливо (ТКТ), такое как брикеты, пеллеты, гранулы и т.п. Интерес к данному направлению вызван тем, что ТКТ благодаря улучшенным теплотехническим характеристикам обеспечивает высокую эффективность и экономичность сжигания, при этом потребителю не нужно вкладывать средства в переоснащение котельной: топливо подходит для широкого диапазона топливосжигающего оборудования слоевого типа. Производство ТКТ в России было начато еще в начале XX века, однако во второй его половине развитие этого направления затормозилось в связи с бурным подъёмом в нефтяной и газовой отраслях. Начиная с конца 90-х годов и до настоящего времени, переработка сырья в ТКТ вновь вызывает интерес у зарубежной и российской общественности, что подтверждается выросшим количеством промышленных установок по его производству (технологические линии Ruf, Nestro, Pini&Kay, Жаско и др.), большим числом зарегистрированных патентов и опубликованных работ по данной тематике.

ТКТ находит применение в жилищно-коммунальном хозяйстве, на вспомогательных котельных промышленных предприятий и сельского хозяйства. Основным недостатком современного производства ТКТ из низкосортного сырья является использование на стадии формирования энергоёмкого прессового оборудования, стоимость которого порой превосходит половину стоимости всей технологической линии. Это приводит к высокой себестоимости продукции и соответственно неконкурентоспособной на топливно-энергетическом рынке цене: стоимость производимого ТКТ на внутреннем рынке России, как правило, превышает стоимость привозного каменного угля. В результате производство ТКТ имеет ярко выраженную экспортную направленность.

Снижение усилий, необходимых при формовке ТКТ, например, посредством добавления связующего вещества, позволит заменить прессы менее энергоёмким и более дешевым оборудованием, тем самым снизив и себестоимость самого изготавливаемого топлива.

Решение проблемы вовлечения в топливно-энергетический баланс и повышение экономической эффективности использования местных ресурсов низкосортного органического сырья на основе их теплотехнологичной переработки в ТКТ представляется актуальной задачей научных исследований.

Основная идея [49-57] заключается в теплотехнологичной переработке местного низкосортного сырья в облагороженные высококалорийные продукты путем применения низкотемпературного пиролиза, в последующем формовании на их основе ТКТ. Основные преимущества такой переработки состоят в следующем:

- исходным материалом является доступное местное возобновляемое низкосортное сырье;
- осуществление процесса теплотехнологической переработки в условиях низких температур позволяет избежать крупных капиталовложений на организацию производства и снижает экологическое загрязнение окружающей среды;
- связующим веществом является продукт, получаемый при термической переработке исходного сырья, или относительно дешевое и доступное вещество;
- отсутствует энергоемкое и дорогостоящее прессовое оборудование.

Преимущества получаемой продукции (ТКТ) следующие:

- универсальность позволяет использовать ТКТ в широком диапазоне топливосжигающих устройств слоевого типа;
- высокая теплота сгорания существенно снижает расход при сжигании;
- высокая прочность ТКТ позволяет сохранить его целостность во время загрузки и выгрузки при транспортировке и подаче в топку котла, тем самым снижая величину провала через колосниковую решетку;
- экологичность;
- влагостойкость позволяет сэкономить средства при хранении и подготовке ТКТ к сжиганию.

Промышленная реализация данного принципа переработки требует исследования и оптимизации параметров теплотехнологических процессов и формования ТКТ.

Исходя из вышеизложенного, **целью диссертационной работы** является разработка научно-технических основ теплотехнологии малотоннажной переработки низкосортного органического сырья в ТКТ, основанной на низкотемпературном пиролизе и предназначенной для объектов малой распределённой энергетики.

Тема диссертации соответствует целям программ развития энергетической отрасли Томской области («Энергетическая стратегия Томской области на период до 2020 года») и государства в целом («Энергетическая стратегия России до 2030 года»), а также находится в сфере приоритетных направлений науки, технологий и техники РФ («Энергоэффективность,

энергосбережение, ядерная энергетика») и критических технологий РФ («Технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе»).

Диссертация включает в себя введение, пять глав, заключение, список использованных источников и приложения.

В первой главе показано развитие исследований в области теплотехнологической переработки низкосортного сырья. Приведены описание и характеристики некоторых видов низкосортного сырья. Описаны теоретические аспекты теплотехнологической переработки и формирования твердого топлива. На основе проведенной систематизации и анализа сведений о состоянии вопроса поставлены задачи настоящего исследования.

Во второй главе приведены описание экспериментальной установки и методика проведения исследований. Описаны образцы исследуемого органического сырья, представлены их теплотехнические характеристики и элементный состав. Показана методика обработки экспериментальных данных и оценки погрешности измерения.

Третья глава посвящена балансовым соотношениям теплотехнологии переработки низкосортного сырья, полученным по результатам экспериментальных исследований. Приведены материальные балансы теплотехнологической переработки, характеристики полученных продуктов и оценка сопутствующей переработке теплоты разложения органической массы сырья.

В четвертой главе представлены результаты формирования ТКТ, его прочностные и теплотехнические характеристики, соответствующие исследуемому диапазону теплотехнических параметров теплотехнологии. Исследована возможность придания влагостойкости изготавливаемому топливу.

В пятой главе приведены рекомендации к проектированию теплотехнологических линий, предложена структурная схема малотоннажного производства ТКТ и реализующая её компоновочная схема технологической линии. Сделана технико-экономическая оценка возможности организации производства ТКТ на примере Кандинского торфяного месторождения Томской области.

В приложениях к диссертации приведены оценка погрешности измерений, акты об использовании результатов и тепловой расчет технологической линии.

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.

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

Результаты диссертационной работы были представлены научным коллективом на международной Петербургской технической ярмарке (Санкт-Петербург, 2011 г. – золотая медаль, 2012 г. – диплом), всероссийском конкурсе «Золотая медаль ИТЭ Сибирская ярмарка» (Новосибирск, 2011 г. – серебряная медаль), международном Национальном конкурсе ассоциации изобретателей и производителей Франции (Париж, 2012 г. – золотая медаль).

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.

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.

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.

Автор благодарит д.т.н. Заворина А.С. и к.т.н. Казакова А.В. за участие в обсуждении концепции теплотехнологии и результатов исследования, а также выражает им искреннюю благодарность за помощь в работе над диссертацией.

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 сырьё, представляющем наиболее крупные месторождения Томской области (торф месторождений Суховское, Аркадьевское и Кандинское, бурый уголь

Таловского месторождения, озёрный сапропель месторождения Карасевое) и отходы деревопереработки.

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»).

Глава 1. Теплотехнологии низкосортного органического сырья для энергетического использования: состояние вопроса

1.1 Низкосортное органическое сырье

К низкосортному органическому сырью относятся высокозольные или высоковлажные угли, шламы и промежуточные продукты обогащения каменных углей, горючие сланцы, торф, сапрпель, биомасса. Их общими признаками является низкое значение теплоты сгорания, обычно не превышающее 10-12 МДж/кг в расчете на рабочее состояние [19, 26].

В соответствии с целью работы ниже приведен обзор низкосортного сырья, используемого в последующих исследованиях.

Торф

Торф – это сравнительно молодое геологическое образование, формирующееся в результате отмирания болотной растительности при избыточном количестве влаги и ограниченном доступе кислорода [58]. Его запасы на Земле оцениваются в 500 млрд т, распространенных на территории в 176 млн га с ежегодным приростом 1 мм (в пересчете на естественное состояние) [59, 60]. Общая площадь торфяных месторождений Российской Федерации составляет 80 млн га, на которых сосредоточено более 186 млрд т торфа [59]. На долю Томской области приходится порядка 1505 месторождений, составляющих 30 % торфяных запасов РФ (29 млрд т), часть из которых ранее осушены и подходят для промышленной разработки. Применительно к энергетическому использованию можно выделить месторождения Васюганское (Пчелиное, участок № 5), Суховское, Гусевское, Кандинское, Центральное и Тёмное, имеющие низкие показатели зольности. Запасы торфа только на этих месторождениях составляют от 6 до 69 млн т [59, 61, 62].

Одним из качественных показателей, характеризующих торфяное сырье, является степень разложения – содержание в торфе бесструктурной массы (гумуса) в процентах по отношению ко всей массе торфа. Согласно этому показателю торфяники классифицируют на залежи низкой степени разложения – до 20 %, средней степени разложения – 20-35 % и высокой степени – более 35 % [58].

По внешнему виду торф представляет собой волокнистую (при малой степени разложения) или пластичную (при высокой степени разложения) массу. Коричневую или черную окраску ему придает конечный продукт распада растений в условиях повышенной влажности – гумус. В естественном состоянии торф содержит большое количество воды, чем он резко отличается от других видов твердого ископаемого топлива – бурого и каменного углей [58].

По происхождению различают низинный, переходный и верховой торф [58-60]. Низинный торф образуется в зонах низинных болот, верховой – в зонах моховых болот с низким уровнем грунтовых вод в них. Значение зольности верхового торфа обычно ниже, чем у низинного.

По способу добычи торф делят на кусковой и фрезерный. При фрезерном способе, разработанном М.Н. Карелиным [58], добыча осуществляется путем послойного фрезерования торфяной залежи на глубину 20-150 мм, сушки и уборки в штабеля полученной крошки, где торф досушивается до воздушно-сухого состояния (35-45 % влажности) при длительном хранении. Средний состав и теплота сгорания кускового и фрезерного торфа приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Характеристика торфа [19]

Сорт торфа	Состав рабочей массы, %							Теплота сгорания Q_i^r , кДж/кг	Выход летучих веществ V^{daf} , %
	C^r	H^r	O^r	S^r	N^r	A^r	W^r		
Кусковой	30,9	3,2	17,8	0,2	1,3	6,6	40	10 070	70
Фрезерный	25,7	2,7	14,9	0,1	1,1	5,5	50	8 500	70

В естественном состоянии торф характеризуется высоким содержанием влаги (в мокрой залежи – 95 %, в сухой – 80-85 %) [58-62]. Зольность торфа в зависимости от условий образования залежи колеблется от 3 до 38 % в пересчете на сухую массу [58, 59, 63-67]. Отмечают [58, 59] крайне низкую прочность торфа, даже сформованного в куски, что существенно затрудняет его транспортировку и энергетическое использование в слоевых топках. Прочность торфа зависит от степени разложения, рода торфообразователей (с ростом степени углекислотной фиксации прочность торфа возрастает) и климатических условий (негативно сказывается воздействие отрицательных температур и контакт с воздухом).

История использования торфа в России насчитывает более 200 лет, в течение которых торф использовался в энергетике и сельском хозяйстве [62]. В настоящее время торф рассматривается в первую очередь как весьма ценное сельскохозяйственное удобрение. В качестве энергетического топлива торф сжигается в количестве до 4 млн т в год лишь на нескольких десятках небольших электростанций, общая мощность которых достигает 3800 МВт [19, 68]. Однако, большая величина запасов, простота добычи и возобновляемость (при правильном регулировании жизни торфяных болот идет непрерывное накопление торфа) позволяют утверждать о перспективах его дальнейшего использования в качестве энергетического топлива. За последнее время в некоторых областях Российской Федерации уже внедрены пилотные проекты по вовлечению торфа в энергетику [69-71].

Бурый уголь

Бурый уголь – результат сложной трансформации торфяника, погребенного под мощным слоем наносных отложений, горной породы, предотвративших контакт органического вещества с кислородом воздуха, в условиях повышенной температуры (до 200 °С и выше) и давления (до 300 МПа) [19]. Бурый уголь в своем составе содержит битумы и гуминовые кислоты, суммарное содержание которых колеблется от 5 до 90 % (в зависимости от степени их углефикации). Содержание гуминовых кислот является основной отличительной особенностью бурых углей. При обработке угля горячим водным раствором щелочи гуминовые кислоты образуют растворимые соли (гуматы), которые окрашивают раствор в бурый цвет. Свое название бурые угли получили именно по окраске щелочной вытяжки, так как многие разновидности бурого угля сами по себе имеют черный цвет [19].

Состав органической массы бурых углей различных месторождений меняется в значительной степени. Бурые являются наименее обуглероженным видом ископаемых углей (содержание углерода в горючей массе 65-78 %, водорода 4,3-6,3 % и кислорода 16-27 %, азота 0,6-1,7 %, серы 0,2-2,7 %). Они характеризуются высокой влажностью (содержание влаги в рабочей массе 20-60 %), широким диапазоном зольности (от 7-10 % до 38-40 % на рабочее топливо), высоким выходом летучих веществ 40-60 % (на горючую массу), сравнительно низкой теплотой сгорания: низшая теплота сгорания бурых углей, добываемых в различных районах страны, составляет от 6500 до 18500 кДж/кг [19, 63-66, 72, 73].

Промышленная классификация бурых углей предусматривает разделение их на группы по влажности и зольности. По содержанию влаги в рабочем топливе они делятся на три группы: Б1 – содержание влаги более 40 %, Б2 – влажность 30-40 %, Б3 – влажность менее 30 %. По зольности сухой массы (A^d) бурые угли в зависимости от бассейна делятся на ряд групп (от трех до пяти) [19, 72, 73].

В нашей стране месторождения бурых углей распространены повсеместно с весьма большими запасами: запасы Канско-Ачинского бассейна оцениваются в 600 млрд т (140 млрд т можно добывать открытым способом), в Тунгусском бассейне сосредоточено несколько триллионов тонн бурого угля. Значительные залежи бурых углей расположены в центральной зоне Российской Федерации и на Дальнем Востоке [66]. Томская область так же не обделена запасами бурого угля: суммарные ресурсы бурых углей в области оцениваются 75,7 млрд т, что составляет 5 % от всего объема разведанных ресурсов бурых углей Российской Федерации [11].

Высокое содержание влаги и низкая механическая прочность бурых углей существенно затрудняет их транспортировку на большие расстояния, особенно в зимнее время года: уголь слипается, слеживается, смерзается, усложняя разгрузку. В связи с этим они, как правило, могут рассматриваться в качестве топлива только для местных котельных, расположенных вблизи

месторождения. Однако разработка технологии, позволяющей перерабатывать бурые угли в транспортабельное топливо, в сочетании с новыми способами сжигания (например, в кипящем слое) существенно расширит горизонт и повысит эффективность их использования на энергетических объектах. Перспективно энерготехнологическое или энергохимическое использование бурых углей, при котором на их основе можно получать композитное топливо, химическое сырье или товарную продукцию различного назначения.

Биомасса

Биомасса – возобновляемое органическое вещество, генерируемое растениями путем фотосинтеза [74]. К этой категории низкосортного сырья помимо древесины относят также растительные отходы, образующиеся при вырубке леса и его последующей переработке (ветви, пни, сучья, вершинные части деревьев, обрезки, щепы, стружка, опилки, опад), а также отходы сельского хозяйства (лузга, солома и др.). Органическая часть биомассы состоит в основном из углеводов (целлюлозы – 60 % органической части, лигнина – 20-30 %) и в меньшей мере из белков, жиров, восков и смол [19].

Биомасса в естественном состоянии обычно содержит 50-60 % влаги и около 1 % золы, выход летучих веществ на горючую массу составляет 85 % [72]. Элементный состав горючей массы древесины включает: $C^{daf} = 50,0 \%$, $H^{daf} = 6,1 \%$, $O^{daf} = 42,3 \%$, $N^{daf} = 0,6 \%$ [63]. Характеристики дров, поставляемых потребителю, приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Теплотехнические характеристики дров [72]

Показатели	Значение показателя
Влажность на рабочую массу, %	40,0
Выход летучих веществ на горючую массу V^{daf} , %	85,0
Низшая теплота сгорания Q_i^r , кДж/кг (ккал/кг)	10248 (2440)

Согласно [19], 85 % срубленного леса расходуется для производства лесоматериалов и бумаги, 4 % – в качестве топлива, остальные 11 % – отходы при заготовке и транспортировке. К тому же при распиловке древесины на производстве лесоматериалов и бумаги образуется еще от 6 до 30 % отходов в виде опилок.

На территории Томской области ежегодно накапливается 350-360 тыс. м³ отходов, образующихся при лесозаготовке и деревопереработке [75, 76].

Сапропель

Сапропели являются донными озерными отложениями и образуются из следующих основных компонентов: минеральных примесей приносного характера, неорганических компонентов биогенного происхождения, органического вещества отмерших водных растений и организмов, обитающих в воде озера, населяющих его дно и берега [77]. Классификация

озерных отложений осуществляется по методу П.М. Страхова [77], согласно которому они разделяются на пять групп по содержанию органического вещества: пески алевролитовые и глинистые илы – менее 10 %; слабосапропелевые алевролитовые и глинистые илы – 10-30 %; глинистые сапропелевые илы – 30-50 %; сапропелево-глинистые илы – 50-70 %; сапропели – свыше 70 %.

Содержание минеральной части у различных видов сапропелей колеблется от 5 до 85 %. В известковых сапропелях содержание СаО составляет 5-48 %, в смешанных – 3-18 %, в кремнеземистых – 1-8 %. Разнообразен и элементный состав сапропелей (таблица 1.3).

Таблица 1.3 – Элементный состав органического вещества озерных отложений [77]

Содержание органического вещества, %	С	О	Н	N	S
Свыше 90	54,5-60,8	–	6,6-7,4	4,0-4,9	–
80-90	50,5-60,8	29,7-34,1	6,3-7,8	3,3-5,9	0,3-1,8
70-80	47,2-58,6	30,4-34,1	6,5-7,7	3,5-5,1	0,3-2,7
60-70	48,3-61,4	30,7-39,6	6,8-8,1	3,4-6,0	0,6-3,1
50-60	50,5-60,0	30,6-35,8	6,9-7,6	3,6-5,6	0,5-2,6
40-50	47,4-59,4	25,7-39,8	5,1-8,1	3,4-5,9	1,0-5,6
30-40	49,3-60,9	23,6-33,8	6,8-9,0	3,2-5,4	1,4-6,3
20-30	50,2-59,1	25,3-36,9	6,3-8,9	3,4-5,3	0,7-3,9
10-20	52,4-30,4	30,4-32,2	7,6-8,4	4,2-6,3	2,3-4,9
В целом	47,2-61,4	23,6-39,9	5,1-9,0	3,2-6,3	0,3-6,3

На территории стран СНГ выявлено 2188 месторождений сапропеля (1050 месторождений в озерах и 1138 – в торфяниках), содержащих около 44,0 млрд м³ [77]. На данный момент озерный сапропель применяют на косметическом производстве или в лечебных целях, энергетическое использование практически не встречается.

1.2 Процессы при теплотехнологической переработке твердого органического сырья

Теплотехнология – это совокупность методов преобразования органического сырья в заданный товарный продукт на основе изменения теплового состояния материала сырья [78].

Одним из наиболее характерных свойств органического сырья является его неустойчивость при воздействии повышенных температур. При нагревании без доступа воздуха органическая масса сырья претерпевает сложные превращения, в результате которых образуются твердые, жидкие и газообразные продукты [79]. Процесс термического разложения органического сырья при его нагреве в отсутствие свободного кислорода называют пиролизом [26, 72, 73, 80-85].

При пиролизе одновременно протекают следующие основные химические реакции и физико-химические процессы [80]: «1) термическая деструкция с отщеплением разных атомных групп из боковых цепей, образующих газообразные и жидкие продукты; 2) поликонденсационные

процессы в ядерной части структурных единиц, приводящие к росту числа атомарных колец в каждой из углеродных сеток, а также к срастанию сеток друг с другом; 3) повышение степени упорядоченности расположения в пространстве растущих по размеру углеродных сеток».

Пиролиз органического сырья может быть выражен следующим уравнением материального баланса, учитывающим выделение или поглощение тепла при разложении:

$$\text{сырьё} = \text{углеродистый остаток} + \text{смолопродукты} + \text{газ} + \text{вода} \pm Q,$$

где Q – теплота разложения органической массы сырья, кДж/кг.

Теплота разложения может принимать как положительное, так и отрицательное значение, что обусловлено количеством содержащегося кислорода в органической массе. Экзотермический эффект наблюдается при разложении сырья с высоким содержанием кислорода (древесного топлива, торфа, молодого бурого угля), эндотермический – при разложении сырья, находящегося на более поздних стадиях метаморфизма (каменного угля, антрацита). Так, при разложении нагретой до 180 °С древесины $Q = +1200$ кДж/кг, а при разложении торфа $Q = +720$ кДж/кг. При разложении органического сырья, содержащего менее 15 % кислорода, Q незначительна [26].

В зависимости от вида сырья начало термического разложения наблюдается при температуре 100-400 °С, а окончание процесса – при 1100-1200 °С [80]. На начальной стадии термического разложения (низкотемпературной) происходит образование воды и кислородсодержащих газов за счет разложения боковых групп макромолекул (углерод-кислородных связей), наименее стабильных в термическом отношении. Эта стадия заключается преимущественно в деструкции высокомолекулярного органического вещества вследствие разрыва связей между основными структурными звеньями. Одновременно происходят отщепление боковых цепей, сопровождающееся их частичным распадом. Из сырья удаляется некоторое количество кислорода, азота и серы. В первичной стадии пиролиза выделяется основная часть летучих веществ.

После удаления боковых цепей и отдельных групп создаются свободные валентности у периферийных атомов углерода, которые соединяются между собой, образуя углеродистый остаток – полукокс. Удаляемые боковые цепи и отдельные группы образуют смолу и газ.

При более высоких температурах главную роль играют поликонденсационные процессы в ядерной части, вызываемые продолжающимся термическим разложением.

Образовавшиеся соединения на различных стадиях пиролиза также подвергаются распаду, при котором наименее термически стойкие соединения при дальнейшем повышении температуры разлагаются. Это ведет к тому, что состав продуктов пиролиза даже при

постоянной температуре изменяется во времени в сторону образования устойчивых при этой температуре соединений [73].

Сырьё, находящееся на более высокой стадии метаморфизма, характеризуется меньшим количеством боковых атомных групп, более прочно связанных с ядром. Как следствие, с ростом метаморфизма наблюдается увеличение температуры начала термического разложения [82]: для торфа – 100-110 °С, для древесины – 160 °С, для бурого угля – 130-170 °С.

В общем случае выделение газа начинается при температуре около 250 °С. Примерно при 300 °С выделяются пары смолы и некоторого количества воды, называемой пирогенетической водой. Образование смолы прекращается при температуре около 550 °С, при дальнейшем возрастании температуры выход смолы практически не наблюдается [81].

В промышленности теплотехнологическая переработка посредством пиролиза получила название «коксование» [26, 80-83]: низкотемпературный пиролиз – полукоксование, среднетемпературный – среднетемпературное коксование, высокотемпературный – коксование.

Для низкотемпературного пиролиза, протекающего при температуре 450-550 °С, характерны максимальный выход жидких и твердых (полукокс) продуктов при минимальном выходе пиролизного газа. При этом выделяемый газ обладает высокой теплотой сгорания.

Пиролиз при температурах (600-850 °С) принято называть среднетемпературным. При этих температурах наблюдается выход большего количества газа с меньшей теплотой сгорания, а также небольшое количество жидких продуктов и твердого остатка (кокса).

При температуре 900-1050 °С происходит высокотемпературный пиролиз, сопровождающийся минимальным выходом жидких и твердых продуктов и максимальной выработкой газа – высококачественного горючего (минимальное содержание смолы).

Пиролиз является одним из перспективных способов выделения ценных компонентов из органических веществ и отходов. В этом отношении низкосортное органическое сырьё особенно интересно тем, что, являясь наименее зрелым в химическом отношении видом твердых горючих ископаемых, может быть относительно простым путем разделено на вещества, обладающие различными между собой и характерными химическими свойствами.

1.2.1 Продукты теплотехнологической переработки

При пиролизе твердого органического сырья образуются следующие продукты: углеродистый остаток, пиролизная смола, пирогенетическая влага, газ (в том числе газовый бензин).

Важнейшим продуктом низкотемпературного пиролиза, который получается в самом большом количестве по сравнению с другими продуктами, является твердый углеродистый остаток (полукокс). В полукоксе из-за особенностей процесса полукоксования отсутствует влага. Вследствие выделения летучих продуктов (смолы и газа) содержание углерода выше, а

выход летучих существенно ниже, чем в исходном сырье. Минеральные компоненты, содержащиеся в составе исходного сырья, практически не выделяются при полукоксовании, поэтому зольность полукокса всегда выше, чем у перерабатываемого сырья. Теплота сгорания полукокса в зависимости от его вида составляет 8 840-25 980 кДж/кг [80-85].

Состав полукоксового газа существенно изменяется по мере повышения температуры (таблица 1.4): при низких температурах он состоит из одной углекислоты, по мере повышения температуры – выделяются горючие составные части, а содержание углекислоты неуклонно падает. При нагревании сырья более 550 °С в выделяемом газе содержание углекислоты, окиси углерода и метана понижается, а водорода – сильно возрастает.

Таблица 1.4 – Состав газа, выделяющегося при различных температурах полукоксования торфа (по данным В.Е. Раковского и К.К. Апушкина) [81]

Состав газа, %	Температурный интервал, °С				
	225-240	350-370	420-430	450-470	550
Углекислый газ CO ₂	79,32	39,95	16,60	9,60	7,20
Неизвестные углеводороды C _m H _n	1,30	4,20	0,30	0,50	0,05
Кислород O ₂	0,37	0,40	0,25	0,45	0,90
Окись углерода CO	15,90	20,25	18,60	18,90	13,35
Водород H ₂	1,61	19,41	41,70	42,57	43,97
Метан CH ₄	1,15	13,61	22,36	25,74	31,57
Азот N ₂	0,35	2,18	0,19	2,24	2,96

Другой летучий продукт пиролиза твердого органического сырья – газовый бензин, представляющий собой смесь различных низкокипящих углеводородов (насыщенных и ненасыщенных, ароматических и гидроароматических). Газовый бензин – жидкий, бесцветный или окрашенный в желтый цвет продукт, теплота сгорания которого составляет приблизительно 41900 кДж/кг [85]. Выход этого продукта в зависимости от сырья и условий полукоксования составляет от 0,6 до 1,0 %.

Пирогенетическая влага – это вода, образующаяся в процессе пиролиза из кислорода и водорода органического сырья. Конденсируясь вместе с внешней влагой и парами смолы, пирогенетическая влага в зависимости от плотности смолы образует подсмольную или надсмольную воду. Химический состав этой воды зависит от состава смолы и газа, так как вода растворяет некоторые из их компонентов. Подсмольная вода, полученная при полукоксовании торфа, содержит 0,95 % уксусной кислоты, 0,020 % масляной кислоты, 0,015 % муравьиной кислоты и большое количество фенолов. С повышением степени метаморфизма органического сырья количество фенолов постепенно уменьшается. Например, подсмольная вода, полученная полукоксованием слабометаморфизованных каменных углей, содержит около 2,25 г/л фенолов и 0,082 г/л органических оснований [85].

Наиболее ценным продуктом пиролиза, с точки зрения химической промышленности, является пиролизная смола. Она представляет собой сложную смесь различных органических веществ, находящуюся в пастообразном состоянии при комнатной температуре. Плотность смолы, полученной из гумусовых торфов и бурых углей, составляет 845-1078 кг/м³, из каменных углей – 1044-1075 кг/м³ [85]. Состав смолы зависит от температуры (таблица 1.5) и условий проведения пиролиза, характера сырья (природы, стадии химической зрелости и состава). С повышением степени метаморфизма образуется все меньшее количество смолы [86]: наибольший выход смолы дают торф, бурые угли и слабометаморфизованные каменные угли, а антрациты её практически не образуют.

Таблица 1.5 – Элементный состав смолы, полученной в различных температурных интервалах пиролиза торфа (по данным В. Е. Раковского и С. И. Рыбина) [81]

Температурный интервал, °С	до 300	300-350	350-400	400-450	450-500	500-550
Выход смолы, % на безводный торф	1,11	2,27	3,31	1,95	0,89	0,71
Элементный состав смолы, %:						
С	77,15	78,35	79,93	77,85	79,10	80,66
Н	10,77	10,51	10,63	8,78	8,92	9,17
N	0,61	0,68	0,66	0,88	1,10	1,14
O+S	11,47	10,46	8,78	12,49	10,88	9,03

Качественный состав смол торфа, бурых и каменных углей существенно не различается, различным является соотношение отдельных компонентов [85]: содержание фенолов в смолах, образованных из торфа и бурых углей, составляет 9,7-16,0 %, из слабометаморфизованных (длиннопламенных и газовых) каменных углей – 18,7-35,2 %. В фракциях смолы каменного угля также обнаруживаются: бензол и его гомологи, нафталин (4,5-10,0 %), антрацен (0,7-1,0 %), фенантрен (4,3-5,5 %), пиридиновые основания (0,7-1,5 %) и фенолы (0,7-2,5 % и более) [85]. С увеличением степени метаморфизма каменных углей содержание фенолов в смоле уменьшается, а ароматических углеводородов возрастает.

1.2.2 Режимные параметры теплотехнологической переработки

На процесс термической переработки оказывают влияние следующие факторы: природа органического сырья, температура процесса, скорость нагрева частиц перерабатываемого сырья, размер его частиц, а также давление и наличие катализатора.

Влияние природы органического сырья

Природа органического сырья и содержание отдельных элементов влияют на выход продуктов пиролиза (таблица 1.6): сырьё с высоким содержанием кислорода выделяет больше газа при пиролизе; наличие водорода в составе сырья способствует образованию смолы. Эти факторы влияют и на начало термического разложения: чем моложе органическое сырьё и

больше в нем кислорода, тем легче идет процесс термического распада, а соответственно и ниже температура выделения газа и смолы (таблице 1.7).

Таблица 1.6 – Элементный состав органического сырья и выход продуктов полукоксования [82]

Органическое сырьё	Элементный состав, %			Выход продуктов полукоксования, % вес. от органической массы		
	С	Н	О	смола	газ	полукокс
Торф	57,7	6,1	35,0	15,9	18,0	46,6
Бурый уголь	74,8	5,1	17,4	8,0	8,8	73,7
Каменный уголь	81,3	5,2	12,0	13,1	3,9	79,0
Сланец прибалтийский	76,6	9,2	11,7	68,15	12,4	26,81

Таблица 1.7 – Температура начала выделения смолы для различных видов органического сырья [82]

Органическое сырьё	Температура начала выделения смолы, °С
торф	204
битуминозный сланец	277
челябинский бурый уголь	288
кузнецкий каменный уголь	345

Влияние температуры на динамику разложения твердого топлива

Выход и качество продуктов полукоксования в значительной степени зависят от температуры нагрева органического сырья. При заданной продолжительности опыта с увеличением температуры наблюдается больший выход парогазовых продуктов полукоксования.

В таблице 1.8 приведены экспериментальные данные Е. И. Казакова [82], полученные при полукоксовании эстонских и кашпирских сланцев в интервале температур 500-600 °С. Продолжительность опытов составила 60 секунд, скорость газа-теплоносителя – 0,75 м/с. В таблице также показаны опытные данные Гофмана по исследованию термического разложения лисичанского каменного угля.

Таблица 1.8 – Выход продуктов термического разложения топлив в зависимости от температуры нагрева, в % вес. (на органическую массу) [82]

Топливо	Температура, °С											
	400			500			600			коксование		
	смола	газ	твердый остаток	смола	газ	твердый остаток	смола	газ	твердый остаток	смола	газ	твердый остаток
Эстонский сланец	–	–	–	36,0	2,4	60,0	44,8	4,9	48,0	–	–	–
Кашпирский сланец	–	–	–	22,7	4,65	70,7	27,7	9,05	60,0	–	–	–
Лисичанский каменный уголь	10,1	5,04	70,8	13,1	10,4	64,3	14,1	10,4	62,4	5,7	18,8	57,4

Уменьшение выхода смолы при переходе от температуры полукоксования к температуре коксования (таблица 1.8) объясняется тем, что при более высоких температурах происходит пиролиз части жидких продуктов, преобразующихся в газ. Влияние конечной температуры процесса полукоксования торфа на выход продуктов показано в таблице 1.9.

Таблица 1.9 – Влияние конечной температуры процесса полукоксования торфа на выход продуктов [81]

Выход на сухую массу топлива, %	Конечная температура процесса, °С			
	350	400	450	500
Углеродистый остаток	76,30	54,00	46,50	41,30
Смола	6,82	17,45	20,80	20,10
Пирогенетическая влага	8,07	14,00	15,86	17,00
Газ, л/кг	13,6	52,3	70,90	160,0

По мере повышения температуры нагрева органического сырья увеличивается степень его термического разложения. Поэтому определенной температуре нагрева соответствуют продукты термического разложения определенного состава, различного для каждого вида сырья. Например, для торфа характерна следующая картина термического разложения (таблица 1.10).

С ростом температуры процесса полукоксования изменяется состав газа и увеличивается его выход в результате пиролиза части жидких продуктов (таблицы 1.11 и 1.12), а также увеличивается суммарное содержание H_2 и CO .

Таблица 1.10 – Стадии термического разложения торфа [81]

Температурный интервал, °С	Стадия разложения
до 100-105	Удаление гигроскопической влаги
150-160	Начало выделения пирогенетической влаги и метилового спирта
до 200	Преимущественное выделение CO_2 и небольшого количества CO , образование уксусной кислоты и смолы
275-300	Начало экзотермических реакций разложения, выделение большого количества CO_2
около 300	Активная точка разложения, начало выделения CH_4
475-500	Выделение водорода
около 500	Окончание выделения смолы
около 750	Окончание выделения аммиака

Таблица 1.11 – Зависимость выхода и состав газа от температуры разложения торфа [82]

Температура нагрева, °С	Состав газа, в %							Теплота сгорания газа Q_i^d , кДж/м ³
	CO_2	C_mH_n	CO	H_2	CH_4	C_2H_6	N_2	
105	100	–	–	–	–	–	–	–
150	97,8	следы	2,2	–	–	–	–	281

Температура нагрева, °С	Состав газа, в %							Теплота сгорания газа Q_i^d , кДж/м ³
	CO ₂	C _m H _n	CO	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	N ₂	
200	95,4	следы	4,6	–	–	–	–	588
240	90,6	0,5	8,7	0,2		–	–	1470
280	87,4	0,7	11,3	0,6		–	–	2058
250	89,5	0,6	6,9	1,7	1,1	0,1	0,1	1995
300	76,5	0,5	5,4	–	–	–	–	–
400	72,2	2,3	16,0	4,6	4,6	–	0,3	5972
500	57,1	3,4	17,3	3,3	8,0	4,5	6,4	9933
730	37,8	2,1	16,3	16,7	19,8	2,8	3,5	14343
800	35,0	2,9	16,7	20,9	18,6	2,2	3,7	15057

Таблица 1.12 – Зависимость выхода и состав газа от температуры разложения каменного угля ($V^{daf} = 25\%$) [82]

Температура, °С	Выход газа, нм ³ /т	Состав газа, % объемные				
		CH ₄	C ₂ H ₆	C _m H _n	H ₂	CO ₂ , CO, N ₂ и др.
500	80	45	30	8	15	2
600	90	40	20	6	20	14
700	120	35	15	4	30	16
800	200	30	8	3	40	19
900	250	25	6	2	50	17
1000	340	20	3	2	60	15

Влияние скорости нагрева

Скорость нагрева сырья является одним из решающих факторов, влияющих на выход и качество продуктов полукоксования. Она оказывает существенное влияние на процесс физико-химического изменения его органической части. Однако мнения ученых о характере влияния скорости нагрева разнятся. Согласно одним данным [87] при скорости нагрева 0,015 °С/с разлагается малая часть органической массы исходного сырья, при 0,055 °С/с – около 70 %, при 0,4 °С/с – органическая масса разлагается почти полностью при конечной температуре 250-300 °С. Можно сделать вывод, что при высокой скорости нагрева частиц органического сырья количественный выход продуктов термического разложения будет всегда больше, чем при медленном нагревании.

В работе [88] опубликованы следующие результаты исследований: при скорости нагрева 0,4 °С/с органическая масса исходного сырья, способная разложиться при данной температуре, разлагается почти полностью при его нагреве лишь до 250-300 °С; при 10 °С/с – только 50 % при нагревании до 540 °С; при 100 °С/с – разложения сырья в период нагрева до 450-550 °С почти не наблюдается. Таким образом, при медленном нагревании частиц органического сырья до определенной температуры количественный выход продуктов термического разложения будет всегда больше, чем при быстром нагревании.

Теоретически суммарный процесс термического разложения органического сырья можно представить как два основных процесса, протекающих одновременно: а) нагрев сырья и

б) физико-химический процесс изменения массы сырья [88]. Нагрев сырья обуславливает протекание реакций разложения его органической части. Однако скорости указанных процессов могут быть неодинаковы. Например, при высокой скорости нагрева реакции разложения органической части не успевают полностью завершиться, поэтому с повышением скорости нагрева до определенной температуры выход продуктов термического разложения снижается.

Скорость нагрева влияет также и на качество образующихся продуктов. Процесс разложения органической массы идет через различные химические реакции, энергия активации которых различна. В связи с этим изменение скорости реакций от температуры будет иметь разный характер. Особенно сильное воздействие скорость нагрева оказывает на вторичные реакции: быстрый нагрев частиц органического сырья способствует разложению первичных продуктов полукоксования с образованием более ценных жидких и газообразных продуктов.

На основании лабораторных исследований физико-химических изменений органической массы бурых углей и волжских сланцев в [88] сделан вывод, что процесс термического разложения сырья можно разбить на три группы химических реакций:

а) высокоскоростное бертинирование, протекающее с большой скоростью при 450-550 °С, в продуктах которого содержится большое количество CO₂, H₂O и немного CO, смола и сернистые соединения почти не выделяются;

б) образование смолы и газообразных продуктов (главным образом углеводов);

в) процесс выгазовывания, основными продуктами которого являются метан и водород (протекает с наименьшей скоростью).

Потенциальное тепло летучих веществ распределяется по этим группам реакций следующим образом. В продуктах, получающихся по первой группе реакций, оно равно 10-15 %, а иногда и ниже 10 %; в продуктах второй группы реакций оно составляет 70-90 %; в продуктах третьей группы равно 20-30 % [88].

На основании указанных исследований открывается возможность разделения процессов высокоскоростного бертинирования и основного процесса термического разложения органического сырья с осуществлением их в различных аппаратах.

Изменение интенсивности нагрева в современных промышленных печах не приводит к значительному изменению количества и качества продуктов полукоксования. Это объясняется использованием крупнокускового сырья, которое невозможно быстро и равномерно прогреть. Применение мелкозернистого сырья позволяет интенсифицировать процесс нагрева.

Влияние размера частиц топлива

Время процесса термического разложения главным образом определяется временем прогрева частиц коксуемого сырья до заданной температуры. При термической обработке происходит постепенный нагрев кускового сырья, тепло, воспринимаемое внешней поверхностью кусков,

передается посредством теплопроводности в их центр. В результате между наружной поверхностью и центром возникает разность температур, которая возрастает с увеличением размеров кусков и скорости подвода тепла к сырью. Это приводит к тому, что в каждый момент времени отдельные части куска находятся в различных стадиях разложения, причем процесс в центральной части отстает от процесса, проходящего на периферии, что приводит к увеличению времени процесса термической обработки крупнокускового сырья.

Образующиеся летучие продукты термического разложения из внутренних частей куска диффундируют к внешней поверхности, через которую выходят наружу. Проходя через зоны постепенно повышающейся температуры, летучие продукты подвергаются воздействию температуры более высокой, чем та, при которой они были образованы.

При медленном нагреве небольших кусков разность температур между центром и поверхностью куска невелика, и поэтому выделяющиеся летучие продукты подвергаются лишь небольшому перегреву, который не оказывает на них никакого влияния.

При быстром нагреве кусков большого размера, разность температур между центром и внешней поверхностью куска достигает большого значения, из-за этого летучие продукты подвергаются в периферийных слоях куска большому перегреву. Это приводит к разложению отдельных, термически неустойчивых компонентов смолы на менее сложные жидкие продукты и газы. Параллельно с этим происходит процесс выделения некоторого количества сложных углеродистых соединений. Чем больше кусок исходного сырья, тем сильнее влияние перегрева на выход продуктов [80].

Разложение смолы в куске является причиной того, что по мере уменьшения размеров коксуемого сырья выход смолы возрастает (таблица 1.13). Однако при полукоксовании пыли смолы наблюдается меньше, чем из кусков с размером грани 10 мм. Это объясняется тем, что в слое кускового материала имеются большие пустоты, через которые летучие продукты легко удаляются из слоя и на пути через него приходят в соприкосновение с относительно небольшой поверхностью нагретого сырья. В пылевидном слое органического сырья пустоты между частицами очень малы, и при движении по мелким каналам, продукты находятся в тесном соприкосновении с сильно разогретой поверхностью сырья, что приводит к их некоторому разложению.

Результаты исследований Е.И. Казакова [82, 86] по влиянию размеров частиц на динамику разложения эстонского и кашпирского сланцев показали (таблица 1.14), что из фракций сланца 0,25-1 и 1-2 мм выделение летучих продуктов произошло полностью, для фракций 10-13 мм за это же время полукоксования выделилось продуктов меньше чем 50 %.

