

На правах рукописи



КУЗЬМИНА Юлия Сергеевна

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ПИРОЛИЗА (ТОРРЕФИКАЦИИ)
ГРАНУЛИРОВАННОГО БИОТОПЛИВА**

05.14.01 – энергетические системы и комплексы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Объединенном институте высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН).

Научный руководитель: доктор технических наук, старший научный сотрудник
Зайченко Виктор Михайлович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Косивцев Юрий Юрьевич,
ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», профессор

доктор химических наук, профессор,
эксперт Российской академии наук
Мясоедова Вера Васильевна,
ФГБУН «Институт химической физики им.
Н.Н. Семёнова РАН», главный научный
сотрудник

Ведущая организация: Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (НИУ МЭИ), г. Москва

Защита состоится “7” декабря 2016 г. в 11 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.110.03 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук по адресу: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2, экспо-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ОИВТ РАН www.jiht.ru

Автореферат разослан “ _____ ” _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.110.03
д.т.н.

 Л.Б. Директор

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, 2016

Актуальность темы. Биомасса является возобновляемым энергетическим ресурсом, и ее использование в энергетике, в особенности, в распределенной, постоянно растет: в настоящее время топливо из биомассы обеспечивает около 14 % всего мирового энергопотребления. Основу современного рынка твердого биотоплива составляют топливные гранулы – пеллеты, обладающие более высокой по сравнению с необработанным биотопливом плотностью энергии и позволяющие механизировать процесс подачи топлива в топку котла. Потребность в таком экологически чистом топливе иллюстрирует неуклонный рост объемов производства пеллет, в частности, в России к 2016 г. он достиг 1 млн т в год. При всех достоинствах топливные пеллеты обладают одним существенным недостатком – высокой гигроскопичностью, что предъявляет повышенные требования к их хранению и транспортировке. Кроме того, затруднен процесс сжигания пеллет в пылеугольных котлах.

Эти недостатки могут быть устранены в процессе низкотемпературного пиролиза (торрефикации) – нагреве биомассы до температур 200 – 300 °С в бескислородной среде. Торрефицированные пеллеты гидрофобны, по своим теплотехническим характеристикам приближаются к углям и имеют хорошие перспективы использования в распределенной энергетике: в угольных и пеллетных котлах, как сырье для газогенераторов.

Интерес к процессу торрефикации растет с каждым годом, что подтверждается большим количеством научных публикаций и пилотных проектов, однако эффективных промышленных технологий пока не существует. Это связано, прежде всего, с низкой энергетической эффективностью предлагаемых схем и технических решений. Один из путей решения проблемы – применение комбинированных технологий (когенерация, тригенерация).

Цель работы. Целью диссертационной работы является разработка основ когенерационной технологии производства торрефицированных древесных пеллет, высокая энергетическая эффективность которой достигается за счет комбинированного производства электроэнергии, тепла и кондиционного твердого биотоплива. Для достижения цели в работе решаются следующие задачи:

- экспериментальное исследование процесса торрефикации при непосредственном нагреве топливных пеллет за счет сбросного тепла уходящих газов газопоршневой энергоустановки;

- экспериментальное исследование теплофизических свойств торрефицированных пеллет;

- определение основных режимных параметров процесса торрефикации и разработка принципиальной схемы когенерационного энерготехнологического комплекса с реактором торрефикации.

Научная новизна работы

1. Впервые исследованы особенности процесса торрефикации с прямым нагревом биомассы продуктами сгорания газопоршневой энергоустановки и показана принципиальная возможность создания промышленной технологии с высокой энергетической эффективностью.

2. Получены новые экспериментальные данные по теплофизическим свойствам торрефицированных топливных пеллет.

3. Разработан когенерационный энерготехнологический комплекс с реактором торрефикации и проведены его испытания в составе комплексного экспериментального стенда ОИВТ РАН.

Практическая значимость работы

1. Экспериментально подтверждена возможность реализации процесса торрефикации в реакторе с прямым нагревом древесных пеллет продуктами сгорания.

2. Получены расчетные и экспериментальные зависимости потери массы, теплоты сгорания и теплосодержания пеллет от температуры торрефикации и времени процесса.

3. Разработана принципиальная схема энерготехнологического когенерационного комплекса с реактором торрефикации производительностью 200 кг/ч.

4. Результаты исследований использованы при создании энерготехнологического когенерационного комплекса на линии гранулирования биомассы завода ОАО «ПРОДМАШ», г. Ростов-на-Дону.

Часть исследований выполнена в рамках соглашения о предоставлении субсидии № 14.607.21.0032 от 05.04.2016 г. по теме «Разработка и создание экспериментального многофункционального энерготехнологического комплекса для низкотемпературного пиролиза биомассы».

Положения, выносимые на защиту

1. Основы технологии процесса торрефикации с использованием продуктов сгорания газопоршневой энергоустановки.

2. Результаты экспериментальных исследований свойств торрефицированных пеллет (элементный состав, выход летучих, зольность, влажность, плотность, теплота сгорания и предел гигроскопичности).

3. Принципиальная схема энерготехнологического комплекса с реактором торрефикации производительностью 200 кг/ч.

Апробация работы

Результаты исследований докладывались на V, VI и VIII Школах молодых ученых им. Э.Э. Шпильрайна «Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов» (Махачкала, 2012, 2013, 2015), XXIX и XXXI Между-

народных конференциях «Уравнения состояния вещества» (Эльбрус, 2014, 2016), 2nd International Congress on Energy Efficiency and Energy Related Materials (ENEFM 2014) (Mugla, Turkey, 2014), Международном конгрессе «Возобновляемая энергетика XXI век: Энергетическая и экономическая эффективность» REENCON-2015 (Москва, 2015), 2nd International Conference on BIOMASS «IConBM 2016» (Sicily, Italy, 2016), Междисциплинарном молодежном научном форуме с международным участием «Новые подходы в энергетике» (Казань, 2016).