Таблица 1.13 – Влияние размера кусков торфа на изменения выхода продуктов полукоксования [80]

Размер кусков торфа, мм	Выход продуктов на безводный торф, %			
	Углеродистый остаток	Смола	Пирогенетическая влага	Газ
60×60×65	42,00	15,41	22,34	20,25
40×40×40	42,14	16,93	21,37	19,56
20×20×20	43,60	17,70	19,85	18,85
10×10×10	42,60	20,04	16,28	19,71
Пыль	41,22	18,50	20,34	18,62

Таблица 1.14 – Влияние размера частиц топлива на выход продуктов полукоксования топлива, % мас. (на органическую массу топлива) [82, 86]

Температура, °С	Сланец	Фракция 10-13 мм			Фракция 1-2 мм			Фракция 0,25-1,0 мм		
		деготь	газ	твердый остаток	деготь	газ	твердый остаток	деготь	газ	твердый остаток
500	Эстонский	12,55	0,15	85,30	63,40	10,60	23,80	70,80	14,75	10,45
500	Кашпирский	9,25	3,00	86,50	37,50	15,50	44,00	37,35	17,15	40,50
550	Эстонский	30,20	1,25	67,60	65,70	12,70	18,60	70,80	14,75	10,45
550	Кашпирский	23,90	5,35	69,50	37,60	17,10	40,50	37,50	17,50	40,60

Процессы, протекающие при термической переработке органического сырья, в пространстве можно разделить на две области: 1) процессы внутри куска сырья, в результате которых происходят выделение парогазовой смеси и образование полукокса; 2) процессы в межкусковом пространстве. Чтобы сохранить «первичный» характер получаемых продуктов, необходимо вести процесс с быстрым удалением их из межкускового пространства (применение вакуума, соответствующее конструктивное оформление аппаратуры). Однако первичные продукты не удается получить даже в лабораторных условиях, так как на практике скорости термического разложения сырья невелики и первичные продукты полукоксования от поверхности куска совершают продолжительный путь по межкусковому пространству, неизбежно претерпевая вторичные физико-химические изменения.

Кроме того, более глубокому физико-химическому изменению первичных продуктов способствует их неустойчивый характер в момент образования и большая активность поверхности твердой фазы. Исследования микроструктуры полукокса и кокса показывают, что поверхностная зона по своей микроструктуре отличается от остальной части куска. Глубина превращения продуктов полукоксования в межкусковом пространстве в значительной степени зависит от высоты слоя и размера частиц органического сырья. Чем больше высота слоя и чем меньше размер частиц сырья, тем глубже идет процесс вторичных превращений, так как с

увеличением слоя возрастает время контакта парогазовых продуктов с реакционной поверхностью кусков перерабатываемого сырья [82].

Влияние размеров каналов, по которым продвигаются продукты, сказывается не только при движении продуктов через слой, такое же влияние оказывает и размер пор в самом куске коксующего сырья. В этом случае наличие крупных пор так же облегчает выделение смолы и предохраняет ее от разложения. Влияние размера пор на выход продуктов показано в таблице 1.15.

Таблица 1.15 – Влияние переработки торфа на выход продуктов полукоксования [82]

Переработка торфа	Выход на безводный торф, %			
	Углеродистый остаток	Смола	Пирогенетическая влага	Газ, л/кг
Не переработанный	43,67	11,06	21,06	136
Переработанный 1 раз	43,71	10,24	21,58	133
Переработанный 3 раза	43,96	8,95	22,41	144

Влияние давления

Влияние давления в процессе термического разложения твердого сырья необходимо рассматривать отдельно на каждую стадию процесса – распад органической массы сырья (первичные реакции) и вторичные реакции между выделившимися первичными продуктами, которые могут взаимодействовать также и с твердой фазой. В работе [82] изучено влияния давления на отдельные стадии процесса термического разложения в потоке газа (таблица 1.16).

Таблица 1.16 – Влияние давления на распад органического сырья при полукоксовании [82]

Топливо	20 ат		50 ат		100 ат	
	выход полукокса, % вес.	выход летучих из полукокса, % % вес.	выход полукокса, % вес.	выход летучих из полукокса, % % вес.	выход полукокса, % вес.	выход летучих из полукокса, % % вес.
Прибалтийский сланец	60,57	15,25	60,10	11,2	60,80	14,20
Подмосковный уголь	83,90	9,60	82,60	10,7	82,81	9,30
Донецкий длиннопламенный уголь	73,36	7,40	–	–	73,40	8,45
Украинский бурый уголь	55,90	9,55	55,40	11,90	55,90	10,50

Установлено, что давление не оказывает влияния на первую стадию процесса – основной распад органической массы. При повышении давления выход продуктов не изменяется, но изменяется их качество. Изменение давления оказывает влияние на вторичные реакции, протекающие в газовом объеме. С термодинамической точки зрения повышение давления будет стимулировать реакции синтеза и тормозить реакции, связанные с распадом первичных продуктов. Кроме того, протеканию реакций синтеза будет способствовать увеличение времени

пребывания первичных продуктов в зоне высоких температур, связанное с повышением давления [82].

С увеличением времени пребывания первичных продуктов в зоне высоких температур под давлением вторичные реакции протекают настолько глубоко, что наблюдается не только качественное изменение парогазовых продуктов, но изменяется их количественный выход. Экспериментально установлено [82], что с увеличением времени пребывания увеличивается выход полукокса и газа, при этом выход смолы уменьшается. В газе увеличивается содержание метана и уменьшается содержание непредельных углеводородов.

Влияние катализаторов

Катализатором называют химическое вещество, ускоряющее реакцию, но не входящее в состав получаемых продуктов [89-91]. Использование минеральных добавок (щелочи, щелочные и щелочно-земельные металлы) в качестве катализатора при пиролизе влажного сырья резко изменяет течение процесса. Например, при перегонке сухого торфа в присутствии извести $\text{Ca}(\text{OH})_2$ не получается значительных изменений в выходе продуктов, богатых водородом, если обработка осуществлялась в сухом виде. Однако, при обработке влажного торфа известью и прогреве полученной смеси наблюдается значительное увеличение выхода смолы [61]. Результаты исследований [92] показывают, что термическая обработка сырья, богатого кислородом, в присутствии щелочей приводит к образованию богатых водородом органических соединений.

Также наблюдается изменение выхода продуктов пиролиза при добавлении NaOH : увеличивается выход смолы и сокращается выход коксового остатка. Наибольший эффект оказывает KOH , при введении которого выход смолы из торфа возрастает до 24,5 % [92].

1.3 Процессы при формировании твердого композитного топлива

Сжигание несортированного низкосортного сырья в слоевых топочных устройствах сопровождается высокими потерями тепла из-за провала его мелких частиц сквозь колосниковую решетку. Более того, применение несортированного сырья создает ряд неудобств в процессе его транспортировки, хранения и последующего использования. Особенно неэффективно его применение в жилищно-коммунальном хозяйстве. В связи с этим для увеличения ресурсов кускового сырья прибегают к формированию.

Наиболее распространёнными видами формирования являются брикетирование и гранулирование. Брикетирование топлив представляет собой совокупность процессов, связанных с превращением сыпучего мелкозернистого материала в куски (брикеты) определенной геометрической формы, одинакового размера и стандартного качества [93, 94].

Брикеты в отличие от исходного сырья имеют более низкую влажность, высокую прочность и не самовозгораются.

Под гранулированием понимают процесс переработки материала в куски геометрически правильной, единообразной формы и одинаковой массы гранулы (пеллеты). Отличием гранулирования от брикетирования является размер и форма, получаемой продукции. Согласно ГОСТ Р 54248-2010 «Брикеты и пеллеты (гранулы) торфяные для коммунально-бытовых нужд. Технические условия» форма брикета определяется конструкцией матричного канала брикетирующего пресса и должна иметь следующие размеры:

– прямоугольная четырехгранная призма с закругленными углами (длина – от 80 до 220 мм, ширина – от 40 до 95 мм, высота – от 15 до 70 мм);

– прямоугольная шестигранная призма (диаметр вписанной окружности основания призмы – от 50 до 100 мм, высота – от 50 до 250 мм);

– цилиндр (диаметр – от 50 до 100 мм, высота – от 50 до 250 мм).

Пеллеты (гранулы) изготавливаются цилиндрической или шарообразной формы с диаметром от 5 до 25 мм и длиной от 10 до 7,5·d. Размеры пеллет определяются конструкцией гранулирующего устройства.

Термин «твёрдое композитное топливо» обобщает в себе два этих понятия – брикеты и гранулы (пеллеты). ТКТ можно рассматривать как трехфазную систему, состоящую из твердого вещества, воздуха и воды. Количественное соотношение этих фаз определяет условия получения прочного топлива. Превращение сырья в твердое топливо осуществляется внешним давлением за счет резкого уменьшения количества газообразной фазы или склеиванием и затвердеванием связующего вещества. При сближении частиц, ранее разомкнутых газообразной фазой, под действием внешнего давления начинает проявляться действие сил сцепления и притяжения между частицами [94-96], обеспечивающих механическую прочность ТКТ. Под воздействием давления расстояние между частицами уменьшается, происходит их сближение и частичная деформация. При этом количество и величина поверхности контактов увеличиваются, силы взаимодействия возрастают.

Образование механически прочного ТКТ представляет собой сложный процесс, зависящий от физико-механических свойств материала и условий протекания процесса формования. Основными факторами, обуславливающими прочность и большой объемный вес ТКТ при брикетировании, являются величина давления, температура и время прессования, влажность, размер частиц топлива и параметры последующей сушки [94].

Формование ТКТ можно осуществить следующими методами [79, 93-95]:

а) под действием сил молекулярного сцепления, возникающих в результате сближения поверхностей отдельных частиц материала (брикетирование без связующих веществ), в том числе:

– со сравнительно небольшой температурной обработкой сырья (по этому методу брикетируется торф, молодые бурые угли, биомасса);

– с глубокой обработкой сырья без доступа воздуха, когда значительно изменяются физические и химические свойства материала (таким методом можно брикетировать самые разнообразные материалы и получать экзобрикеты или термобрикеты);

б) со связующими веществами (роль которых могут выполнять также капиллярные силы жидкостей), обеспечивающими необходимое сцепление поверхностей частиц материала или заменяющих это сцепление;

в) благодаря сплетению волокон при прессовании у волокнистых материалов.

Нередко все три явления протекают почти одновременно.

1.3.1 Режимные параметры формования

Роль воды в процессе формования

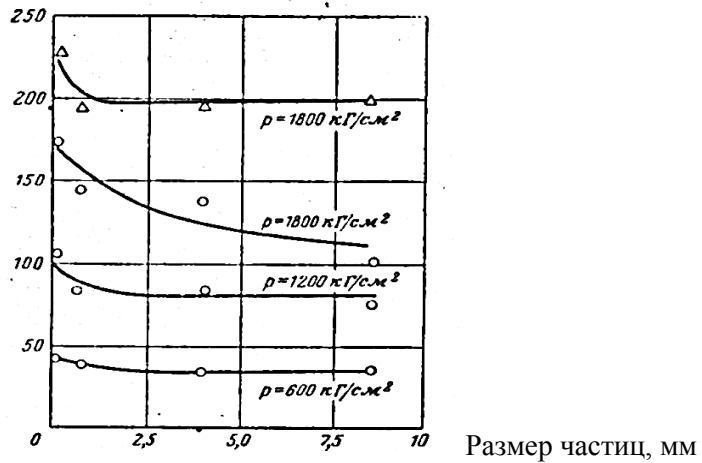
Количество содержащейся в ТКТ воды определяет его качество: с увеличением количества воды в формируемом сырье резко снижается механическая прочность изготавливаемого топлива, увеличивается крошимость, снижается теплота сгорания [94]. Наличие влаги в ТКТ приводит к дополнительным затратам на сушку и подготовку к сжиганию.

При определенном влагосодержании вода в сырье в процессе брикетирования не обладает свойствами свободной и может рассматриваться как одно целое с твердым веществом. На это указывает и способность адсорбционной воды на контракцию (сжатие) системы. Например, для торфа такое влагосодержание составляет от 0 до 17 %, при котором частицы торфа обладают наибольшим объемным весом [94]. Повышение влагосодержания приводит к снижению объемного веса, что говорит о наличии свободной воды, имеющей меньший удельный вес, чем адсорбционная. Наиболее прочное ТКТ получается при брикетировании органического сырья, в котором имеется только адсорбционная влага и отсутствует свободная. Сжатие системы адсорбционными силами приводит к упрочнению частиц топлива [94].

Влияние размера частиц сырья

Прочность сформованного топлива зависит от плотности укладки его отдельных частиц. Самая плотная укладка достигается при наиболее мелком измельчении вещества. При этом увеличивается суммарная поверхность частиц и действие сил сцепления. Согласно [94, 97, 98] увеличение степени измельчения исходного сырья приводит к проявлению сил сцепления при сближении частиц и повышению прочности ТКТ (рисунок 1.1). К тому же предварительное измельчение обеспечивает наиболее равномерное распределение влаги по фракциям.

Предел прочности при сжатии, кгс/см²

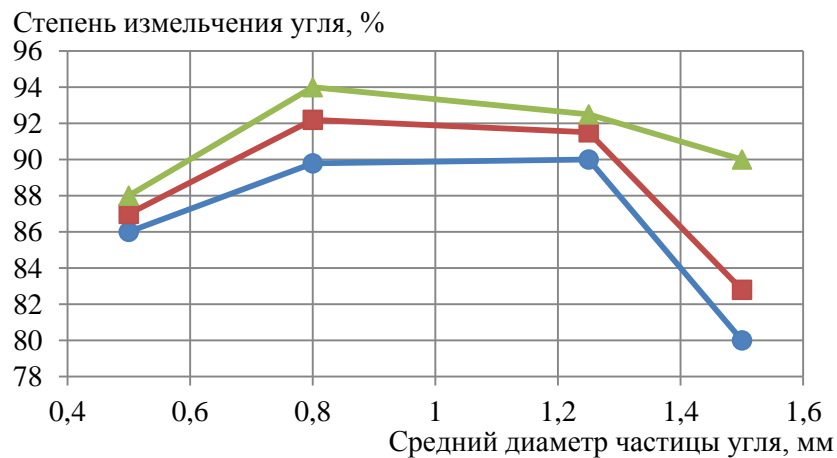


О – гранулированный торф, Δ – обыкновенный фрезерный торф

Рисунок 1.1 – Связь между прочностью ТКТ и размером частиц формируемого торфа [94]

При прессовании измельченных материалов получение прочного топлива осуществляется за счет большого количества пластических (невосстанавливаемых при снятии нагрузки) деформаций. При этом должно быть достигнуто наиболее полное непосредственное соприкосновение поверхностей частиц материала. Если прессуется органическое сырье с частицами крупного размера, образование достаточной поверхности и соответственно обеспечение достаточного соприкосновения поверхностей происходит только после его раздавливания. С увеличением размера сырья необходимо применение более мощного оборудования и увеличение времени прессования, применение которого приводит к повышению энергозатрат на формирование [95].

При термобрикетировании увеличение степени измельчения позволяет повысить прочность коксобрикетов (рисунок 1.2). Однако при очень тонком помоле прочность снижается, что связано с резким увеличением удельной поверхности сырья и недостатком связующего [99].



Δ – брикетирование при 100 кгс/см²; □ – при 200 кгс/см²; О – при 300 кгс/см²

Рисунок 1.2 – Зависимость прочности коксобрикетов от давления и степени измельчения формируемого сырья [99]

Температура формования

Особую ценность имеют мероприятия, в результате которых прессуемый материал в процессе формования размягчается, а затем снова затвердевает. Этого можно добиться при помощи нагрева сырья в процессе формовки. Многочисленные опыты в этом направлении производились с каменными углями [95], которые размягчаются при нагревании. Для этого пригодны в первую очередь коксовые, спекающиеся и слабоспекающиеся угли. Недостаток этого метода заключается в том, что нагревание угля приводит не только к его размягчению, но и к началу разложения. Вследствие образования газов ТКТ, выходящее из формы в нагретом виде, как правило, разрушается.

Способ формования, при котором ТКТ оставалось бы в форме под давлением до достаточного охлаждения, при обычном современном оборудовании слишком дорог. По этим причинам необходимо, чтобы требуемая температура нагрева сырья была как можно ниже.

1.3.2 Связующие материалы, применяемые при формовании

Прочность ТКТ зависит от молекулярного взаимодействия связующего с поверхностью частиц формуемого сырья, а величина молекулярного взаимодействия определяется процессом адсорбции.

Для изготовления энергетического топлива используют множество связующих материалов: битумы, пеки, смолы, крахмал, фусы и т. д. К ним предъявляют особые требования: связующее должно не повышать зольность и не снижать теплоту сгорания топлива; быть дешевым, доступным и несложным в применении; обеспечивать достаточную механическую прочность, водоустойчивость и термоустойчивость; не образовывать вредных веществ при сжигании.

Связующие вещества подразделяют на неорганические и органические [99]. В качестве неорганических связующих веществ используют цемент, техническое жидкое стекло, гашеную известь; в качестве органических – каменноугольный пек, смолы, сульфит-целлюлозные щелоки, нефтепродукты (битумы, гудроны, мазуты и т. п.), крахмал. В некоторых случаях применяют комбинации различных связующих.

Рассмотрим наиболее часто встречающиеся связующие вещества при изготовлении ТКТ.

Растворимое стекло

Растворимое стекло относится к неорганическим связующим и представляет собой натриевый или калиевый силикат различного состава: $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ или $\text{K}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ [99]. На практике в основном применяют натриевое стекло, которое при контакте с измельченным формуемым сырьем образует железистый силикат, являющийся цементирующим веществом. После сушки ТКТ становится прочным и может храниться, не требуя специально оборудованных помещений.

Этот метод усовершенствовал А.П. Фояков [99], который предложил вводить вместе с жидким стеклом небольшие количества хлоридов щелочных и щелочноземельных металлов. В результате образовывался гель кремнекислоты, представляющий собой аморфный кремнезем с некоторым количеством воды. Для закрепления топлива применялся обжиг с температурой 500-600 °С, при котором происходила дегидратация геля [100].

Известь

Известь также относится к связующим веществам неорганического типа. Наиболее широкое распространение при формовании энергетических топлив известь получила благодаря способности предотвращать образование оксидов серы при сжигании [101, 102]. Однако в этом случае наблюдается шлакование поверхностей нагрева.

Формование ТКТ на основе извести заключается в переводе гидрата окиси кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в карбонат кальция CaCO_3 под воздействием углекислого газа CO_2 , при этом закрепление (затвердевание) топлива осуществляют методом карбонизации. Прочность ТКТ с известью возрастает с течением времени, поэтому перед употреблением топливо рекомендуется выдерживать [99].

Сульфит-целлюлозные щелоки

Сульфит-целлюлозные щелоки относятся к группе органических связующих и представляют собой отходы целлюлозно-бумажной промышленности, являясь побочным продуктом переработки измельченной древесины на сульфитную целлюлозу. При высокой связующей способности сульфит-целлюлозные щелоки имеют ряд недостатков: содержат значительное количество серы, получаемое топливо неустойчиво при хранении на воздухе и в воде. В Московском институте радиоэлектроники и горной электромеханики разработан способ [103], понижающий содержание серы, при котором не теряются связующие свойства щелоков.

Каменноугольные фусы

Каменноугольные фусы – это наиболее тяжелые остатки каменноугольной смолы, полученной при пиролизе угля [99]. Они представляют собой густую смесь, содержащую смолу, мельчайшие частицы углеродистого остатка и воды. Связующие свойства фусов зависят от количественного соотношения компонентов, содержащихся в них. Различное соотношение компонентов, в свою очередь, зависит от режима конденсации смоляных паров при пиролизе. Характеристики фусов полукоксования, полученные В.П. Окладниковым [99], приведены в таблице 1.17.

Топливо на основе фусов обладает высокой водоустойчивостью и вполне удовлетворительной термоустойчивостью. Однако широкое применение фусов для технологического производства ТКТ не распространено в связи с плохой дозируемостью [99].

Таблица 1.17 – Характеристика фусов полукоксования [99]

Показатели	Значение
Содержание смолы, %	54,2
Влажность, %	2,5
Зольность, %	11,2
Выход летучих веществ, %	68,5
Теплота сгорания, кДж/кг (ккал/кг)	36351 (8655)

Каменноугольный пек

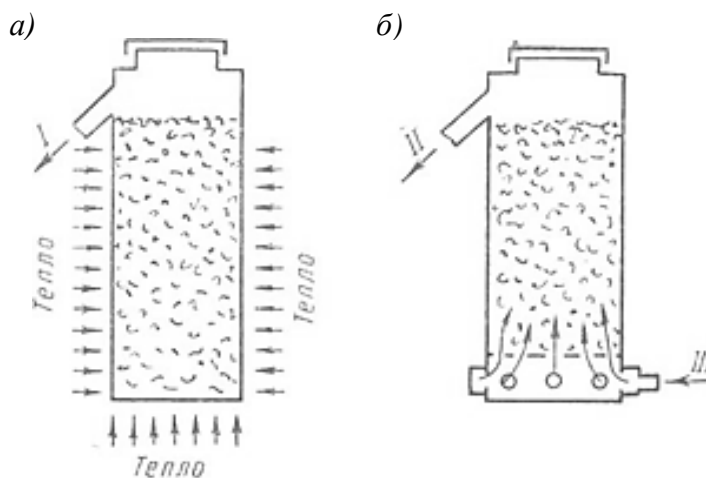
Каменноугольный пек – твердое вещество органического происхождения, являющееся остаточным продуктом перегонки каменноугольной смолы при температуре 360-380 °С. Пек в твердом состоянии представляет собой бесформенную массу черного цвета, в жидком – вязкую массу темного, почти черного цвета, со специфическим запахом. В его состав входят углеводороды, фенолы, основания и аморфный углерод. Физико-химические свойства пека зависят от температуры разгонки смолы, которая определяет количество легких фракций, входящих в состав пека [99].

Пеки обеспечивают получение свойств термо- и водоустойчивости, поэтому получили наибольшее распространение при производстве ТКГ для коммунально-бытовых нужд.

1.4 Теплотехнологии переработки низкосортного органического сырья

Методы теплотехнологии переработки органического сырья определяются способом передачи тепла:

- передача тепла сырью через стенку печи (внешний обогрев, рисунок 1.3, а);
- передача тепла сырью при непосредственном его соприкосновении с теплоносителем (внутренний обогрев, рисунок 1.3, б).



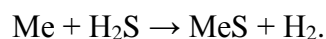
а – внешний обогрев через стенку; б – внутренний обогрев теплоносителем

I – летучие; II – летучие и теплоноситель; III – теплоноситель

Рисунок 1.3 – Схема подвода тепла к перерабатываемому сырью [82]

В качестве твердого теплоносителя могут быть использованы различные инертные или малоактивные материалы в пылевидном или мелкозернистом состоянии: металлическая дробь, полукокс или кокс, кварцевый песок и т.п. К достоинствам твердого теплоносителя относят те же достоинства, что характерны и для газового, а также большую компактность, что позволяет значительно сократить габаритные размеры и металлоемкость устройств для полукоксования органического сырья. К недостаткам можно отнести сильный абразивный износ материала оборудования при циркуляции теплоносителя, забалластировку летучих веществ мелкими фракциями теплоносителя, сильно загрязняющими смолопродукты.

В качестве жидкого теплоносителя применяют расплавы шлака, солей и металлов, достоинствами которых являются хороший контакт с топливом, простота регулирования температуры расплава, возможность связывания серы органического сырья с некоторыми видами жидкого теплоносителя, например с металлом, по реакции [87]:



Недостатки жидкого теплоносителя – непостоянство состава вследствие захвата некоторых компонентов органического сырья, неблагоприятные вязкостно-температурные характеристики (для шлакового расплава), повышенная стоимость (при использовании расплава металла) [87].

С экономической и технической точки зрения процесс теплотехнологии переработки топлива с внутренним обогревом имеет следующие преимущества перед переработкой с внешним обогревом [82]:

- значительно уменьшается расход тепла на процесс, снижаются потери тепла в окружающую среду;
- ускоряется процесс термопереработки, так как повышение температуры происходит одновременно во всем объеме слоя органического сырья;
- предотвращается возможность чрезмерного перегрева отдельных частиц сырья, так как температура нагрева не может быть выше температуры газа-теплоносителя (в печах с внешним обогревом слой сырья нагревается неравномерно – сырьё около стенок нагрето до более высоких температур, чем в центре загрузки);
- быстрое удаление парогазовых продуктов из зоны высоких температур предохраняет их от вторичного разложения (больше выход смолы);
- меньше капиталовложений на создание установки.

Печи с внутренним обогревом не лишены и недостатков: смешение парогазовой смеси с газом-теплоносителем приводит к значительному увеличению объема охлаждаемого в конденсационной системе газа, что приводит к увеличению необходимого объема конденсационной аппаратуры [82].

Первыми простейшими способами тепловой переработки торфа, позволяющими получать обогащенные продукты (кокс) без каких-либо печей, являются ямно-костровый и костровый. По обоим способам переработка проводится за счет сжигания части коксующего материала, в результате чего из исходного торфа удается получить только около 25 % кокса. По принципу работы кострового способа была создана печь «морянка», а позднее разработаны печи Шварца. Одним из первых представителей промышленных печей с внутренним обогревом являются печи Пинча и Гаммерса, с внешним – печь Циглера, созданная в начале XIX столетия на Редкинском торфококсовальном заводе [81].

Постепенное развитие исследований в области переработки низкосортного сырья привело к раздвоению направления: а) получение топливного газа и искусственного жидкого топлива [26, 34-39, 81, 104, 105]; б) получение твердых продуктов (включая ТКТ).

Процесс теплотехнологической переработки торфа в ТКТ был впервые осуществлен в Германии в 1903 году [106], где было построено два опытных завода, работающих по способу Шенинга-Фрица. Торф в трех ретортах нагревался последовательно до температур 115, 190 и 250 °С, затем брикетировался.

В 1931 году Р.И. Семечкин и А.А. Глов [106, 107] получили ТКТ в виде брикетов из торфа, прессование которого осуществлялось при температуре 215-280 °С и давлении от 10 до 100 кгс/см². Выдержка под давлением составила от 1 секунды до 5-10 минут.

Л.М. Сапожников [108] предложил метод теплотехнологической переработки топлива путем непрерывного коксования, в котором дробленый уголь подвергался быстрому нагреву до температуры 400-460 °С, после чего в течение 0,5-2,0 минут выдерживался для достижения определенного уровня деструкции и формовался в пресс-формовочной машине. Далее сформованное ТКТ поступало в камерные печи, где нагревалось со скоростью 1,5-2,5 °С/минуту до температуры 800 °С, после чего его подвергали тушению. Технология была реализована в 1959-1960 гг. на Харьковском коксохимическом заводе.

В 1953 г. Е.М. Тайц и В.З. Аненкова [99] получили ТКТ из смеси углей Иркутского бассейна и примеси полукокса, используя при этом в качестве связующего окисленную тяжелую фракцию низкотемпературной смолы.

Позднее С.И. Смольянинов и С.Г. Маслов изготовили термобрикеты из торфа [79] при различных режимах прессования (температуре и давлении).

В конце XX века производство ТКТ вновь стало актуальным направлением исследований и развития топливосжигающей техники, что обусловлено стремлением использовать в энергетических целях доступное низкосортное сырьё и резко возросшим интересом к экологически чистой тепловой энергетике на основе возобновляемых ресурсов. Только в России в период 1991-2014 гг. зарегистрировано около 234 патентов на изобретения по данной

тематике [109], часть из которых основана на теплотехнологической переработке исходного сырья.

Патентный поиск в области получения ТКТ из низкосортного органического сырья (МПК C10L5/00; C10L5/02; C10L5/10; C10L5/12; C10L5/14; C10L5/40; C10L5/44; C10L5/46; C10L5/48) показал, что среди изобретений наиболее часто используются следующие связующие вещества: полиакриламид [110-114], цемент или глина [115-120], отходы нефтеперерабатывающей промышленности [121-128], органические связующие (крахмал, декстрин, меласса и др.) [120, 129-136] или смесь из нескольких типов. Встречаются топлива, изготовленные посредством прессования без добавления связующего [137-141].

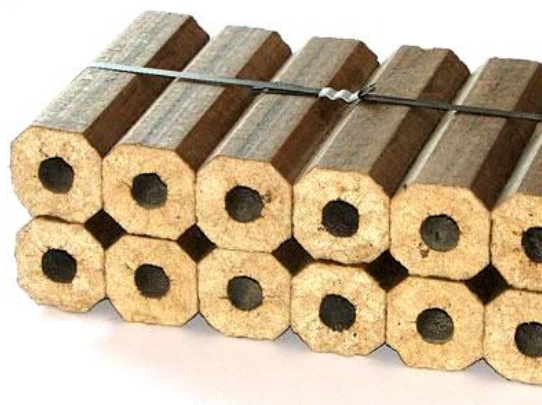
Известны способы получения ТКТ, основанные на использовании в качестве связующего вещества компоненты с низкой температурой плавления (криогель, воск, парафин и т.п.) [142-145]. Эти связующие предварительно расплавляют, добавляют в них формуемое сырье и дают остыть, получая при этом прочное ТКТ.

Представленные на топливно-энергетическом рынке технологии производства ТКТ базируются на одновременном нагреве и прессовании сырья без добавления связующего. Наиболее распространенной продукцией являются брикеты Ruf, Pini&Kay, Nestro и пеллеты (рисунок 1.4).

а)



б)



в)



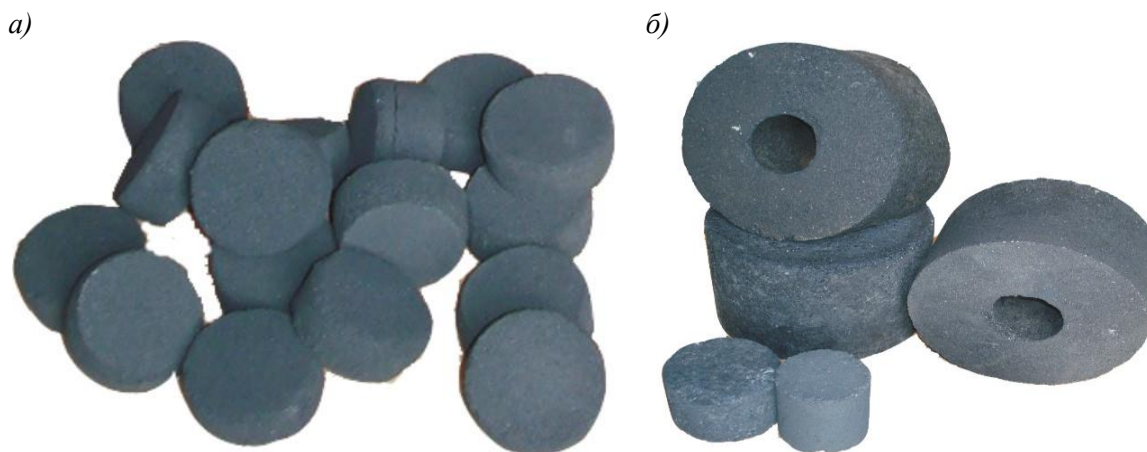
г)



а) – брикеты RUF; б) – брикеты Pini&Kay; в) – брикеты NESTRO; г) – древесные пеллеты

Рисунок 1.4 – Твердое композитное топливо, представленное на рынке РФ

Менее распространено ТКТ на основе продуктов теплотехнологической переработки органического сырья (рисунок 1.5.).



а) – из полукоксовой мелочи; б) – из коксовой мелочи с антрацитом

Рисунок 1.5 – Твёрдое композитное топливо из продуктов теплотехнологической переработки низкосортного сырья, представленное на рынке РФ

Примечательно, что практически во всех упомянутых технологических линиях по производству ТКТ присутствует дорогостоящее и энергозатратное прессовое оборудование, приводящее к высокой себестоимости продукции.

На данный момент на топливно-энергетическом рынке России нет ТКТ, которое смогло бы составить серьезную конкуренцию привозному углю. И если прочностные, теплотехнические и экологические характеристики существующего ТКТ в некоторых случаях превосходят характеристики угля, то его себестоимость из-за использования прессового оборудования пока значительно выше.

1.5 Постановка задач исследований

Выполненный аналитический обзор, включающий мировые тенденции в области энергетики, состояние исследований и современные используемые теплотехнологии и устройства переработки низкосортного органического сырья в ТКТ, позволяет сделать следующие выводы.

1) Необходимо привлекать невостребованное на данный момент низкосортное органическое сырье на покрытие собственных энергетических нужд регионов, замещая привозной уголь на топливно-энергетическом рынке. Замещение в перспективе позволит улучшить экологическую и экономическую ситуацию в использующих их регионах.

2) Существующее котельное оборудование не приспособлено к сжиганию высоковлажного и высокозольного низкосортного сырья, для этого требуется его модернизация, что влечет за собой дополнительные капиталовложения, которые владельцы котельных не в состоянии

привлечь. Необходима переработка этого сырья в ТКТ, которое эффективно использовалось бы как в существующих топливосжигающих устройствах слоевого типа, так и в разрабатываемых.

3) Перспективным направлением по условиям минимизации капиталоемкости переработки низкосортного сырья можно признать теплотехнологию, которая позволяет получить обогащенные продукты, используя при этом оборудование из углеродистых сталей обыкновенного качества.

4) Желая снизить энергозатратность и минимизировать капиталовложения на создание установки, необходимо стремиться к использованию в технологии формовочных аппаратов штамповочного типа, взамен прессового оборудования.

5) Назрела потребность в создании доступных широкому кругу потребителей автономных установок по малотоннажному производству высококачественного энергетического топлива из местного низкосортного сырья.

В связи с этим наиболее привлекательным направлением исследований становится разработка оригинальной теплотехнологии по производству ТКТ из низкосортного органического сырья. Основными критериями, которым должна удовлетворять данная теплотехнология, является дешевизна технологической линии, используемой при производстве ТКТ, и её простота в обслуживании. Низкая стоимость линии обеспечивается ведением процесса теплотехнологичной переработки исходного сырья при температурах 200-450 °С и использованием штамповочного оборудования в качестве формовочного аппарата.

Исходя из вышеизложенного и поставленной цели исследований, основными задачами настоящей работы являются:

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 формования 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.

Глава 2. Методические основы экспериментальных исследований теплотехнологии переработки низкосортного органического сырья

2.1 Исследуемое органическое сырье

В качестве сырья для теплотехнологической переработки выбраны низкосортные топлива Томской области (рисунок 2.1): торф с месторождений Бакчарского, Колпашевского и Томского районов, бурый уголь Таловского месторождения, древесные отходы одного из лесоперерабатывающих предприятий, сапрпель озерного месторождения Колпашевского района.



а) – торф месторождения «Суховское»; б) – торф месторождения «Аркадьевское»; в) – торф месторождения «Кандинское»; г) – бурый уголь месторождения «Таловское»; д) – древесные отходы ЛПК «Партнер-Томск»; е) – озерный сапрпель месторождения «Карасевое»

Рисунок 2.1 – Пробы низкосортных топлив Томской области [51]

«Аркадьевское» и «Суховское» относятся к месторождениям среднеразложившихся торфов с низинным типом залежи. Месторождения ранее были подготовлены для промышленной разработки. В период 1986-1995 гг. вблизи месторождения «Аркадьевское» было построено высокомеханизированное торфодобывающее предприятие, которое прекратило свое существование в конце 90-х годов [146]. Торф Суховского месторождения имеет уплотненную консистенцию, характеризуется высокими значениями выхода летучих веществ, влажности и зольности, что в совокупности приводит к низкой теплоте сгорания (таблица 2.1). Торф

Аркадьевского месторождения рыхлый, имеет умеренную влажность и зольность, высокий выход летучих, низкую теплоту сгорания [49, 51].

Таблица 2.1 – Теплотехнические характеристики исследуемого сырья [49, 51, 147-149]

Теплотехническая характеристика	Торф			Таловский уголь	Карасевский сапрпель	Древесная щепа
	Суховской	Аркадьевский	Кандинский			
Влажность на рабочую массу $W_t^r, \%$	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 на сухую массу $A^d, \%$	39,5±0,8	31,5±0,7	9,1±0,2	25,9±0,6	38,4±0,8	0,6±0,2
Зольность на рабочую массу $A^r, \%$	16,0	19,5	2,5	12,7	12,7	0,3
Выход летучих веществ на сухую беззольную массу $V^{daf}, \%$	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 на сухую беззольную массу $Q^{daf}, \text{МДж/кг}$	23,1	19,4	19,8	27,1	18,6	19,1
Низшая теплота сгорания $Q_i^r, \text{МДж/кг}$	4,2±0,2	7,3±0,2	3,1±0,2	8,6±0,2	2,1±0,2	9,3±0,2

Кандинское месторождение также образовано низинной залежью торфа. В настоящее время на месторождении ведется добыча глины и песчано-гравийной смеси, находящейся под слоем торфа. Представленные образцы торфа имеют коричневый цвет, в естественном состоянии обладают высокими значениями влажности и выхода летучих веществ.

Таловское месторождение бурого угля расположено в юго-восточной части Томской области. Месторождение оценивают как относительно крупное с прогнозными ресурсами угля марки Б1 около 3,6 млрд т (ежегодно добыча может составить 10-15 млн т) [5]. Уголь относится к топливам ранней стадии метаморфизма, в его составе содержатся неразложившиеся остатки древесины и органических веществ. Уголь хрупкий, коричневого цвета, имеет неоднородный состав, низкую теплоту сгорания в пересчете на рабочую массу [51, 148].

Пробы озерного сапрпеля добыты с месторождения «Карасевое», расположенного в Колпашевском районе вблизи села Чажемто. Сапрпель представляет собой высоковлажную вязкую массу с довольно высоким значением зольности и низкой теплотой сгорания.

В качестве отходов лесоперерабатывающей промышленности исследовалась древесная щепа из различных пород древесины с ЗАО «Лесоперерабатывающий комбинат «Партнер-Томск».

Элементный состав исследуемых топлив приведен в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Элементный состав исследуемых топлив [148, 149]

Топливо		Элементный состав на горючую массу, %				
		C^{daf}	H^{daf}	N^{daf}	S^{daf}	O^{daf}
Торф	Суховской	59,95±1,36	5,98±0,05	2,69±0,10	0,09±0,01	31,29±1,44
	Аркадьевский	51,03±1,48	6,01±0,23	4,62±0,17	0,15±0,03	38,19±1,41
	Кандинский	57,52±0,22	5,61±0,14	2,17±0,24	0,15±0,05	34,55±0,54
Таловский уголь		68,38±0,34	6,28±0,08	0,62±0,04	0,44±0,13	24,28±0,53
Карасёвский сапрпель		51,45±0,91	5,25±0,15	3,57±0,12	0,22±0,02	39,51±0,15
Древесная щепа		50,87±0,39	6,23±0,03	0,20±0,01	следы	42,70±0,39

Определенные характеристики исследуемых топлив соотносятся со значениями, приведенными в главе 1. Расчет погрешности определения теплотехнических характеристик и элементного состава приведен в Приложении А.

Учитывая высокие значения влажности и зольности, можно сделать вывод, что использование данных топлив в существующем котельном оборудовании по традиционным технологиям сжигания неэффективно и нецелесообразно. Необходима предварительная переработка данных топлив перед сжиганием.