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 16 печатных работ, в том числе 3 статьи в журналах из перечня ВАК при Минобрнауки России и 1 статья в журнале, входящем в реферативную базу данных Scopus. В процессе работы над диссертацией получено 2 патента на полезную модель и 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** определена актуальность работы, цели и направление исследования.

Первая глава посвящена обзору литературных данных, касающихся темы диссертации.

Приведены общие сведения о биомассе и методах ее использования в энергетических целях. Процесс торрефикации является перспективным методом термической обработки топлива из биомассы. В результате топливные pellets становятся гидрофобными, а их теплота сгорания увеличивается по сравнению с исходным состоянием. Промышленные технологии процесса торрефикации гранулированной биомассы на мировом и российском рынках практически не представлены, и требуется разработка новых технических решений. Торрефицированная биомасса, как конечный продукт, может быть использована при совместном сжигании с углем в пылеугольных горелках, сжигании в pelletных котлах и в технологиях газификации (получение газа с повышенными теплотехническими характеристиками).

Представлены схемы процессов торрефикации и выполнено сравнение основных конструкций реакторов торрефикации. Анализ схем показал, что реакторы с прямым нагревом биомассы являются наиболее эффективными с точки зрения процессов тепло- и массопереноса. Для торрефикации pellets применяются реакторы с движущимся слоем, которые имеют минимальное количество подвижных частей, что не приводит к разрушению pellets. Производство pellets, так же как и процесс торрефикации, является энергозатратным, и использование когенерационных схем значительно повышает энергетическую эффективность технологии.

Во **второй главе** представлены описание экспериментального стенда, методики проведения испытаний и результаты исследований процесса торрефикации.

Схема экспериментального стенда приведена на рис. 1. Для прямого нагрева пеллет в реакторе торрефикации (Р) в качестве газа-теплоносителя (бескислородной среды) использовались высокотемпературные продукты сгорания (ПС) газопоршневой установки (ГПУ). Для обеспечения температуры торрефикации и температуры охлаждения торрефицированных пеллет часть ПС охлаждалась в кожухотрубном газо-водяном теплообменном аппарате (ТО). Смешение горячих и холодных газов для получения заданной температуры торрефикации осуществлялось в смесителе (С).

В экспериментах использовалась стендовая газопоршневая энергоустановка мощностью 75 кВт. Двигатель работал на стехиометрической смеси «топливо-воздух», содержание кислорода в продуктах сгорания составляло $\leq 1\%$.

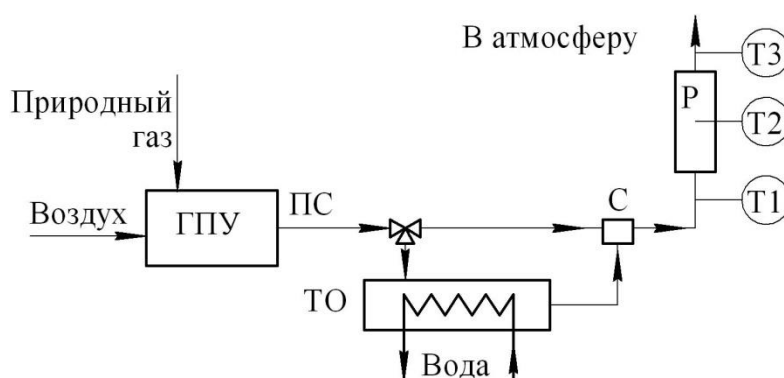


Рис.1. Схема экспериментального стенда

Процесс торрефикации осуществлялся в цилиндрическом реакторе внутренним диаметром 50 мм и длиной 300 мм, установленном вертикально и продуваемом газом-теплоносителем снизу-вверх. Термопары T1 и T3 располагались по газовому тракту перед и за реактором, соответственно. Термопара T2 была установлена в центре реактора в слое пеллет в среднем сечении реактора.

Для проведения исследований использовались пеллеты диаметром 8 мм и длиной от 10 до 15 мм из хвойных пород деревьев. Масса пеллет, загружаемых в реактор, составляла 260 ± 10 г.

Эксперименты проводились следующим образом. Реактор заполнялся пеллетами, затем устанавливалась верхняя сетка. После запуска ГПУ продукты сгорания разделялись на два потока. Первый поток направлялся в теплообменный аппарат, охлаждался до температуры $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ и поступал в смеситель, где смешивался со вторым потоком горячего газа. На выходе из смесителя устанавливалась заданная температура продуктов сгорания, соответствующая выбранному режиму торрефикации. Зависимость температур T_1 , T_2 и T_3 от времени приведена на рис. 2. В экспериментах были исследованы три температурных режима торрефикации: 230 , 250 и $270\text{ }^{\circ}\text{C}$. Прогрев реактора осуществлялся до момента, когда температура в слое пеллет T_2 достигала значения T_1 . Темп

нагрева составлял 50 град./мин., время нагрева τ_H – около 5 мин. В зависимости от режима эксперимента после достижения температуры торрефикации поток продуктов сгорания направлялся в реактор или через теплообменный аппарат для охлаждения пеллет, или через смеситель для обеспечения процесса торрефикации с выдержкой пеллет в реакторе при температуре торрефикации в течение $\tau_H=30$ мин.