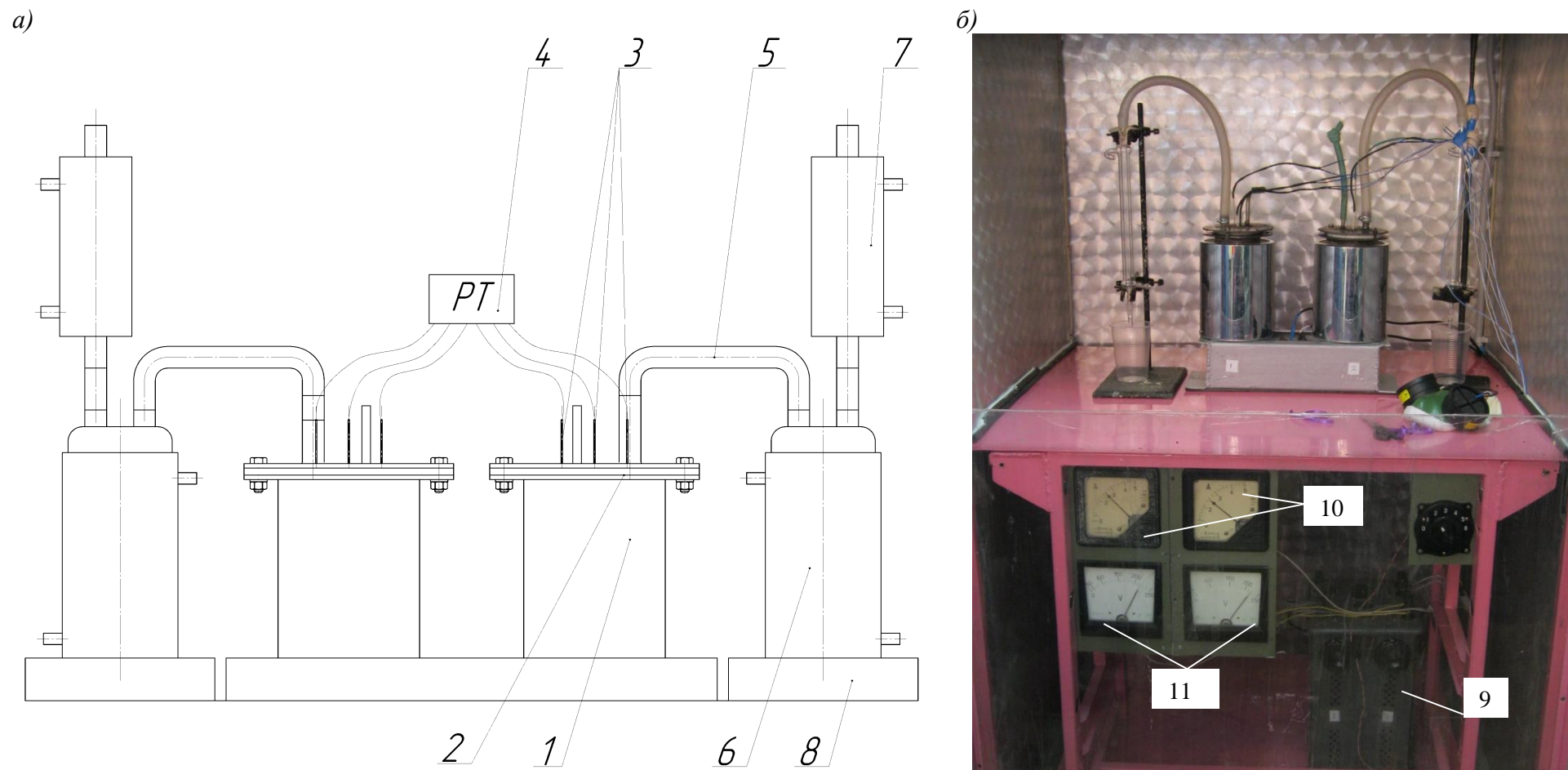
2.2 Экспериментальная установка теплотехнологической переработки

Теплотехнологическая переработка твердого органического сырья характеризуется выделением газообразного, жидкого (в виде паров) и твердого продуктов. В связи с отсутствием универсального метода анализа получаемых продуктов необходимо проводить их разделение для получения наиболее полной информации об их характеристиках и формирования представления о происходящих процессах.

Согласно поставленным задачам и специфике исследований экспериментальная установка теплотехнологической переработки должна удовлетворять следующим основным требованиям:

- должна присутствовать возможность загрузки исследуемого сырья до проведения переработки и выгрузки полученного твердого продукта по её окончанию;
- должен обеспечиваться нагрев загружаемого сырья до температуры 200-500 °С с возможностью измерения температуры и регулировки мощности нагрева;
- должна присутствовать защитная теплоизоляция;
- должна присутствовать герметичность всех узлов и соединительных элементов, исключая потери газовой среды и паров;
- должны обеспечиваться условия для улавливания всех продуктов теплотехнологической переработки и их разделения, обеспечивающие объективные данные материального баланса.

С учетом вышеизложенного разработана экспериментальная установка (рисунок 2.2), предназначенная для теплотехнологической переработки органического сырья в обогащенные продукты (полукоксы, пиролизный конденсат и газ).



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*

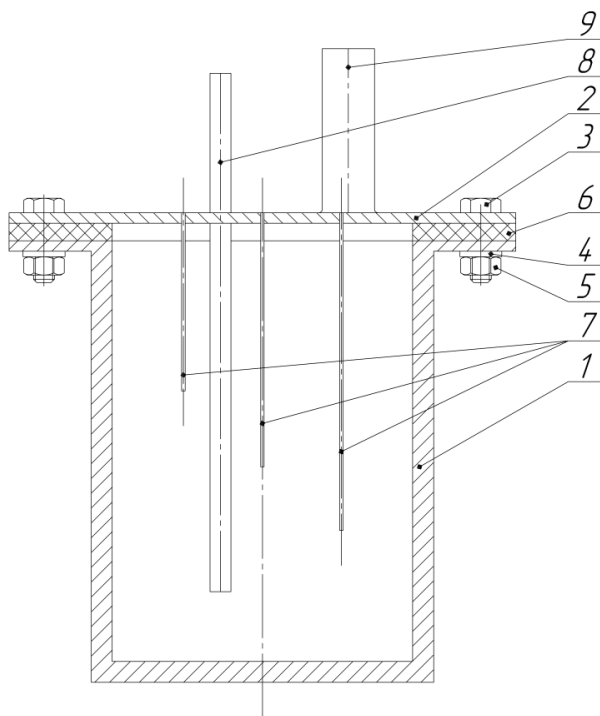
Рисунок 2.2 – Экспериментальная установка теплотехнологической переработки низкосортного сырья [51]

Установка состоит из нагревательного элемента 1, реактора 2, системы термодпар 3, регистратора температуры 4 (термометра), термостойкого шланга 5, конденсатор 6 для сбора конденсата, холодильника 7, закрепленных на опоре 8.

Трансформатор 9 позволяет регулировать мощность нагревательного элемента теплотехнологической установки. Снимать необходимые данные о значениях силы тока и напряжения позволяют включенные в электрическую цепь амперметр 10 и вольтметр 11.

Все перечисленные элементы установки представлены в двух экземплярах (рисунок 2.2), что позволяет проводить одновременно 2 эксперимента, снижая время, затрачиваемое на исследования.

Реактор (рисунок 2.3) представляет собой цилиндрический металлический сосуд 1, соединенный с крышкой 2 при помощи болтового соединения (поз. 3-5). Герметичность соединения крышки и реактора обеспечивается использованием паранитовой прокладки 6. К крышке 2 приварены три трубки 7, предназначенные под систему термодпар, канал для ввода присадок 8 и патрубков 9 для отвода летучих продуктов. Реактор помещается в нагревательный элемент. Подвод теплоты к реактору осуществляется по периметру боковой поверхности.



1 – металлический сосуд, 2 – крышка, 3 – болт, 4 – шайба, 5 – гайка, 6 – прокладка, 7 – трубки для системы термодпар, 8 – канал для ввода присадок, 9 – патрубок

Рисунок 2.3 – Реактор экспериментальной теплотехнологической установки

В реакторе предусмотрена система термодпар, которая позволяет определять температуру надслойного пространства (t_1) и в слое перерабатываемого сырья (в центре t_2 и на периферии t_3).

Конструкция одной из трех термопар, позволяющая обеспечить наибольшую чувствительность измерения, представлена на рисунке 2.4.

Конденсатор (рисунок 2.5) позволяет одновременно охлаждать парообразные продукты, получаемые во время осуществления теплотехнологической переработки, и собирать полученную смесь пиролизной смолы и пирогенетической влаги. Для исключения возможности проскока парообразных продуктов при неполной конденсации на выходе из конденсатора расположен дополнительный холодильник.

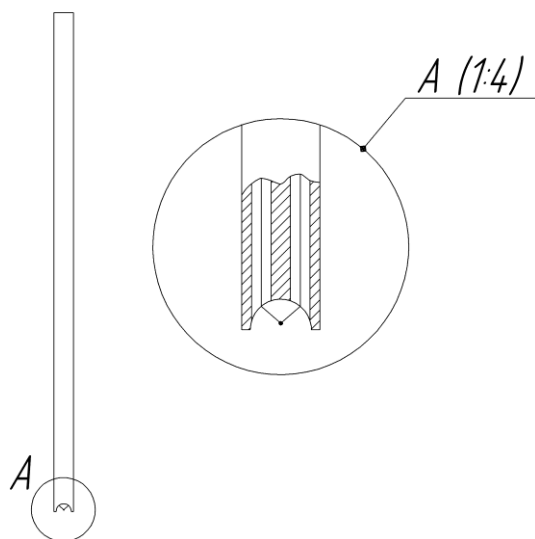
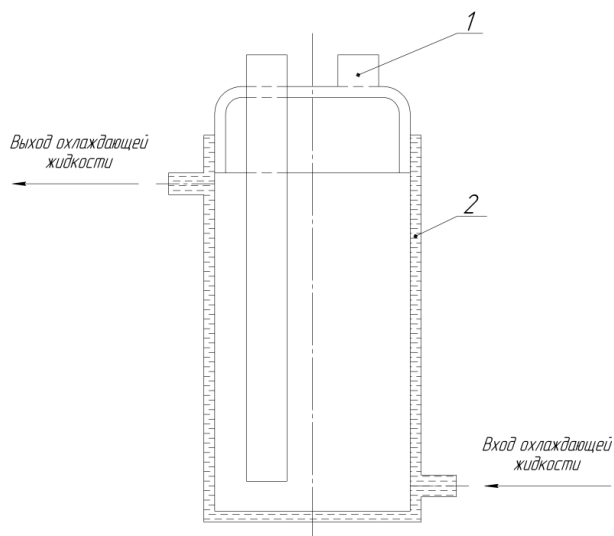


Рисунок 2.4 – Термопара



1 – крышка, 2 – ёмкость с охлаждающим теплоносителем

Рисунок 2.5 – Конденсатор

Так как установка работает в различных температурных режимах, то для выхода на определенный уровень температуры используются соответствующие градуировочные зависимости. Зависимости температуры в реакторе от выставленной мощности нагревательного элемента приведены на рисунках 2.6-2.8.

Температура надслоного пространства t_1 , °C

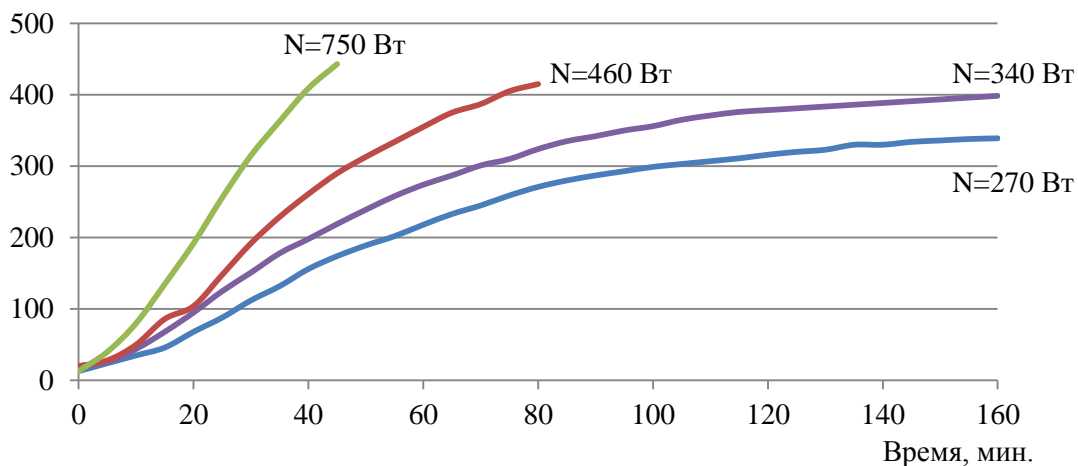


Рисунок 2.6 – Зависимость температуры надслоного пространства (t_1) от мощности нагревательного элемента

Температура реактора t_2 , °C

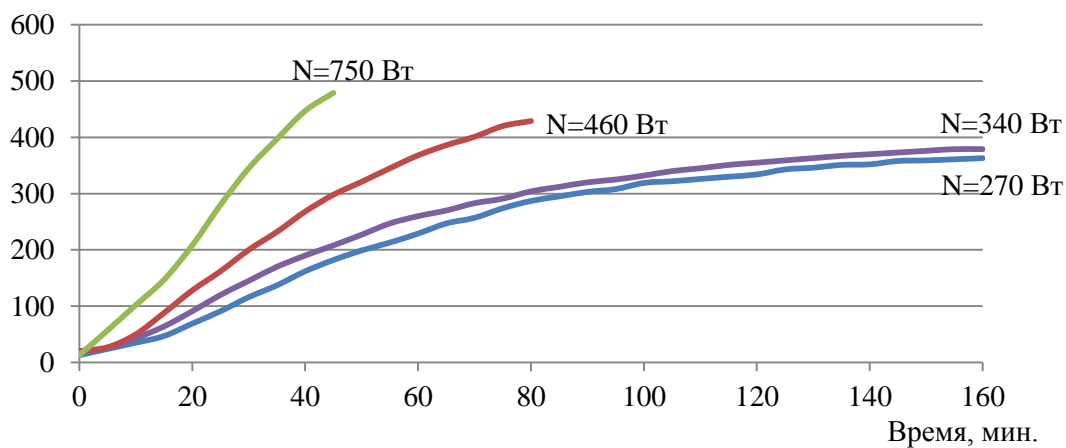


Рисунок 2.7 – Зависимость температуры в центре реактора (t_2) от мощности нагревательного элемента

Температура реактора t_3 , °C

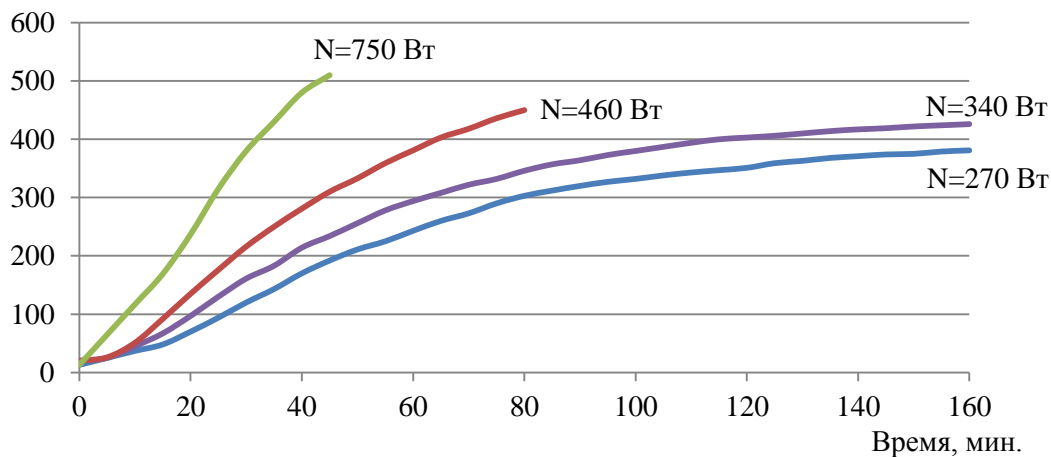


Рисунок 2.8 – Зависимость температуры в нижней части реактора (t_3) от мощности нагревательного элемента

Разработанная экспериментальная установка позволяет решать несколько задач:

- проведение теплотехнологической переработки различных видов органического сырья при различных режимных параметрах (мощность, температура нагрева);
- определение материальных балансов процесса пиролиза;
- тестирование веществ, используемых в качестве катализатора процесса пиролиза.

2.3 Методика проведения экспериментов

В данной работе проводились следующие исследования: определение теплотехнических характеристик и элементного состава исходного органического сырья; эксперименты по теплотехнологической переработке органического сырья; определение теплотехнических характеристик и состава продуктов теплотехнологической переработки; эксперименты по формовке ТКТ; определение теплотехнических характеристик ТКТ; испытание ТКТ на прочность и водопоглощение.

2.3.1 Определение теплотехнических характеристик и элементного состава исходного органического сырья

Структурная схема проведения анализов для определения теплотехнических характеристик и элементного состава исходного сырья показана на рисунке 2.9.

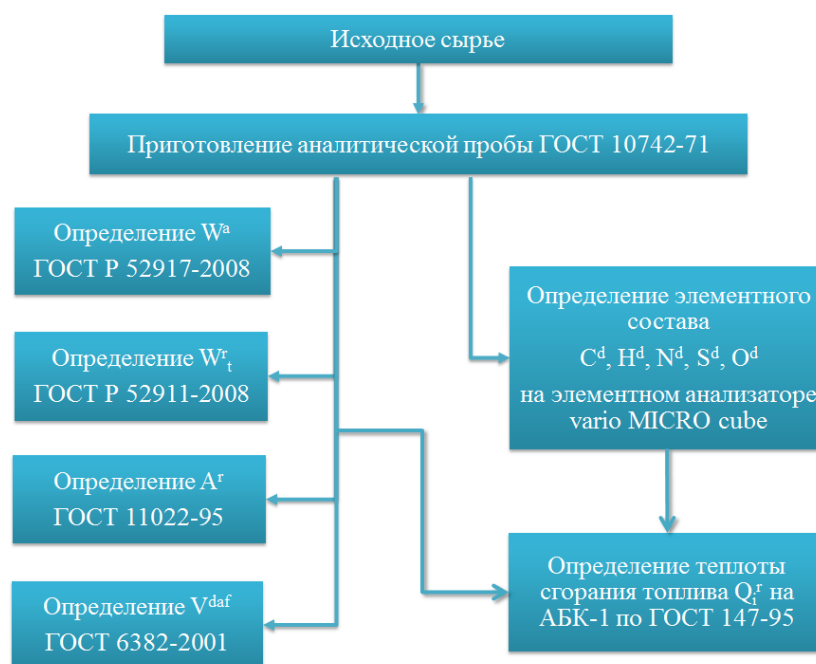


Рисунок 2.9 – Структурная схема определения характеристик исследуемого сырья

Определение теплотехнических характеристик производилось по стандартным методикам: влажность – по ГОСТ Р 52917-2008 «Топливо твердое минеральное. Методы определения влаги в аналитической пробе» и ГОСТ Р 52911-2008 «Топливо твердое минеральное. Методы определения общей влаги», зольность – по ГОСТ 11022-95 «Топливо твердое минеральное.

Методы определения зольности», выход летучих веществ – по ГОСТ 6382-2001 «Топливо твердое минеральное. Методы определения выхода летучих веществ». Теплота сгорания топлив определялась на колориметре АБК-1 по ГОСТ 147-95 «Топливо твердое минеральное. Определение высшей теплоты сгорания и вычисление низшей теплоты сгорания».

Элементный состав исследуемого сырья определялся на анализаторе элементного состава «Vario micro cube», порядок работы на котором и методика проведения анализа изложены в специально разработанном учебном пособии [150].

2.3.2 Теплотехнологическая переработка органического сырья

Исследования проводились на экспериментальной установке, представленной на рисунке 2.2. Разработана следующая последовательность процедур проведения эксперимента:

а) сформировать исходное сырье, измерить аналитическую влажность, взвесить на весах и загрузить в реактор;

б) реактор с подготовленным сырьем герметично соединить с крышкой, поместить в нагревательный элемент, затем вставить термопары в специально предназначенные трубки;

в) термопары подключить к регистрирующему устройству (термометру), измерить начальную температуру в реакторе;

г) реактор, конденсатор и холодильник герметично соединить между собой;

д) подать охлаждающую жидкость (водопроводную воду) в конденсатор и холодильник;

е) проверить герметичность собранной установки;

ж) включить нагревательный элемент;

з) с ростом температуры в реакторе происходит деструкция органического сырья, необходимо следить за процессом, отслеживая температуру сырья внутри реактора, изменения в процессе конденсации и выхода газовой фракции;

и) газ для анализа отбирать при помощи шприца, предварительно отбор первоначальной прокачкой его объема анализируемой пробой, затем отобранную пробу вводить в хроматограф;

к) после достижения необходимого значения температуры снизить мощность нагревательного элемента для поддержания изотермического режима;

л) дождавшись визуального окончания процесса, выключить нагревательный элемент;

м) сборник конденсата отсоединить, сконденсировавшийся пиролизный конденсат взвесить, отфильтровать на бумажных фильтрах для определения содержания смолы;

н) реактор охладить и разобрать;

п) твердый остаток извлечь из реактора, взвесить, упаковать в герметичную тару;

р) систему разобрать, промыть и высушить.

Описанная технологическая цепочка применима к единичному эксперименту. Для обеспечения «чистоты» последующих опытов необходимо тщательное выполнение п. «р».

Согласно [151] для обеспечения сходимости результатов, исключения случайной ошибки и определения погрешности измерений эксперименты по теплотехнологической переработке одного и того же вида органического сырья в определенных условиях проводятся не менее 4-х раз.

2.3.3 Определение теплотехнических характеристик и состава продуктов теплотехнологической переработки

Теплотехнические характеристики углеродистого остатка (полукокса) и пиролизной смолы определялись по стандартным методикам [152-156]: ГОСТ Р 52917-2008, ГОСТ Р 52911-2008, ГОСТ 11022-95, ГОСТ 6382-2001. Теплота сгорания измерялась на колориметре АБК-1 по [150] в соответствии с ГОСТ 147-95. Определение элементного состава полукокса осуществлялось на анализаторе «Vario micro cube» по [150]. Анализ газа проводился на газовом хроматографе «Хроматэк-Кристалл 5000.2», порядок работы на котором изложен в инструкции к прибору [158]. Структурная схема анализа показана на рисунке 2.10.

Состав газа, получаемого при теплотехнологической переработке топлива, устанавливался посредством газовой хроматографии, как одного из наиболее распространенных физико-химических методов исследования газовых смесей. Газовая хроматография – универсальный метод разделения, качественного и количественного анализа смесей разнообразных газообразных или испаряющихся без разложения веществ. Компоненты анализируемой смеси перемещаются по хроматографической колонке с потоком газа-носителя. По мере продвижения смесь многократно разделяется между газом-носителем (подвижной фазой) и твердым носителем (стационарной фазой), которым наполнена колонка. Принцип разделения состоит в неодинаковом сродстве веществ к летучей подвижной фазе и стационарной фазе в колонке. Компоненты смеси селективно задерживаются последней, поскольку растворимость их в этой фазе различна, и таким образом разделяются (компонентам с большей растворимостью требуется большее время для выхода, чем компонентам с меньшей растворимостью). На выходе из колонки вещества из разделенной смеси регистрируются детектором. Сигнал детектора отображается на компьютере в виде хроматограммы, являющейся источником качественной и количественной информации о составе анализируемой газовой смеси [157].

Качественный анализ основан на относительном постоянстве времени выхода (время удерживания) каждого компонента из разделительной колонки – это время, прошедшее от момента ввода пробы до выхода максимума концентрации (высоты пика) определяемого компонента, выраженное в единицах времени. Каждому компоненту смеси соответствует свое время удерживания, определенное при калибровке прибора. Количественный анализ основан на измерении площади пиков. Зависимость площади пика и времени выхода от концентрации устанавливается при калибровке хроматографа.

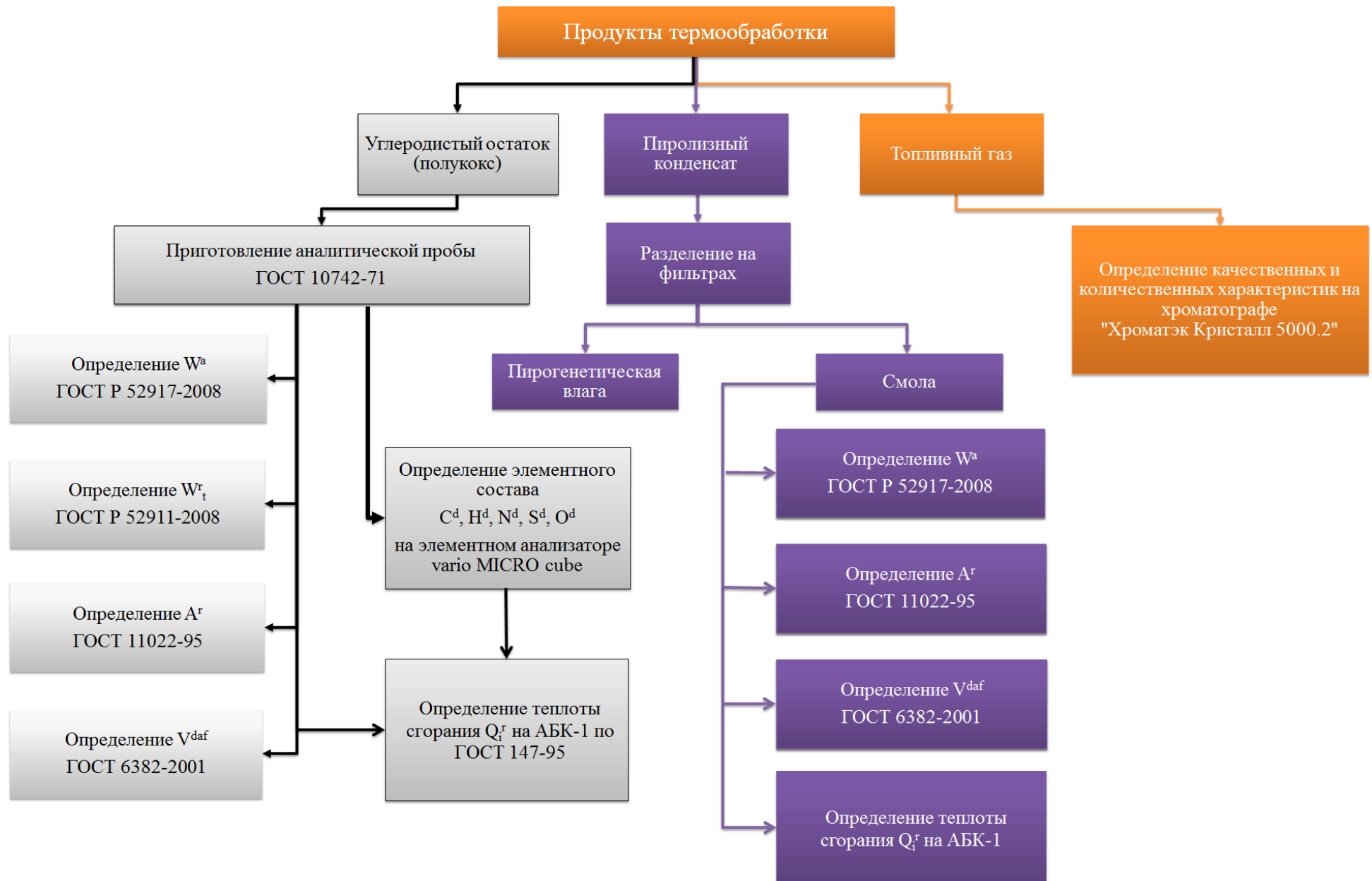
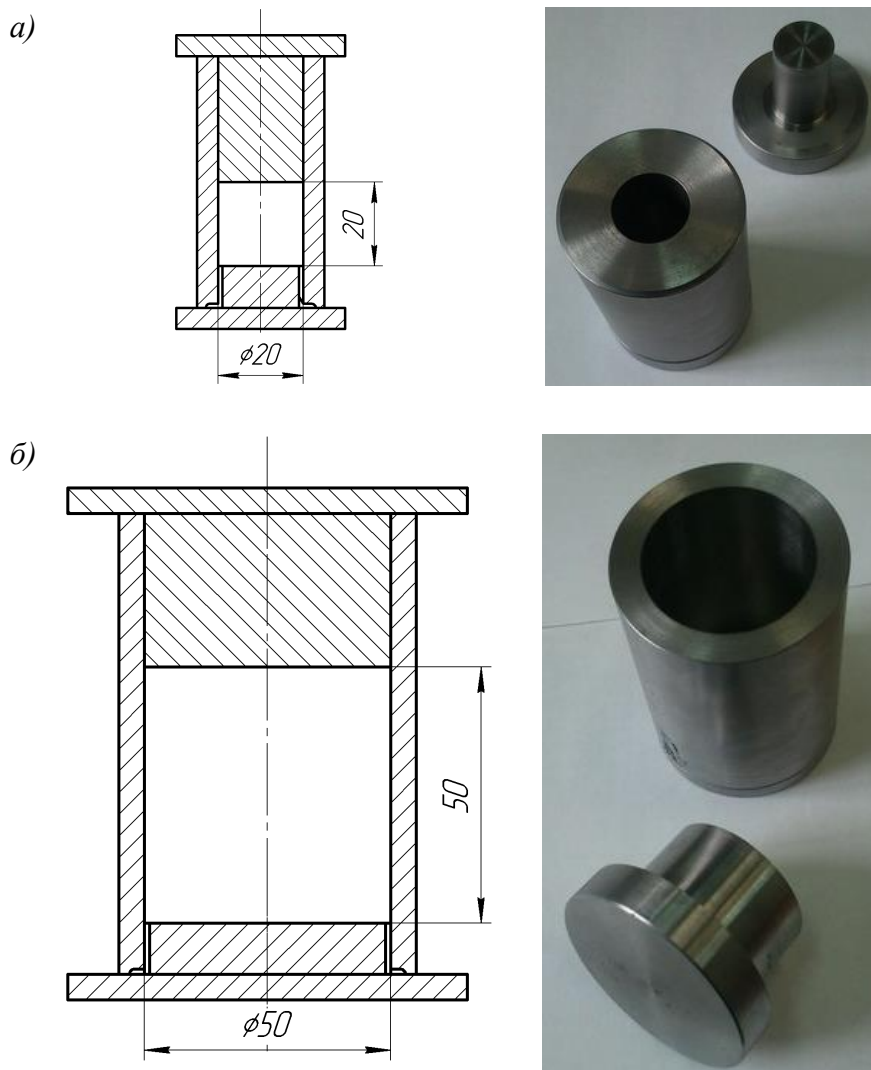


Рисунок 2.10 – Структурная схема определения характеристик продуктов теплотехнологической переработки

2.3.4 Формовка ТКТ

Разработана следующая последовательность проведения процедур эксперимента:

- а) полукокс измельчить в ступке, взвесить на весах;
 - б) пиролизную смолу (или связующее на основе декстрина и пиролизного конденсата) взвесить на весах, смешать с измельченным полукоксом;
 - в) взвесить массу подготовленной смеси;
 - г) посредством штамповочной формы (рисунок 2.11) из смеси сформовать ТКТ (пеллета – диаметр 20 мм и длина 20 мм, брикет – диаметр 50 мм и высота 50 мм);
 - д) поместить сформованное топливо в сушильный шкаф;
 - е) включить сушильный шкаф, выставив необходимую температуру;
 - ж) сушить ТКТ до тех пор, пока его масса не перестанет уменьшаться, приняв постоянное значение, или не начнет увеличиваться вследствие окисления;
- з) используемую тару и емкости промыть и высушить.



а) – для пеллет, б) – для брикетов

Рисунок 2.11 – Штамповочные формы для изготовления ТКТ

Данная технологическая цепочка применима к разовому эксперименту. Для обеспечения «чистоты» последующих опытов необходимо тщательное выполнение п. «и».

Согласно [151] для обеспечения сходимости результатов, исключения случайной ошибки и определения погрешности измерений эксперименты по формованию ТКТ проводятся не менее 4-х раз.

2.3.5 Определение теплотехнических характеристик ТКТ

Теплотехнические характеристики устанавливались согласно следующим методикам [152-156]: ГОСТ Р 52917-2008, ГОСТ Р 52911-2008, ГОСТ 11022-95, ГОСТ 6382-2001, ГОСТ 147-95. Элементный состав определялся на анализаторе элементного состава «Vario micro cube» согласно [150].

2.3.6 Испытание ТКТ на прочность и водопоглощение

Определение прочностных характеристик полученного топлива и его водопоглощение проводилось согласно стандартным методикам [159-161]: ГОСТ 21290-75, ГОСТ 21289-75, ГОСТ 18132-72.

Большая часть потери ТКТ происходит во время загрузки и выгрузки при транспортировке, а также при подаче в топку котла, при которых оно подвергается многократным падениям и следующим за ними разрушениям целостности. В связи с этим в качестве основного испытания, определяющего механическую прочность ТКТ, выбрано испытание на сбрасывание по ГОСТ 21289-75 «Брикеты угольные. Методы определения механической прочности». Согласно ГОСТ ТКТ предварительно взвешивают, три раза сбрасывают на металлическую поверхность с высоты 1500 мм, вслед за этим сброшенное топливо собирают, просеивают на сите и взвешивают. Далее составляют отношение массы ТКТ после испытаний к начальной.

Вторым испытанием согласно ГОСТ 21289-75 является сжатие ТКТ с помощью пресса для определения максимальной нагрузки, которую оно сможет выдержать.

Испытания на водопоглощение проводились согласно ГОСТ 21290-75 «Брикеты угольные. Метод определения водопоглощения». Для этого предварительно измеряют массу испытываемого ТКТ, затем его помещают в емкость с водой на 2 часа. По истечении времени испытания ТКТ извлекают из емкости и взвешивают. Водопоглощение определяют как отношение разницы массы ТКТ до и после пребывания в воде к начальной массе [159]:

$$X = \frac{m_1 - m}{m} \cdot 100\%,$$

где m – масса ТКТ до испытания, г;

m_1 – масса ТКТ после испытания, г.

2.4 Обработка экспериментальных данных

2.4.1 Материальный баланс теплотехнологической переработки

Материальный баланс основан на законе сохранения массы: сумма масс продуктов теплотехнологической переработки равна массе исходного сырья. Для его составления необходимо измерение массы следующих составляющих: исходного сырья и его влаги, углеродистого остатка (полукокса), пиролизного конденсата (смола и пирогенетической влаги), выделившегося газа.

Масса исходного сырья определяется взвешиванием перед загрузкой в реактор (m_o). Так как сырье содержит в своем составе влагу, необходимо измерить влажность топлива (W^a) перед непосредственным проведением эксперимента.

Масса влаги сырья (m_{H_2O}) равна:

$$m_{H_2O} = m_o \cdot W^a, \text{ кг.}$$

Соответственно масса сухого сырья ($m_{o,сух}$) равна:

$$m_{o,сух} = m_o - m_{H_2O}, \text{ кг.}$$

Масса полукокса ($m_{пк}$) определяется взвешиванием твердого остатка после теплотехнологической переработки исходного сырья.

Пиролизный конденсат после окончания процесса собирается в емкости-холодильнике для сбора конденсата, после чего массу емкости с конденсатом (m_{ex+k}) взвешивают на весах. Массу пиролизного конденсата (m_k) получают вычитанием массы влаги топлива (m_{H_2O}) и массы емкости-холодильника для сбора конденсата (m_{ex}), измеренную до проведения эксперимента, из массы емкости с конденсатом (m_{ex+k}):

$$m_k = m_{ex+k} - m_{ex} - m_{H_2O}, \text{ кг.}$$

После того, как пиролизный конденсат отстоится, жидкие продукты расслаиваются на два слоя. Сверху располагается пиролизная смола, снизу подсмольная вода – пирогенетическая влага. Конденсат фильтруется с помощью фильтровальной бумаги. Отфильтрованная подсмольная вода взвешивается ($m_{пв}$). Масса пиролизной смолы ($m_{см}$) определяется разницей между массой пиролизного конденсата (m_k) и массой подсмольной воды ($m_{пв}$):

$$m_{см} = m_k - m_{пв}, \text{ кг.}$$

Материальный баланс записывается в виде:

$$m_o = m_{пк} + m_2 + m_k + m_{H_2O}, \text{ кг,}$$

где m_2 – масса выделившегося при пиролизе газа, кг.

В процентном отношении материальный баланс можно записать:

$$\left(\frac{m_{пк}}{m_o} + \frac{m_2}{m_o} + \frac{m_k}{m_o} + \frac{m_{H_2O}}{m_o} \right) \cdot 100 = 100 \, \%.$$

Однако для более объективной оценки выхода продуктов пиролиза следует записывать материальный баланс, приведенный на сухую массу исходного сырья, т.е.:

$$\left(\frac{m_{нк}}{m_{о.сух}} + \frac{m_2}{m_{о.сух}} + \frac{m_k}{m_{о.сух}} \right) \cdot 100 = 100 \text{ \%}.$$

С учетом того, что эксперимент проводится в полностью герметичной системе и определяется масса получаемых продуктов (твердый остаток и жидкая фракция), массу газа можно принять равной:

$$m_2 = m_o - m_{нк} - m_k - m_{H_2O} = m_{о.сух} - m_{нк} - m_k, \text{ кг}.$$

Плотность получаемого газа (сухого при 0 °С и 760 мм рт. ст.) подсчитывается по формуле [63]:

$$\rho_2 = 0,01 \cdot [1,96 \cdot CO_2 + 1,52 \cdot H_2S + 1,25 \cdot N_2 + 1,43 \cdot O_2 + 1,25 \cdot CO + 0,0899 \cdot H_2 + \sum (0,536 \cdot m + 0,045 \cdot n) \cdot C_m H_n], \text{ кг/м}^3,$$

где CO_2 , H_2S , N_2 , O_2 , CO , H_2 , $C_m H_n$ – содержание составляющих газа в % по объему;

$\sum (0,536 \cdot m + 0,045 \cdot n)$ – средняя плотность неизвестных углеводородов, в интервале температур 200-300 °С равная 0,905 кг/м³ [162].

Объем выделившегося газа определяется по формуле:

$$V_2 = \frac{m_2}{\rho_2}, \text{ м}^3.$$

2.4.2 Оценка теплотворной способности газа, полученного при теплотехнологической переработке органического сырья

Оценка теплоты сгорания 1 м³ газа подсчитывается согласно [63]:

$$Q_d^i = 0,01 \cdot [Q_{H_2S} \cdot H_2S + Q_{CO} \cdot CO + Q_{H_2} \cdot H_2 + \sum Q_{C_m H_n} \cdot C_m H_n], \text{ кДж/м}^3,$$

где H_2S , CO , H_2 , $C_m H_n$ – содержание отдельных компонентов в газовой смеси в % по объему;

Q_{H_2S} , Q_{CO} , Q_{H_2} , $Q_{C_m H_n}$ – теплота сгорания отдельного газового компонента, кДж/м³.

Теплоту сгорания 1 кг газа можно определить по формуле:

$$Q_d^i(\text{мас.}) = \frac{Q_d^i}{\rho_2},$$

где Q_d^i – теплота сгорания 1 м³ газа, кДж/м³;

ρ_2 – плотность газа, кг /м³.

2.4.3 Расшифровка хроматограммы

Хроматограмма является носителем качественной и количественной информации по составу газов. Для расшифровки хроматограммы необходимо первоначально провести калибровку прибора по газам с известной концентрацией для установления времени выхода каждого компонента смеси и построения зависимости площади пика от концентрации компонента. В данной работе калибровка проводилась калибровочными газовыми смесями, полученными в лабораториях ООО «Чистые газы» Института катализа СО РАН. Состав калибровочных смесей согласно паспорту приведен в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Состав калибровочных газовых смесей

Номер баллона	Состав газовой смеси, %								
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	CO	CO ₂	N ₂	O ₂
3615	1,96±0,03	1,10±0,02	0,26±0,02	–	0,28±0,02	24,10±0,20	40,70±0,04	остальное	–
15504	36,1±0,5	16,7±0,4	3,0±0,3	–	1,1±0,1	5,1±0,1	23,0±0,3	остальное	–
14087	остальное	21,4±0,2	–	–	–	20,7±0,2	–	–	–
45982	0,014	–	–	99,850	–	–	–	0,127	0,009
346070	остальное								99,995

Газовый хроматограф «Хроматэк-Кристалл 5000.2» в своей комплектации имеет одну насадочную колонку типа NaX, а также две последовательно соединенные насадочные колонки Hayesep-R. При этом колонка NaX и колонки Hayesep-R соединены параллельно в газовой схеме хроматографа, что позволяет наилучшим образом разделять и анализировать компоненты. Насадочная колонка NaX позволяет разделять на компоненты газовую смесь, состоящую из гелия (He), водорода (H₂), кислорода (O₂), азота (N₂), метана (CH₄) и оксида углерода (CO). Насадочные колонки Hayesep-R предназначены для разделения диоксида углерода (CO₂) и углеводородов (CH₄, C₂H₄, C₂H₆, C₃H₈ и C_mH_n).

Регистрирующими сигнал элементами в газовом хроматографе «Хроматэк-Кристалл 5000.2» являются два универсальных детектора по теплопроводности (ДТП 1 и ДТП 2), а также пламенно-ионизационный детектор (ПИД), который позволяет анализировать только состав горючих компонентов газа.

Для определения концентрации отдельного компонента исследуемой газовой смеси применяются зависимости:

$$C_i = \frac{S_i}{S_{ik}} \cdot C_{ik}, \%$$

где C_{ik} – концентрация определяемого компонента в калибровочной смеси;

S_i – площадь пика определяемого компонента, полученная при проведении анализа;

S_{ik} – площадь пика определяемого компонента, полученная при калибровке.

Однако на практике не всегда удается получать качественно разделенную хроматограмму (рисунок 2.12, а). Приходится сталкиваться с неполным разделением компонентов (рисунок

2.12, б), что не позволяет получить адекватные результаты при расчете. В этом случае необходимо увеличение длины насадочной колонки (замена на другую колонку) или определение оптимальных параметров хроматографа при проведении эксперимента.

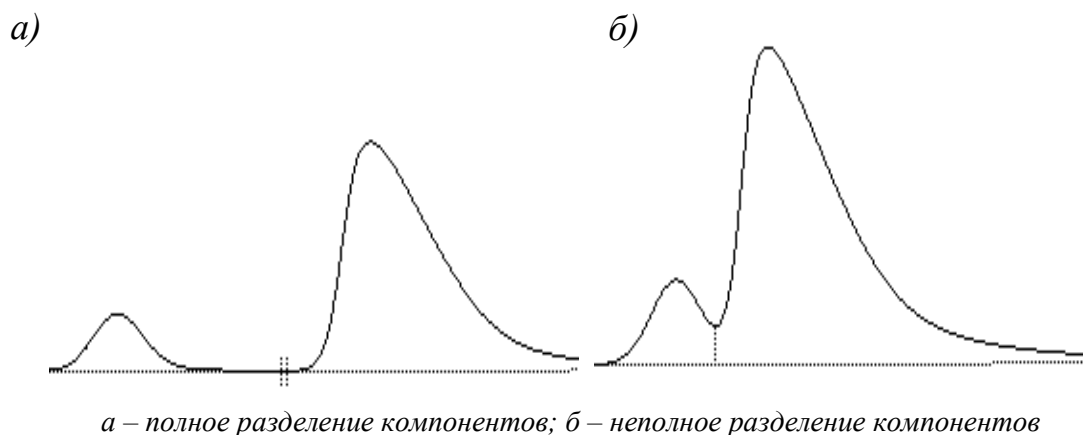


Рисунок 2.12 – Разделение компонентов на хроматограмме

С целью повышения надежности получаемых результатов исследовано влияние температуры колонки используемого хроматографа на анализ пиролизных газов [163], а также определены оптимальные параметры прибора, обеспечивающие разделения газовой смеси (топливного газа): начальная температура колонок – 40 °С (в течении 10 минут), последующий нагрев колонок до температуры 160 °С со скоростью 20 °С в минуту. Продолжительность анализа составила 20 минут.

2.4.4 Пересчет результатов на различные состояния сырья

Пересчет результатов анализов для различных состояний сырья производится по ГОСТ Р 54245-2010 «Топливо твердое минеральное. Пересчет результатов анализа на различные состояния топлива».

2.4.5 Оценка погрешности измерений

2.4.5.1 Оценка погрешности результатов измерений, полученных согласно нормативным документам [152-156], может быть проведена с учетом показателя воспроизводимости (а именно предела воспроизводимости) по формуле [164]:

$$\Delta_{\sigma(n)m} = \pm 1,96 \cdot \sigma_{R_m}, \%$$

где $\sigma_{R_m} = \frac{R_m}{Q(P, 2)}$, % – показатель воспроизводимости методики анализа в виде среднеквадратичного отклонения (СКО),

R_m – показатель воспроизводимости методики анализа в виде предела воспроизводимости;

$Q(P, n)$ – коэффициент, зависящий от числа параллельных определений n и доверительной вероятности P (при $n = 2$ и $P = 0,95$ коэффициент $Q(0,95; 2) = 2,77$).

2.4.5.2 Для оценки качества результатов, полученных путем прямых измерений с многократными наблюдениями, применялись статистические методы оценки погрешности измерений по алгоритму, изложенному в [151], согласно которому при статистической обработке группы результатов измерений следует выполнить следующие операции (таблица 2.4):

- а) исключить грубые погрешности;
- б) вычислить среднее арифметическое результатов измерений \bar{X} ;
- в) сделать оценку среднего квадратического отклонения результатов измерений $S(\bar{X})$;
- г) вычислить доверительные границы случайной погрешности (случайной составляющей погрешности) результата измерений Δ .

Таблица 2.4 – Обработка результатов измерений

Результат параллельного измерения, размерность	Среднее арифметическое результатов измерений \bar{X} , размерность	Среднее квадратическое отклонение результатов измерений $S(\bar{X})$ при $p=0,95$, размерность	Доверительные границы случайной погрешности результата измерений $\pm \Delta$ при $P=0,95$, размерность
X_1	$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$	$S(\bar{X}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n \cdot (n-1)}}$	$\Delta = t \cdot S(\bar{X}),$ где t – коэффициент Стьюдента, который в зависимости от доверительной вероятности P и числа результатов наблюдений n находят по [151].
X_2			
X_3			
...			
X_n			

2.4.5.3 Форма записи результатов измерений

Конечные результаты измерений представлены в форме:

$$\bar{X} \pm \Delta,$$

где \bar{X} – результат измерения.

Числовое значение результата измерения оканчивается цифрой того же разряда, что и значение погрешности Δ [151].

Глава 3. Балансовые соотношения теплотехнологии переработки низкосортного органического сырья

3.1 Материальный баланс теплотехнологической переработки

Переработка исследуемого сырья осуществлялась на установке, описанной в разделе 2.2, при температурах 200-450 °С и различной мощности нагрева установки 270-750 Вт. При этом определялся выход продуктов переработки во всем диапазоне этих температур.

При проведении экспериментов [49, 165-167] установлено, что для увеличения выхода пиролизного конденсата и получения полукокса с наибольшей теплотой сгорания теплотехнологическую переработку необходимо осуществлять при температуре 450 °С. В литературных источниках встречаются разночтения в вопросе влияния скорости нагрева на выход продуктов при теплотехнологической переработке, в связи с чем было проведено соответствующее экспериментальное исследование. На рисунке 3.1 показана зависимость массового выхода пиролизного конденсата от скорости нагрева при температуре 450 °С, из которой видно, что скорость нагрева сырья в данных условиях эксперимента должна быть не менее 6 °С в минуту. В этом случае удастся получить наибольший выход пиролизного конденсата.

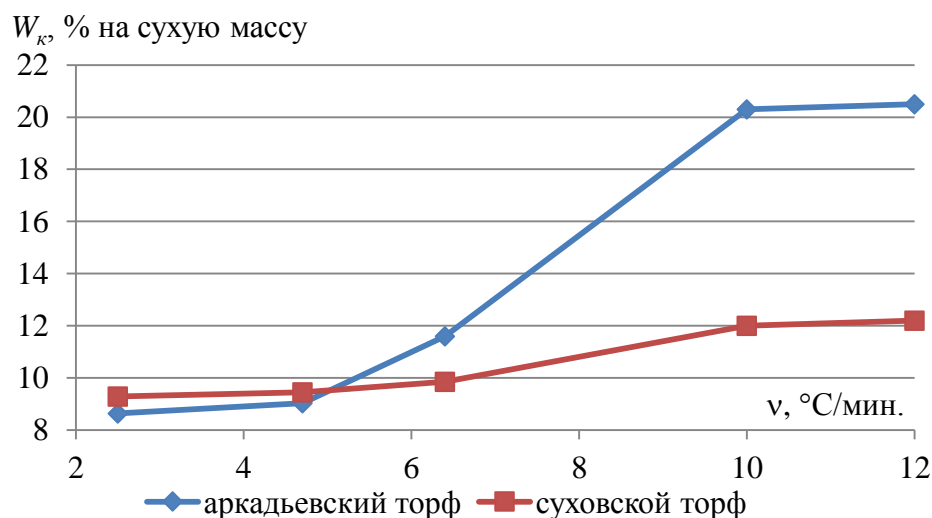


Рисунок 3.1 – Зависимость массового выхода пиролизного конденсата W_k (относительно сухой массы исходного сырья) от скорости нагрева v при температуре 450 °С

Материальный баланс теплотехнологической переработки (скорость нагрева 10 °С/мин., температура 450 °С) приведен в таблице 3.1. Высокий выход полукокса из органического сырья, находящегося на ранней стадии метаморфизма – аркадьеvского и суховского торфа, карасёvского сапропеля и таловского угля, объясняется высокой зольностью исходного сырья (таблица 2.1). Сырье с низким значением зольности – древесная щепка и кандинский торф –

позволяет получить невысокий выход полукокса (до 43,4 %), характерный для «молодых» топлив. Высокий выход газа 30-45 % (относительно исходной массы сухого сырья), наблюдаемый при переработке древесной щепы и кандинского торфа, позволяет рассматриваться их в качестве сырья для технологических линий, предназначенных для получения как твердого композитного, так и газообразного топлива.

Необходимо отметить, что при переработке древесной щепы в пиролизном конденсате практически отсутствует смола.

Таблица 3.1 – Материальный баланс теплотехнологической переработки низкосортного сырья Томской области [49, 51, 168]

Продукты \ Сырьё	Суховской торф	Аркадьевский торф	Кандинский торф	Таловский уголь	Карасевский сапрпель	Древесная щепа
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
– пиролизная 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

Полученные данные сопоставимы с результатами по изучению низкотемпературного пиролиза других авторов [80-82, 169], что подтверждает достоверность установленных значений и позволяет на их основе проводить необходимые дальнейшие исследования.

3.2 Характеристики продуктов теплотехнологической переработки

Теплотехнические характеристики углеродистого остатка (полукокса), пиролизного конденсата (смолы) и газа определялись по методике, приведенной в разделе 2.3. Продукты были получены при следующих режимах теплотехнологии: температура нагрева исходного сырья – 450 °С, скорость нагрева 10 °С/минуту. В таблицах 3.2 и 3.3 приведены характеристики полукокса и пиролизной смолы соответственно.

Благодаря специфике теплотехнологической переработки влага в полукоксе, определяемая весовым методом [152], отсутствует. Согласно ГОСТ 6382-2001 температура, при которой происходит выход всех содержащихся в сырье летучих веществ, составляет 900 °С. Теплотехнологическая переработка проводилась при температуре 450 °С, в связи с чем в полученном полукоксе остается часть летучих веществ ($V^{daf} = 12,7-25,1$ %), выходящих при температурах более 450 °С. Минеральные компоненты в процессе переработки претерпевают незначительные изменения, что в совокупности с выходом летучих продуктов приводит к росту зольности полукокса. Это особенно заметно при рассмотрении полукокса из аркадьевского торфа, зольность которого после теплотехнологической переработки превысила значение зольности исходного сырья на 30,4 %. Несущественно выросла зольность полукокса из

суховского торфа (на 9,3 %) и древесной щепы (на 2,9 %), что позволяет рассматривать их как наиболее ценное сырьё для теплотехнологической переработки в энергетических целях. Рост зольности по отношению к исходному сырью у остальных топлив составил от 12,6 до 18,1 %.

Таблица 3.2 – Теплотехнические характеристики и элементный состав полукокса [49, 51, 168]

Теплотехническая характеристика	Суховской торф	Аркадьевский торф	Кандинский торф	Таловский уголь	Карасевский сапрпель	Древесная щепа
Зольность на сухую массу A^d , %	48,8±1,1	61,9±1,3	22,9±0,5	38,5±0,8	56,5±1,2	3,5±0,2
Выход летучих веществ на сухую беззольную массу V^{daf} , %	25,1±0,2	18,6±0,2	23,3±0,2	12,7±0,2	19,8±0,2	15,7±0,2
Теплота сгорания на сухую беззольную массу Q^{daf} , МДж/кг	28,1	29,1	27,9	29,6	23,0	33,0
Низшая теплота сгорания Q_i^r , МДж/кг	14,4±0,2	11,1±0,2	21,5±0,2	18,2±0,2	10,0±0,2	31,9±0,2
Содержание, %						
углерода C^{daf}	77,90±1,03	80,76±0,57	82,23±1,06	81,32±5,61	70,62±0,68	85,96±0,81
водорода H^{daf}	3,18±0,20	2,89±0,02	4,05±0,04	4,24±0,12	4,24±0,05	3,39±0,07
азота N^{daf}	3,17±0,07	3,78±0,06	3,96±0,08	1,07±0,02	3,16±0,14	0,47±0,02
серы S^{daf}	0,24±0,04	0,32±0,11	0,21±0,08	0,77±0,13	0,58±0,07	0,05±0,02
кислорода O^{daf}	15,51±1,00	12,25±0,72	9,56±1,11	12,60±5,71	23,40±0,70	10,13±0,83

Таблица 3.3 – Теплотехнические характеристики пиролизной смолы

Теплотехническая характеристика	Суховской торф	Аркадьевский торф	Кандинский торф	Таловский уголь	Карасевский сапрпель
Влажность W^a , %	~ 0,0	~ 0,0	~ 0,0	~ 0,0	~ 0,0
Зольность на сухую массу A^d , %	~ 0,0	~ 0,0	~ 0,0	~ 0,0	~ 0,0
Выход летучих веществ на сухую беззольную массу V^{daf} , %	100,0±0,02	100,0±0,02	100,0±0,02	100,0±0,02	100,0±0,02
Низшая теплота сгорания Q_i^r , МДж/кг	34,2±0,02	29,5±0,02	29,4±0,02	33,1±0,02	36,8±0,02

В процессе переработки часть содержащегося в сырье водорода отщепилась и преобразовалась в газообразные соединения (H_2 , CH_4 , C_mH_n), в результате чего его доля в составе полукокса в пересчете на горючую массу снизилась на 1,01-3,12 % по сравнению с исходным сырьём. Содержание кислорода уменьшилось до $O^{daf} = 9,56-23,40$ %, а содержание углерода, наоборот, возросло до $C^{daf} = 77,90-85,96$ %. Как следствие, теплота сгорания полукокса составила 23,0-33,0 МДж/кг, превысив теплоту сгорания исходного сырья на 2,5-

13,9 МДж/кг. Однако, на 0,05-0,36 % повысилось содержание серы в составе горючей массы полукокса, что негативно скажется на экологических показателях при его сжигании.

Пиролизная смола с точки зрения энергетического использования является ценным сырьём: практически отсутствует зольность, при высокой теплоте сгорания (29,4-36,8 МДж/кг). Свойства клейкости и гидрофобности смолы позволяют рассматривать её в качестве связующего вещества для получения влагостойкого ТКТ.

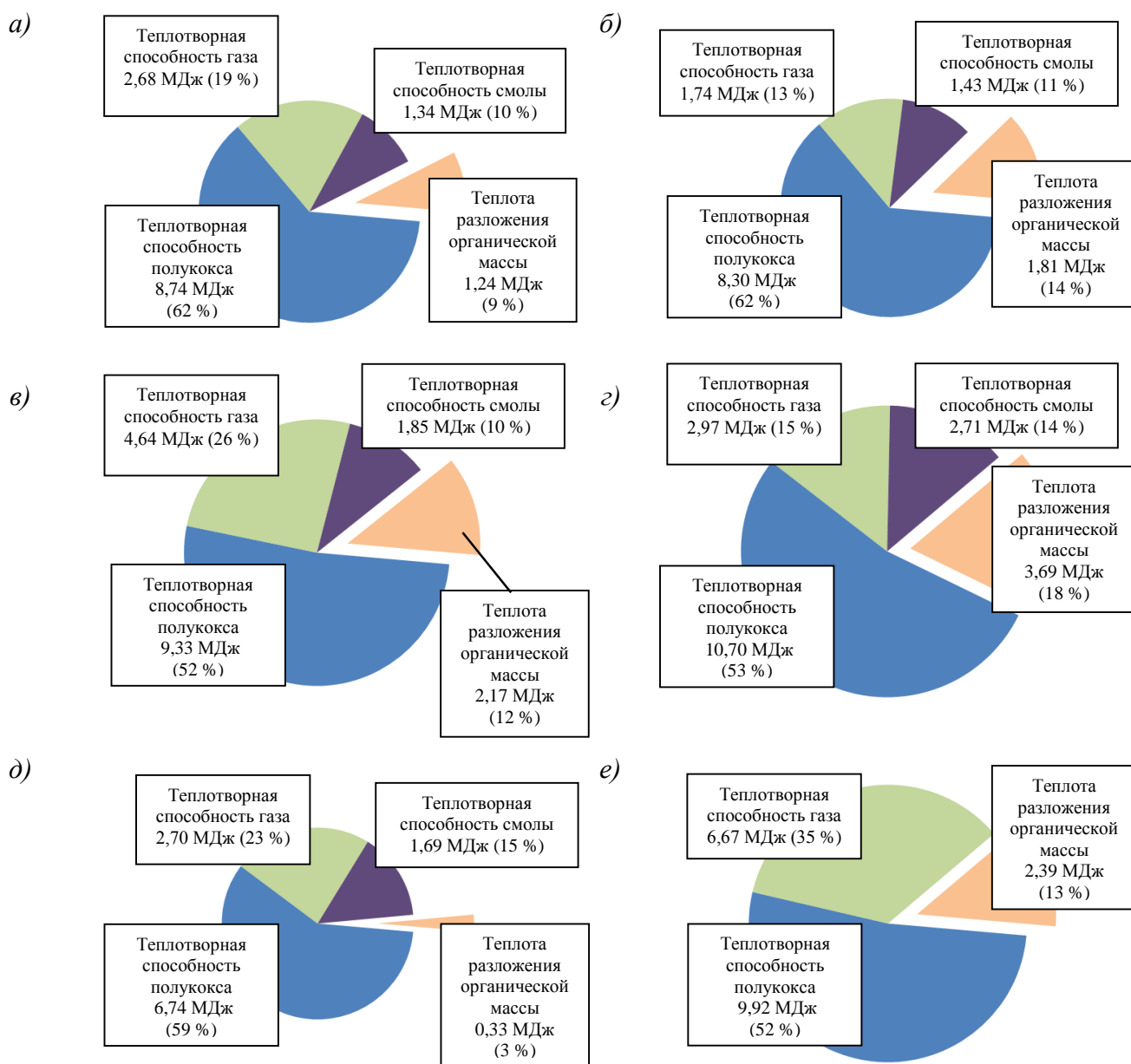
Усредненные значения состава газа, измеренного в диапазоне температур 200-450 °С с шагом измерений 50 °С, и его теплоты сгорания приведены в таблице 3.4. Полученные результаты позволяют оценить теплоту разложения органической массы сырья, сопровождающую теплотехнологическую переработку (рисунок 3.2). Теплота разложения показывает, какое количество тепла выделяется в процессе термической деструкции сухого сырья.

Таблица 3.4 – Усредненный состав газа и его теплота сгорания в температурном интервале 200-450 °С [51, 55, 149, 168, 170-172]

Низкосортное сырьё	Состав топливного газа, %					Теплота сгорания газа Q_a^i , МДж/м ³	Плотность газа ρ , кг/м ³	Теплота сгорания в пересчете на 1 кг газа Q_a^i (мас.), МДж/кг
	H ₂	CO	CH ₄	C _m H _n	CO ₂ +N ₂			
Суховской торф	25,88	9,36	10,81	11,79	42,16	16,24	1,151	14,12
Аркадьевский торф	27,59	9,11	9,73	10,59	42,98	15,16	1,147	13,22
Кандинский торф	23,81	9,80	12,93	12,79	40,68	17,55	1,150	15,27
Таловский уголь	15,90	11,68	16,02	11,18	45,22	16,90	1,262	13,38
Карасевский сапропель	26,84	7,60	10,21	12,83	42,52	16,65	1,142	14,59
Древесная щепа	6,46	25,99	19,26	11,48	36,81	19,06	1,294	14,73

Теплота сгорания газа, полученного из исследуемых видов низкосортного сырья, различается незначительно (15,16-19,06 МДж/м³). Это объясняется тем, что сырьё находится на близких стадиях метаморфизма: исследуемые торфа относятся к группе среднеразложившихся, таловский уголь – к углям ранней стадии углефикации.

Из рисунка 3.2 видно, что в процессе теплотехнологической переработки всех видов исследуемого сырья выделяется 0,33-3,69 МДж/кг. Положительное значение теплоты разложения объясняется тем, что сырьё характеризуется высоким содержанием кислорода в своем составе ($O^{daf}=24,28-42,70$ %). В процессе нагрева часть горючих компонентов сырья вступает в химическую реакцию с содержащимся в нём кислородом, выделяя тепло. В результате окисления органической и декарбонирования минеральной масс сырья в полученном газе наблюдается высокое содержание углекислого газа (таблица 3.4).



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

Рисунок 3.2 – Распределение потенциального тепловыделения между продуктами теплотехнологической переработки 1 кг высушенного низкосортного сырца

3.3 Оценка погрешности измерений

Погрешность измерения выхода продуктов при теплотехнологической переработке и определения их характеристик, рассчитанная согласно п. 2.4, приведена в Приложении Б. Установлено, что при составлении материального баланса выхода продуктов теплотехнологической переработки погрешность измерений не превысила 8 %. Погрешность измерения характеристик конечных продуктов переработки составила 0,02-5,61 %, что свидетельствует об удовлетворительной достоверности полученных результатов.

3.4 Анализ результатов

Установленные значениями содержания углерода ($C^{daf} = 50,87-68,38 \%$) и водорода ($H^{daf} = 5,25-6,28 \%$) в низкосортном органическом сырье обуславливают достаточно высокую теплотворность его горючей массы ($Q^{daf} = 18,6-27,1$ МДж/кг). Высокое содержание кислорода ($O^{daf} = 24,28-42,70 \%$), характерное для органических топлив ранних стадий метаморфизма, указывает на возможность протекания экзотермических реакций при термическом разложении. Небольшое содержание серы ($S^{daf} = 0,02-0,15 \%$) в изучаемом сырье является предпосылкой к получению энергетических продуктов, практически не наносящих вред окружающей среде выбросами оксидов серы при его сжигании. Однако высокие значения влажности ($W_t^r = 12,0-72,8 \%$) и зольности ($A^r = 0,3-19,5 \%$) сырья приводят к низкому значению теплоты сгорания при пересчете на рабочее состояние. В связи с этим его сжигание традиционными для энергетики способами нецелесообразно из-за возникающих при этом высоких эксплуатационных затрат, обусловленных сушкой высоковлажного сырья перед сжиганием, его высоким расходом, подаваемым в топку, а также необходимостью удаления большого количества золы и шлака.

Исследования теплотехнологической переработки рассматриваемого сырья показали, что необходимо стремиться к наибольшей в заданном диапазоне температуре процесса ($450 \text{ }^\circ\text{C}$) и скорости нагрева не менее $6 \text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$. В этом случае удастся получить, в частности, наибольший выход пиролизного конденсата и пиролизной смолы. Материальный баланс теплотехнологической переработки при данных режимах показал, что выход полукокса составляет $31,1-74,8 \%$ от сухой массы исходного сырья. При этом кандинский торф и древесная щепа дают наименьшее количество полукокса $31,1-43,4 \%$, выход пиролизного конденсата и газа составляет соответственно $23,6-26,2 \%$ и $30,4-45,3 \%$. Данные топлива представляют ценность как для производства ТКТ, так и для получения газа. Погрешность измерений составляющих материального баланса не превысила 8% .

Полученный полукокс практически не содержит влаги. Полукокс из большинства видов исследованного сырья характеризуется более высокими значениями зольности ($A^d = 22,9-61,9 \%$) и уменьшенным выходом летучих веществ ($V^{daf} = 12,7-29,6 \%$). Однако полукокс из древесной щепы, как и исходное сырье, имеет низкое значение зольности ($A^d = 3,5 \%$). Благодаря высокому содержанию углерода теплота сгорания полукокса на сухую беззольную массу равна $Q^{daf} = 23,0-33,0$ МДж/кг, что в пересчете на рабочее состояние составляет для торфяных полукоксосов – $11,1-21,5$ МДж/кг, угольного – $18,2$ МДж/кг, сапропелевого – $10,0$ МДж/кг, древесного – $31,9$ МДж/кг.

Полукокк имеет более высокое содержание серы ($S^{daf} = 0,05-0,77\%$) по сравнению с исходным сырьем, поэтому при его сжигании следует ожидать образования большего количества оксидов серы в продуктах сгорания.

Смола, содержащаяся в пиролизном конденсате, обладает высокой теплотой сгорания (29,4-36,8 МДж/кг), характеризуется отсутствием зольности и клейкостью, что позволяет рассматривать её в качестве связующего вещества при формировании ТКТ. Гидрофобные свойства смолы могут быть использованы для придания влагостойкости топлива, например, при нанесении её в качестве наружного покрытия.

Для получения ТКТ ценность представляют полукокк и смола, являющиеся основой для формирования. Получаемый при теплотехнологической переработке газ рассматривается в качестве побочного продукта. Несмотря на высокую долю содержания балласта ($\text{CO}_2 + \text{N}_2$), 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. Характеристики газа позволяют использовать его для энергообеспечения производственных площадей в устройствах выработки тепла и электричества [40, 44, 173-175], не причиняющих вреда окружающей среде. Возможны варианты, при которых тепла от сжигания полученного газа в совокупности с собственным теплом разложения органической массы сырья (0,33-3,69 МДж/кг) будет достаточно для осуществления теплотехнологической переработки.

Установленные данные о материальных балансах теплотехнологии и характеристиках полученных продуктов позволяют оценить техническую целесообразность переработки низкосортного органического сырья в ТКТ для последующего энергетического использования.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием аттестованных методик (ГОСТ) для их получения, поверенного и откалиброванного оборудования, а также удовлетворительным совпадением с известными данными других исследований.

3.5 Краткие выводы

На основе полученных результатов сделаны следующие выводы.

1) Теплотехнологическая переработка исследуемого сырья позволяет получить энергетически ценные продукты для формирования ТКТ – пиролизную смолу и полукокк, практически не содержащие влагу 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.

Глава 4. Влияние условий теплотехнологии на свойства твердого композитного топлива для малой энергетики

4.1 Параметры формования твердого композитного топлива

Характеристики продуктов, полученных при теплотехнологической переработке исходного сырья, свидетельствуют об их энергетической ценности и высоком потенциале для формирования на их основе ТКТ. Исходя из соображения минимизации технологических издержек, необходимо стремиться к тому, чтобы как можно меньше прочих продуктов было задействовано при формовании.

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.

Согласно методике, изложенной в разделе 2.3.4, продукты термической переработки исходного сырья формовались в ТКТ. Соотношение полукокса и пиролизной смолы (по массе) при формовании ТКТ из всех видов исследуемого сырья составило 1 : 1 (таблица 4.1). Последовательное увеличение концентрации полукокса до 3 : 2 приводит к тому, что формовочная смесь становится слишком сухой, связующего вещества не хватает и топливо не формируется без приложения усилий пресса. Увеличение содержания смолы до 3 : 2, наоборот, делает смесь слишком вязкой, не позволяя придать топливу твердую и устойчивую форму. Пиролизный конденсат древесной щепы не содержит смолы в своём составе, по причине чего ТКТ из продуктов её теплотехнологической переработки по данной методике сформировать не удалось.

Таблица 4.1 – Формирование ТКТ при различном соотношении полукокса и смолы

Соотношение полукокк : пиролизная смола (по массе)	Суховской торф	Аркадьевский торф	Кандинский торф	Таловский уголь	Карасевский сапрпель
3 : 7	–	–	–	–	–
7 : 13	–	–	–	–	–
2 : 3	–	–	–	–	–
9 : 11	+	+	+	+	+
1 : 1	+	+	+	+	+
11 : 9	+	+	+	+	+
3 : 2	–	–	–	–	–
13 : 7	–	–	–	–	–
7 : 3	–	–	–	–	–

Примечание: «+» – ТКТ формовалось; «–» – топливо сформировать не удалось.

В связи с тем, что согласно [82] при температуре 100-110 °С фиксируется начало термического разложения торфа, сопровождающееся разложением смолы, температура сушки

ТКТ исследовалась в интервале от 20 до 110 °С. Отмечено, что после сушки в интервале температур 20-80 °С полученное ТКТ на протяжении 14 суток оставляет «смоляные следы» на поверхности, с которой соприкасается (рисунок 4.1). После выдержки топлива более 14 суток пиролизная смола затвердевает, не оставляя следов на контактируемой с ней поверхности. Однако образцы высушенного таким образом ТКТ разрушились при испытании на сбрасывание согласно ГОСТ 21289-75.



Рисунок 4.1 – ТКТ из полукокса и пиролизной смолы, высушенное при температуре 80 °С

Сушка при (100-105) °С позволила получить ТКТ, не оставляющее «смоляных следов» сразу после её окончания. Теплотехнические и прочностные характеристики данного топлива приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Характеристики ТКТ на основе полукокса и пиролизной смолы, высушенного при 105 °С [49, 176, 177]

Теплотехническая характеристика	Суховской торф	Аркадьевский торф	Кандинский торф	Таловский уголь	Карасевский сапрпель
Влажность W_t^r , %	~ 0,0	~ 0,0	~ 0,0	~ 0,0	~ 0,0
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 на сухую беззольную массу 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
Механическая прочность при сбрасывании, %	100±0	100±0	100±0	100±0	100±0

Сравнивая материальные балансы теплотехнологической переработки исследуемого сырья (таблица 3.1) и установленные значения соотношения компонентов, можно сделать вывод, что

количества пиролизной смолы не хватит для формирования всего количества полукокса в ТКТ. Данный способ может быть применён к отдельным видам низкосортного сырья с высоким выходом пиролизной смолы [81, 82, 86, 178], сопоставимым с выходом полукокса.

На пригодность к использованию в качестве связующего вещества был исследован декстрин, как одно из наиболее доступных связующих в промышленности. Декстрин – продукт термической переработки картофельного или кукурузного крахмала, применяемый в основном для изготовления различных клеевых составов [179]. Декстрин относится к горючим веществам с низкой температурой воспламенения (260 °С), практически не содержит золы и характеризуется достаточно высокой (по сравнению с низкосортным сырьем) теплотой сгорания, равной 16,8 МДж/кг [180].

Связующее получали путем смешивания подогретого до температуры 50-70 °С пиролизного конденсата и декстрина. Исследовалось ТКТ из полукокса торфяных (наиболее хрупкие из полученных) и связующего вещества с 5, 10, 15, 20, 30 %-ым содержанием декстрина (по массе). Рассмотрены следующие соотношения полукокса и связующего на основе декстрина, растворенного в пиролизном конденсате: (1 : 4); (1 : 3); (2 : 3); (1 : 1); (3 : 2). Установлено, что при использовании соотношений (1 : 1) и (3 : 2) недостаточно связующего для формирования, смесь слишком сухая. Соотношения (1 : 4) и (1 : 3) не позволяют сформировать ТКТ из-за отсутствия вязкости – смесь слишком жидкая, что свидетельствует о чрезмерно высоком содержании связующего. Оптимальным соотношением полукокса и связующего в данном случае является 2 : 3. При недостаточном выходе пиролизного конденсата возможно его разбавление обыкновенной водой.

Использование 5 %-го раствора в качестве связующего позволило задействовать полностью весь полукокс, получив при этом однородную и клейкую формовочную смесь. Она легко поддается формовке, сохраняет принятую форму. Соответствующие или близкие к этим результаты показало применение 10 и 15 %-го растворов.

При тестировании более концентрированных растворов декстрина формовочная смесь получалась сухой, неоднородной, состоящей из слоев, что негативно сказывалось на формировании ТКТ, заставляя затрачивать дополнительные усилия для придания формы.

Сушка сформированного топлива с различным содержанием декстрина осуществлялась при температуре 20-40 °С. Результаты механических испытаний на сжатие ТКТ показаны на рисунке 4.2, из которого видно, что наибольшая механическая прочность на сжатие (P_{max}) наблюдается у ТКТ с содержанием декстрина 5-10 % [181], дальнейшее увеличение доли декстрина приводит к снижению прочностных характеристик.

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.

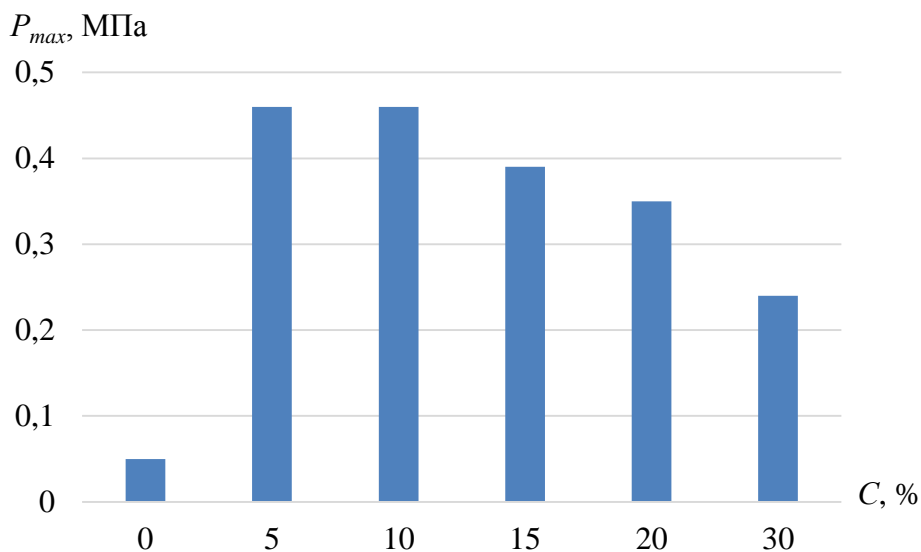


Рисунок 4.2 – Зависимость прочности ТКТ на сжатие (P_{max}) от содержания декстрина (C) в связующем веществе [181]

На примере pellets, изготовленных на основе связующего с 5 %-м содержанием декстрина в пиролизном конденсате, экспериментально исследована температура сушки ТКТ в интервале от 20 до 140 °С. Потери влаги в процессе сушки изготовленных pellets показаны на рисунке 4.3.

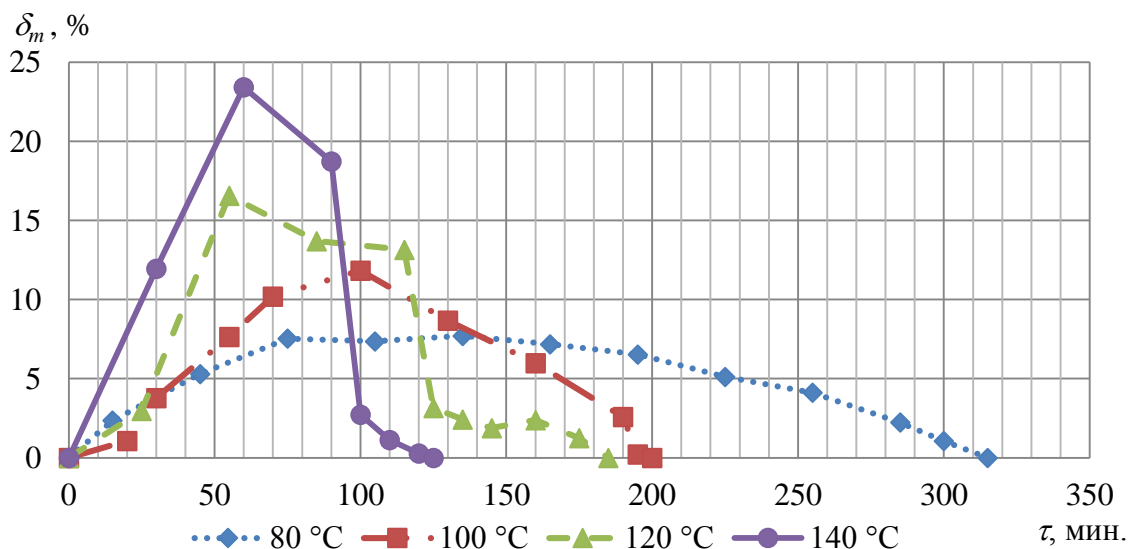


Рисунок 4.3 – Потеря влаги pellets (δ_m) от времени (τ) при различной температуре сушки [54]

Из рисунка 4.3 видно, что при высокой температуре сушки (100-140 °С) влага из ТКТ интенсивно испаряется. Это приводит к появлению и развитию поверхностной пористости.

Механические испытания (таблица 4.3) показали, что все образцы ТКТ обладают устойчивостью к разрушению при сбрасывании. Результаты испытаний на сжатие показывают, что pellets, высушенные при 20-80 °С, обладают наибольшей прочностью на сжатие. Повышение температуры сушки приводит к снижению их прочности за счет появления пор на поверхности. При температуре свыше 120 °С появляются заметные трещины (рисунок 4.4), наличие которых свидетельствует о чрезмерно высокой скорости сушки и приводит к резкому снижению прочностных характеристик (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Результаты механических испытаний ТКТ при различной температуре сушки [54]

Вид ТКТ	Температура сушки, °С	Показатели механической прочности	
		при сбрасывании, %	на сжатие, МПа
Пеллета	20-40	100±0	0,46±0,00
	80	100±0	0,46±0,00
	100	100±0	0,26±0,07
	120	100±0	0,26±0,07
	140	100±0	0,20±0,00



Рисунок 4.4 – Пеллета, высушенная при 140 °С

Форма и геометрические размеры ТКТ оказывают влияние как на прочность, так и на процесс его сжигания в топочной камере. Разработанные варианты получения ТКТ основаны на использовании связующего вещества при формовании, поэтому потребность в прессовом оборудовании отсутствует. В связи с этим размеры топлива не привязаны к геометрии матричного канала. Исследовано влияние размеров на механическую прочность ТКТ цилиндрической формы: pellets – d=20 мм, высота 20; 30; 40 мм; брикеты – d=50 мм, высота 20; 35; 50 мм. Для условий сушки рассмотрено 2 варианта: 20-40 °С – температура производственных помещений в течение года; 80 °С – установленное ранее максимальное значение температуры, обеспечивающей наибольшую прочность ТКТ на сжатие. Результаты потери влаги pellets и брикетов в процессе сушки при 80 °С показаны на рисунке 4.5, из

которого видно, что влага из образцов одинакового диаметра, несмотря на различие в высоте, испаряется с одной и той же скоростью. Время сушки брикетов практически не зависит от их высоты, а определяется величиной диаметра.

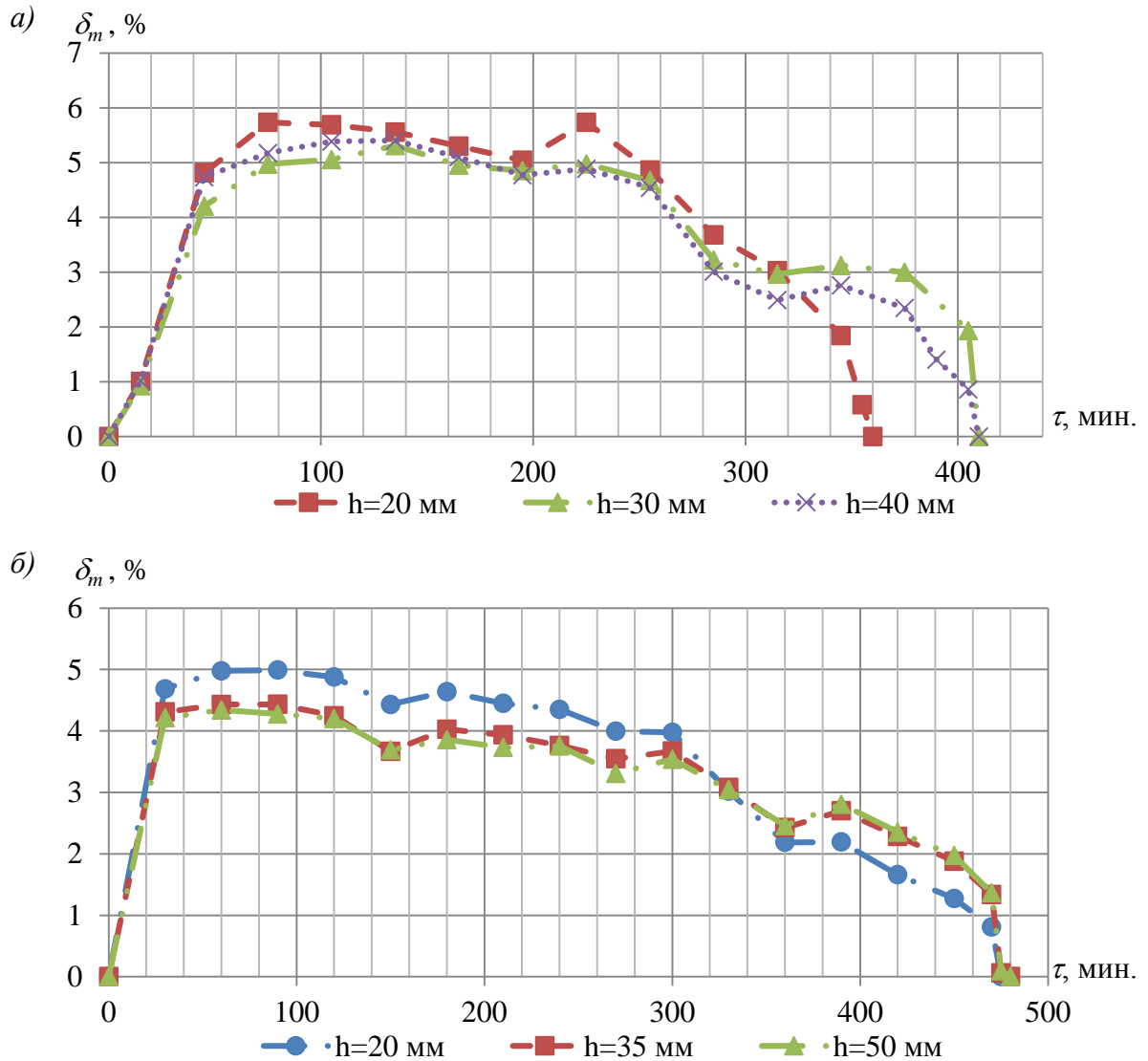


Рисунок 4.5 – Потеря влаги ТКТ (δ_m) во время сушки (τ) при 80 °С

Однако, во время сушки при 80 °С на поверхности брикетов образовались заметные трещины. Появление трещин объясняется тем, что увеличение диаметра брикетов (в 2,5 раза по сравнению с пеллетами) приводит к неравномерности нагрева. Ввиду низкой теплопроводности брикеты прогреваются от наружной поверхности к центру неравномерно. Прогревшись, наружная поверхность брикета затвердевает. В процессе продолжающейся сушки влага, содержащаяся внутри брикета, испаряется, и выход паров через наружную отвердевшую поверхность сопровождается образованием пор. Если скорость сушки высокая, то интенсивный

выход испаряющийся влаги образует трещины на поверхности топливного брикета (рисунок 4.6).