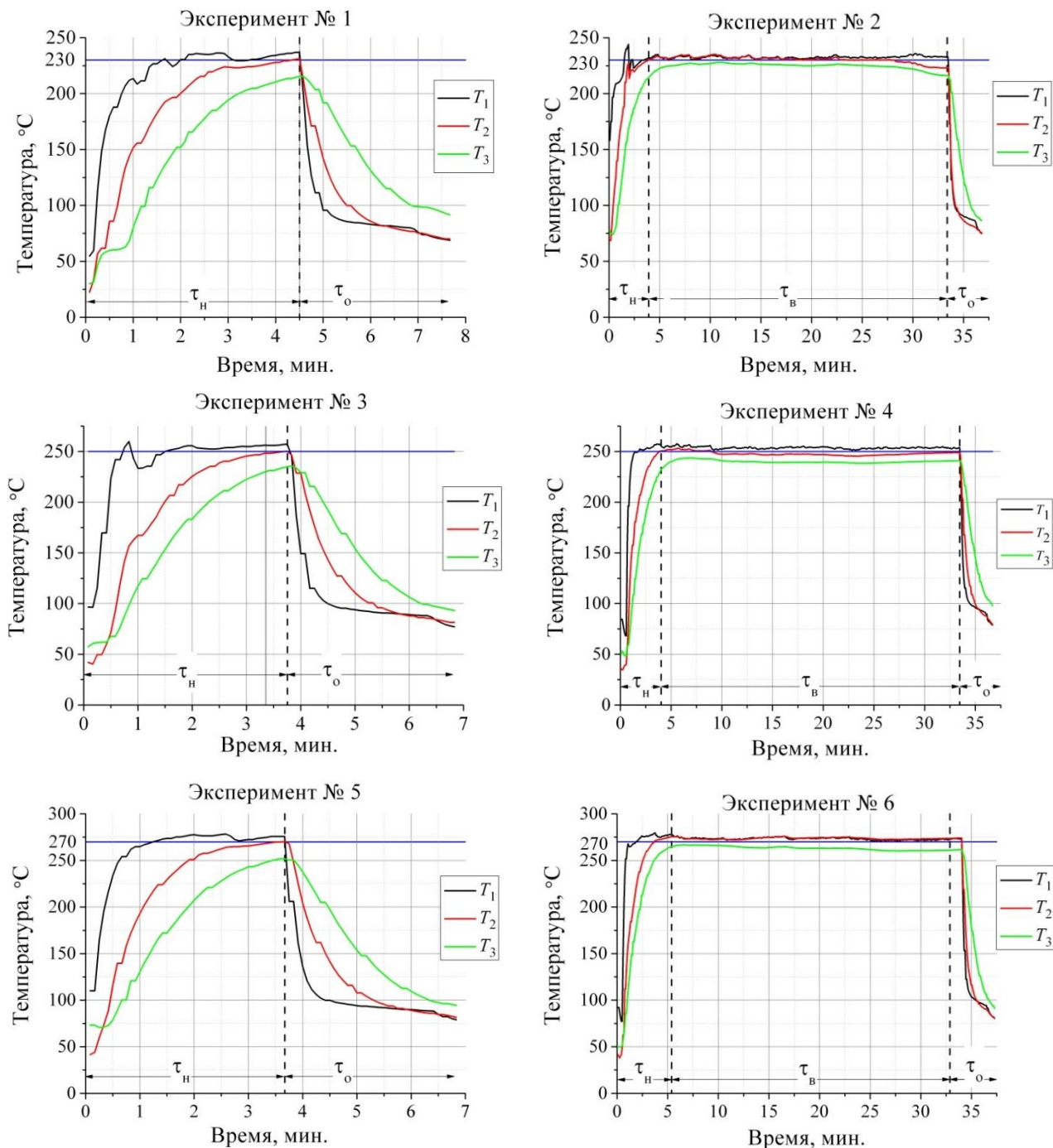


Рис. 2. Зависимость температуры от времени:
 τ_H – время нагрева; τ_B – время выдержки; τ_O – время охлаждения

Эксперименты № 1, 3 и 5 проводились без выдержки при температуре торрефикации ($\tau_b \approx 0$ мин.). Режим охлаждения пеллет продолжался до тех пор, пока температура газа на выходе из реактора T_3 не опускалась ниже 100°C .

Результаты экспериментов показали принципиальную возможность использования продуктов сгорания ГПУ в качестве газа-теплоносителя для проведения процесса торрефикации.

В связи с тем, что технологии торрефикации находятся на стадии освоения, стандартов, регламентирующих качество торрефицированного топлива, пока не разработано. Для оценки качества полученных в экспериментах пеллет результаты сравнивались с данными, представленными в работах Bridgeman [1], Prins [2] и Wilen [3].

Элементный состав необработанных и торрефицированных пеллет определялся с помощью анализатора элементного состава Vario MACRO cube. Результаты измерений показаны на диаграмме Ван Кревелена (Van Krevelen diagram), которая отражает взаимосвязь атомных отношений Н/С и О/С и позволяет систематизировать различные виды топлив по теплотехническим свойствам (рис. 3). На диаграмме также нанесены данные, опубликованные другими исследователями.

В связи с удалением воды и, частично, летучих, торрефицированные пеллеты имеют более низкие значения атомных отношений Н/С и О/С, что приводит к увеличению удельной теплоты сгорания. Следует отметить, что как для полученных в работе экспериментальных данных, так и для значений, опубликованных в работах других авторов, с повышением температуры и времени процесса торрефикации наблюдается смещение точек в сторону увеличения теплоты сгорания. Заметные отличия от литературных данных (рис. 3) связаны с разными породами древесины, использованных в экспериментах, и методами проведения процесса торрефикации.