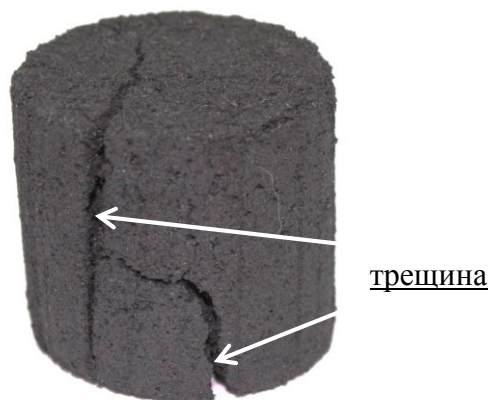
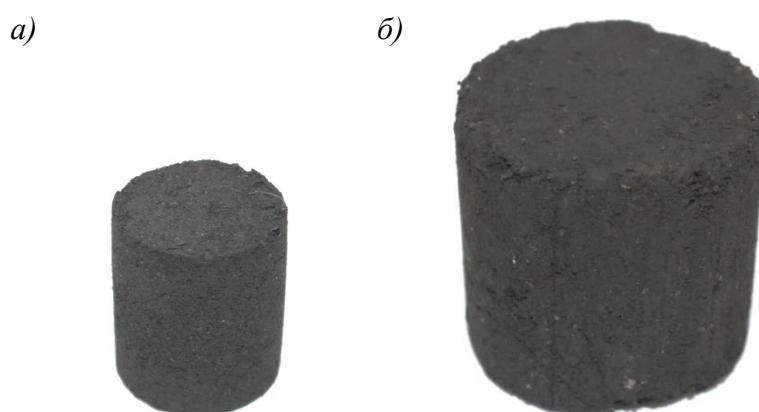


Рисунок 4.6 – Брикеты ($d=50$, $h=50$ мм) после сушки при 80 °C

Пеллеты независимо от высоты в процессе сушки при 80 °C прогреваются практически равномерно, влага выходит из пеллет еще до отверждения поверхности, не образовывая трещин.

Сушка при $20-40$ °C обеспечивает равномерный выход влаги из брикетов, как следствие – поверхность брикетов гладкая, трещины отсутствуют, пористость минимальна (рисунок 4.7).



а) – пеллета ($d=20$, $l=20$ мм); б) – бrikет цилиндрической формы ($d=50$, $h=50$ мм)

Рисунок 4.7 – Сформованное ТКТ на основе декстрина после сушки при 20 °C

Результаты испытаний ТКТ различных геометрических размеров приведены в таблице 4.4. Из результатов испытаний видно, что увеличение высоты топлива не снижает его прочностные характеристики.

Теплотехнические характеристики брикетов ($d=50$ мм, $h=50$ мм) с 5 %-ым содержанием декстрина в формовочной смеси, высушенные при температуре $20-40$ °C, приведены в таблице 4.5. В связи с тем, что ТКТ изготовлено из полукокса, являющегося гидрофильным веществом, в условиях хранения и транспортировки его влажность может изменяться. Соответственно, в таблице 4.5 приведены значения в пересчете на сухую массу топлива.

Таблица 4.4 – Результаты механических испытаний ТКТ различных размеров

Вид композитного топлива	Высота, мм	Температура сушки, °С	Показатели механической прочности	
			при сбрасывании, %	на сжатие, МПа
Пеллета (d=20 мм)	20	20-40	100±0	0,46±0,00
	30		100±0	0,46±0,00
	40		100±0	0,46±0,00
Пеллета (d=20 мм)	20	80	100±0	0,46±0,00
	30		100±0	0,46±0,00
	40		100±0	0,46±0,00
Брикет цилиндрической формы (d=50 мм)	20	20-40	100±0	0,15±0,00
	35		100±0	0,15±0,00
	50		100±0	0,15±0,00

Таблица 4.5 – Теплотехнические характеристики ТКТ из смеси с 5 %-ым содержанием декстрина [51, 183, 184]

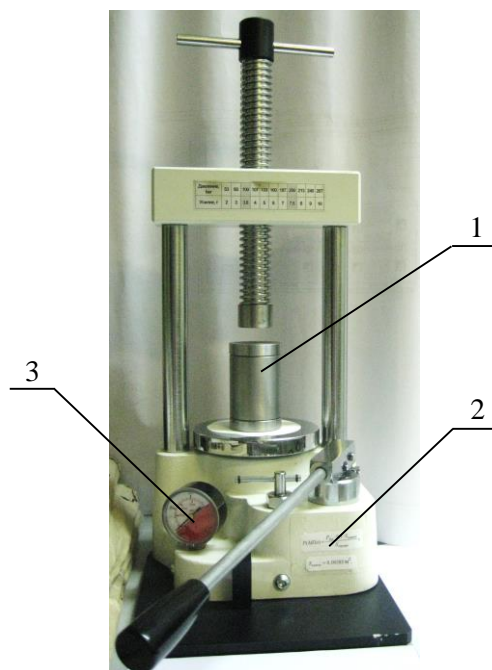
Теплотехническая характеристика	Суховской торф	Аркадьевский торф	Кандинский торф	Таловский уголь	Карасевский сапрпель	Древесная щепа
Зольность на сухую массу A^d , %	40,7±0,9	51,6±1,1	19,1±0,4	32,1±0,7	47,1±1,0	2,9±0,1
Выход летучих веществ на сухую беззольную массу V^{daf} , %	20,9±0,2	15,5±0,2	19,4±0,2	10,6±0,2	16,5±0,2	13,1±0,2
Низшая теплота сгорания, 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

При сравнении характеристик полукокса из низкосортного сырья и ТКТ на его основе можно отметить, что за счет добавления декстрина зольность топлива снизилась на 0,6-10,3 %. При этом уменьшился на 2,1-4,2 % выход летучих веществ в пересчете на сухую беззольную массу. В связи с тем, что теплота сгорания декстрина выше теплоты сгорания некоторых полукокса (суховского торфа, аркадьевского торфа, сапрпеля), то низшая теплота сгорания ТКТ из суховского и аркадьевского торфов, сапрпеля выросла на 0,3-2,0 МДж/кг. При формовке ТКТ из полукокса остальных видов сырья, теплотворность полукокса которых выше декстрина, наблюдается обратная картина – низшая теплота сгорания топлива из кандинского торфа, бурого угля и древесной щепы снизилась на 0,2-2,5 МДж/кг.

При определении водопоглощения все образцы ТКТ на основе декстрина разрушились уже через несколько минут после начала испытаний, что свидетельствует об отсутствии влагостойкости.

4.2 Влияние давления на формование твердого композитного топлива

Для исследования вопроса о влиянии давления на процесс формования ТКТ, полученного на основе связующего из декстрина и пиролизного конденсата, использован пресс (рисунок 4.8), позволяющий формовать топливо при различном давлении (от 0 до 300 бар).



1 – штамповочная форма для изготовления ТКТ; 2 – пресс; 3 – манометр

Рисунок 4.8 – Пресс для формования ТКТ

ТКТ в виде пеллеты изготавливалось из полукокса кандинского торфа и связующего с 5 %-ым содержанием декстрина. Смесь полукокса и связующего загружалась в штамповочную форму, которая помещалась в пресс. Прессование осуществлялось при давлении 60-300 бар (показания манометра) с шагом измерения 20 бар. Пересчет давления осуществлялся по формуле:

$$P_{\text{прес}} = \frac{P_{\text{бар}} \cdot 0,1 \cdot S_{\text{поршня}}}{S_{\text{образца}}} \text{ МПа,}$$

где $P_{\text{бар}}$ – значение давления, показываемое манометром, бар;

$S_{\text{поршня}}$ – площадь поршня, равная 0,00385 м²;

$S_{\text{образца}}$ – площадь основания образца прессуемого композитного топлива, м².

В процессе проведения экспериментов по прессованию смеси установлено, что связующее 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 удастся 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.

4.3 Параметры придания влагостойкости твердому композитному топливу

Наличие свойства влагостойкости у ТКТ позволяет менее требовательно относиться к его транспортировке и хранению, а также существенно снижает затраты на подготовку топлива к сжиганию, что позволяет повысить его конкурентоспособность на топливно-энергетическом рынке.

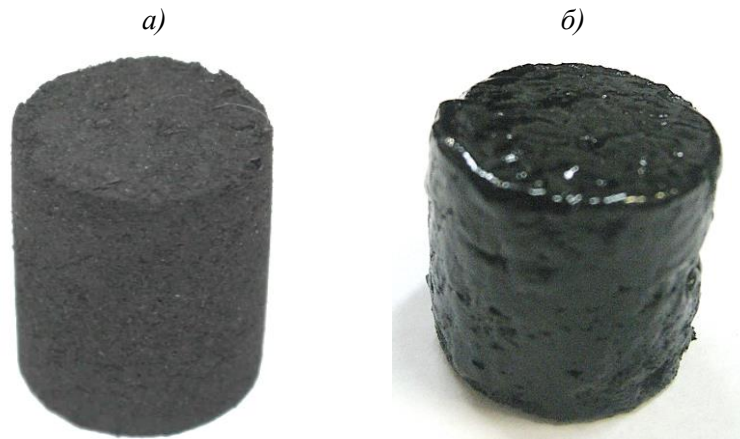
В выводах по разделу 3 отмечено, что получаемая при теплотехнологической переработке пиролизная смола обладает гидрофобными свойствами, следовательно, может быть рассмотрена в качестве средства для придания влагостойкости ТКТ. Такая возможность была исследована посредством нанесения смолы на поверхность топлива, изготовленного в виде пеллеты, и последующей сушки при температуре 20-100 °С. В связи с тем, что согласно [82] при температуре 100-110 °С фиксируется начало термического разложения некоторых видов низкосортного сырья, сопровождающееся разложением смолы, температура свыше 100 °С на пригодность для сушки не исследовалась. Сушка осуществлялась до тех пор, пока масса ТКТ с нанесенной на него смолой не принимала постоянного значения. Результаты испытаний ТКТ на водопоглощение показаны в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Водопоглощение ТКТ, покрытого смолой, при различных режимах последующей сушки

Температура сушки топлива, °С	Масса до испытания m_0 , г	Масса после испытания m_1 , г	Водопоглощение X , %
20-40	6,0	6,0	0
	5,5	5,5	0
	5,5	5,5	0
	5,8	5,8	0
60	3,20	разрушился	–
	3,44	разрушился	–
	2,69	разрушился	–
	2,84	разрушился	–
80	2,79	разрушился	–
	3,23	разрушился	–
	2,94	разрушился	–
	2,84	разрушился	–
100	2,71	разрушился	–
	3,21	разрушился	–
	2,66	разрушился	–
	2,72	разрушился	–

Из таблицы 4.6 видно, что водопоглощение ТКТ, покрытого смолой и высушенного при 20-40 °С, отсутствует. Влагостойкость обеспечивает прочный защитный слой, образующийся в процессе сушки после 14 суток выдержки (рисунок 4.9). При времени выдержки менее 14 суток

слой смолы не затвердевает, оставляя следы на контактирующей с ним поверхности. Водопоглощение ТКТ, покрытого таким защитным слоем, равно нулю.



а) – без нанесения смолы, б) – с защитным слоем из смолы

Рисунок 4.9 – Пеллеты для испытания на водопоглощение

Сушка при более высоких температурах (60-100 °С) не позволяет обеспечить влагостойкость из-за низкой температуры плавления пиролизной смолы: при нагреве она плавится, стекая с поверхности топлива или впитываясь в него. В результате ТКТ не обладает влагостойкостью и разрушается при контакте с водой.

4.4 Анализ полученных результатов

Вывод о возможности использования пиролизной смолы в качестве связующего вещества приводит к решению, в котором ТКТ получают смешиванием смолы с измельченным полукоксом. В этом случае соотношение смолы и полукокса должно составлять 1 : 1 (по массе). После формовки топливо необходимо сушить при температуре 100-105 °С. Более низкая температура сушки приводит к необходимости выдержки сформованного топлива в течение 14 дней для полного затвердевания используемого связующего. В результате переработки представленных образцов низкосортного органического сырья Гомской области получено ТКТ с низшей теплотой сгорания 14,0-22,9 МДж/кг, зольность которого составила $A^d = 18,8-48,0 \%$. Значение зольности ТКТ выше значения для исходного сырья, но несколько ниже значения зольности полукокса, что объясняется использованием в качестве связующего пиролизной смолы. Установленное соотношение пиролизной смолы и полукокса приводит к выводу, что выхода пиролизной смолы из исследуемых образцов сырья (таблица 3.1) недостаточно для переработки всего количества получаемого полукокса, в связи с чем необходимо добавление дополнительного связующего вещества.

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

Эксперименты по тестированию в качестве связующего вещества раствора декстрина в пиролизном конденсате позволили определить соотношение компонентов для формирования ТКТ и температуру последующей сушки. Содержание декстрина 5-10 % в пиролизном конденсате при формовке обеспечивает наибольшую прочность топлива на сжатие. С практической и экономической точки зрения целесообразно использовать связующее с минимальной концентрацией декстрина (5 %). При этом соотношение полукокса и связующего на основе декстрина составляет 2 : 3. При недостаточном выходе пиролизного конденсата необходимо его разбавление обыкновенной водой.

Формование ТКТ на основе связующего с декстрином должно осуществляться оборудованием штаповочного типа, исключая воздействие давления на формовочную смесь. При этом плотность сырца ТКТ составляет 1400-1600 кг/м³.

Температура сушки ТКТ при изготовлении пеллет составляет от 20 до 80 °С, брикетов – от 20 до 40 °С. Более высокая температура сушки приводит к образованию пор и трещин на поверхности, снижая механическую прочность ТКТ. Установленный интервал для изготовления пеллет позволяет производителю самостоятельно выбирать в его пределах температуру сушки. При 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 топлива на этой стадии производства, требует помещения большей площади для их высушивания.

Использование декстрина в составе связующего снижает зольность ТКТ по сравнению с основным продуктом (полукоksom) на 0,6-10,3 % (в пересчете на сухую массу). При переработке низкосортного сырья, полукокс которого имеет низшую теплоту сгорания менее 16,8 МДж/кг, добавление декстрина позволяет повысить теплоту сгорания изготавливаемого топлива. Теплотехнические характеристики ТКТ с декстрином по своим характеристикам сопоставимы с каменными углями Кузнецкого бассейна ($W_f^r = 6,0-24,0$ %, $A^r = 10,2-39,5$ %, $Q_i^r = 14,4-25,3$ МДж/кг [63-66]), поэтому их конкурентоспособность на топливно-энергетическом рынке будет определяться преимущественно ценовым фактором.

При сравнении характеристик ТКТ (таблица 4.2), полученного из полукокса и пиролизной смолы, и ТКТ на основе связующего с декстрином (таблица 4.5) 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 в пересчете на сухую беззольную массу значительно выше, низшая теплота сгорания выше на 0,9-5,9 МДж/кг.

Испытания механической прочности ТКТ, как полученного из смолы и полукокса, так и с добавлением декстрина, на сбрасывание продемонстрировали 100 %-ую устойчивость к разрушению: топливо способно выдержать операции загрузки и выгрузки при транспортировании, подаче в котел. Механическая прочность ТКТ показывает 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.

Измерения характеристик ТКТ в данной главе приведены с погрешностью не более 1 % (Приложение В), что обусловлено высокой сходимостью результатов измерений.

4.5 Краткие выводы

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.

Глава 5. Рекомендации к проектированию энергоэффективной технологической схемы малотоннажного производства твердого композитного топлива

5.1 Варианты теплотехнологии малотоннажной переработки низкосортного органического сырья

Как показано выше, теплотехнологическая переработка низкосортного сырья (торфов, бурого угля, древесины и сапропеля) позволяет получить ценные энергетические продукты – углеродистый остаток (полукокс), пиролизный конденсат и газ.

В результате проведенных исследований разработано три способа теплотехнологической переработки низкосортного органического сырья в ТКТ, предназначенное для использования на объектах малой энергетики и коммунально-бытовых нужд.

5.1.1 Теплотехнология получения ТКТ из полукокса и пиролизной смолы

Разработанный вариант позволяет перерабатывать низкосортное сырье, обладающее высоким выходом пиролизной смолы, и решает задачу снижения затрат на технологический процесс производства ТКТ. Суть этого варианта состоит в том, что низкосортное сырье подвергается тепловой обработке при температуре 200-500 °С, в результате чего образуются более кондиционные продукты – пиролизная смола, углеродистый остаток и газ (рисунок 5.1).

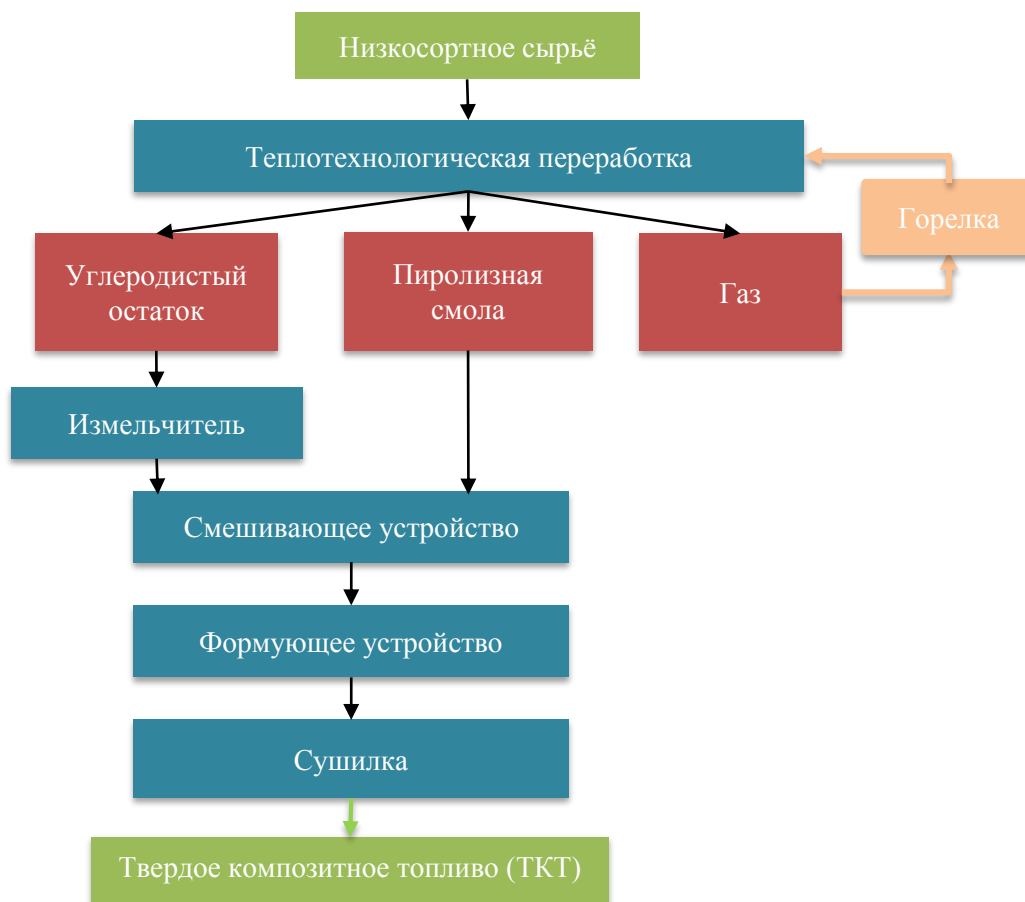


Рисунок 5.1 – Вариант принципиальной схемы получения ТКТ из полукокса и пиролизной смолы

Затем углеродистый остаток измельчают, смешивают с пиролизной смолой в равных долях (по массе), образуя формовочную смесь. Из полученной смеси формируют ТКТ, которое сушат при температуре 100-105 °С и оставляют отвердевать при температуре окружающего воздуха более суток.

На разработанный способ получен патент РФ № 2458974 от 20.08.2012 года на изобретение «Способ получения топливных брикетов из низкосортного топлива» [50], лицензия на использование которого приобретена ООО «Политехнологии» (Приложение Д).

5.1.2 Теплотехнология изготовления ТКТ из полукокса и связующего на основе декстрина

Этот вариант позволяет перерабатывать более широкий спектр органического сырья независимо от количества получаемой при термпереработке пиролизной смолы и также включает теплотехнологическую переработку сырья при 200-500 °С (рисунок 5.2). При переработке сырья преобразуется в пиролизный конденсат, углеродистый остаток и газ. Связующее вещество получают растворением декстрина в пиролизном конденсате в соотношении 1 : 20. ТКТ формируют из смеси, полученной при смешивании измельченного углеродистого остатка и связующего. Полученное топливо сушат при температуре окружающего воздуха более суток.

На разработанный способ получен патент РФ № 2484125 от 10.06.2013 года на изобретение «Способ изготовления топливных брикетов из биомассы» [52].



Рисунок 5.2 – Вариант принципиальной схемы производства ТКТ из полукокса и связующего на основе декстрина

5.1.3 Теплотехнология получения влагостойкого ТКТ

Еще один способ (рисунок 5.3) также основан на теплотехнологической переработке органического сырья при температуре 200-500 °С, в результате которой оно преобразуется в пиролизный конденсат (смесь пиролизной смолы и подсмольной воды), углеродистый остаток и газ. Пиролизный конденсат посредством фильтрования разделяют на пиролизную смолу и подсмольную воду, а углеродистый остаток измельчают и смешивают со связующим, полученным растворением декстрина в подсмольной воде в соотношении 1 : 20.

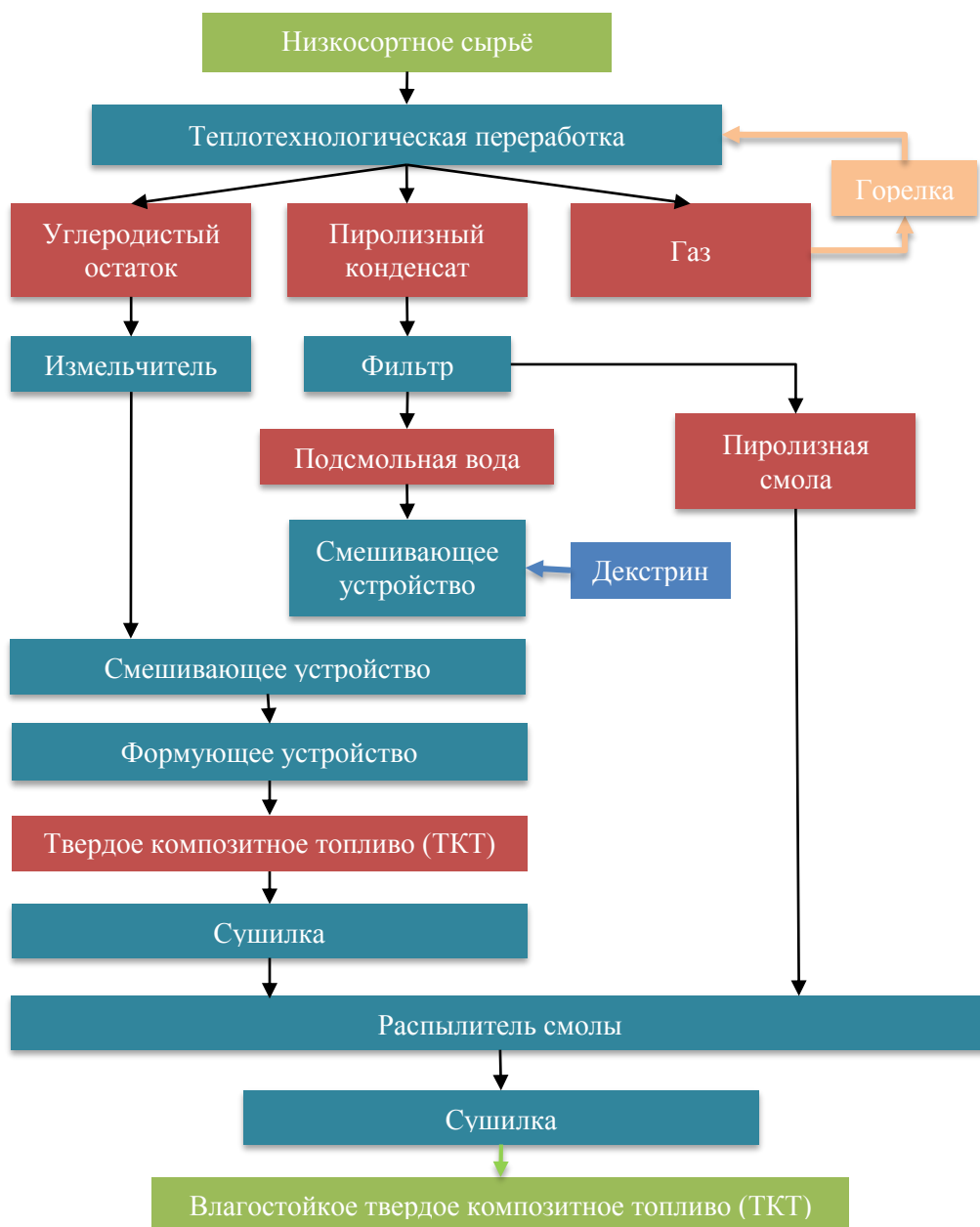


Рисунок 5.3 – Принципиальная схема изготовления влагостойкого ТКТ

Из полученной смеси формируют ТКТ, которое в зависимости от вида сушат при температуре от 20 до 80 °С. После сушки на поверхность топлива, остывшего до температуры окружающего воздуха (близкой к комнатной), наносят отфильтрованную пиролизную смолу и

повторно сушат при температуре 20-40 °С. По окончании сушки необходима выдержка ТКТ при комнатной температуре более 14 суток для отверждения смоляного покрытия. Технический результат – получение влагостойкого топлива.

На разработанный способ подана заявка на патент РФ № 2014152382 от 23.12.2014 года на изобретение «Способ получения влагостойкого композитного топлива из торфа» [57].

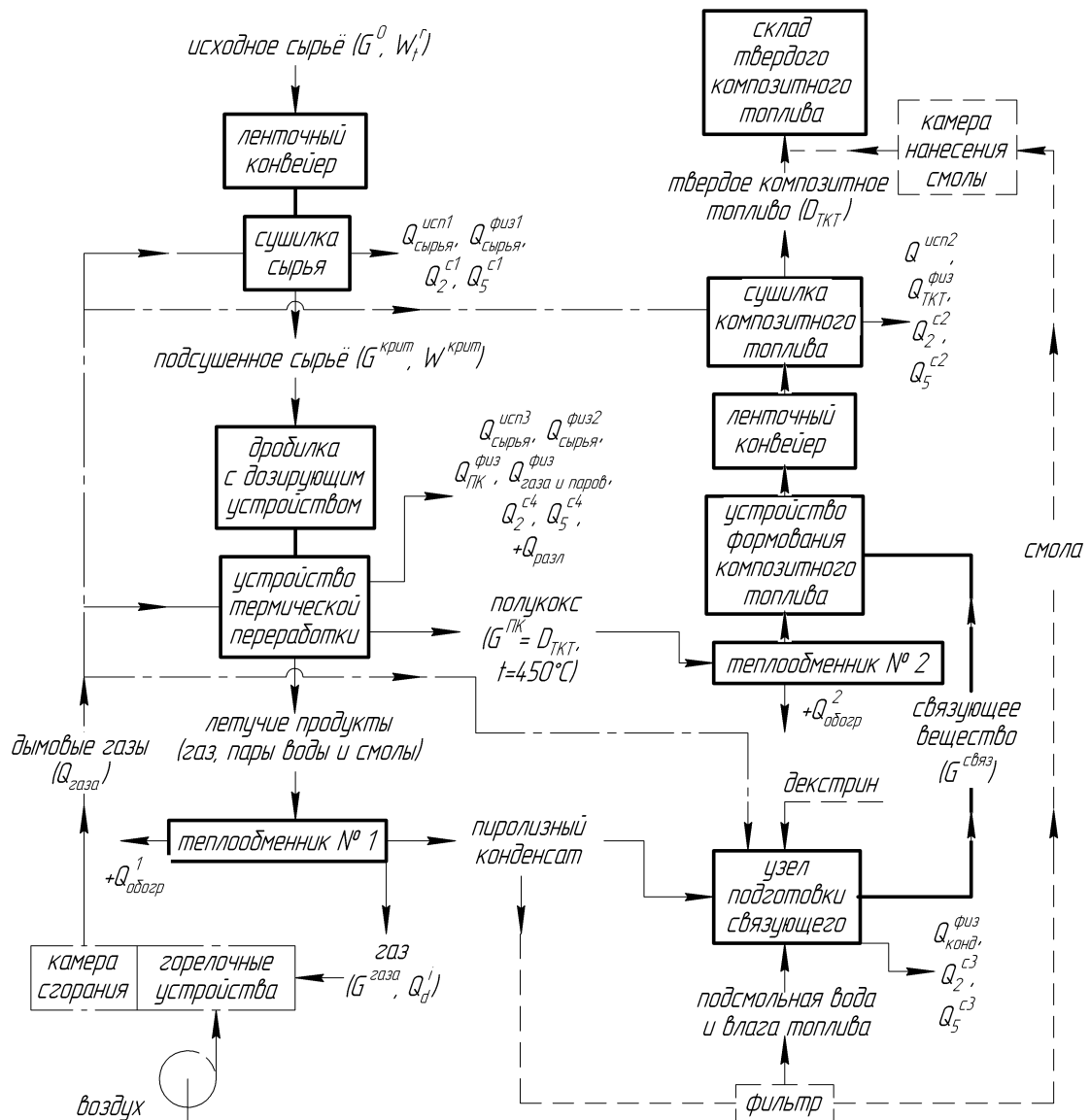
5.2 Инженерно-аппаратурное оформление энергоэффективной технологической схемы производства твердого композитного топлива

Во всех разработанных вариантах теплотехнологии получения ТКТ [50, 52, 57] общим является переработка исходного низкосортного сырья при температуре 200-500 °С с целью получения кондиционных продуктов, измельчение углеродистого остатка, смешение его со связующим, формование и сушка ТКТ, последующее отверждение при близкой к комнатной температуре. Схожесть технологических процессов подводит к выводу о возможности создания универсального производства, которое могло бы реализовывать все три варианта теплотехнологии.

Принципиально производство ТКТ в схематичном виде можно представить следующим образом (рисунок 5.4). 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. Фильтр предусмотрен для разделения пиролизного конденсата на пиролизную смолу и подсмольную воду с влагой топлива. Камера нанесения смолы – для покрытия ТКТ водозащитным смоляным слоем.

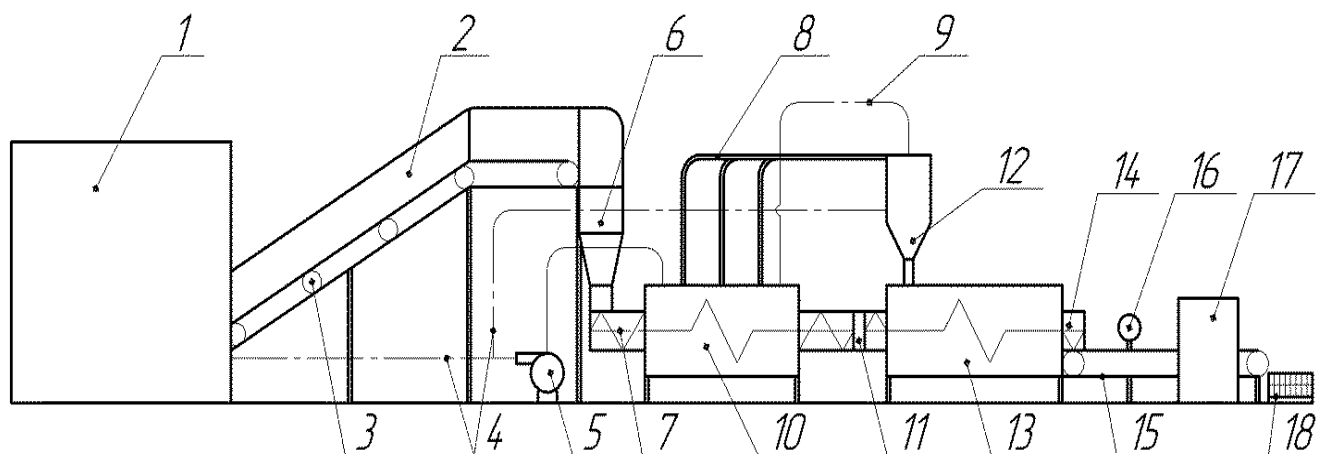


- G^0 – расход сырья, кг/с; W_t^r – влажность сырья, %; $G^{крит}$ – расход сырья после предварительной сушки, кг/с; $W^{крит}$ – влажность сырья после предварительной сушки, %; $G^{ПК}$ – выход полукокса, кг/с; $G^{связ}$ – расход связующего вещества, кг/с; $D_{ТКТ}$ – производительность линии, кг/с; $G_{газа}$ – расход газа, кг/с; Q_d^i – теплота сгорания газа, кДж/кг; $Q_{газа}$ – тепло, полученное при сжигании газа, кВт; $Q_{сырья}^{исп1}$ – тепло, затрачиваемое на испарение влаги в процессе сушки исходного сырья до влажности $W^{крит}$, кВт; $Q_{сырья}^{физ1}$ – физическое тепло сырья после сушки, кВт; $Q_{сырья}^{исп2}$ – тепло, затрачиваемое на испарение влаги в процессе сушки ТКТ, кВт; $Q_{ТКТ}^{физ}$ – физическое тепло ТКТ после сушки, кВт; $Q_{сырья}^{исп3}$ – тепло, затрачиваемое на испарение оставшейся влаги сырья, кВт; $Q_{сырья}^{физ2}$ – тепло, необходимое для нагрева сырья до 100 °С, кВт; $Q_{ПК}^{физ}$ – тепло на теплотехнологическую переработку сырья при 450 °С, кВт; $Q_{газа}^{физ}$ – тепло летучих продуктов (газа, паров смолы и подсмольной воды), кВт; $Q_2^{с1}, Q_2^{с2}, Q_2^{с3}, Q_2^{с4}$ – потеря тепла с уходящими газами, кВт; $Q_5^{с1}, Q_5^{с2}, Q_5^{с3}, Q_5^{с4}$ – потеря тепла от наружного охлаждения, кВт; $Q_{разл}$ – тепло разложения органической массы сырья, кВт; $Q_{обогр}^1, Q_{обогр}^2$ – тепло охлаждающего теплоносителя на обогрев производственных площадей, кВт

Рисунок 5.4 – Структурная схема теплотехнологического производства ТКТ

Представленный вариант структурной схемы является в целом универсальным и способным перерабатывать различные виды низкосортного органического сырья, однако комплектация оборудования для производства ТКТ зависит от конкретного вида сырья. Например, при переработке опилок или древесной щепы, не выделяющих пиролизную смолу при теплотехнологической переработке, будут отсутствовать операции дробления и нанесения смолы.

В качестве прообраза технической реализации малотоннажного производства разработана компоновочная схема технологической линии производства ТКТ (рисунок 5.5). Ввиду специфики производства (связующее изготавливается на основе воды и пирогенетической влаги, являющихся несжимаемыми жидкостями) использование прессового оборудования или экструдера для формования ТКТ не представляется возможным. В связи с этим формовка осуществляется посредством прижимного вала и штамповочного формовщика.



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 – корзина

Рисунок 5.5 – Технологическая линия малотоннажного производства ТКТ

Потребляемая мощность линии определяется как сумма энергопотреблений отдельного оборудования, входящего в её состав (таблица 5.1). Энергозатраты, связанные с энергопотреблением шкафов управления, освещением производственных площадей, потерями и прочим, определяются при составлении проекта электроснабжения под конкретное производство.

Таблица 5.1 – Номенклатура энергопотребляющего оборудования технологической линии малотоннажного производства ТКТ (производительность 1,875 т/час)

Оборудование	Рассматриваемая линия малотоннажного производства ТКТ			Действующий комплекс по производству топливных брикетов из торфа [185]	
	Тип	Потребляемая мощность, кВт	Кол-во, шт.	Потребляемая мощность, кВт	Кол-во, шт.
Ленточный конвейер	КЛ (ф)–500–15–5	4,0	2	5,5	2
				2,2	4
Теплогенерации	Дымосос Д–3.5М	3,0	1	11,65	2
	Дутьевой вентилятор ВДН–6,3	5,5	1		
Система подачи	Дробилка SK300	4,0	1	1,5	2
Шнековый транспортер	ТШ–4300 М	1,1	2	2,2	2
Мешалка погружная	АМ–4	0,4	1	–	–
Штамповочный формовщик	–	8,8	1	–	–
Сушильная камера	–	–	–	12,0	2
Система очистки отработанного теплоносителя	–	–	–	46,5	2
Оборудование брикетирования	–	–	–	65,0	2
Суммарная мощность линии, кВт		31,9		297,5	
Удельная потребляемая мощность, кВт/т		17,0		148,75	

Сравнивая энергозатраты предложенной технологической линии с линиями производства ТКТ других производителей, использующими пресловое оборудование или экструдер для формовки топлива, можно отметить, что удельная потребляемая электрическая мощность оборудования рассматриваемой линии ниже, чем у других производителей, а в отдельных случаях [185, 186] в несколько раз.

5.3 Методические рекомендации к расчету теплотехнологической линии

5.3.1 Исходные данные для расчета

Исходными данными для расчета технологической линии малотоннажного производства являются: производительность по ТКТ ($D_{\text{ТКТ}}$); влажность исходного сырья (W_t^r); балансовые соотношения его теплотехнологической переработки; базовые параметры теплотехнологии (температурный режим переработки, температура сушки).

Производительность производства принимается на основе предварительно проведенных маркетинговых исследований и технико-экономической оценки производства.

Информация об исходной влажности низкосортного сырья, поступающего на теплотехнологическую переработку, необходима для расчета сушки сырья.

Температурный режим теплотехнологической переработки исходного сырья определяется исходя из соображения использования углеродистых сталей обыкновенного качества для изготовления оборудования технологической линии, балансовых соотношений и требуемых характеристик ТКТ. Высокие температуры (~ 500 °С) позволяют получить большее количество

пиролизной смолы, углеродистый остаток с бóльшим содержанием углерода и соответственно более высокой теплотой сгорания, но приводят к снижению выхода углеродистого остатка, требуют использования легированных сталей. В общем случае температурный режим теплотехнологии принимают 350-450 °С.

Известные из предшествующего раздела балансовые соотношения теплотехнологической переработки позволяют выбрать вариант переработки исходного сырья в ТКТ (по способу получения топливных брикетов из низкосортного топлива, по способу изготовления топливных брикетов из биомассы или по способу получения влагостойкого композитного топлива из торфа). Результаты определения материального баланса необходимы для теплового конструкторского расчета линии, выбора типа и количества связующего вещества.

5.3.2 Расчет ленточного конвейера

Ленточный конвейер состоит из конвейерной ленты, опоры, приводного и хвостового барабанов, натяжного устройства, загрузочного устройства и рамы. Работа конвейера осуществляется от электродвигателя через редуктор.

Расчет ленточного конвейера по известной методике [187] включает определение ширины и типа ленты, материала прокладок, тяговой силы конвейера, размеров приводного и натяжного барабанов, требуемой мощности двигателя.

Ширина ленты транспортирования сыпучих материалов определяется по уравнению:

$$B = 1,1 \left(\sqrt{\frac{Q}{v \cdot \rho_H \cdot K \cdot K_\beta}} + 0,05 \right),$$

где B – ширина ленты, м;

Q – производительность конвейера, т/ч;

v – скорость ленты, м/с;

ρ_H – насыпная плотность материала, т/м³;

K – коэффициент, зависящий от угла естественного откоса материала;

K_β – коэффициент, зависящий от угла наклона конвейера.

Тип ленты, материала прокладок и толщина обкладок для выбранного типа ленты принимаются согласно рекомендациям [187].

Тяговая сила конвейера определяется [187]:

$$W_0 = [\omega \cdot L_z \cdot (g + g_k) \pm g \cdot H] \cdot m + W_{np},$$

где W_0 – тяговая сила конвейера, кг;

ω – коэффициент сопротивления (определяется по [187]);

L_z – длина проекции конвейера на горизонтальную плоскость, м;

g – погонная весовая нагрузка от груза, кг/м;

g_k – погонная весовая нагрузка от движущихся частей конвейера, кг/м;

H – высота подъема, м;

m – коэффициент;

W_{np} – сопротивление плужкового разгрузчика (учитывается при его наличии), кг.

Размеры приводного и натяжного барабанов определяют по формулам [187]:

$$D_{н.б.} = a \cdot i, \quad D_{н.б.} = 0,8a \cdot i,$$

где $D_{н.б.}$, $D_{н.б.}$ – диаметр соответственно приводного и натяжного барабанов, мм;

a – коэффициент, принимается по [187];

i – число прокладок, определяемое по формуле [187]:

$$i = \frac{S_{\max} \cdot n_0}{K_p \cdot B},$$

где S_{\max} – максимальное статическое натяжение ленты, кг;

n_0 – номинальный запас прочности конвейерной ленты (определяется по [187]);

K_p – предел прочности прокладок, кг/м (определяется по [187]).

Мощность электродвигателя рассчитывается по формуле [187]:

$$N = \frac{KN_0}{\eta},$$

где N – мощность электродвигателя, кВт;

$K = 1,1 - 1,4$ – коэффициент, учитывающий условия работы конвейера;

$\eta = 0,6 - 0,85$ – КПД привода;

N_0 – мощность на приводном валу, кВт;

$$N_0 = \frac{W_0 \cdot v}{102 \cdot \eta_{бар}};$$

где $\eta_{бар} = \frac{1}{1 + \omega_б(2K_s - 1)}$ – КПД барабана;

$\omega_б = 0,4$ – коэффициент сопротивления барабана;

K_s – является функцией от коэффициента сцепления барабана с лентой μ и от угла его обхвата лентой, определяется согласно [187].

5.3.3 Тепловой расчет технологической линии

Тепловой расчет линии можно разбить на две составляющие:

– тепловые затраты устройства термической переработки (оценка возможности автотермического протекания процесса за счет тепла разложения органической массы);

– прочие потребности тепла в производстве (тепловые нужды сушки сырья, узла подготовки связующего, сушки композитного топлива).

5.3.3.1 Условие автотермического протекания процесса термической переработки органического сырья можно записать как:

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

где $Q_{разл} = Q_{разл}^{y0} \cdot G_T^{сух}$, кВт;

$Q_{разл}^{y0}$ – удельная теплота разложения топлива, кДж/кг;

$G_T^{сух}$ – расход сухого сырья, кг/с;

$Q_{сырья}^{физ2} = C_p^{сырья} \cdot G_T^{сух} \cdot (100 - t_0)$, кВт;

$C_p^{сырья}$ – теплоемкость сырья, кДж/(кг·К);

t_0 – температура сырья после сушки, °С;

$Q_{ПК}^{физ} = C_p^{ПК} \cdot \left(\frac{G_T^{сух} + G^{ПК}}{2} \right) \cdot (t^k - 100)$, кВт;

$C_p^{ПК}$ – теплоемкость полукокса, кДж/(кг·К);

t^k – конечная температура теплотехнологической переработки, °С;

$Q_{газа\ и\ паров}^{физ} = C_p^{газа} \cdot G_T^{сух} \cdot W^{газа} \cdot (t^k - t^{н.в.г.}) + C_p^{п.конд} \cdot G_T^{сух} \cdot W^{конд} \cdot (t^k - 100)$, кВт;

$C_p^{газа}$ – теплоемкость газа, кДж/(кг·К);

$W^{газа}$ – массовый выход газа (относительно сухой массы исходного сырья);

$t^{н.в.г.}$ – температура начала выхода газа, °С;

$C_p^{п.конд}$ – теплоемкость паров пиролизного конденсата, кДж/(кг·К);

$W^{конд}$ – массовый выход пиролизного конденсата (относительно сухой массы исходного сырья);

$Q_{сырья}^{исп3} = (G^{крит} - G_T^{сух}) \cdot r$, кВт;

r – удельная теплота парообразования, кДж/кг;

5.3.3.2 Условие компенсации прочих тепловых нужд производства за счет тепла от сжигания газа, получаемого при теплотехнологической переработке, можно записать следующим образом:

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

где $Q_{сырья}^{исп1} = (G^0 - G^{крит}) \cdot r$, кВт;

$$Q^{исп2} = (G_{ТКТ}^0 - D_{уст}) \cdot r, \text{ кВт};$$

$G_{ТКТ}^0 = G^{ПК} + G^{связ}$ – производительность ТКТ на выходе из устройства формования, кг/с;

$$Q_{сырья}^{физ1} = C_p^{сырья} \cdot G_T^{сух} \cdot (t_0 - t_{o.c.}), \text{ кВт};$$

$t_{o.c.}$ – начальная температура сырья, °С;

$$Q_{ТКТ}^{физ} = C_p^{ТКТ} \cdot G_T^{сух} \cdot (t_c - t_{ф.у.}), \text{ кВт};$$

$C_p^{ТКТ} \approx C_p^{ПК}$ – 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;

$$Q_{конд}^{физ} = C_p^{конд} \cdot G_T^{сух} \cdot W^{конд} \cdot (70 - t_{m.o.}), \text{ кВт};$$

$C_p^{конд}$ – теплоемкость пиролизного конденсата, кДж/(кг·К);

$t_{m.o.}$ – температура пиролизного конденсата на выходе из теплообменника, °С.

5.3.4 Расчет шнекового транспортера (шнека)

Частота вращения шнекового транспортера (шнека) определяется по формуле [188]:

$$n = \frac{0,275 \cdot Q}{E \cdot D \cdot \varphi \cdot \rho_t \cdot R_\beta},$$

где n – частота вращения шнекового транспортера (шнека), об/мин;

Q – производительность, т/мин;

E – отношение шага винта к диаметру винта, (принимают согласно [188]);

ρ_t – плотность топлива, т/м³;

D – диаметр винта, м;

φ – коэффициент заполнения желоба (принимают согласно [188]);

R_β – коэффициент уменьшения производительности от наклона конвейера (принимают согласно [188]).

Осевая скорость движения груза шнекового транспортера (шнека) определяется по формуле [188]:

$$v = S \cdot n,$$

где v – осевая скорость движения груза шнекового транспортера (шнека), м/с;

S – шаг винта, м.

5.3.5 Расчет камеры нанесения смолы

Нанесение смолы должно осуществляться распылением на поверхность брикетов. В качестве распылителей применяются [189, 190]: струйные форсунки, форсунки с соударяющимися струями, центробежные механические форсунки, пневматические форсунки и центробежные пневматические распылители. Согласно [189] распыление пиролизной смолы возможно только при использовании центробежного дискового распылителя.

Размеры распылительной камеры зависят от радиуса распыла смолы. Основной величиной, характеризующей радиус распыла, является скорость подачи раствора, при которой происходит отрывание капель от диска. Максимально возможная скорость равна [189]:

$$u_{\max} = \sqrt{2} \cdot \omega \cdot R, \text{ м/с},$$

где R – радиус диска, м;

ω – угловая скорость вращения диска, 1/с.

Формула справедлива в том случае, если угол отрыва раствора от диска составляет 45° . В действительности за счет трения радиальная скорость раствора будет несколько меньше, вследствие чего и угол отрыва будет меньше 45° .

С учетом трения радиальная скорость раствора будет равна [189]:

$$u_r = \frac{\omega^{0,8} R^{0,4}}{A^{0,4}} \left(1 - \frac{0,35}{A^{0,95} \omega^{0,42} R^{1,43}}\right)^{0,4}, \text{ 1/с},$$

где A – коэффициент, зависящий от формы каналов, определяемый для каналов прямоугольного сечения [189]:

$$A = 0,105 \frac{b^{0,35} v^{0,25}}{\left(\frac{G}{n}\right)^{0,8}};$$

где G – производительность диска, кг/с;

n – число каналов;

b – высота каналов, м;

v – кинематическая вязкость раствора, м²/с.

Для каналов круглого сечения коэффициент A равен [189]:

$$A = 0,09 \frac{r_r^{0,35} \nu^{0,25}}{\left(\frac{G}{n}\right)^{0,8}},$$

где r_r – радиус канала, м.

Факел распыла в камерах с дисковым распылителем расположен в горизонтальной плоскости. Исходя из этого, рекомендовано [189] принимать отношение высоты камеры к ее диаметру (рисунок 5.7) равным:

$$\frac{H_k}{D_k} = 0,8 - 1,0.$$

Высоту сушильной камеры определяют по формуле [189]:

$$H_k = 1,37 d_{\max} \text{Re}^{0,25} K^{0,462}, \text{ м},$$

где d_{\max} – максимальный диаметр капель;

$$\text{Re} = \frac{u_z d_{\max}}{\nu};$$

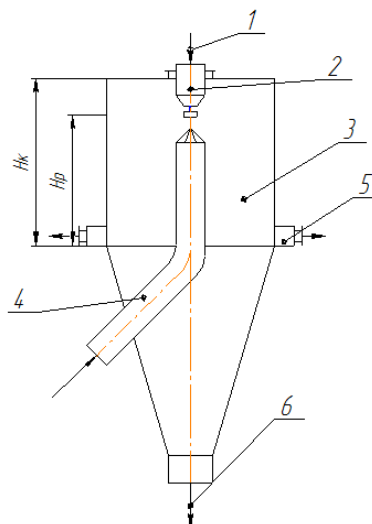
u_z – скорость сушильного агента (газа);

$$K = \frac{r \cdot u_z}{\lambda \cdot \Delta t};$$

r – удельная теплота парообразования;

Δt – разность температур между газом и смолой;

λ – коэффициент теплопроводности газа.



1 – подвод смолы; 2- дисковый распылитель; 3 – камера распыла; 4 – подвод сушильного агента;

5 – отвод сушильного агента (газа); 6 – отвод излишков смолы; H_k – высота камеры;

H_p – высота распыла

Рисунок 5.6 – Распылительная сушильная камера

Секундный тепловой поток, обеспечивающий высыхание капель смолы максимального диаметра вычисляют по формуле [189]:

$$q = \frac{4,19 \cdot \lambda \cdot \left(R_k - \frac{r_d}{2}\right)^2 \Delta t_\tau}{\gamma_c \cdot d_{\max}^2} \cdot \sqrt{\frac{u_c \cdot \gamma_c}{r_d \cdot n}},$$

где q – секундный тепловой поток, Вт;

R_k – радиус камеры, м;

r_d – радиус диска, м;

γ_c – плотность смолы, кг/м³;

γ_s – плотность сушильного агента, кг/м³.

5.4 Технико-экономическая оценка внедрения (на примере Томской области)

В планах Министерства энергетики РФ значится перевод котельных отдаленных районов на местное торфяное топливо [191], что позволит снизить себестоимость генерации энергии и обеспечить энергетическую безопасность населённых пунктов зимой и в межсезонье, когда нет транспортной доступности. Пилотные проекты вовлечения торфа в энергетику уже внедрены во Владимирской, Тверской и других областях.

Объем топливно-энергетического рынка Томской области для котельных на твердом топливе составляет более 162 000 т у.т. в год [8], при этом около 80 % рынка занимает привозной уголь, остальная часть – дрова. Область обладает запасами различных видов низкосортных сырья – торфа, бурого угля, древесины и её отходов, сапропеля. Особенно актуален вопрос использования торфяных месторождений, по залежам которых Томская область занимает второе место в России.

Часть торфяных месторождений представляет собой особую экономическую ценность благодаря тому, что под залежами торфа располагаются ценные для промышленности или строительства материалы – железная руда (с. Бакчар) или глина и песчано-гравийная смесь (д. Кандинка). Рассмотрим теплотехнологическую переработку в ТКТ на базе месторождения торфа, на котором в настоящее время ведется добыча нерудных материалов, находящихся под торфяным слоем 2,5 метра. При добыче торф складывается на месторождении без последующего употребления. Учитывая влажность торфа и особенности теплотехнологической переработки [51], ежегодно из торфа этого месторождения возможно получать до 40 000 т ТКТ.

Практика показывает, что предприятие можно считать успешным, если его продукция занимает 5-10 % рынка. В связи с этим при расчете показателей экономической эффективности

объем производимой продукции принят 45 т ТКГ в сутки (около 10 % топливно-энергетического рынка Томской области) в виде топливных брикетов. Просчитаны два сценария для расчета: оптимистический и пессимистический. При оптимистическом сценарии принято, что первоначальные инвестиции – собственные средства предприятия, торф является побочным утилизируемым продуктом добычи нерудных материалов и его стоимость равна нулю; при пессимистическом – первоначальные инвестиции являются заемными средствами банка (кредит на три года под 20 % годовых), стоимость торфа составляет 100 руб./м³ (рентабельная цена добычи торфа для промышленного использования).

Начальные инвестиции на организацию производства топливных брикетов по технологии [52] включают изготовление технологической линии и строительство производственного цеха. Ориентировочная себестоимость теплотехнологической линии переработки торфа производительностью 45 т в сутки (комплектация для получения брикетов с декстрином, без влагостойкости) по ценам на конец 2014 года составляет около 1 млн рублей (таблица 5.2). Энергопотребление оборудования, входящего в её состав, не превышает 32 кВт (таблица 5.1). Цель строительства производственного цеха – защита установки от воздействия осадков, поэтому целесообразно строительство быстровозводимого здания облегченной конструкции. Стоимость строительства приблизительно составит 300-400 тыс. рублей.

Таблица 5.2 – Средняя стоимость основных элементов технологической линии производительностью 45 тонн брикетов в сутки (по рыночной оценке на 2014 год)

№ п/п	Элемент	Марка	Кол-во, шт.	Средняя стоимость с учетом кол-ва, руб.
1	Ленточный конвейер	КЛ (ф) – 500-15-5	2	60000
2	Дымосос	Дымосос Д-3,5М	1	135000
3	Дутьевой вентилятор	ВДН-6,3	1	62700
4	Дробилка	SK 300	1	33000
5	Шнековый транспортер	ТШ – 4300 М	2	270000
6	Мешалка погружная	АМ-4	1	60000
7	Штамповочный формовщик	–	1	16000
Итого				966700

Потребность установки в сырье и других ресурсах, а также величина прочих постоянных издержек, возникающих при производстве, показаны в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Издержки при производстве топливных брикетов (45 т/сутки)

№ п/п	Статья расхода	Величина затрат для каждого сценария, тыс.руб./месяц	
		Оптимистичный	Пессимистичный
1	Торф	0	850
2	Декстрин	2 100,0	2 100,0
3	Электричество	50,7	50,7
4	Наемный транспорт	40,0	40,0
5	Амортизация установки	18,4	18,4
6	Обслуживание установки	15,0	15,0
7	Заработная плата персонала (с учетом налогов)	331,7	331,7

5.4.1 Оценка тепловых затрат производства

В результате теплового расчета технологической линии (Приложение Е) установлено, что предварительное подсушивание кандинского торфа на воздухе после добычи до значения $W_t^r = 63\%$ позволяет полностью покрыть тепловые затраты теплотехнологии за счет тепла от разложения топлива и сжигания вырабатываемого газа. Сушка торфа в сушилке сырья до значения влажности 35% (или менее) позволяет организовать автотермическое протекание процесса теплотехнологической переработки за счет тепла разложения органической массы сырья, для этого необходимо лишь организовать предварительный розжиг и теплоизолировать линию. Вывод о возможности автотермического протекания процесса низкотемпературного пиролиза подтверждается исследованиями А.В. Казакова [169, 192, 193], А.Н. Субботина и Р.Н. Кулеша [194, 195].

5.4.2 Расчет показателей экономической эффективности

Расчет показателей экономической эффективности производства 45 т в сутки брикетов проведен при помощи программного обеспечения «Project Expert 7» (таблица 5.4). При расчете стоимость топливных брикетов принята из условия, что модифицированная внутренняя норма рентабельности (MIRR) составляет 30% . Период расчета составил 5 лет.

Таблица 5.4 – Показатели эффективности инвестиций

Показатель	Сценарий расчета	
	Оптимистичный	Пессимистичный
Цена тонны брикетов, рубли	3 400	4 180
Период окупаемости (PB), месяцы	7	6
Средняя норма рентабельности (ARR), %	72,30	73,36
Чистый приведенный доход (NPV), рубли	11 783 301	14 180 230
Индекс прибыльности (PI)	3,61	3,67
Модифицированная внутренняя норма рентабельности (MIRR), %	30	30

Результаты расчета показали, что для достижения значения модифицированной внутренней нормы рентабельности (MIRR) 30% цена топливных брикетов при оптимистичном сценарии должна составлять 3 400 рублей, при пессимистичном – 4 180 рублей. При учете того, что стоимость каменного угля в г. Томске составляет 2 100-2 800 рублей/т, при пессимистичном варианте брикетам будет сложно с ним конкурировать. В этом случае придется снижать их стоимость, уменьшая величину модифицированной внутренней нормы рентабельности (MIRR), или расширять производство, снижая величину доли постоянных издержек.

При развитии сценария по оптимистичному пути, учитывая дополнительные преимущества топливных брикетов (удобство разгрузки, отсутствие пыли, низкая влажность), можно предположить, что спрос на них по такой цене будет расти. Возникнет возможность расширения производства, в результате которого увеличится чистый приведенный доход (NPV).

Стоимость топливных брикетов других производителей (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 (таблица 5.5).

Таблица 5.5 – Показатели эффективности инвестиций при конкуренции с брикетами других производителей (за период 5 лет)

Показатель	Сценарий расчета	
	Оптимистичный	Пессимистичный
Цена тонны брикетов, рубли	5 500	5 500
Период окупаемости (PB), месяцы	3	4
Средняя норма рентабельности (ARR), %	1 017,21	445,90
Чистый приведенный доход (NPV), рубли	124 465 228	84 938 436
Индекс прибыльности (PI)	50,86	22,29
Модифицированная внутренняя норма рентабельности (MIRR), %	119,42	86,05

Учитывая развитие научно-технического сотрудничества в области энергетических технологий и дружественную политику между Китаем и Россией [196], возможен вариант экспортной направленности производства в соседние государства (Китай, Монголию, КНДР).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены вопросы теплотехнологической переработки местных низкосортных ресурсов Томской области в ТКТ для энергетического использования в топочных устройствах слоевого типа.

На основе аналитического обзора современного состояния проблемы исследований сформулирована цель и поставлены задачи настоящей работы. Для проведения физических экспериментов по исследованию теплотехнологической переработки низкосортного сырья (торфа, бурого угля, древесины и сапропеля) при температурах 200-450 °С и формовки ТКТ создана установка теплотехнологической переработки и разработана методика проведения исследований.

В результате экспериментов определены материальные балансы теплотехнологии, теплотехнические характеристики и элементный состав исходного сырья, продуктов теплотехнологической переработки и образцов полученного ТКТ, механические испытания которого позволили определить оптимальные соотношения компонентов при формовании и режимные параметры сушки.

На основе результатов работы разработаны 3 изобретения по теплотехнологии для получения ТКТ из низкосортного сырья и реализующее их инженерно-аппаратурное оформление энергосберегающей технологической схемы производства. Выполнена технико-экономическая оценка организации производства ТКТ на территории Томской области на примере переработки торфа одного из месторождений.

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.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Боднар Л.А., Ткаченко С.И., Дахновская О.В. Проблемы сжигания низкосортного топлива в котлах малой мощности // Энергетика и электротехника. – 2012. – № 4. – С. 1-7.
- 2 Пугач Л. И. Качество энергетических углей. Влияние качества на экономику и технологию использования на ТЭС: учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1998. – 104 с.
- 3 Мяки А.Э. Истинные причины проблем отопления в северных регионах // Топливно-энергетический комплекс. – 2003. – № 2. – С. 95-98.
- 4 Федеральная программа «Энергообеспечение районов Крайнего Севера и приравненных к ним территорий, а также мест проживания коренных малочисленных народов Севера, Сибири и Дальнего Востока за счет использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии и местных видов топлива». – М.: Министерство топлива и энергетики РФ, 1996. – 27 с.
- 5 Емешев В.Г., Паровинчак М.С. Без привозной энергетики // Нефтегазовая вертикаль, 2005. – № 17. – С. 63-65.
- 6 Суржикова О.А. Проблемы и основные направления развития электроснабжения удаленных и малонаселенных потребителей России // Вестник науки Сибири. – 2012. – №. 3 (4). – С. 103-108. URL: <http://sjs.tpu.ru/journal/article/view/362> (дата обращения: 15.07.2014).
- 7 Самылин А., Яшин М. Современные конструкции газогенераторных установок // ЛесПромИнформ. – 2009. – № 1. – С. 78-86.
- 8 Котельные на твёрдом топливе // Геоинформационная система «Возобновляемые источники энергии в Томской области» [2014-2014]. Дата обновления: 1.02.2014. URL: <http://green.tsu.ru/tomres/?cat=11> (дата обращения: 06.02.2014 г.).
- 9 Парников Н.М. Повышение энергетической эффективности комплексов децентрализованного электроснабжения на примере Республики Саха (Якутия): диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: спец. 05.09.03 / Н.М. Парников; Томский политехнический университет (ТПУ); науч. рук. Б.В. Лукутин. – Томск, 2009. – 181 с.
- 10 Финансово-экономическое обоснование к проекту закона // Федеральный закон «О внесении изменений в статью 17 федерального закона «О лицензировании отдельных видов деятельности» [2012-2013]. Дата обновления: 1.12.2013. URL: [http://www.asozd2.duma.gov.ru/arhiv/a_dz_4.nsf/ByID/A2A61CF339907B57C3257249004BADA6/\\$File/%D0%A4%D0%AD%D0%9E.rtf?OpenElement](http://www.asozd2.duma.gov.ru/arhiv/a_dz_4.nsf/ByID/A2A61CF339907B57C3257249004BADA6/$File/%D0%A4%D0%AD%D0%9E.rtf?OpenElement) (дата обращения: 24.12.2013 г.).
- 11 Приложение к Постановлению Государственной Думы Томской области от 28.02.2008 № 1008 «Энергетическая стратегия Томской области на период до 2020 года».
- 12 Распоряжение Правительства Российской Федерации № 1715-р «Энергетическая стратегия России на период до 2030 года» от 13 ноября 2009 г.

- 13 Попель О.С., Реутов Б.Ф., Антропов А.П. Перспективные направления использования возобновляемых источников энергии в централизованной и автономной энергетике // Теплоэнергетика. – 2010. – № 11. – С. 2-11.
- 14 Wright L. Worldwide commercial development of bioenergy with a focus on energy crop-based projects // Biomass and Bioenergy. – 2006. – vol. 30. – P. 706–714.
- 15 Sakkampang C., Wongwuttanasatian T. Study of ratio of energy consumption and gained energy during briquetting process for glycerin-biomass briquette fuel // Fuel. – 2014. – vol. 115. – P. 186-189.
- 16 Singh R.N., Bhoi P.R., Patel S.R. Modification of commercial briquetting machine to produce 35mm diameter briquettes suitable for gasification and combustion // Renewable Energy. – 2007. – vol. 32. – P. 474-479.
- 17 Производство и использование биомассы // Энергосбережение. – 2007. – № 5. – С. 72-73. URL: http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=3708 (дата обращения 15.07.2014).
- 18 Акимов А.А. Энергия лесных запасов // Лесная газета. – 2006. – № 54-25. – С. 1.
- 19 Белосельский Б.С., Барышев В.И. Низкосортные энергетические топлива. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 136 с.
- 20 Беляев А.А. Сжигание высокозольного топлива и возможности его использования на ТЭС // Химия твердого топлива. – 2005. – № 1. – С. 44-53.
- 21 Чмель В.Н. Использование биомассы в качестве альтернативного топлива // Альтернативная энергетика и экология. – 2012. – № 8. – С. 60-65.
- 22 Ковалев А.П. Парогенераторы: учебное пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 376 с.
- 23 Смирнова Г. От торфяников ждут прибыль // «Дерево.ru». – 2011. – № 3. – С. 56-58. URL: http://www.derevo.ru/derevo_journal_pdf/2011/boienerg_1-3.jpg (дата обращения 15.07.2014).
- 24 Кучин Г.П. Сжигание низкосортных топлив в псевдоожигенном слое. – Киев: Техника, 1987. – 144 с.
- 25 Баскаков А.П. Сжигание твердых бытовых отходов с целью получения тепла и электроэнергии // Теплофизика и энергетика: Сб. трудов конф. с международным участием «VIII Всероссийский семинар вузов по теплофизике и энергетике». – Екатеринбург: УрФУ, 2013. – С. 112-116.
- 26 Белосельский Б.С. Технология топлива и энергетических масел: учебник для вузов. – М.: Издательство МЭИ, 2005. – 348 с.
- 27 Шевердяев О.Н., Гвоздев В.М., Пахомов А.В., Желтова В.В. Сжигание в кипящем слое – перспективная технология для низкосортных топлив // Энергосбережение и водоподготовка. – 2010. – № 6. – С. 39-41.
- 28 Антонов П.П., Скрябин А.А., Королев С.В. Испытания котла КВ-ТС-20 при сжигании низкосортных углей в кипящем слое // Ползуновский вестник. – 2004. – № 1. – С. 141-146.

29 Беляев А.А. Сжигание высокозольных топлив в топках с кипящим слоем промышленных котлов: учебное пособие. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 71 с.

30 Шупамбаев Е.А., Реш А.Г. Преимущества сжигания органического топлива в кипящем слое // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы междунар. научно-техн. конф. студентов, аспирантов, ученых. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2014. – С. 364-369.

31 Петрик Ю.О., Афанасьев П.Т., Богомолов А.Р., Козлова Г.С., Дадонов П.В. Гравитационно-рециркуляционная вихревая топка для сжигания высокозольного топлива // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2009. – № 2. – С. 136-139.

32 Пузырев Е.М., Афанасьев К.С., Жуков Е.Б., Голубев В.Е. Сжигание низкосортного топлива в вихревых топочных устройствах // Вестник алтайской науки. – 2008. – № 2. – С. 109-113.

33 Пузырев Е.М., Афанасьев К.С. Опыт разработки вихревых топок на дробленом угле для котлов малой и средней мощности // Энергетик. – 2009. – № 4. – С. 11-12.

34 Zavorin A.S., Kazakov A.V., Makeev A.A., Podorov S.V. Studying the process through which gas is generated in independent power installations // Thermal engineering. – 2010. – vol. 57. – № 1. – P. 77-82.

35 Zhang J., Wu R., Zhang G., Yu J., Yao C., Wang Y., Gao S., Xu G. Technical review on thermochemical conversion based on decoupling for solid carbonaceous fuels // Energy and fuels. – 2013. – vol. 27. – № 4. – P. 1951-1966.

36 Кузнецов Г.В., Кулеш Р.Н., Полсонгкрам М. Повышение эффективности термической конверсии древесной биомассы // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 4. – С. 22-25.

37 Казаков А.В., Заворин А.С., Казакова О.А. Технико-экономическая оценка внедрения энергетических установок на основе внутрицикловой конверсии низкосортных топлив на примере Томской области // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Социально-экономические науки. – 2013. – Т. 13. – № 2. – С. 59-68.

38 Пат. 2462503 Россия. МПК С10J3/02. Способ получения горючего газа, обогащенного водородом / А.С. Заворин, А.В. Казаков, Р.Б. Табакаев. Заявлено 24.05.2011. Оpubл. 27.09.2012.

39 Пат. 2490445 Россия. МПК E21B43/295; С10J3/00. Способ подземной газификации угля / А.С. Заворин, А.В. Казаков, Р.Б. Табакаев. Заявлено 07.07.2011. Оpubл. 20.08.2013.

40 Казаков А.В., Заворин А.С., Новосельцев П.Ю., Табакаев Р.Б. Когенерационная энергоустановка с топливным элементом на основе внутрицикловой конверсии органического сырья для автономного энергообеспечения // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324. – № 4. – С. 54-61.

41 Казаков А.В., Заворин А.С., Табакаев Р.Б., Новосельцев П.Ю. Проект модуля блочной когенерационной энергоустановки с топливным элементом на основе внутрицикловой конверсии органического сырья для автономного энергообеспечения: монография. – Томск: ТПУ, 2013. – 191 с.

42 Казаков А.В., Заворин А.С., Новосельцев П.Ю., Табакаев Р.Б. Малая распределенная энергетика России: совместная выработка тепло- и электроэнергии // Вестник науки Сибири. – 2013. – № 4 (10). – С. 13-18. URL: <http://sjs.tpu.ru/journal/article/view/806/564> (дата обращения: 15.07.2014).

43 Казаков А.В., Заворин А.С., Новосельцев П.Ю., Табакаев Р.Б. Современное состояние когенерации в России: обзор публикаций, перспективные направления исследований // Теплофизические основы энергетических технологий: сб. науч. трудов IV Всерос. научно-практ. конф. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – С. 321-329.

44 Систер В.Г., Иванникова Е.М., Ямчук А.И., Московский А.С., Бабарицкий А.И., Деминский М.А., Чебаньков Ф.Н. Газификация твёрдого органического сырья как источник топлива для когенерационных установок // Альтернативная энергетика и экология. – 2013. – № 16. – С. 75-78.

45 Simonov A.D., Yazykov N.A., Vedyakin P.I., Lavrov G.A., Parmon V.N. Industrial experience of heat supply by catalytic installations // Catalysis Today. – 2000. – № 1. – P. 139-145.

46 Simonov A.D., Fedorov I.A., Dubinin Y.V., Yazykov N.A., Yakovlev V.A., Parmon V.N. Catalytic heat-generating units for industrial heating // Catalysis in Industry. – 2013. – № 1. – P. 42-49.

47 Симонов А.Д., Языков Н.А., Дубинин Ю.В., Афлятунов А.С., Яковлев В.А., Пармон В.Н. Каталитическое сжигание битуминозного песка и сланцев с различным содержанием керогена // Альтернативная энергетика и экология. – 2013. – Т. 124. – № 4-2. – С. 52-60.

48 Осташенков А.П., Онучин Е.М. Теплоснабжение зимовников пасечных хозяйств на базе каталитических устройств сжигания биогенных топлив // Научный журнал КубГАУ. – 2013. – № 89. – С. 437-453.

49 Заворин А.С., Казаков А.В., Табакаев Р.Б. Экспериментальные предпосылки к технологии производства топливных брикетов из торфа // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 4. – С. 18-22.

50 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. – 7с.: ил.

51 Табакаев Р.Б., Казаков А.В., Заворин А.С. Перспективность низкосортных топлив Томской области для теплотехнологического использования // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 4. – С. 41-46.

52 Пат. 2484125 Россия. МПК C10L5/44; C10L5/14; C10L5/26; C10F7/06. 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.

53 Табакаев 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.

54 Табакаев 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.

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

56 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 (012052).

57 Заяв. на пат. 2014152382 Россия. МПК C10L5/14; C10L5/28. Способ получения влагостойкого композитного топлива из торфа / А.С. Заворин, А.В. Казаков, Р.Б. Табакаев и др.; заяв. 23.12.2014.

58 Колотушкин В.И. Справочная книжка торфяника / Под ред. В.Н. Колесина. – М.: Недра, 1973. – 208 с.

59 Инишева Л.И., Архипов В.С., Маслов С.Г., Михантьева Л.С. Торфяные ресурсы Томской области и их использование. – Новосибирск, 1995. – 88 с.

60 Раковский В.Е., Пигулевская Л.В. Химия и генезис торфа / Под ред. А.В. Лазарева. – М.: Недра, 1978. – 231 с.

61 Касицкая Л.В., Саркисов Ю.С., Горленко Н.П., Копаница Н.О., Кудяков А.И. Торфяные ресурсы Томской области и пути их использования в строительстве. – Томск: STT, 2007. – 292 с.

62 Нечепуренко А. Болотные перспективы // Недра и ТЭК Сибири. – 2013. – № 11 (89). – С. 13.

63 Тепловой расчет котлов: нормативный метод. – СПб.: 1998. – 256 с.: ил.

64 Вдовченко В.С., Мартынова М.И., Новицкий Н.В., Юшина Г.Д. Энергетическое топливо СССР. Ископаемые угли, горючие сланцы, торф, мазут и горючий природный газ : справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 183 с.

65 Энергетическое топливо (ископаемые угли, горючие сланцы, торф, мазут и горючий природный газ): справочник. – М.: Энергия, 1968. – 112 с.

- 66 Мельников Н.В. Топливо-энергетические ресурсы СССР. – М.: Наука, 1968. – 419 с.
- 67 Архипов В.С., Прейс Ю.И., Бернатонис В.К., Маслов С.Г., Антропова Н.А. Битуминозные торфа Томской области. – Томск: STT, 2008. – 240 с.
- 68 Лаптев А.Г., Лаптедутьче Н.К., Сергеева Е.С. Комплексное использование торфа в энергетике // Труды Академэнерго. – 2007. – № 4. – С. 28-31.
- 69 Минэнерго реализует «пилотный» проект развития биоэнергетики на основе торфа в Тверской области // Министерство энергетики Российской Федерации [2008-2014]. Дата обновления: 17.06.2010. URL: http://minenergo.gov.ru/press/min_news/4035.html?sphrase_id=522042 (дата обращения: 19.02.2014 г.).
- 70 В России открыт современный автоматизированный завод по изготовлению топливных торфяных брикетов // Министерство энергетики Российской Федерации [2008-2014]. Дата обновления: 16.02.2011. URL: http://minenergo.gov.ru/press/min_news/6935.html?sphrase_id=522042 (дата обращения: 19.02.2014 г.).
- 71 Минэнерго России выступает за программу обводнения торфоразработок и развитие торфопредприятий // Министерство энергетики Российской Федерации [2008-2014]. Дата обновления: 03.09.2010. URL: http://minenergo.gov.ru/press/min_news/4769.html?sphrase_id=522042 (дата обращения: 19.02.2014 г.).
- 72 Равич М.Б. Топливо и эффективность его использования. – М.: Наука, 1971. – 358 с.
- 73 Белосельский Б.С. Твердое энергетическое топливо. – М.: Изд-во МЭИ, 1976. – 143 с.
- 74 Чочиа А.П. Биомасса как источник энергии. – М.: Мир, 1985. – 368 с.
- 75 Итоги работы лесопромышленного комплекса Томской области в 2010 году // Департамент развития предпринимательства и реального сектора экономики Томской области. [2010-2014]. Дата обновления: 1.10.2011. URL: http://www.biznesdep.tomsk.gov.ru/files/doc/2011/itogi_LPK_2010.pdf (дата обращения: 20.02.2014).
- 76 Итоги работы лесопромышленного комплекса Томской области в 2011 году // Департамент развития предпринимательства и реального сектора экономики Томской области. [2010-2014]. Дата обновления: 1.10.2012. URL: http://www.biznesdep.tomsk.gov.ru/current_status_of_forestry.html (дата обращения: 20.02.2014).
- 77 Штин С.М. Озерные сапропели и их комплексное освоение. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2005. – 373 с.
- 78 Григорьев В.А., Зорин В.М. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника: справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 588 с.
- 79 Смольянинов С.И., Маслов С.Г. Термобрикети́рование торфа. – Томск: Издательство Томского университета, 1975. – 108 с.
- 80 Агроскин А.А. Химия и технология угля. – М.: «Недра», 1969. – 240 с.

- 81 Богданов Н.Н. Полукоксование и газификация торфа. – М.: Госэнергоиздат, 1947. – 268 с.
- 82 Федосеев С.Д., Чернышев А.Б. Полукоксование и газификация твердого топлива. – М.: Гостоптехиздат, 1960. – 328 с.
- 83 Равич М.Б. Эффективность использования топлива / Всесоюзный институт научной и технической информации. – М.: Наука, 1977. – 344 с.
- 84 Аронов С.Г. Химия твердых горючих ископаемых: учебное пособие. – Харьков: Изд-во Харьковского ун-та, 1960. – 371 с.
- 85 Русчев Д.Д. Химия твердого топлива / Под ред. Д.А. Розенталя. – Л.: Химия, 1976. – 254 с.
- 86 Казаков Е.И. Генезис и химическая природа пресноводных сапропелей. – Труды института горючих ископаемых. – М.: Изд-во АН СССР, 1950. – Т.2. – С. 253-266.
- 87 Химические вещества из угля / Пер. с нем. под ред. И. В. Калечица; Под ред. Ю. Фальбе. – М.: Химия, 1980. – 616 с.
- 88 Чуханов З.Ф. Некоторые проблемы топлива и энергетики. – Москва: Изд-во АН СССР, 1961. – 478 с.
- 89 Химическая энциклопедия : в 5-ти томах. – М.: Советская энциклопедия, 1988 – 1999. – 3360 с.
- 90 Томас Ч. Промышленные каталитические процессы и эффективные катализаторы. – М.: Мир, 1973. – 385 с.
- 91 Гузей Л.С. Общая химия: учебник. – М.: Изд-во МГУ, 1999. – 333 с.
- 92 Раковский В.Е. Общая химическая технология торфа. – М.: Госэнергоиздат, 1949. – 363 с.
- 93 Булышко М.Г., Петровский Е.Е. Технология торфобрикетного производства. – М.: Недра, 1968. – 312 с.
- 94 Булышко М.Г. Брикетирование торфа. – М.: Госэнергоиздат, 1962. – 304 с.
- 95 Кегель К. Брикетирование бурого угля. – М.: Углетехиздат, 1957. – 659 с.
- 96 Thiessen P.A., Schoon Th. Ein handliches Elektronen-Beugungsgerat und seine Anwendung zur Bestimmung des inneren Potentials von Ionenkristallgittern // Ztschr. f. Physik. Chemie. – 1937. – № 36. – P. 195-231.
- 97 Auerbach F., Hort W. Handbuch der physik. und techn. Mechanik. – Leipzig, 1931. – P. 116.
- 98 Smekal A. Kristallbaufehler und Aktivzentren heterogener Analyse // Ztschr. f. Elektrochemie. – 1929. – № 35. – P. 567-572.
- 99 Тайц Е.М. Кокс и железокс на основе брикетирования. – М.: Metallургия, 1965. – 173 с.
- 100 Тюренков Н.Г. Брикетирование руд. – М.: Metallургияиздат, 1947. – 128 с.
- 101 Жабо В.В. Охрана окружающей среды на ТЭС и АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 240 с.

102 Рихтер Л.А. Охрана водного и воздушного бассейнов от выбросов тепловых электростанций. – М.: Энергоиздат, 1981. – 295 с.

103 Равич Б.М., Семенов Л.В. Новое связующее для получения технологических брикетов // Сборник ЦИТИ угля. – 1962. – № 10-11.

104 Гаврилов А.Ф. Энергетика на базе новых технологий использования низкосортных топлив // ЭСКО. – 2007. – № 10 (70). – С. 235-240.

105 Кольниченко Г.И., Сиротов А.В., Тарлаков Я.В. Жидкое биотопливо: проблемы и перспективы создания и использования // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2010. – № 1. – С. 105-107.

106 Ривкина Х.И. Получение металлургического кокса из фрезерного торфа через брикетирование в период коксования // Торфяное дело. – 1934. – № 9. – С. 28-32.

107 Витт К.Н. Брикетирование древесных отходов. – М.: «Горлестехиздат», 1935. – 88 с.

108 Сапожников Л.М., Сперанская Г.В. Получение формованного металлургического и энергетического топлива путём непрерывного коксования. – М.: ВИНТИ, 1959. – 53 с.

109 Информационно-поисковая система // Федеральный институт промышленной собственности [2009-2014]. Дата обновления: 04.03.2014. URL: http://www1.fips.ru/wps/wcm/connect/content_ru/ru/inform_resources/inform_retrieval_system/ (дата обращения: 04.03.2014 г.).

110 Пат. 2496858 Россия. МПК C10L5/44; C10L5/00; C10L5/14. Способ изготовления топливных брикетов / И.В. Белов, Н.Г. Ибрагимов, И.П. Иванова и др.; заяв. 21.03.2012; опубл. 27.10.2013. – 7 с.: ил.

111 Пат. 2496857 Россия. МПК C10L5/00; C10L5/14; C10L5/32; C06D5/06. Брикетированное твердое топливо / И.В. Белов, Н.Г. Ибрагимов, В.Ф. Молчанов и др.; заяв. 01.10.2012; опубл. 27.10.2013. – 5 с.

112 Пат. 2496856 Россия. МПК C10L5/00; C10L5/14; C06D5/06. Брикетированное твердое топливо / И.В. Белов, Н.Г. Ибрагимов, Г.Н. Амарантов и др.; заяв. 01.10.2012; опубл. 27.10.2013. – 5 с.

113 Пат. 2473671 Россия. МПК C10L5/00; C10L5/14; C10L9/10; C10L5/02; C10L5/10. Способ получения угольных брикетов/ Т.В. Шевченко, Ш.А. Файрушин, Е.В. Ульрих и др.; заяв. 19.04.2011; опубл. 27.01.2013. – 6 с.

114 Пат. 2477745 Россия. МПК C10L5/00; C10L5/14; C06D5/06. Брикетированное твердое топливо / И.В. Белов, Н.Г. Ибрагимов, И.П. Иванова и др.; заяв. 09.12.2011; опубл. 20.03.2013. – 5 с.

115 Пат. 2501845 Россия. МПК C10L5/00; C10L5/10; C22B1/00. Брикет экструзионный (брэкс) коксовый / И.Ф. Курунов, А.М. Бижанов; заяв. 18.05.2012; опубл. 20.12.2013. – 6 с.