Содержание летучих и зольность определялись с помощью термоанализатора SDT Q600. Для определения содержания летучих в образце нагрев проис-

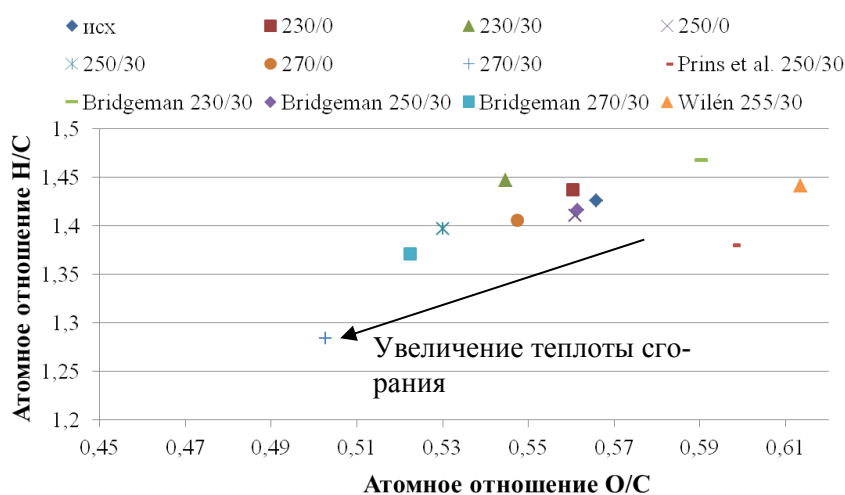


Рис. 3. Диаграмма Ван Кревелена для необработанных и торрефицированных пеллет

ходил до температуры 1000 °С с темпом 10 град./мин. в инертной среде (азот). Определение зольности проводилось при тех же условия, но в атмосфере синтетического воздуха (газовая смесь N₂ и O₂). Результаты измерений показали, что режимные параметры торрефикации не влияют на зольность конечного продукта. Увеличение температуры и времени торрефикации приводит к снижению содержания летучих в торрефицированных образцах.

Теплота сгорания торрефицированных пеллет определялась калориметрическим методом с помощью калориметра БКС-2Х. Полученные результаты показаны на рис. 4. Также на графике указаны значения высшей теплоты сгорания торрефицированной биомассы, приведенные в работах Bridgeman, Prins и Wilen, и бурого и каменного углей.

Была исследована кажущаяся (отношение массы материала ко всему занимаемому им объёму) и насыпная плотность пеллет. Анализ данных показал, что с увеличением температуры и времени торрефикации снижается кажущаяся и насыпная плотность пеллет.

Предел гигроскопичности пеллет определялся как максимальное количество влаги, которое может впитать образец при относительной влажности воздуха близкой к 100 %. Изменение предела гигроскопичности торрефицированных пеллет с выдержкой 30 мин. показано на рис. 5.

Из представленных данных видно, что торрефикация позволяет существенно повысить гидрофобные свойства гранулированного твердого топлива. Предел гигроскопичности пеллет, прошедших термическую обработку при температуре торрефикации 270 °С, уменьшается более чем в два раза по сравнению с аналогичным параметром для необработанного сырья. Это позволит хранить и транспортировать торрефицированные пеллеты без специальных требований.

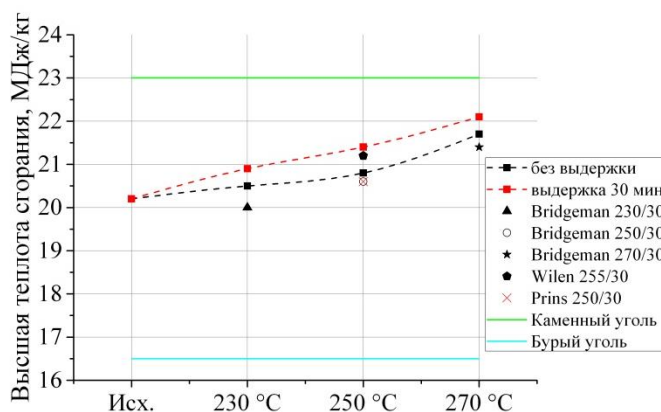


Рис. 4. Изменение относительной высшей теплоты сгорания в зависимости от режима торрефикации

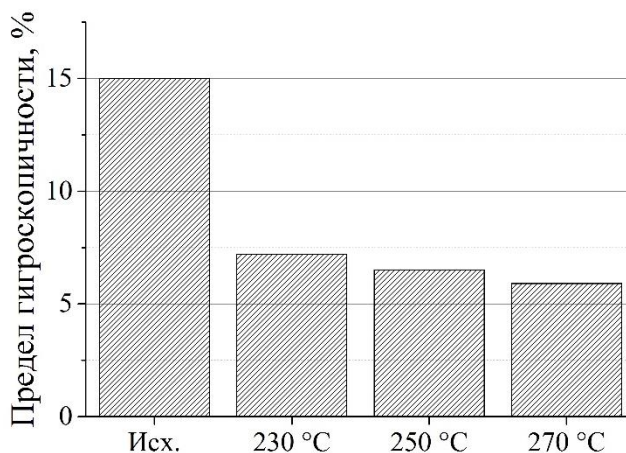


Рис. 5. Изменение предела гигроскопичности

В **третьей главе** описана принципиальная схема когенерационного энерготехнологического комплекса с реактором торрефикации, который может быть встроен непосредственно в технологическую линию по производству пеллет. Товарная продукция комплекса – торрефицированное гранулированное топливо, электроэнергия и тепловая энергия (рис. 6).

Древесные пеллеты с температурой около 100 °С после пеллетизера поступают в реактор торрефикации, где последовательно проходят три секции: секцию предварительного нагрева, секцию торрефикации и секцию охлаждения пеллет (рис. 6). Конструкция секций идентична, время нахождения биомассы в каждой секции одинаково. Секция реактора представляет собой шахту, поперечно продуваемую газом-теплоносителем.

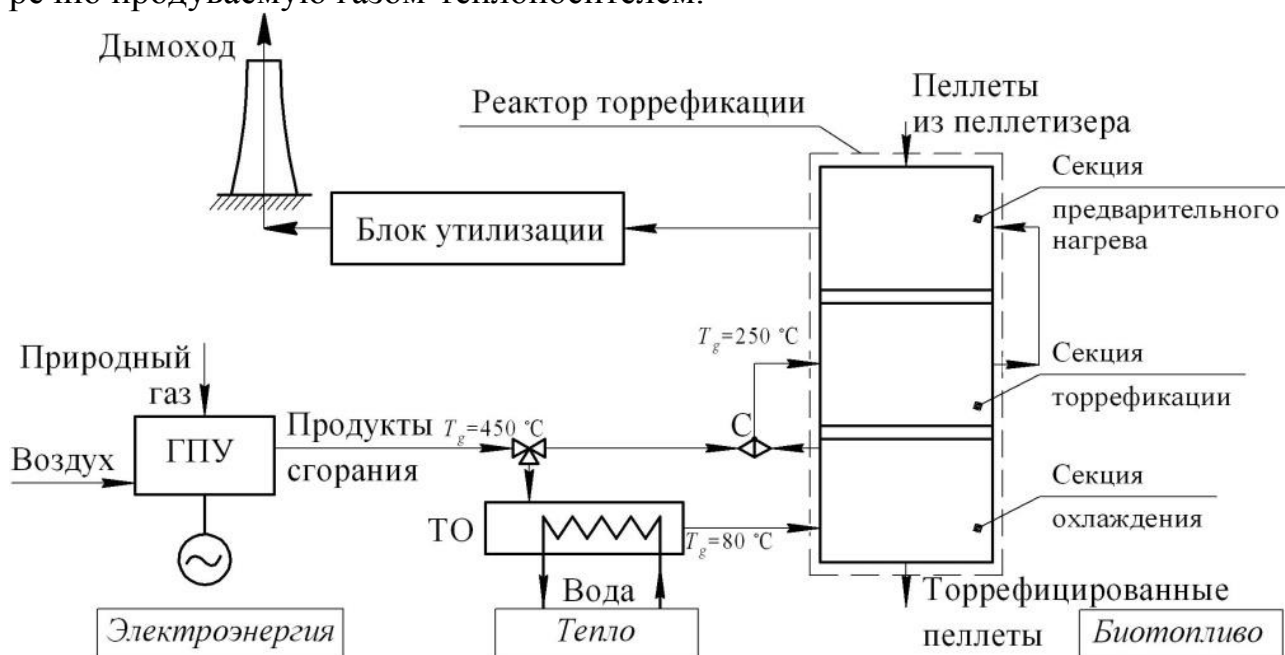


Рис. 6. Принципиальная схема энерготехнологического комплекса

Для определения основных характеристик реактора была разработана, изготовлена и испытана типовая секция, установленная на стендовом комплексе ОИВТ РАН. В качестве источника газа-теплоносителя использовалась стендовая газопоршневая установка АГ-200, а для охлаждения продуктов сгорания применялся специально разработанный кожухотрубный теплообменный аппарат. В ходе испытаний (рис. 7) на одной секции моделировались все процессы, протекающие в модульном реакторе торрефикации: предварительный нагрев, торрефикация и охлаждение. Обозначения на рис. 7: 1, 2, 3 – температуры пеллет в трех сечениях секции, расположенных на входе, в центре и на выходе из секции по ходу движения газа; $T_{вх}$ – температура продуктов сгорания перед секцией. Масса загруженных пеллет составила 120 кг. Время каждого режима – 40 мин.

Результаты исследований торрефицированных пеллет показали, что их параметры соответствуют характеристикам, полученным при проведении исследований на экспериментальном стенде при температуре 250 °С и выдержке 30 мин. (глава 2, эксперимент №4).

Для расчета основных параметров реактора торрефикации разработана математическая модель фильтрации газообразных продуктов сгорания через пористую среду, образованную слоем пеллет. Для средних по сечению реактора параметров теплообмена описывается нестационарными одномерными дифференциальными уравнениями в частных производных. Основные допущения математической модели, граничные и начальные условия представлены в диссертации. Сравнение результатов измерений и расчетов приведено на рис. 8 и 9.