116 Пат. 2495092 Россия. МПК C10L5/00; C10L5/08; C10L5/40. Брикет экструзионный (брэкс) коксовый / И.Ф. Курунов, А.М. Бижанов, В.И. Ефимов; заяв. 18.05.2012; опубл. 10.10.2013. – 6 с.

117 Пат. 2453585 Россия. МПК C10L5/00. Твердое топливо, топливный брикет и способ его изготовления / Т.Х. Гвон; заяв. 18.06.2010; опубл. 20.06.2012. – 11 с.: ил.

118 Пат. 2130046 Россия. МПК C10L5/00; C10L5/12; C10L9/10. Способ переработки угля / В.А. Игошин, А.В. Виноградов, Т.Н. Иванова и др.; заяв. 20.11.1996; опубл. 10.05.1999.

119 Пат. 2006500 Россия. МПК C10L5/00; C10L5/02. Способ получения топливных брикетов / Л.А. Лезгин, Ю.А. Нифонтов, В.А. Блинов; заяв. 24.06.1991; опубл. 30.01.1994.

120 Пат. 2206602 Россия. МПК C10L5/02; C10L5/14; C10L5/44. Топливный брикет / В.Н. Аликин, Г.Э. Кузьмицкий, Г.Ю. Сечина и др.; заяв. 26.02.2002; опубл. 20.06.2003.

121 Пат. 2497935 Россия. МПК C10L5/00; C10L5/10; C10L5/16; C10L5/40; C10L5/44. Способ получения топливных окатышей / Д.А. Курьянов; заяв. 14.03.2011; опубл. 10.11.2013. – 7 с.

122 Пат. 2483097 Россия. МПК C10L5/00; C10L5/02; C10L5/06. Способ получения твердого топлива и твердое топливо, полученное данным способом / С. Ямамото, Т. Сигехиса, Ю. Митоу; заяв. 29.09.2009; опубл. 27.05.2013. – 18 с.: ил.

123 Пат. 2418845 Россия. МПК C10L1/18; C10L1/22; C10L5/00. Топливная композиция «Визель» и способ ее получения / С. Ямамото, Т. Сигехиса, Ю. Митоу; заяв. 29.09.2009; опубл. 27.05.2013. – 18 с.: ил.

124 Пат. 2014350 Россия. МПК C10L9/10; C10L5/00. Способ обогащения каменного угля / А. Веттор, Н. Пассарини, А. Маркотуллио; заяв. 15.12.1988; опубл. 15.06.1994.

125 Пат. 2014349 Россия. МПК C10L9/10; C10L5/00. Способ обогащения каменного угля / А. Веттор, Н. Пассарини, А. Маркотуллио; заяв. 15.12.1988; опубл. 15.06.1994.

126 Пат. 2486232 Россия. МПК C10L5/10; C10L5/02; C10L5/16; C22B1/24; C22B1/244; C22B1/248. Способ получения топливных брикетов / В.В. Пингин, А.В. Прошкин, Г.Е. Нагибин и др.; заяв. 01.03.2012; опубл. 27.06.2013. – 10 с.: ил.

127 Пат. 2205204 Россия. МПК C10L5/02. Способ получения топливных брикетов / Н.И. Буравчук, О.В. Гурьянова, Е.П. Огороков и др.; заяв. 20.11.2001; опубл. 27.05.2003.

128 Николаева Л.А., Латышев В.Г., Буренина О.Н. Топливные брикеты из бурых углей Якутии // Химия твердого топлива. – 2009. – № 2. – С. 55-59.

129 Пат. 2103328 Россия. МПК C10L5/04; C10L5/20; C10L5/00. Способ получения гранулированного твердого топлива / А.А. Кричко, В.М. Неводник, Г.И. Петров и др.; заяв. 27.05.1997; опубл. 27.01.1998.

130 Пат. 2473672 Россия. МПК C10L5/02; C10L5/14; C10L10/02. Способ получения брикетного топлива / Г.Е. Нагибин, И.О. Михалев, С.Р. Исламов и др.; заяв. 26.07.2011; опубл. 27.01.2013. – 8 с.

131 Пат. 2468070 Россия. МПК C10L5/02; C10L5/10; C10L5/14. Топливный брикет и способ его получения / И.А. Дерявский, С.П. Дворцов; заяв. 29.06.2011; опубл. 27.11.2012. – 10 с.: ил.

132 Пат. 2396306 Россия. МПК C10L5/02; C10L5/14; C10L5/44. Способ изготовления топливного брикета (варианты) / Н.И. Буравчук, О.В. Гурьянова; заяв. 23.04.2009; опубл. 10.08.2010. – 12 с.

133 Пат. 2187542 Россия. МПК C10L5/10; C10L5/12; C10L5/44. Топливный брикет (варианты) / В.В. Тумаркин; заяв. 25.04.2001; опубл. 20.08.2002.

134 Пат. 2402597 Россия. МПК C10L5/42; C10L5/44. Формованное топливо и способ его получения / А.Н. Иванкин, М.И. Бабурина, Т.В. Шульгина; заяв. 02.10.2007; опубл. 27.10.2010. – 7 с.

135 Пат. 19384 Россия (полезная модель). МПК C10L5/42; C10L5/44. Топливный брикет (варианты) / В.В. Тумаркин; заяв. 26.04.2001; опубл. 27.08.2001. – 7 с.: ил.

136 Судакова И.Г., Иванченко Н.М., Кузнецов Б.Н. Получение древесных топливных брикетов с использованием связующих из суберина березовой коры // Химия растительного сырья. – 2008. – № 2. – С. 31-34.

137 Пат. 2437921 Россия. МПК C10L5/02; C10L5/04; C10L5/00. Способ получения брикетов из углеродосодержащих материалов / О.А. Гогенко, А.В. Сидорский, О.И. Толстун и др.; заяв. 05.04.2010; опубл. 27.12.2011. – 6 с.

138 Пат. 2364617 Россия. МПК C10L5/00; B30B9/12; B30B11/24; B27N3/28. Способ получения брикетов и установка для изготовления брикетов / А.Н. Пыщечкин, С.В. Коняшин; заяв. 01.03.2007; опубл. 20.08.2009. – 8 с.: ил.

139 Пат. 2186093 Россия. МПК C10L5/00. Способ получения брикетов и установка для изготовления брикетов / В.Е. Зайденварг, С.Б. Мяков, Г.Б. Фрайман; заяв. 12.02.2001; опубл. 27.07.2002.

140 Исламов С.Р. Переработка низкосортных углей в высококалорийное топливо // Уголь. – 2012. – № 3. – С. 64-66.

141 Исламов С.Р. Энерготехнологическая переработка углей: монография. – Красноярск: «Поликор», 2010. – 224 с.

142 Пат. 2147029 Россия. МПК C10L5/12; C10L5/14; C10L5/16; C10L5/40. Топливный брикет и способ его получения / В.Г. Лурий; заяв. 05.04.1999; опубл. 27.03.2000.

143 Манжай В.Н., Фуфаева М.С., Егорова Л.А. Топливные брикеты на основе мелкодисперсных частиц кокса и криогелей поливинилового спирта // Химия твёрдого топлива. – 2013. – № 1. – С. 44-47.

144 Пат. 2174535 Россия. МПК C10L5/16. Способ получения торфяных топливных брикетов и состав для брикетирования / Р.К. Агафонов, Е.Б. Ивашкин, М.В. Кнатько и др.; заяв. 06.12.1999; опубл. 10.10.2001.

145 Пат. 2130047 Россия. МПК C10L5/02; C10L5/44; C10L5/12; C10L5/14. Топливный брикет и способ его получения / В.Г. Лурий; заяв. 06.04.1998; опубл. 10.05.1999.

146 Бернатонис В.К., Бернатонис П.В. Концепция освоения ресурсов торфа в современных экономических условиях (на примере Томской области) // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 1. – С. 161-163.

147 Воропаев С.А., Табакаев 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.

148 Кызычаков В.С., Нестерова М.А., Табакаев Р.Б. Сравнение характеристик твердых топлив по степени углефикации // Современные техника и технологии: Сб. трудов XVIII Междунар. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: ТПУ, 2012. – Т. 3. – С. 259-260.

149 Табакаев Р.Б., Зубрицкая Я.А., Гергелижиу 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.

150 Николаева В.И., Буваков К.В., Табакаев Р.Б. Методы исследования свойств твердых топлив: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – 92 с.

151 ГОСТ Р 8.736-2011. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. – Введ. 2013-01-01. – М.: Стандартинформ, 2013.

152 ГОСТ Р 52917-2008. Топливо твердое минеральное. Методы определения влаги в аналитической пробе. – Введ. 2009-01-01. – М.: Стандартинформ, 2008.

153 ГОСТ Р 52911-2008. Топливо твердое минеральное. Методы определения общей влаги. – Введ. 2009-01-01. – М.: Стандартинформ, 2008.

154 ГОСТ 11022-95. Топливо твердое минеральное. Методы определения зольности. – Введ. 1997-01-01. – М.: Стандартинформ, 2006.

155 ГОСТ 6382-2001. Топливо твердое минеральное. Методы определения выхода летучих веществ. – Введ. 2003-01-01. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2002.

156 ГОСТ 147-95. Топливо твердое минеральное. Определение высшей теплоты сгорания и вычисление низшей теплоты сгорания. – Введ. 1997-01-01. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2002.

157 Царев Н.И., Царев В.И., Катраков И.Б. Практическая газовая хроматография: учебно-методическое пособие. – Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2000. – 156 с.

158 Хроматографические аппаратно-программные комплексы СКБ Хроматэк: руководство пользователя 214.00045-51И.

159 ГОСТ 21290-75. Брикетты угольные. Метод определения водопоглощения. – Введ. 1977-07-01. – М.: Издательство стандартов, 1986.

160 ГОСТ 21289-75. Брикетты угольные. Методы определения механической прочности. – Введ. 1977-07-01. – М.: Издательство стандартов, 1986.

161 ГОСТ 18132-72. Брикетты и полубрикетты торфяные. Метод определения механической прочности. – Введ. 1974-01-01. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2000.

162 Плотность топлива // Топливо [2014-2014]. Дата обновления: 17.07.2014. URL: <http://toplivko.ru/reaktivnye-i-dizelnye-topliva/plotnost-topliva.html> (дата обращения: 17.07.2014 г.).

163 Табакаев Р.Б., Казаков А.В., Гергелижиу 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.

164 РМГ 61-2010. Показатели точности, правильности, прецизионности методик количественного химического анализа. Методы оценки. – Введ. 2012-09-01. – М.: Стандартиформ, 2012.

165 Кефер А.Е., Плахова Т.М. Исследование оптимальных параметров термической обработки исходного сырья применительно к технологии производства универсальных топливных брикетов на основе торфа // Современные техника и технологии: Сб. трудов XVII Междунар. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: ТПУ, 2011. – Т. 3. – С. 205-206.

166 Кефер А.Е., Воропаев С.А. Исследование термической обработки торфов Томской области применительно к технологии производства универсальных топливных брикетов // Энергетика: эффективность, надежность, безопасность: труды XIII Всерос. студ. научно-техн. – Томск: СПБ Графикс, 2011. – Т. 2. – С. 50-52.

167 Сазонова Е.А., Бардашова Н.В. Исследование характеристик продуктов термической обработки применительно к технологии производства брикетного топлива // Современные техника и технологии: Сб. трудов XVII Междунар. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: ТПУ, 2011. – Т. 3. – С. 261-262.

168 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.

169 Казаков А.В. Термическая конверсия низкосортных топлив применительно к газогенерирующим установкам: диссертация ... канд. техн. наук. – Томск: Б.и., 2002. – 159 с.

170 Табакаев Р.Б., Зубрицкая Я.А., Чесноков Д.В., Зайцев А.С. Связь степени метаморфизма низкосортных топлив и характеристик их топливного газа // Теплофизические основы энергетических технологий: сб. науч. трудов III Всерос. научно-практ. конф. с междунар. участием. – Томск: Изд-во ТПУ, 2012. – С. 240-243.

171 Нестерова М.А., Чесноков Д.В., Зайцев А.С. Исследование топливного газа применительно к технологии производства топливных брикетов из торфа // Энергетика: эффективность, надежность, безопасность: труды XIV Междунар. студ. научно-техн. семинара. – Томск: Изд-во СПб Графикас, 2012. – Т. 2. – С. 19-23.

172 Чесноков Д.В., Нестерова М.А., Гергелижю П.С. Исследование топливного газа применительно к технологии производства топливных брикетов из бурого угля // Энергетика: эффективность, надежность, безопасность: труды XIV Междунар. студ. научно-техн. семинара. – Томск: Изд-во СПб Графикас, 2012. – Т. 2. – С. 15-19.

173 Пат. 2498166 Россия. МПК F24H1/00. Устройство для индивидуального теплоснабжения / А.С. Заворин, А.В. Казаков, Р.Б. Табакаев. Заявлено 02.05.2012. Опубл. 10.11.2013.

174 Казаков А.В., Табакаев Р.Б., Новосельцев П.Ю., Баскакова А.С., Уваров Е.А. Методические положения по исследованию принципа когенерации при внутрицикловой конверсии низкосортного топлива // Теплофизические основы энергетических технологий: сб. науч. трудов IV Всерос. научно-практ. конф. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – С. 297-300.

175 Казаков А.В., Заворин А.С., Табакаев Р.Б., Новосельцев П.Ю. Модель когенерационной энергоустановки с топливным элементом на основе внутрицикловой конверсии органического сырья для автономного энергообеспечения (методическое пособие по работе модели): учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – 82 с.

176 Бардашова Н.В., Беккер Е.Г. Исследование топливных характеристик брикетного образца // Современные техника и технологии: Сб. трудов XVII Междунар. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: ТПУ, 2011. – Т. 3. – С. 189-190.

177 Бардашова Н.В., Кефер А.Е., Плахова Т.М. Исследование теплотехнических и прочностных характеристик топливных брикетов применительно к технологии производства

универсальных топливных брикетов // Энергетика: эффективность, надежность, безопасность: труды XIII Всерос. студ. научно-техн. семинара. – Томск: СПБ Графикс, 2011. – Т. 2. – С. 45-49.

178 Табакаев 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.

179 Кнунянц И.Л. Краткая химическая энциклопедия: В 5 т. – М.: Советская энциклопедия, 1961. – Т. 1. – 1262 с.

180 Корольченко А.Я., Корольченко Д.А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: справочник в 2-х ч. – М.: Асс. «Пожнаука», 2004. – Ч. 1. – 713 с.

181 Казаков А.В., Табакаев 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.

182 ГОСТ Р 54248-2010. Брикеты и пеллеты (гранулы) торфяные для коммунально-бытовых нужд. Технические условия. – Введ. 2012-07-01. – М.: Стандартиформ, 2012.

183 Табакаев Р.Б., Казаков А.В., Васильева А.В. Оценка целесообразности теплотехнологической переработки местных низкосортных топлив Томской области в топливные брикеты // Теплофизические основы энергетических технологий: сб. науч. трудов IV Всерос. научно-практ. конф. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – С. 294-297.

184 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.

185 Комплекс по производству топливных брикетов из торфа (типовое бизнес-досье ООО РБК «ВЛАДИМИР»). – Владимир: ООО РБК «ВЛАДИМИР», 2009. – 18 с.

186 Автоматическая линия брикетирования ВАС (коммерческое предложение «Интервесп»). – М: «Интервесп», 2011. – 12 с.

187 Брус И.Д., Тураев Н.С. Расчет ленточного транспортера : учебно-методические указания по самостоятельной работе по курсу «Процессы и аппараты химической технологии». – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 23 с.

188 Брус И.Д., Тураев Н.С. Расчет шнекового транспортера: учебно-методические указания по самостоятельной работе по курсу «Процессы и аппараты химической технологии». – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 13 с.

189 Лыков М.В., Леончик Б.И. Распылительные сушилки. Основы теории и расчета. – М.: Издательство «Машиностроение», 1966. – 332 с.: ил.

190 Бородин В.А., Дитякин Ю.Ф., Клячко Л.А., Ягодкин В. И. Распыливание жидкостей. – М.: Издательство «Машиностроение», 1967. – 264 с.

191 Протокол № АЯ-103 пр от 28 марта 2013 года заседания рабочей группы по подготовке комплекса мер, направленных на создание условий по использованию торфа в сфере производства тепловой и электрической энергии // Министерство энергетики Российской Федерации [2008-2014]. Дата обновления: 28.03.2013. URL: <http://minenergo.gov.ru/activity/vie/> (дата обращения: 06.02.2014 г.).

192 Казаков А.В., Заворин А.С., Попов Р.И. Автотермический пиролиз торфа в условиях свободного перемещения в слое // Интеллектуальные энергосистемы: материалы II Межд. молод. форума. – Томск: Издательство ТПУ, 2014. – Т. 1. – С. 275-278.

193 Kazakov A.V., Plakhova T.M., Popov R.I. Autothermal pyrolysis of peat in conditions of free movement in layer // MATEC Web of Conferences. – 2014. – Vol. 19. – P. 1-4 (01019).

194 Кулеш Р.Н., Субботин А.Н. Экспериментальное исследование параметров зажигания торфа в условиях его промышленного складирования // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 4. – С. 15-20.

195 Субботин А.Н., Кулеш Р.Н. Исследование механизма и минимальной энергии зажигания торфа источником тепла // Пожарная безопасность. – 2009. – № 4. – С. 77–83.

196 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., Табакаев 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.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Определение погрешности измерений

Таблица А.1 – Оценка погрешности измерений теплотехнических характеристик исследуемых низкосортных топлив

Вид топлива	Среднее значение величины	Единицы измерения величины	Предел воспроизводимости при P=0,95, R	Стандартное отклонение воспроизводимости при P=0,95, σ_R	Показатель точности (границы абсолютной погрешности измерений при P=0,95), $\pm\Delta$
<i>влажность на рабочую массу (W_f^r)</i>					
суховской торф	59,6	%	0,6	0,2	0,4
аркадьеvский торф	38,2				
кандинский торф	72,8				
карасевский сапропель	67,0				
<i>зольность на сухую массу (A^d)</i>					
суховской торф	39,5	%	1,2	0,4	0,8
аркадьеvский торф	31,5		1,0	0,4	0,7
кандинский торф	9,1		0,3	0,1	0,2
древесная щепа	0,6		0,3	0,1	0,2
таловский уголь	25,9		0,8	0,3	0,6
карасевский сапропель	38,4		1,2	0,4	0,8
<i>выход летучих веществ на сухую беззольную массу (V^{daf})</i>					
суховской торф	69,3	%	2,8	1,0	2,0
аркадьеvский торф	71,0		2,8	1,0	2,0
кандинский торф	71,6		2,9	1,0	2,1
древесная щепа	91,8		3,7	1,3	2,6
таловский уголь	63,2		2,5	0,9	1,8
карасевский сапропель	84,8		3,4	1,2	2,4
<i>теплота сгорания на сухую беззольную массу (Q^{daf})</i>					
суховской торф	12,8	МДж/кг	0,3	0,1	0,2
аркадьеvский торф	15,2				
кандинский торф	19,8				
древесная щепа	19,1				
таловский уголь	27,1				
карасевский сапропель	12,5				

Таблица А.2 – Оценка погрешности измерений элементного состава суховского торфа

Результат параллельного измерения X, %	Среднее арифметическое результатов параллельных измерений \bar{X} , %	Среднее квадратическое отклонение результатов измерений $S(\bar{X})$ при P=0,95, %	Доверительные границы случайной погрешности результатов измерений $\pm \Delta$ при P=0,95, %	Среднее арифметическое значение результатов измерений в пересчете на сухую беззольную массу \bar{X}^{daf} при P=0,95, %	Доверительная граница случайной погрешности P=0,95 $\pm \Delta^{daf}$ в пересчете на сухую беззольную массу при P=0,95, %
Массовая доля углерода C					
37,10	36,27	0,30	0,30	59,95	1,36
35,87					
36,77					
35,47					
36,15					

Массовая доля водорода <i>H</i>					
3,645	3,618	0,011	0,030	5,98	0,05
3,582					
3,610					
3,634					
3,620					
Массовая доля азота <i>N</i>					
1,67	1,63	0,02	0,06	2,69	0,10
1,61					
1,60					
1,57					
1,69					
Массовая доля серы <i>S</i>					
0,064	0,057	0,002	0,005	0,09	0,01
0,056					
0,059					
0,053					
0,055					
Массовая доля кислорода <i>O</i>					
18,021	18,924	0,313	0,870	31,29	1,44
19,382					
18,461					
19,773					
18,985					

Таблица А.3 – Оценка погрешности измерений элементного состава аркадьевского торфа

Результат параллельного измерения X , %	Среднее арифметическое результатов параллельных измерений \bar{X} , %	Среднее квадратическое отклонение результатов измерений $S(\bar{X})$ при $P=0,95$, %	Доверительные границы случайной погрешности результатов измерений $\pm \Delta$ при $P=0,95$, %	Среднее арифметическое значение результатов измерений в пересчете на сухую беззольную массу \bar{X}^{daf} при $P=0,95$, %	Доверительная граница случайной погрешности $P=0,95$ $\pm \Delta^{daf}$ в пересчете на сухую беззольную массу при $P=0,95$, %
Массовая доля углерода <i>C</i>					
35,82	34,96	0,32	1,02	51,03	1,48
34,65					
34,34					
35,01					
Массовая доля водорода <i>H</i>					
3,998	4,117	0,049	0,155	6,01	0,23
4,217					
4,172					
4,082					
Массовая доля азота <i>N</i>					
3,24	3,16	0,04	0,12	4,62	0,17
3,07					
3,14					
3,20					
Массовая доля серы <i>S</i>					
0,106	0,105	0,006	0,018	0,15	0,03
0,119					
0,104					
0,091					

Результат параллельного измерения X , %	Среднее арифметическое результатов параллельных измерений \bar{X} , %	Среднее квадратическое отклонение результатов измерений $S(\bar{X})$ при $P=0,95$, %	Доверительные границы случайной погрешности результатов измерений $\pm \Delta$ при $P=0,95$, %	Среднее арифметическое значение результатов измерений в пересчете на сухую беззольную массу \bar{X}^{daf} при $P=0,95$, %	Доверительная граница случайной погрешности $P=0,95$ $\pm \Delta^{daf}$ в пересчете на сухую беззольную массу при $P=0,95$, %
Массовая доля кислорода O					
25,336	26,160	0,303	0,965	38,19	1,41
26,444					
26,744					
26,117					

Таблица А.4 – Оценка погрешности измерений элементного состава кандинского торфа

Результат параллельного измерения X , %	Среднее арифметическое результатов параллельных измерений \bar{X} , %	Среднее квадратическое отклонение результатов измерений $S(\bar{X})$ при $P=0,95$, %	Доверительные границы случайной погрешности результатов измерений $\pm \Delta$ при $P=0,95$, %	Среднее арифметическое значение результатов измерений в пересчете на сухую беззольную массу \bar{X}^{daf} при $P=0,95$, %	Доверительная граница случайной погрешности $P=0,95$ $\pm \Delta^{daf}$ в пересчете на сухую беззольную массу при $P=0,95$, %
Массовая доля углерода C					
52,30	52,29	0,06	0,20	57,52	0,22
52,40					
52,12					
52,33					
Массовая доля водорода H					
5,098	5,104	0,040	0,127	5,61	0,14
5,157					
4,992					
5,167					
Массовая доля азота N					
2,02	1,97	0,07	0,22	2,17	0,24
1,97					
1,79					
2,11					
Массовая доля серы S					
0,180	0,138	0,015	0,049	0,15	0,05
0,126					
0,139					
0,107					
Массовая доля кислорода O					
31,302	31,41	0,155	0,494	34,55	0,54
31,247					
31,859					
31,186					

Таблица А.5 – Оценка погрешности измерений элементного состава таловского угля

Результат параллельного измерения X , %	Среднее арифметическое результатов параллельных измерений \bar{X} , %	Среднее квадратическое отклонение результатов измерений $S(\bar{X})$ при $P=0,95$, %	Доверительные границы случайной погрешности результатов измерений $\pm \Delta$ при $P=0,95$, %	Среднее арифметическое значение результатов измерений в пересчете на сухую беззольную массу \bar{X}^{daf} при $P=0,95$, %	Доверительная граница случайной погрешности $P=0,95 \pm \Delta^{daf}$ в пересчете на сухую беззольную массу при $P=0,95$, %
Массовая доля углерода C					
50,35	50,67	0,09	0,25	68,38	0,34
50,85					
50,69					
50,59					
50,86					
Массовая доля водорода H					
4,615	4,652	0,021	0,058	6,28	0,08
4,655					
4,677					
4,596					
4,716					
Массовая доля азота N					
0,44	0,46	0,01	0,03	0,62	0,04
0,47					
0,45					
0,46					
0,46					
Массовая доля серы S					
0,381	0,327	0,030	0,095	0,44	0,13
0,373					
0,294					
0,261					
Массовая доля кислорода O					
18,314	18,062	0,123	0,392	24,28	0,53
17,752					
17,989					
18,193					

Таблица А.6 – Оценка погрешности измерений элементного состава сапропеля

Результат параллельного измерения X , %	Среднее арифметическое результатов параллельных измерений \bar{X} , %	Среднее квадратическое отклонение результатов измерений $S(\bar{X})$ при $P=0,95$, %	Доверительные границы случайной погрешности результатов измерений $\pm \Delta$ при $P=0,95$, %	Среднее арифметическое значение результатов измерений в пересчете на сухую беззольную массу \bar{X}^{daf} при $P=0,95$, %	Доверительная граница случайной погрешности $P=0,95 \pm \Delta^{daf}$ в пересчете на сухую беззольную массу при $P=0,95$, %
Массовая доля углерода C					
31,20	31,69	0,20	0,56	51,45	0,91
31,31					
32,20					
32,10					
31,65					

Результат параллельного измерения X , %	Среднее арифметическое результатов параллельных измерений \bar{X} , %	Среднее квадратическое отклонение результатов измерений $S(\bar{X})$ при $P=0,95$, %	Доверительные границы случайной погрешности результатов измерений $\pm \Delta$ при $P=0,95$, %	Среднее арифметическое значение результатов измерений в пересчете на сухую беззольную массу \bar{X}^{daf} при $P=0,95$, %	Доверительная граница случайной погрешности $P=0,95 \pm \Delta^{daf}$ в пересчете на сухую беззольную массу при $P=0,95$, %
Массовая доля водорода H					
3,159	3,233	0,034	0,093	5,25	0,15
3,180					
3,315					
3,312					
3,197					
Массовая доля азота N					
2,16	2,20	0,03	0,08	3,57	0,12
2,15					
2,18					
2,30					
2,20					
Массовая доля серы S					
0,137	0,136	0,004	0,012	0,22	0,02
0,143					
0,139					
0,125					
Массовая доля кислорода O					
24,944	24,323	0,323	1,028	39,51	0,15
24,817					
23,766					
23,763					

Таблица А.7 – Оценка погрешности измерений элементного состава древесной щепы

Результат параллельного измерения X , %	Среднее арифметическое результатов параллельных измерений \bar{X} , %	Среднее квадратическое отклонение результатов измерений $S(\bar{X})$ при $P=0,95$, %	Доверительные границы случайной погрешности результатов измерений $\pm \Delta$ при $P=0,95$, %	Среднее арифметическое значение результатов измерений в пересчете на сухую беззольную массу \bar{X}^{daf} при $P=0,95$, %	Доверительная граница случайной погрешности $P=0,95 \pm \Delta^{daf}$ в пересчете на сухую беззольную массу при $P=0,95$, %
Массовая доля углерода C					
50,71	50,56	0,12	0,38	50,87	0,39
50,81					
50,28					
50,45					
Массовая доля водорода H					
6,181	6,191	0,009	0,028	6,23	0,03
6,204					
6,172					
6,208					
Массовая доля азота N					
0,20	0,20	0,00	0,01	0,20	0,01
0,19					
0,20					
0,21					

Результат параллельного измерения X , %	Среднее арифметическое результатов параллельных измерений \bar{X} , %	Среднее квадратическое отклонение результатов измерений $S(\bar{X})$ при $P=0,95$, %	Доверительные границы случайной погрешности результатов измерений $\pm \Delta$ при $P=0,95$, %	Среднее арифметическое значение результатов измерений в пересчете на сухую беззольную массу \bar{X}^{daf} при $P=0,95$, %	Доверительная граница случайной погрешности $P=0,95$ $\pm \Delta^{daf}$ в пересчете на сухую беззольную массу при $P=0,95$, %
Массовая доля серы S					
0,000	0,000	0,000	0,000	0,00	0,00
0,000					
0,000					
0,000					
Массовая доля кислорода O					
42,309	42,446	0,122	0,390	42,70	0,39
42,196					
42,748					
42,532					

Таблица А.8 – Оценка погрешности измерений выхода продуктов пиролиза суховского торфа

Результат параллельного измерения X , %	Среднее арифметическое результатов параллельных измерений \bar{X} , %	Среднее квадратическое отклонение результатов измерений $S(\bar{X})$ при $P=0,95$, %	Доверительные границы случайной погрешности результатов измерений $\pm \Delta$ при $P=0,95$, %
Выход углеродистого остатка			
65,6	60,7	2,5	7,9
57,5			
59,0			
Выход пиролизного конденсата			
19,8	20,3	0,5	1,6
21,3			
19,9			
– выход пирогенетической влаги			
15,9	16,4	0,3	1,0
17,0			
16,3			
– выход пиролизной смолы			
3,9	3,9	0,2	0,6
4,3			
3,6			
Выход топливного газа			
14,7	19,0	2,2	6,9
21,2			
21,2			

Таблица А.9 – Оценка погрешности измерений выхода продуктов пиролиза аркадьевского торфа

Результат параллельного измерения X , %	Среднее арифметическое результатов параллельных измерений \bar{X} , %	Среднее квадратическое отклонение результатов измерений $S(\bar{X})$ при $P=0,95$, %	Доверительные границы случайной погрешности результатов измерений $\pm \Delta$ при $P=0,95$, %
Выход углеродистого остатка			
74,0	74,8	0,6	1,9
76,0			
74,5			

Результат параллельного измерения X , %	Среднее арифметическое результатов параллельных измерений \bar{X} , %	Среднее квадратическое отклонение результатов измерений $S(\bar{X})$ при $P=0,95$, %	Доверительные границы случайной погрешности результатов измерений $\pm \Delta$ при $P=0,95$, %
Выход пиролизного конденсата			
12,0	12,0	0,2	0,7
11,6			
12,4			
– выход пирогенетической влаги			
6,7	7,2	0,3	1,0
7,4			
7,6			
– выход пиролизной смолы			
5,3	4,8	0,3	1,0
4,2			
4,8			
Выход топливного газа			
14,0	13,2	0,5	1,5
12,4			
13,1			

Таблица А.10 – Оценка погрешности измерений выхода продуктов пиролиза кандинского торфа

Результат параллельного измерения X , %	Среднее арифметическое результатов параллельных измерений \bar{X} , %	Среднее квадратическое отклонение результатов измерений $S(\bar{X})$ при $P=0,95$, %	Доверительные границы случайной погрешности результатов измерений $\pm \Delta$ при $P=0,95$, %
Выход углеродистого остатка			
43,5	43,4	0,2	0,5
43,3			
43,8			
43,0			
Выход пиролизного конденсата			
28,0	26,2	0,8	2,4
24,8			
26,8			
25,0			
– выход пирогенетической влаги			
21,0	19,9	0,4	1,3
19,3			
19,8			
19,3			
– выход пиролизной смолы			
7,0	6,3	0,4	1,3
5,5			
7,0			
5,7			
Выход топливного газа			
28,5	30,4	0,9	2,9
31,9			
29,4			
32,0			

Таблица А.11 – Оценка погрешности измерений выхода продуктов пиролиза таловского угля

Результат параллельного измерения X , %	Среднее арифметическое результатов параллельных измерений \bar{X} , %	Среднее квадратическое отклонение результатов измерений $S(\bar{X})$ при $P=0,95$, %	Доверительные границы случайной погрешности результатов измерений $\pm \Delta$ при $P=0,95$, %
Выход углеродистого остатка			
58,8	58,8	0,9	3,0
56,2			
60,1			
60,3			
Выход пиролизного конденсата			
19,0	19,0	0,5	1,5
19,9			
19,4			
17,7			
– выход пирогенетической влаги			
10,6	10,8	0,2	0,7
11,4			
10,7			
10,4			
– выход пиролизной смолы			
8,4	8,2	0,3	1,0
8,5			
8,7			
7,3			
Выход топливного газа			
22,2	22,2	0,7	2,7
23,9			
20,5			
22,0			

Таблица А.12 – Оценка погрешности измерений выхода продуктов пиролиза сапропеля

Результат параллельного измерения X , %	Среднее арифметическое результатов параллельных измерений \bar{X} , %	Среднее квадратическое отклонение результатов измерений $S(\bar{X})$ при $P=0,95$, %	Доверительные границы случайной погрешности результатов измерений $\pm \Delta$ при $P=0,95$, %
Выход углеродистого остатка			
67,2	67,4	0,6	1,8
65,8			
68,3			
68,1			
Выход пиролизного конденсата			
14,5	14,1	0,8	2,4
16,1			
12,9			
13,0			
– выход пирогенетической влаги			
9,5	9,5	0,5	1,7
11,0			
8,7			
8,8			
– выход пиролизной смолы			
5,0	4,6	0,2	0,8
5,1			
4,2			
4,2			

Результат параллельного измерения X , %	Среднее арифметическое результатов параллельных измерений \bar{X} , %	Среднее квадратическое отклонение результатов измерений $S(\bar{X})$ при $P=0,95$, %	Доверительные границы случайной погрешности результатов измерений $\pm \Delta$ при $P=0,95$, %
Выход топливного газа			
18,3	18,5	0,2	0,6
18,1			
18,8			
18,9			

Таблица А.13 – Оценка погрешности измерений выхода продуктов пиролиза древесной щепы

Результат параллельного измерения X , %	Среднее арифметическое результатов параллельных измерений \bar{X} , %	Среднее квадратическое отклонение результатов измерений $S(\bar{X})$ при $P=0,95$, %	Доверительные границы случайной погрешности результатов измерений $\pm \Delta$ при $P=0,95$, %
Выход углеродистого остатка			
32,0	31,1	1,0	3,3
32,2			
29,0			
Выход пиролизного конденсата			
21,1	23,6	1,4	4,4
24,0			
25,8			
– выход пирогенетической влаги			
21,1	23,6	1,4	4,4
24,0			
25,8			
– выход пиролизной смолы			
0,0	0,0	0,0	0,0
0,0			
0,0			
Выход топливного газа			
46,9	45,3	0,9	2,8
43,9			
45,2			

Таблица А.14 – Оценка погрешности измерений теплотехнических характеристик полукокса

Вид топлива	Среднее значение величины	Единицы измерения величины	Предел воспроизводимости при $P=0,95$, R	Стандартное отклонение воспроизводимости при $P=0,95$, σ_R	Показатель точности (границы абсолютной погрешности измерений при $P=0,95$), $\pm \Delta$
<i>зольность на сухую массу (A^d)</i>					
суховской торф	48,8	%	1,5	0,5	1,1
аркадьеvский торф	61,9		1,9	0,7	1,3
кандинский торф	22,9		0,7	0,2	0,5
таловский уголь	38,5		1,2	0,4	0,8
карасевский сапрпель	56,5		1,7	0,6	1,2
древесная щепа	3,5		0,3	0,1	0,2
<i>выход летучих веществ на сухую беззольную массу (V^{daf})</i>					
суховской торф	25,1	%	0,3	0,1	0,2
аркадьеvский торф	18,6				
кандинский торф	23,3				
таловский уголь	12,7				
карасевский сапрпель	19,8				
древесная щепа	15,7				

Вид топлива	Среднее значение величины	Единицы измерения величины	Предел воспроизводимости при P=0,95, R	Стандартное отклонение воспроизводимости при P=0,95, σ_R	Показатель точности (границы абсолютной погрешности измерений при P=0,95), $\pm\Delta$
<i>низшая теплота сгорания на сухую беззольную массу (Q_i^r)</i>					
суховской торф	14,4	МДж/кг	0,3	0,1	0,2
аркадьеvский торф	11,1				
кандинский торф	21,5				
таловский уголь	18,2				
карасевский сапропель	10,0				
древесная щепа	31,9				

Таблица А.15 – Оценка погрешности измерений состава полукокса из суховского торфа

Результат параллельного измерения X, %	Среднее арифметическое результатов параллельных измерений \bar{X} , %	Среднее квадратическое отклонение результатов измерений $S(\bar{X})$ при P=0,95, %	Доверительные границы случайной погрешности результатов измерений $\pm \Delta$ при P=0,95, %	Среднее арифметическое значение результатов измерений в пересчете на сухую беззольную массу \bar{X}^{daf} при P=0,95, %	Доверительная граница случайной погрешности P=0,95 $\pm \Delta^{daf}$ в пересчете на сухую беззольную массу при P=0,95, %
Массовая доля углерода C					
39,78	39,89	0,17	0,53	77,90	1,03
39,93					
39,52					
40,31					
Массовая доля водорода H					
1,564	1,630	0,032	0,100	3,18	0,20
1,641					
1,712					
1,603					
Массовая доля азота N					
1,62	1,62	0,01	0,04	3,17	0,07
1,64					
1,59					
1,64					
Массовая доля серы S					
0,129	0,122	0,007	0,022	0,24	0,04
0,138					
0,107					
0,115					
Массовая доля кислорода O					
8,107	7,940	0,161	0,513	15,51	1,00
7,851					
8,271					
7,532					

Таблица А.16 – Оценка погрешности измерений состава полукокса из аркадьеваского торфа

Результат параллельного измерения X , %	Среднее арифметическое результатов параллельных измерений \bar{X} , %	Среднее квадратическое отклонение результатов измерений $S(\bar{X})$ при $P=0,95$, %	Доверительные границы случайной погрешности результатов измерений $\pm \Delta$ при $P=0,95$, %	Среднее арифметическое значение результатов измерений в пересчете на сухую беззольную массу \bar{X}^{daf} при $P=0,95$, %	Доверительная граница случайной погрешности $P=0,95 \pm \Delta^{daf}$ в пересчете на сухую беззольную массу при $P=0,95$, %
Массовая доля углерода C					
30,80	30,77	0,08	0,22	80,76	0,57
30,98					
30,84					
30,51					
30,71					
Массовая доля водорода H					
1,097	1,101	0,003	0,008	2,89	0,02
1,110					
1,094					
1,101					
1,102					
Массовая доля азота N					
1,44	1,44	0,01	0,02	3,78	0,06
1,47					
1,45					
1,43					
1,42					
Массовая доля серы S					
0,110	0,122	0,015	0,041	0,32	0,11
0,172					
0,118					
0,082					
0,128					
Массовая доля кислорода O					
4,653	4,667	0,099	0,275	12,25	0,72
4,368					
4,598					
4,977					
4,740					

Таблица А.17 – Оценка погрешности измерений состава полукокса из кандинского торфа

Результат параллельного измерения X , %	Среднее арифметическое результатов параллельных измерений \bar{X} , %	Среднее квадратическое отклонение результатов измерений $S(\bar{X})$ при $P=0,95$, %	Доверительные границы случайной погрешности результатов измерений $\pm \Delta$ при $P=0,95$, %	Среднее арифметическое значение результатов измерений в пересчете на сухую беззольную массу \bar{X}^{daf} при $P=0,95$, %	Доверительная граница случайной погрешности $P=0,95 \pm \Delta^{daf}$ в пересчете на сухую беззольную массу при $P=0,95$, %
Массовая доля углерода C					
62,91	63,40	0,26	0,82	82,23	1,06
64,03					
63,6					
63,06					

Результат параллельного измерения X , %	Среднее арифметическое результатов параллельных измерений \bar{X} , %	Среднее квадратическое отклонение результатов измерений $S(\bar{X})$ при $P=0,95$, %	Доверительные границы случайной погрешности результатов измерений $\pm \Delta$ при $P=0,95$, %	Среднее арифметическое значение результатов измерений в пересчете на сухую беззольную массу \bar{X}^{daf} при $P=0,95$, %	Доверительная граница случайной погрешности $P=0,95 \pm \Delta^{daf}$ в пересчете на сухую беззольную массу при $P=0,95$, %
Массовая доля водорода H					
3,117	3,123	0,010	0,032	4,05	0,04
3,146					
3,129					
3,098					
Массовая доля азота N					
3,10	3,05	0,02	0,06	3,96	0,08
3,07					
3,01					
3,03					
Массовая доля серы S					
0,189	0,162	0,020	0,64	0,21	0,08
0,203					
0,121					
0,134					
Массовая доля кислорода O					
7,784	7,363	0,269	0,858	9,56	1,11
6,651					
7,240					
7,778					