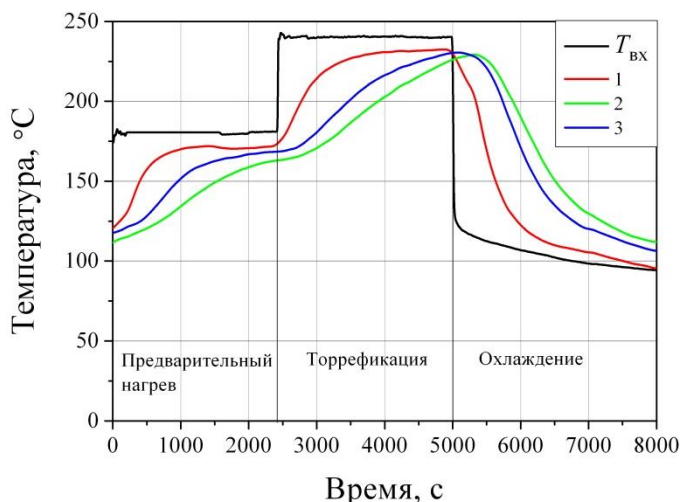


Рис.7. Зависимость температуры от времени в процессе испытания

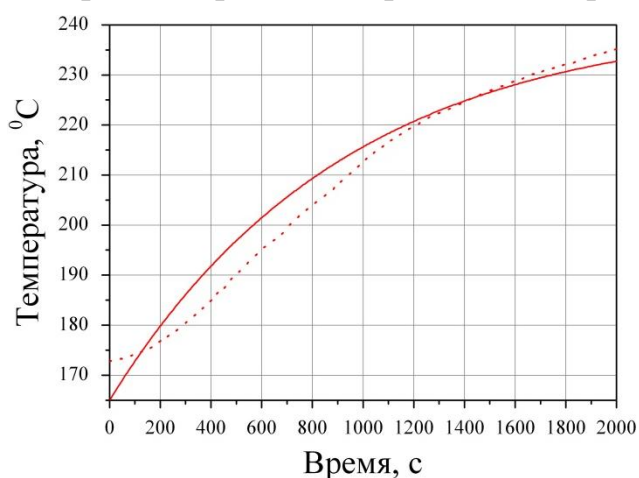


Рис. 8. Зависимость температуры пеллет в центре секции торрефикации от времени: кривая – расчет, точки – эксперимент

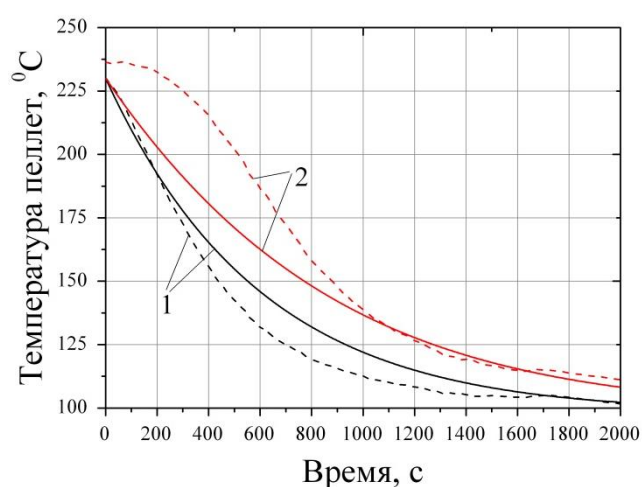


Рис. 9. Зависимость температуры пеллет в секции охлаждения от времени (сплошные линии – расчет, пунктирные линии – эксперимент): 1 – на входе в секцию, 2 – на выходе из секции

Наблюдается вполне удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных кривых. Различие поведения температуры пеллет в начале процесса охлаждения (рис. 9, кривые 2) объясняется большой инерционностью конструкций секции охлаждения (торрефикация пеллет осуществлялась в той же секции, что и охлаждение).

Выполнены расчеты относительной потери массы, удельной теплоты сгорания и относительного теплосодержания торрефицированных пеллет в диапазоне температур торрефикации 230 – 270 °С и времени выдержки до 3 часов. Результаты расчетов параметров процесса торрефикации представлены в виде номограмм (рис. 10). Рассчитанные зависимости позволяют, не прибегая к дополнительным расчетам, при задании двух параметров, например, температуры торрефикации и времени процесса, определить основные характеристики конечного продукта – торрефицированных пеллет. На основании этих данных возможно оценить эффективность процесса торрефикации и рентабельность конкретной установки. Для режима с температурой торрефикации 250 °С и продолжительностью цикла работы в 1 ч выполнены расчеты энергетических и массовых потоков когенерационного комплекса (рис. 11). Энергетическая эффективность определялась как отношение произведённой комплексом энергии (электрической и тепловой) и теплосодержания торрефицированных пеллет к теплосодержанию природного газа и необработанных пеллет, и составила 75 %.

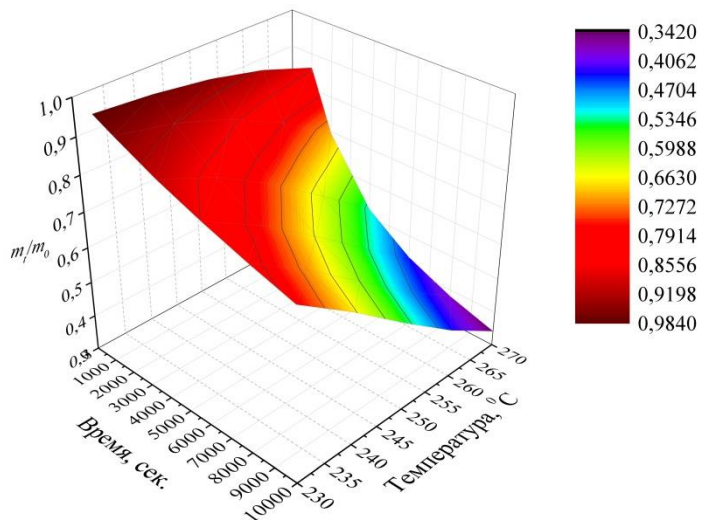


Рис. 10. Зависимость степени потери массы торрефицированных пеллет от температуры и времени торрефикации

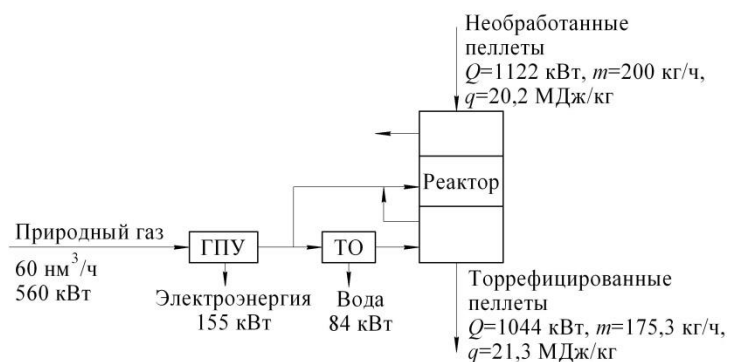


Рис. 11. Расчетные значения потоков массы и энергии

В четвертой главе приведены оценки экономической эффективности опытно-промышленного комплекса, встраиваемого в линию по гранулированию биомассы на заводе ОАО «Продмаш» (г. Ростов-на-Дону). В качестве базы для расчетов приняты показатели существующей линии по гранулированию. Для определения эффективности комплекса с реактором торрефикации были рассмотрены два режима работы:

Режим №1. Предприятие в течение года производит только торрефицированные пеллеты. Произведенная электроэнергия полностью покрывает соб-

ственные нужды линии, а «лишняя» энергия используется предприятием для других производственных целей.

Режим №2. В течение «летнего» сезона (0,5 года) предприятие производит торрефицированные пеллеты, а в «зимний» сезон – необработанные древесные пеллеты. При этом тепловая энергия комплекса используется предприятием для собственных нужд. Электрическая энергия вырабатывается в течение всего года и используется предприятием аналогично режиму № 1.

Простой срок окупаемости комплекса при работе в режиме №1 составил 2,4 года, а в режиме №2 – 1,8 года (рис. 12). Для определения энергетической эффективности разработанного комплекса был использован коэффициент использования топлива k_T , рассчитанный как отношение произведенной электрической энергии и использованной в технологическом процессе тепловой энергии продуктов сгорания ГПУ к теплосодержанию израсходованного природного газа. При КПД двигателя 30 % коэффициент использования топлива для режима №1 составил 49 %, для режима № 2 – 55 %.

Выполнена оценка эффективности для основных сфер применения торрефицированных пеллет: сжигание совместно с углем, в пеллетных котлах и в качестве исходного сырья в газогенераторах.

Расчет совместного сжигания угля и торрефицированных пеллет был проведен для котла КП-300 (КВ-300) российского производства. В результате расчета получено, что максимальный КПД достигается при сжигании только торрефицированных пеллет. Замена 50 % угля на торрефицированные пеллеты приводит к увеличению полезно использованной теплоты. Однако основные преимущества торрефицированного сырья при совместном сжигании с ископаемым топливом (углем) – это снижение выбросов окислов серы, азота и CO_2 -нейтральность (условно) топлива.

Результаты расчетов характеристик пеллетного котла при работе на торрефицированных и необработанных древесных пеллетах показали, что при использовании торрефицированного сырья количество топлива, необходимого

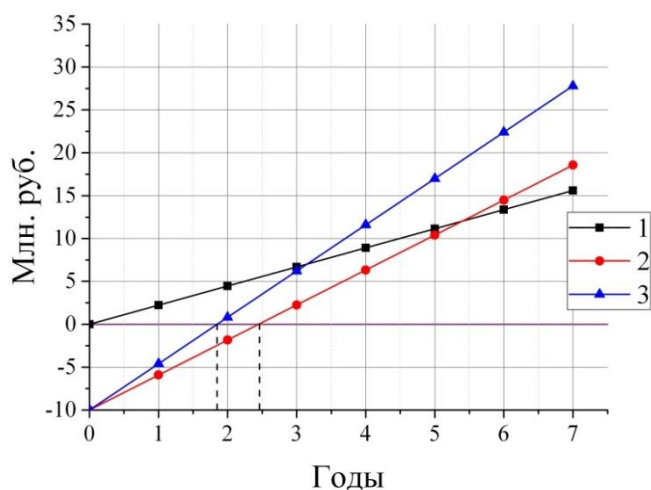


Рис. 12. Прибыль предприятия: 1 – существующая линия по гранулированию; 2 – линия по гранулированию с комплексом, работающим в режиме №1; 3 – комплекс работает в режиме № 2.

для обеспечения номинальной мощности котла (при том же КПД), может быть снижено более чем на 20 %.

В результате расчетов газогенератора получено, что использование торрефицированных пеллет в качестве исходного сырья в процессе газификации позволяет повысить выход газа по сравнению с древесной щепой и торфом. Низшая теплота сгорания генераторного газа из торрефицированных пеллет составляет 6,00 МДж/м³, что в полтора раза превышает теплоту сгорания генераторного газа из древесины и торфа.

В заключении сформулированы основные результаты работы и выводы.

1. Проведен анализ состояния исследований и разработок в области технологий низкотемпературного пиролиза (торрефикации).

2. Экспериментально обоснован способ торрефикации биомассы с использованием в качестве газа-теплоносителя продуктов сгорания газопоршневого электроагрегата.

3. Получены экспериментальные данные по влиянию режимных параметров торрефикации на основные характеристики конечного продукта: влажность, зольность, выход летучих, теплоту сгорания, насыпную и кажущуюся плотность, предел гигроскопичности, а также на элементный состав.

4. Разработана принципиальная схема энерготехнологического комплекса с модульным реактором торрефикации для производства торрефицированных пеллет, электрической и тепловой энергии.

5. Разработана математическая модель модульного реактора торрефикации и рассчитаны зависимости основных параметров торрефицированных пеллет от температуры и времени процесса.

6. Разработан и изготовлен типовой модуль реактора торрефикации и проведены испытания этого модуля.

7. Выполнены расчеты экономической и энергетической эффективности разработанного комплекса.

8. Результаты исследований использовались при разработке опытно-промышленного когенерационного комплекса, установленного на площадке ОАО «Продмаш» (IV квартал 2016 г.) на линии по гранулированию биомассы.

Публикации по теме диссертации

1. Куфтов А.Ф., Кузьмина Ю.С. Перспективы применения твердых топлив из биомассы [Электронный ресурс] // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2011. № 8. URL.: <http://technomag.bmstu.ru/doc/216747.html> (дата обращения 04.09.2016).

2. Бессмертных А.В., Зайченко В.М., Коростина М.А., Кузьмина Ю.С. Перспективные технологии комплексной переработки торфа // Промышленная энергетика. 2013. №2. С. 54–57.