Таблица А.18 – Оценка погрешности измерений состава полукокса из таловского угля

Результат параллельного измерения X , %	Среднее арифметическое результатов параллельных измерений \bar{X} , %	Среднее квадратическое отклонение результатов измерений $S(\bar{X})$ при $P=0,95$, %	Доверительные границы случайной погрешности результатов измерений $\pm \Delta$ при $P=0,95$, %	Среднее арифметическое значение результатов измерений в пересчете на сухую беззольную массу \bar{X}^{daf} при $P=0,95$, %	Доверительная граница случайной погрешности $P=0,95 \pm \Delta^{daf}$ в пересчете на сухую беззольную массу при $P=0,95$, %
Массовая доля углерода C					
52,15	50,01	1,09	3,45	81,32	5,61
49,29					
48,59					
Массовая доля водорода H					
2,653	2,608	0,024	0,076	4,24	0,12
2,598					
2,571					
Массовая доля азота N					
0,66	0,66	0,00	0,01	1,07	0,02
0,66					
0,65					
Массовая доля серы S					
0,441	0,471	0,025	0,080	0,77	0,13
0,520					
0,453					

Результат параллельного измерения X , %	Среднее арифметическое результатов параллельных измерений \bar{X} , %	Среднее квадратическое отклонение результатов измерений $S(\bar{X})$ при $P=0,95$, %	Доверительные границы случайной погрешности результатов измерений $\pm \Delta$ при $P=0,95$, %	Среднее арифметическое значение результатов измерений в пересчете на сухую беззольную массу \bar{X}^{daf} при $P=0,95$, %	Доверительная граница случайной погрешности $P=0,95$ $\pm \Delta^{daf}$ в пересчете на сухую беззольную массу при $P=0,95$, %
Массовая доля кислорода O					
5,596	7,755	1,104	3,513	12,60	5,71
8,432					
9,236					

Таблица А.19 – Оценка погрешности измерений элементного состава полукокса из сапропеля

Результат параллельного измерения X , %	Среднее арифметическое результатов параллельных измерений \bar{X} , %	Среднее квадратическое отклонение результатов измерений $S(\bar{X})$ при $P=0,95$, %	Доверительные границы случайной погрешности результатов измерений $\pm \Delta$ при $P=0,95$, %	Среднее арифметическое значение результатов измерений в пересчете на сухую беззольную массу \bar{X}^{daf} при $P=0,95$, %	Доверительная граница случайной погрешности $P=0,95$ $\pm \Delta^{daf}$ в пересчете на сухую беззольную массу при $P=0,95$, %
Массовая доля углерода C					
29,69	29,85	0,09	0,29	68,62	0,68
29,90					
29,72					
30,09					
Массовая доля водорода H					
1,829	1,844	0,007	0,023	4,24	0,05
1,861					
1,849					
1,835					
Массовая доля азота N					
1,36	1,38	0,02	0,06	3,16	0,14
1,41					
1,40					
1,33					
Массовая доля серы S					
0,232	0,252	0,009	0,029	0,58	0,07
0,256					
0,244					
0,275					
Массовая доля кислорода O					
10,389	10,180	0,096	0,306	23,40	0,70
10,073					
10,287					
9,970					

Таблица А.20 – Оценка погрешности измерений состава полукокса из древесной щепы

Результат параллельного измерения X , %	Среднее арифметическое результатов параллельных измерений \bar{X} , %	Среднее квадратическое отклонение результатов измерений $S(\bar{X})$ при $P=0,95$, %	Доверительные границы случайной погрешности результатов измерений $\pm \Delta$ при $P=0,95$, %	Среднее арифметическое значение результатов измерений в пересчете на сухую беззольную массу \bar{X}^{daf} при $P=0,95$, %	Доверительная граница случайной погрешности $P=0,95 \pm \Delta^{daf}$ в пересчете на сухую беззольную массу при $P=0,95$, %
Массовая доля углерода C					
82,68	82,95	0,24	0,78	85,96	0,81
82,56					
82,91					
83,65					
Массовая доля водорода H					
3,204	3,267	0,021	0,068	3,39	0,07
3,279					
3,298					
3,287					
Массовая доля азота N					
0,47	0,46	0,01	0,02	0,47	0,02
0,44					
0,46					
0,46					
Массовая доля серы S					
0,058	0,044	0,005	0,017	0,05	0,02
0,044					
0,038					
0,034					
Массовая доля кислорода O					
10,088	9,782	0,251	0,800	10,13	0,83
10,177					
9,794					
9,069					

Таблица А.21 – Оценка погрешности измерений теплотехнических характеристик смолы

Вид топлива	Среднее значение величины	Единицы измерения величины	Предел воспроизводимости при $P=0,95$, R	Стандартное отклонение воспроизводимости при $P=0,95$, σ_R	Показатель точности (границы абсолютной погрешности измерений при $P=0,95$), $\pm \Delta$
<i>выход летучих веществ на сухую беззольную массу (V^{daf})</i>					
суховской торф	100,0	%	0,3	0,1	0,2
аркадьевский торф	100,0				
кандинский торф	100,0				
таловский уголь	100,0				
карасевский сапрпель	100,0				
древесная щепка	100,0				
<i>низшая теплота сгорания на сухую беззольную массу (Q_i^r)</i>					
суховской торф	34,2	МДж/кг	0,3	0,1	0,2
аркадьевский торф	29,5				
кандинский торф	29,4				
таловский уголь	33,1				
карасевский сапрпель	36,8				
древесная щепка	–				

Таблица А.22 – Оценка погрешности измерений теплотехнических характеристик ТКТ на основе полукокса и пиролизной смолы, высушенного при 105 °С

Вид топлива	Среднее значение величины	Единицы измерения величины	Предел воспроизводимости при P=0,95, R	Стандартное отклонение воспроизводимости при P=0,95, σ_R	Показатель точности (границы абсолютной погрешности измерений при P=0,95), $\pm\Delta$
<i>зольность на сухую массу (A^d)</i>					
суховской торф	32,2	%	1,0	0,4	0,7
аркадьеvский торф	48,0		1,4	0,5	1,0
кандинский торф	18,8		0,6	0,2	0,4
таловский уголь	33,6		1,0	0,4	0,7
карасевский сапропель	36,7		1,1	0,4	0,8
<i>выход летучих веществ на сухую беззольную массу (V^{daf})</i>					
суховской торф	82,6	%	0,3	0,1	0,2
аркадьеvский торф	89,6				
кандинский торф	86,0				
таловский уголь	88,3				
карасевский сапропель	83,5				
<i>низшая теплота сгорания на сухую беззольную массу (Q_i^r)</i>					
суховской торф	17,7	МДж/кг	0,3	0,1	0,2
аркадьеvский торф	14,0				
кандинский торф	22,9				
таловский уголь	19,9				
карасевский сапропель	17,5				

Таблица А.23 – Оценка погрешности измерений механической прочности при сбрасывании ТКТ на основе полукокса и пиролизной смолы, высушенного при 105 °С

ТКТ из	Результат параллельного измерения X, %	Среднее арифметическое результатов параллельных измерений \bar{X} , %	Среднее квадратическое отклонение результатов измерений $S(\bar{X})$ при P=0,95, %	Доверительные границы случайной погрешности результатов измерений $\pm \Delta$ при P=0,95, %
Суховской торф	100	100	0	0
	100			
	100			
	100			
Аркадьеvский торф	100	100	0	0
	100			
	100			
	100			
Кандинский торф	100	100	0	0
	100			
	100			
	100			
Таловский уголь	100	100	0	0
	100			
	100			
	100			
Карасевский сапропель	100	100	0	0
	100			
	100			
	100			

Таблица А.24 – Оценка погрешности измерений механической прочности при сbrasывании ТКТ с декстрином, высушенного при различных температурах

Вид ТКТ	Температура сушки, °С	Результат параллельного измерения X , %	Среднее арифметическое результатов параллельных измерений \bar{X} , %	Среднее квадратическое отклонение результатов измерений $S(\bar{X})$ при $P=0,95$, %	Доверительные границы случайной погрешности результатов измерений $\pm \Delta$ при $P=0,95$, %
Пеллета ($d=20$ мм, $h=20$ мм)	20-40	100	100	0	0
		100			
		100			
		100			
		100			
	80	100	100	0	0
		100			
		100			
		100			
		100			
	100	100	100	0	0
		100			
		100			
		100			
		100			
	120	100	100	0	0
		100			
		100			
		100			
		100			
140	100	100	0	0	
	100				
	100				
	100				
	100				

Таблица А.25 – Оценка погрешности измерений механической прочности при сжатии ТКТ с декстрином, высушенного при различных температурах

ТКТ	Температура сушки, °С	Результат параллельного измерения X , МПа	Среднее арифметическое результатов параллельных измерений \bar{X} , МПа	Среднее квадратическое отклонение результатов измерений $s(\bar{x})$ при $P=0,95$, МПа	Доверительные границы случайной погрешности результатов измерений $\pm \Delta$ при $P=0,95$, МПа
Пеллета ($d=20$ мм, $h=20$ мм)	20-40	более 0,38	0,38	0,00	0,00
		более 0,38			
		более 0,38			
		более 0,38			
		более 0,38			
	80	более 0,38	0,38	0,00	0,00
		более 0,38			
		более 0,38			
		более 0,38			
		более 0,38			

ТКТ	Температура сушки, °С	Результат параллельного измерения X , МПа	Среднее арифметическое результатов параллельных измерений \bar{X} , МПа	Среднее квадратическое отклонение результатов измерений $s(\bar{x})$ при $P=0,95$, МПа	Доверительные границы случайной погрешности результатов измерений $\pm \Delta$ при $P=0,95$, МПа
	100	0,20	0,26	0,02	0,07
		0,30			
		0,30			
		0,20			
		0,30			
	120	0,20	0,26	0,02	0,07
		0,20			
		0,30			
		0,30			
		0,30			
	140	0,20	0,20	0,00	0,00
		0,20			
		0,20			
		0,20			
		0,20			

Таблица А.26 – Оценка погрешности измерений механической прочности при сбрасывании ТКТ различных размеров

Форма топлива	Высота, мм	Температура сушки, °С	Результат параллельного измерения X , %	Среднее арифметическое результатов параллельных измерений \bar{X} , %	Среднее квадратическое отклонение результатов измерений $s(\bar{x})$, %	Доверительные границы случайной погрешности результатов $\pm \Delta$, %
Пеллеты (d=20 мм)	20	20-40	100	100	0	0
			100			
			100			
			100			
			100			
	30		100	100	0	0
			100			
			100			
			100			
			100			
	40		100	100	0	0
			100			
			100			
			100			
			100			
Пеллеты (d=20 мм)	20	80	100	100	0	0
			100			
			100			
			100			
			100			
	30		100	100	0	0
			100			
			100			
			100			
			100			
	40		100	100	0	0
			100			
			100			
			100			
			100			

Форма топлива	Высота, мм	Температура сушки, °С	Результат параллельного измерения X , %	Среднее арифметическое результатов параллельных измерений \bar{X} , %	Среднее квадратическое отклонение результатов измерений $s(\bar{x})$, %	Доверительные границы случайной погрешности результатов $\pm \Delta$, %
Брикеты цилиндрической формы (d=50 мм)	20	20-40	100	100	0	0
			100			
			100			
			100			
			100			
	35		100	100	0	0
			100			
			100			
			100			
			100			
	50		100	100	0	0
			100			
			100			
			100			
			100			

Таблица 2.27 – Оценка погрешности измерений механической прочности при сжатии ТКТ различных размеров

Форма топлива	Высота, мм	Температура сушки, °С	Результат параллельного измерения X , МПа	Среднее арифметическое результатов параллельных измерений \bar{X} , МПа	Среднее квадратическое отклонение результатов измерений $s(\bar{x})$ при $P=0,95$, МПа	Доверительные границы случайной погрешности результатов измерений $\pm \Delta$ при $P=0,95$, МПа
Пеллеты (d=20 мм)	20	20-40	более 0,38	0,38	0,00	0,00
			более 0,38			
			более 0,38			
			более 0,38			
			более 0,38			
	30		более 0,38	0,38	0,00	0,00
			более 0,38			
			более 0,38			
			более 0,38			
			более 0,38			
	40		более 0,38	0,38	0,00	0,00
			более 0,38			
более 0,38						
более 0,38						
более 0,38						
Пеллеты (d=20 мм)	20	80	более 0,38	0,38	0,00	0,00
			более 0,38			
			более 0,38			
			более 0,38			
			более 0,38			
	30		более 0,38	0,38	0,00	0,00
			более 0,38			
			более 0,38			
			более 0,38			
			более 0,38			
	40		более 0,38	0,38	0,00	0,00
			более 0,38			
более 0,38						
более 0,38						
более 0,38						

Форма топлива	Высота, мм	Температура сушки, °С	Результат параллельного измерения X , МПа	Среднее арифметическое результатов параллельных измерений \bar{X} , МПа	Среднее квадратическое отклонение результатов измерений $s(\bar{x})$ при $P=0,95$, МПа	Доверительные границы случайной погрешности результатов измерений $\pm \Delta$ при $P=0,95$, МПа
Брикеты цилиндрической формы ($d=50$ мм)	20	20-40	0,15	0,15	0,00	0,00
			0,15			
			0,15			
			0,15			
			0,15			
	35		0,15	0,15	0,00	0,00
			0,15			
			0,15			
			0,15			
			0,15			
	50		0,15	0,15	0,00	0,00
			0,15			
			0,15			
			0,15			
			0,15			

Таблица А.28 – Оценка погрешности измерений теплотехнических характеристик ТКТ из смеси с 5 %-ым содержанием декстрина

Вид топлива	Среднее значение величины	Единицы измерения величины	Предел воспроизводимости при $P=0,95$, R	Стандартное отклонение воспроизводимости при $P=0,95$, σ_R	Показатель точности (границы абсолютной погрешности измерений при $P=0,95$), $\pm \Delta$
<i>зольность на сухую массу (A^d)</i>					
суховской торф	40,7	%	1,2	0,4	0,9
аркадьевский торф	51,6		1,5	0,6	1,1
кандинский торф	19,1		0,6	0,2	0,4
таловский уголь	32,1		1,0	0,3	0,7
карасевский сапрпель	47,1		1,4	0,5	1,0
древесная щепа	2,9		0,1	0,0	0,1
<i>выход летучих веществ на сухую беззольную массу (V^{daf})</i>					
суховской торф	20,9	%	0,3	0,1	0,2
аркадьевский торф	15,5				
кандинский торф	19,4				
таловский уголь	10,6				
карасевский сапрпель	16,5				
древесная щепа	13,1				
<i>низшая теплота сгорания на сухую беззольную массу (Q_i^r)</i>					
суховской торф	14,7	МДж/кг	0,3	0,1	0,2
аркадьевский торф	13,1				
кандинский торф	21,1				
таловский уголь	18,0				
карасевский сапрпель	11,6				
древесная щепа	29,4				

Таблица А.29 – Оценка погрешности измерений водопоглощения ТКТ

Масса до испытания m_0 , г	Масса после испытания m_1 , г	Результат параллельного измерения водопоглощения X , МПа	Среднее арифметическое результатов параллельных измерений \bar{X} , МПа	Среднее квадратическое отклонение результатов измерений $s(\bar{x})$ при $P=0,95$, МПа	Доверительные границы случайной погрешности результатов измерений $\pm \Delta$ при $P=0,95$, МПа
6,0	6,0	0	0	0	0
5,5	5,5	0			
4,5	4,5	0			
5,5	5,5	0			

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Документы об использовании результатов работы

УТВЕРЖДАЮ



Проректор по образовательной деятельности
Национального исследовательского Томского
политехнического университета

 Ю.С. Боровиков

«26» марта 2015 г.

СПРАВКА

об использовании результатов диссертационного исследования в учебном процессе

Результаты диссертационного исследования «Теплотехнология получения твёрдого композитного топлива из низкосортного органического сырья», выполненного в рамках реализации федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы» (ГК № 14.740.11.1295), включены в дисциплину образовательного модуля «Творческий проект» по направлению 13.03.03 «Энергетическое машиностроение» и используются в учебном процессе на кафедре парогенераторостроения и парогенераторных установок Томского политехнического университета (протокол решения кафедры ПГС и ПГУ № 18 от «26» марта 2015 года).

Заместитель заведующего кафедрой ПГС и ПГУ


«26» марта 2015 г.

Т.С. Тайлашева



**Общество с ограниченной ответственностью Энергоаудиторская компания «Спейс»
(ООО «Спейс-Энергоаудит»)**

✉ 634021, г. Томск, пр. Кирова, 58, стр.26, ☎ (382 2) 901 016, 901 017, сот. 8 960 972 16 97
E-mail: speis_tom@mail.ru, сайт: space-energoaudit.ru
ОГРН 1107017015456, ИНН/КПП 7017268489/701701001

29.04.2015 № 29

СПРАВКА

об использовании результатов научно-исследовательской работы

Результаты исследований местных низкосортных энергетических ресурсов с целью применения в технологиях термической переработки, выполненных кафедрой парогенераторостроения и парогенераторных установок Национального исследовательского Томского политехнического университета (авторы: Казаков А.В., Табакаев Р.Б., Плахова Т.М., научный руководитель Заворин А.С.), использованы в основной деятельности ООО «Спейс-Энергоаудит» при технико-экономическом обосновании перевода котельных Томской области на местные виды топлива.

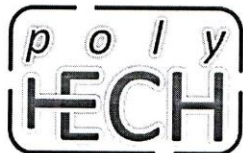
Использование результатов исследований по переработке торфа Суховского и Аркадьевского месторождений Томской области позволило выполнить технико-экономические расчеты по переводу котельных, использующих нефть и мазут, на местные возобновляемые источники энергии.

Итогом проделанной работы являются выданные рекомендации для Администрации Томской области о целесообразности перевода ряда котельных Шегарского и Первомайского районов на продукты термической переработки местных видов низкосортного сырья, в том числе на твердое композитное топливо.

Генеральный директор



А.С. Дорошенко



Общество с ограниченной ответственностью
«Политехнологии»
634034, г. Томск, ул. Нахимова, д. 7, тел.: (913) 800-89-89,
ОГРН 1137017021877, ИНН 7017340551, КПП 701701001

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы

Табакаева Романа Борисовича

«ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТВЁРДОГО КОМПОЗИТНОГО ТОПЛИВА ИЗ НИЗКОСОРТНОГО ОРГАНИЧЕСКОГО СЫРЬЯ»

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы Табакаева Р.Б. «Теплотехнология получения твёрдого композитного топлива из низкосортного органического сырья», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в ООО «Политехнологии» при проектировании технологической линии по производству твердого композитного топлива из низкосортного органического сырья (лицензионное соглашение на использование патента, гос. регистрация в ФИПС № РД0142910 от 05.03.2014).

Использование результатов позволило:

- 1) Разработать эскизную конструкторскую документацию технологической линии по производству твердого композитного топлива из низкосортного органического сырья производительностью 45 тонн в сутки.
- 2) Составить инвестиционное предложение по организации производства твердого композитного топлива из торфа производительностью 45 тонн в сутки.

Заместитель директора

П.Ю. Новосельцев

«30» апреля 2015 г.



ПРИЛОЖЕНИЕ В

Тепловой расчет технологической линии малотоннажного производства ТКТ из торфа
Кандинского месторождения Томской области

1 Оценка тепловых затрат установки термической переработки

1.1 Производительность теплотехнологической установки

$$D_{ТКТ} = 45 \text{ т/сутки} = 0,52 \text{ кг/с.}$$

1.2 Массовый выход полукокса из сухого кандинского торфа (таблица 3.1)

$$W_{нк} = 0,434.$$

1.3 Необходимый расход сухого торфа

$$G_{т}^{сух} = \frac{D_{ТКТ}}{W_{нк}} = \frac{0,52}{0,434} = 1,20 \text{ кг/с.}$$

1.4 Количество теплоты, выделяющееся при разложении 1 кг кандинского торфа (рисунок 3.2)

$$Q_{разл}^{уд} = 2,17 \text{ МДж/кг.}$$

1.5 Тепло, выделившееся при разложении сухого торфа

$$Q_{разл} = Q_{разл}^{уд} \cdot G_{т}^{сух} = 2,17 \cdot 10^3 \cdot 1,2 = 2604 \text{ кВт.}$$

1.6 Теплота парообразования воды [1]

$$r = 2256 \text{ кДж/кг.}$$

1.7 Среднее значение изобарной теплоемкости торфа [2]

$$C_p^m = 1,375 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

1.8 Среднее значение изобарной теплоемкости полукокса из торфа [2]

$$C_p^{ПК} = 0,707 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

1.9 Количество теплоты, необходимое для нагрева сухого торфа до 110 °С (температура начала термического разложения [3])

$$Q_{сырья}^{физ2} = C_p^m \cdot G_{т}^{сух} \cdot (110 - t'_{УТП}) = 1,375 \cdot 1,20 \cdot (110 - 20) = 148,5 \text{ кВт,}$$

где $t'_{УТП}$ – температура на входе в устройство термической переработки, принимается 20 °С.

1.10 Количество теплоты, необходимое для термической переработки торфа в полукокс (температура переработки принимается 450 °С)

$$Q_{ПК}^{физ} = C_p^{ПК} \cdot \left(\frac{G_{т}^{сух} + D_{ТКТ}}{2} \right) \cdot (450 - 110) = 0,707 \cdot \left(\frac{1,20 + 0,52}{2} \right) \cdot (340) = 206,7 \text{ кВт.}$$

1.11 Количество теплоты с уходящими парами смолы и газом

$$Q_{\text{газа и паров}}^{\text{физ}} = C_p^{\text{газа и паров}} \cdot (1 - W_{\text{нк}}) \cdot G_{\text{т}}^{\text{сух}} \cdot (450 - t^{\text{н.в.з.}}) = 4,68 \cdot (1 - 0,434) \cdot 1,2 \cdot (450 - 200) = 794,7 \text{ кВт},$$

где $C_p^{\text{газа и паров}}$ – теплоемкость паров смолы и газа, определяется согласно [4] по формуле:

$$\begin{aligned} C_p^{\text{газа и паров}} &= 0,01 \cdot (C_p^{H_2} \cdot H_2 + C_p^{CO} \cdot CO + C_p^{CH_4} \cdot CH_4 + C_p^{C_m H_n} \cdot C_m H_n + C_p^{(CO_2 + N_2)} \cdot (CO_2 + N_2)) = \\ &= 0,01 \cdot \left(\frac{14,421 + 14,493}{2} \cdot 23,81 + \frac{1,0463 + 1,0691}{2} \cdot 9,80 + \frac{2,796 + 3,684}{2} \cdot 12,93 + 2,59 \cdot 12,79 + \right. \\ &\left. + \frac{0,9102 + 0,9977}{2} \cdot 40,68 \right) = 4,68 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \end{aligned}$$

H_2 , CO , CH_4 , $C_m H_n$, CO_2 , N_2 – содержание соответствующих компонентов в парах смолы и газа при термопереработке (таблица 3.4), %;

$C_p^{H_2}$, C_p^{CO} , $C_p^{CH_4}$, $C_p^{C_m H_n}$, $C_p^{(CO_2 + N_2)}$ – теплоемкости соответствующих компонентов в парах смолы и газа при термопереработке (определены согласно [5-7]);

$t^{\text{н.в.з.}}$ – температура начала выхода газа (принимается 200 °С).

1.12 Максимальное количество влаги, при котором возможно протекание пиролиза за счет тепла разложения торфа

$$G_{\text{воды}} = \frac{Q_{\text{разл}} - (Q_{\text{сырья}}^{\text{физ2}} + Q_{\text{ПК}}^{\text{физ}} + Q_{\text{газа и паров}}^{\text{физ}})}{r} = \frac{2604 - (148,5 + 206,7 + 794,7)}{2256} = 0,64 \text{ кг/с}.$$

1.13 Максимальное значение влажности торфа, при котором возможно протекание пиролиза за счет тепла разложения торфа

$$W^{\text{крит}} = \frac{G_{\text{воды}}}{G_{\text{воды}} + G_{\text{т}}^{\text{сух}}} \cdot 100\% = \frac{0,64}{0,64 + 1,20} \cdot 100\% = 35 \text{ \%}.$$

При значении влажности исходного кандинского торфа менее 35 % процесс термической переработки может протекать автотермически за счет тепла разложения топлива, для этого необходимо лишь организовать предварительный розжиг торфа и теплоизолировать установку. Вывод о возможности автотермического протекания процесса низкотемпературного пиролиза подтверждается исследованиями А.В. Казакова [8, 9], А.Н. Субботина и Р.Н. Кулеша [3, 10].

1.14 Расход торфа при максимальном значении влажности $W^{\text{крит}}$

$$G^{\text{крит}} = \frac{100 \cdot G_{\text{т}}^{\text{сух}}}{(100 - W^{\text{крит}})} = \frac{100 \cdot 1,20}{(100 - 35)} = 1,85 \text{ кг/с}.$$

2 Оценка тепловых затрат на процессы формования и сушки брикетного

2.1 Необходимое количество связующего из пиролизного конденсата и декстрина

$$G_{\text{связ}} = \frac{D_{\text{ТКТ}} \cdot 3}{2} = \frac{0,52 \cdot 3}{2} = 0,78 \text{ кг/с}.$$

2.2 Доля декстрина в связующем веществе

$$C_{\text{декстрина}} = 10 \% .$$

2.3 Количество пиролизного конденсата, необходимого для формирования связующего

$$G_{\text{конд}} = G_{\text{связ}} \cdot \left(\frac{100 - C_{\text{декстрина}}}{100} \right) = 0,78 \cdot \left(\frac{100 - 10}{100} \right) = 0,70 \text{ кг/с} .$$

2.4 Начальная температура пиролизного конденсата (принимается равной комнатной температуре)

$$t_{\text{конд}}^0 = 20 \text{ }^\circ\text{C} .$$

2.5 Температура подогрева пиролизного конденсата (принимается)

$$t_{\text{конд}} = 70 \text{ }^\circ\text{C} .$$

2.6 Теплоемкость пиролизного конденсата

Принимается равной теплоемкости воды: $C_p^{\text{конд}} = C_p^{\text{воды}} = 4,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ [11].

2.7 Тепло, необходимое для нагрева пиролизного конденсата перед добавкой декстрина

$$Q_{\text{конд}}^{\text{физ}} = C_p^{\text{конд}} \cdot G_{\text{конд}} \cdot (t_{\text{конд}}^0 - t_{\text{конд}}) = 4,2 \cdot 0,70 \cdot (70 - 20) = 147,0 \text{ кВт} .$$

2.8 Тепло, необходимое для сушки ТКТ (испарение пиролизного конденсата после формирования)

$$Q^{\text{исп}2} = r \cdot G_{\text{конд}} = 2256 \cdot 0,70 = 1579,2 \text{ кВт} .$$

2.9 Физическое тепло ТКТ после сушки

$$Q_{\text{ТКТ}}^{\text{физ}} = C_p^{\text{ТКТ}} \cdot D_{\text{ТКТ}} \cdot (t_c - t_{\text{ф.у.}}'') = 0,707 \cdot 0,52 \cdot (80 - 20) = 22,1 \text{ кВт} .$$

где $C_p^{\text{ТКТ}} \approx C_p^{\text{ПК}} = 0,707 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ – теплоемкость брикетного топлива;

t_c – температура сушки (зависит от вида ТКТ), $^\circ\text{C}$;

$t_{\text{ф.у.}}''$ – температура ТКТ на выходе из формовочного устройства, $^\circ\text{C}$.

3 Оценка тепловых затрат на сушку исходного сырья

3.1 Рабочая влажность кандинского торфа (таблица 2.1)

$$W_t^r = 72,8 \% .$$

3.2 Расход торфа при рабочей влажности

$$G^0 = \frac{100 \cdot G_T^{\text{сух}}}{(100 - W_t^r)} = \frac{100 \cdot 1,20}{(100 - 72,8)} = 4,41 \text{ кг/с} .$$

3.3 Значение влажности, до которого необходимо подсушить торф (п. 1.13)

$$W^{крит} = 35 \%$$

3.4 Расход торфа при значении влажности $W^{крит}$ (п. 1.14)

$$G^{крит} = 1,85 \text{ кг/с.}$$

3.5 Количество тепла, необходимое для подсушивания торфа до значения $W^{крит}$

$$Q_{сырья}^{исп1} = (G^0 - G^{крит}) \cdot r = (4,41 - 1,85) \cdot 2256 = 5775,4 \text{ кВт.}$$

3.6 Физическое тепло сырья после сушки

$$Q_{сырья}^{физ1} = C_p^{сырья} \cdot G^{крит} \cdot (t_{с.с.}'' - t_{о.с.}) = 1,375 \cdot 1,85 \cdot (100 - 20) = 203,5 \text{ кВт.}$$

где $C_p^{сырья} \approx C_p^m = 1,375 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ – теплоемкость кандинского торфа;

$t_{с.с.}''$ – температура торфа на выходе из сушилки сырья (принимается 100 °С);

$t_{о.с.}$ – температура кандинского торфа (согласно [4] принимается равной 20 °С).

4 Потери в окружающую среду

Принимаются $q_5 = 1 \%$ [12-14].

5 Потери с теплом дымовых газов

5.1 Теоретический объем воздуха, необходимый для полного сгорания газа

$$\begin{aligned} V_0'' &= 0,0476 \cdot \left(0,5 \cdot CO + 0,5 \cdot H_2 + 1,5 \cdot H_2S + \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) \cdot C_m H_n - O_2 \right) = \\ &= 0,0476 \cdot \left(0,5 \cdot 9,80 + 0,5 \cdot 23,81 + 1,5 \cdot 0 + \sum \left(\left(1 + \frac{4}{4} \right) \cdot 12,93 + \left(2 + \frac{4}{4} \right) \cdot 12,79 \right) - 0 \right) = 3,8573 \text{ м}^3 / \text{м}^3. \end{aligned}$$

где $CO, H_2, H_2S, C_m H_n, O_2$ – содержание соответствующих компонентов в газе, % (таблица 3.4).

5.2 Теоретический объем азота

$$V_{0,N_2}'' = 0,79 \cdot V_0'' + \frac{N_2}{100} = 0,79 \cdot 3,8573 + \frac{0}{100} = 3,0473 \text{ м}^3 / \text{м}^3.$$

5.3 Объем трехатомных газов

$$V_{RO_2}'' = \frac{CO_2 + CO + H_2S + \sum m C_m H_n}{100} = \frac{40,68 + 9,80 + 0 + (12,93 + 2 \cdot 12,79)}{100} = 0,8899 \text{ м}^3 / \text{м}^3.$$

5.4 Теоретический объем водяных паров

$$\begin{aligned} V_{0,H_2O}'' &= 0,01 \cdot \left(H_2S + H_2 + \sum \frac{n}{2} C_m H_n + 0,124 \cdot d_{г.тл} \right) + 0,0161 \cdot V_0'' = \\ &= 0,01 \cdot \left(0 + 23,81 + \left(\frac{4}{2} \cdot 12,93 + \frac{4}{2} \cdot 12,79 \right) \right) + 0,0161 \cdot 3,8573 = 0,8146 \text{ м}^3 / \text{м}^3, \end{aligned}$$

где $d_{г.тл}$ – влагосодержание газообразного топлива, отнесенное к 1 м³ сухого газа (принимается 10 г/м³ [4])

5.5 Коэффициент избытка воздуха

Принимается $\alpha = 1,05$.

5.6 Объем водяных паров в дымовых газах при избытке воздуха

$$V_{H_2O}'' = V_{0.H_2O}'' + 0,0161 \cdot (\alpha - 1) \cdot V_0'' = 0,8146 + 0,0161 \cdot (1,05 - 1) \cdot 3,8573 = 0,8177 \text{ м}^3 / \text{м}^3.$$

5.7 Объем дымовых газов, образующихся при избытке воздуха

$$V_{г}'' = V_{RO_2}'' + V_{0.N_2}'' + V_{H_2O}'' + (\alpha - 1) \cdot V_0'' = 0,8899 + 3,0473 + 0,8177 + (1,05 - 1) \cdot 3,8573 = 4,9478 \text{ м}^3 / \text{м}^3.$$

5.8 Температура уходящих газов (принимается из условий недопущения коррозии [15])

$$t_{yx} = 135 \text{ \%}.$$

5.9 Энтальпия уходящих газов

$$I_{yx} = I_{0.г.} + (\alpha - 1) \cdot I_{0.в.} = 913,8 + (1,05 - 1) \cdot 149,7 = 921,3 \text{ кДж/м}^3.$$

где $I_{0.г.}$ – энтальпия теоретического объема дымовых газов,

$$I_{0.г.} = V_{RO_2}'' \cdot (c_{\mathcal{G}})_{CO_2} + V_{0.N_2}'' \cdot (c_{\mathcal{G}})_{N_2} + V_{0.H_2O}'' \cdot (c_{\mathcal{G}})_{H_2O} = 0,8899 \cdot 237,6 + 3,0473 \cdot 175,9 + 0,8146 \cdot 204,2 = 913,8 \text{ кДж/м}^3;$$

$(c_{\mathcal{G}})_{CO_2}$, $(c_{\mathcal{G}})_{N_2}$, $(c_{\mathcal{G}})_{H_2O}$ – удельные энтальпии соответствующих компонентов, кДж/м³ (определяются по [4]);

$I_{0.в.}$ – энтальпия теоретически необходимого количества воздуха (температура воздуха 30 °С),

$$I_{0.в.} = V_0'' \cdot (c_{\mathcal{G}})_в = 3,8573 \cdot 38,8 = 149,7 \text{ кДж/м}^3;$$

$(c_{\mathcal{G}})_в$ – удельная энтальпия воздуха (определяются по [4]).

5.10 Теплота сгорания 1 м³ газа из кандинского торфа (таблица 3.4)

$$Q_i^d = 17,55 \text{ МДж/м}^3.$$

5.11 Потери тепла от химической и механической неполноты сгорания

$$q_3 + q_4 = 0,07 \text{ \% [63]}.$$

5.12 Потеря с уходящими газами

$$q_2 = \frac{I_{yx}}{Q_i^d} \cdot (100 - (q_3 + q_4)) = \frac{921,3}{17,55 \cdot 10^3} \cdot (100 - 0,07) = 5,25 \text{ \%}.$$

6 Оценка тепла, получаемого при сжигании газа теплотехнологической переработки

6.1 Массовый выход газа из сухого кандинского торфа (таблица 3.1)

$$W_{газа} = 0,304.$$

6.2 Массовый расход газа

$$G_{газа} = G_T^{сyx} \cdot W_{газа} = 1,20 \cdot 0,304 = 0,36 \text{ кг/с.}$$

6.3 Теплота сгорания 1 кг газа из кандинского торфа (таблица 3.4)

$$Q_i^d (\text{масс.}) = 15,27 \text{ МДж/кг.}$$

6.4 Суммарное тепловыделение от сжигания газа

$$Q_{газа} = G_{газа} \cdot Q_i^d (\text{масс.}) = 0,36 \cdot 15,27 \cdot 10^3 = 5497,2 \text{ кВт.}$$

7 Суммарная оценка возможности покрытия тепловых затрат теплотехнологического производства брикетного топлива за счет тепла сжигания газа

$$Q_{газа} - \sum_{i=1}^4 Q_2^{ci} - \sum_{i=1}^4 Q_5^{ci} - Q_{сырья}^{исп1} - Q^{исп2} - Q_{сырья}^{физ1} - Q_{ТКТ}^{физ} - Q_{конд}^{физ} = 5497,2 - 288,6 - 55,0 - 5775,4 - 1579,2 - 203,5 - 22,1 - 147,0 = -2573,6 \text{ кВт,}$$

$$\text{где } \sum_{i=1}^4 Q_2^{ci} = \frac{Q_{газа} \cdot q_2}{100} = \frac{5497,2 \cdot 5,25}{100} = 288,6 \text{ кВт,}$$

$$\sum_{i=1}^4 Q_5^{ci} = \frac{Q_{газа} \cdot q_5}{100} = \frac{5497,2 \cdot 1}{100} = 55,0 \text{ кВт}$$

Исходя из сделанной оценки видно, что тепла от сжигания газа не хватает, чтобы полностью обеспечить тепловые затраты теплотехнологического производства. Наибольшее количество тепла от газа тратится на подсушивание исходного торфа со значения рабочей влажности ($W_t^r = 72,8\%$) до 35% , обеспечивающих автотермичность процесса переработки.

На практике торф после добычи не сразу отправляют на производство, а предварительно сушат на воздухе. В этом случае влажность торфа будет иметь менее высокое значение.

Максимальное значение влажности $(W_t^r)_{\max}$, при котором тепла от сжигания газа, получаемого при переработке кандинского торфа, будет достаточно для покрытия всех тепловых нужд теплотехнологического производства:

$$(\Delta W_t^r)_{\max} = \frac{\frac{(Q_{сырья}^{исп1})'}{r} + G_{воды}}{\frac{(Q_{сырья}^{исп1})'}{r} + G_{крит}} \cdot 100\% = \frac{\frac{3201,8}{2256} + 0,64}{\frac{3201,8}{2256} + 1,85} \cdot 100\% = 63,0\%.$$

$$\text{где } (Q_{сырья}^{исп1})' = Q_{газа} - \sum_{i=1}^4 Q_2^{ci} - \sum_{i=1}^4 Q_5^{ci} - Q^{исп2} - Q_{сырья}^{физ1} - Q_{ТКТ}^{физ} - Q_{конд}^{физ} = 5497,2 - 288,6 - 55,0 - 1579,2 - 203,5 - 22,1 - 147,0 = 3201,8 \text{ кВт.}$$

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ К ПРИЛОЖЕНИЮ Е

- 1 Ривкин С.Л., Александров А.А. Теплофизические свойства воды и водяного пара: справочник. – Москва: Энергия, 1980. – 423 с.
- 2 Кулеш Р.Н., Субботин А.Н. Экспериментальное исследование параметров зажигания торфа в условиях его промышленного складирования // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 4. – С. 15-20.
- 3 Федосеев С.Д., Чернышев А.Б. Полукоксование и газификация твердого топлива. – М.: Гостоптехиздат, 1960. – 328 с.
- 4 Тепловой расчет котлов: нормативный метод. – СПб.: 1998. – 256 с.: ил.
- 5 Теплоемкость топлива // Портал теплотехнических характеристик и физических свойств топлив «Топливо» [2014-2015]. Дата обновления: 01.02.2014. URL: <http://toplivko.ru/reaktivnye-i-dizelnye-topliva/teploemkost-topliva.html> (дата обращения: 06.02.2014 г.).
- 6 Удельная теплоемкость метана // Инженерный справочник DPVA.info [2006-2015]. Дата обновления: 01.02.2014. URL: <http://www.dpva.info/Guide/GuideMedias/methane/MethaneCH4SpecificHeatCrToT/> (дата обращения: 06.02.2014 г.).
- 7 Средняя массовая теплоемкость газов [2014-2015]. Дата обновления: 01.02.2014. URL: http://www.google.ru/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=web&cd=1&ved=0CBwQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.tot.spbstu.ru%2Ffiles%2F%25D0%25A1%25D1%2580%25D0%25B5%25D0%25B4%25D0%25BD%25D1%258F%25D1%258F%2520%25D0%25BC%25D0%25B0%25D1%2581%25D1%2581%25D0%25BE%25D0%25B2%25D0%25B0%25D1%258F%2520%25D1%2582%25D0%25B5%25D0%25BF%25D0%25BB%25D0%25BE%25D0%25B5%25D0%25BC%25D0%25BA%25D0%25BE%25D1%2581%25D1%2582%25D1%258C%2520%25D0%25B3%25D0%25B0%25D0%25B7%25D0%25BE%25D0%25B2.doc&ei=MQchVLzBHMW_ywOa_IKIDQ&usg=AFQjCNHmOicSCfUjna-LrNIH6B8I7qXhJA&bvm=bv.75775273,d.bGQ&cad=rjt (дата обращения: 06.02.2014 г.).
- 8 Казаков А.В. Термическая конверсия низкосортных топлив применительно к газогенерирующим установкам: диссертация ... канд. техн. наук. – Томск: Б.и., 2002. – 159 с.
- 9 Казаков А.В., Загорин А.С., Попов Р.И. Автотермический пиролиз торфа в условиях свободного перемещения в слое // Интеллектуальные энергосистемы: материалы II Междун. Молод. форума. – Томск: РауШ мбх, 2014. – Т. 1. – С. 275-278.
- 10 Субботин А.Н., Кулеш Р.Н. Исследование механизма и минимальной энергии зажигания торфа источником тепла // Пожарная безопасность. – 2009. – № 4. – С. 77-83.
- 11 Александров А.А., Орлов К.А, Очков В.Ф. Теплофизические свойства рабочих веществ теплоэнергетики. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – 224 с.

12 Федоров В.Г., Виноградов-Салтыков В.А., Марценко В.П. Измерение потерь тепла от наружных поверхностей водогрейных котлов // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 1997. – № 3. – С. 66-68.

13 Марценко В.П., Федоров В.Г. Эффективность изоляционных ограждений водогрейных котлов // Пром. теплотехника. – 2000. – Т. 22. – № 2. – С. 78-80

14 Марчак И.И., Гольшев Л.В., Мысак И.С. Методика определения потери тепла паровым котлом в окружающую среду // Теплоэнергетика. – 2001. – № 10. – С. 67-70.

15 Фурсов И.Д. Конструирование и тепловой расчет паровых котлов: учебное пособие. – Барнаул: Изд-во Алтайского ГТУ, 2001. – 265 с.