3. Директор Л.Б., Зайченко В.М., Косов В.Ф., Кузьмина Ю.С. Демонстрационный энерготехнологический комплекс с реактором торрефикации модульного типа // Промышленная энергетика. 2016. №2. С. 58–62.
4. Julia Kuzmina, George Sytchev, Victor Zaychenko. Torrefaction. Prospects and Application // Chemical Engineering Transactions. 2016. Vol. 50. doi: 10.3303/CET1650045.
5. Патент РФ № 2013122072/05, 15.05.2013. Зайченко В.М., Косов В.Ф., Кузьмина Ю.С., Марков А.В., Морозов А.В. Энерготехнологический комплекс с торрефикатором биопеллет // Патент России № 136801. 2014. Бюл. № 2.
6. Патент РФ 2015142402/13, 06.10.2015. Зайченко В.М., Косов В.Ф., Кузьмина Ю.С., Сычев Г.А. Установка для торрефикации гранулированной биомассы // Патент России № 161775. 2016. Бюл. № 13.
7. Программа сбора и обработки теплотехнических параметров энерготехнологического когенерационного комплекса. Молчанов Д.А., Кузьмина Ю.С. // Свид-во о регистрации программы для ЭВМ № 2016616737. 20.06.2016.
8. Бессмертных А.В., Косов В.Ф., Кузьмина Ю.С., Сычев Г.А. Установка по торрефикации биомассы // Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов / Материалы V Школы молодых ученых им. Э.Э. Шпильрайна. 11 – 12 октября 2012 г. / Под. ред. д.т.н. А.Б. Алхасова. – Махачкала: АЛЕФ, 2012. С. 216–219.
9. Victor Zaichenko, Valentin Kosov, Julia Kuzmina, Vladimir Lavrenov. Torrefied Pellets as Fuel for Two-stage Technology of Biomass Conversion into Synthesis Gas // Journal of Energy and Power Engineering. 2014. Vol. 8. P. 79–84.
10. Бессмертных А.В., Зайченко В.М., Кузьмина Ю.С., Сычев Г.А. Исследование процесса торрефикации пеллет из пометно-подстилочной массы // Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов / Материалы VI Школы молодых ученых им. Э.Э. Шпильрайна. 23 – 26 сентября 2013 г. / Под. ред. д.т.н. А.Б. Алхасова – Махачкала: АЛЕФ. 2013. С. 231-234.
11. Kosov V.F., Kuzmina J.S., Zaitchenko V.M. Biomass torrefaction plant // XXIX International Conference on Equations of State for Matter, March 1-6, 2014, Elbrus, Russia. Book of abstracts. P. 152.
12. V.F. Kosov, I.S. Kuzmina, V.A. Lavrenov, V.M. Zaychenko. Optimization of Pilot Torrefaction Moving Bed Plant Operating Parameters // 2nd International Congress on Energy Efficiency and Energy Related Materials (ENEFM2014), October 16-19, 2014, Mugla, Turkey. Book of Abstracts. P.114.
13. Зайченко В.М., Кузьмина Ю.С., Сычев Г.А. Утилизация древесных отходов с целью замещения ископаемого топлива // Материалы Международного конгресса «Возобновляемая энергетика XXI век: Энергетическая и экономическая эффективность» REENCON-2015. 27-28 октября 2015 г./ Под ред.

к.ф.-м.н Д.О. Дуникова, д.т.н. О.С. Попеля и чл.-корр. РАН Филиппова С.П. - Москва: ОИВТ РАН-ВШЭ. 2015. С. 173-179.

14. Кузьмина Ю.С., Сычев Г.А. Исследование процесса прогрева гранулированного топлива из биомассы в процессе торрефикации // Материалы IV Международной конференции «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы» и VIII Школы молодых ученых «Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов» им. Э.Э. Шпильрайна. Том 2. 21-24 сентября 2015 г. / Под. ред. д.т.н. А.Б. Алхасова. – Махачкала: АЛЕФ, 2015. С. 113-116.

15. Director, L., Kuzmina J. Mathematical simulation of energy-technological complex / Book of abstracts. International Conference on Thermophysical and Mechanical Properties of Advanced Materials – THERMAM 2015, Baku, Azerbaijan. 2015. P. 28-29.

16. Kuzmina J.S., Director L.B., Zaichenko V.M., Energy-technological complex with reactor for torrefaction // XXXI International Conference on Equations of State for Matter March 1-6, 2016, Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia. Book of abstracts. Изд-во. КБГУ, Нальчик. 2016. P. 110.

Цитируемая литература

1. Bridgeman, T.G., Jones, J.M., Shield, I., Williams, P.T. Torrefaction of reed canary grass, wheat straw and willow to enhance solid fuel qualities and combustion properties // Fuel. 2008. V. 87. P. 844-856.

2. Prins, M.J., Ptasiński, K.J., Janssen, F.J.J.G. More efficient biomass gasification via torrefaction // Energy. 2006. V.31, №15. P. 3458-3470.

3. Wilén, C., Jukola, P., Järvinen, T., Sipilä, K. Wood torrefaction – pilot tests and utilisation prospects // VTT Technology 122. 2013. 80 p.

Кузьмина Юлия Сергеевна

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ПИРОЛИЗА (ТОРРЕФИКАЦИИ) ГРАНУЛИРОВАННОГО БИОТОПЛИВА

Автореферат

Подписано в печать 30.09.2016

Формат 60x84/16

Печать офсетная

Уч.-изд.л.

Усл.-печ.л.

Тираж 100 экз.

Заказ N

Бесплатно

ОИВТ РАН. 125412, Москва, Ижорская ул., 13, стр. 2