На правах рукописи

ФЕДЮХИН АЛЕКСАНДР ВАЛЕРЬЕВИЧ

РАЗРАБОТКА СИСТЕМ КОМБИНИРОВАННОЙ ВЫРАБОТКИ ТЕПЛОВОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПИРОЛИЗА И ГАЗИФИКАЦИИ БИОМАССЫ

Специальность 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново 2014

Работа выполнена на кафедре Промышленных теплоэнергетических систем Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт»

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор **СУЛТАНГУЗИН Ильдар Айдарович**

Официальные оппоненты:
АВЕРЬЯНОВ Владимир Константинович, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, ОАО «Газпром промгаз», заведующий отделом развития систем энергоснабжения в г. Санкт-Петербурге

СУББОТИН Владимир Иванович, кандидат технических наук, профессор ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», профессор кафедры «Промышленная теплоэнергетика»

Ведущая организация: **Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева,** г. Москва

Защита состоится «30» мая 2014 г. в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 при ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус «Б», аудитория 237.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, Ученый совет ИГЭУ. Тел.: (4932) 38-57-12, 26-98-61, факс: (4932) 38-57-01. E-mail: uch_sovet@ispu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ивановского государственного энергетического университета.
Диссертация размещена http://ispu.ru/files/Dissertaciya_Fedyuhin_A.V..pdf
Автореферат размещен на сайте ИГЭУ www.ispu.ru.

Автореферат разослан «04» апреля 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.064.01,
доктор технических наук, доцент Бушуев Евгений Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Общий запас древесины в России превышает 80 млрд. куб. м., благодаря чему наша страна занимает лидирующее место в мире по площади лесного фонда и его количеству на одного жителя. Потенциал использования биомассы в России составляет: валовый (467 млн. тут/год), технический (129 млн. тут/год), экономический (69 млн. тут/год), включая отходы агропромышленного комплекса - до 80 млн. тут/год; отходы лесопромышленного комплекса - более 30 млн. куб. м. В то же время в районы Крайнего Севера, Дальнего Востока и Сибири ежегодно завозится порядка 6-8 млн. тонн жидкого и 20-25 млн. тонн твердого топлива. В настоящее время доля возобновляемых ресурсов в производстве энергии в России, включая малые гидроэлектростанции, не превышает 2 %, при планируемом целевом показателе – 4,5 % к 2020 году. Использование биомассы в энергетических целях актуально также с точки зрения экологического аспекта, т.к. приведет к снижению выбросов парниковых газов в совокупности с утилизацией бытовых, промышленных, древесных и сельскохозяйственных отходов.

Переход на предлагаемый вид топлива для решения проблем энергоснабжения промышленности и ЖКХ должен сопровождаться применением передовых энергоэффективных технологий на базе пиролиза или газификации исходного сырья и последующей комбинированной выработки электрической и тепловой энергии в цикле ПГУ.

Цель работы заключается в разработке тепловых схем использования биомассы в энергетических целях с применением современных технологий комбинированной выработки тепловой и электрической энергии на основе непрерывного пиролиза или газификации исходного топлива.

Задачами работы являются:

- анализ мирового опыта применения биомассы в качестве энергетического сырья;
- рассмотрение процессов пиролиза и газификации растительных продуктов как одного из перспективного направления использования возобновляемых источников энергии в России, проведение термогравиметрического анализа разных видов биомассы;
- математическое моделирование и описание процесса термической конверсии с получением кинетических параметров, отвечающих за данный процесс;
- разработка методики оценки состава и энергетического потенциала продуктов пиролиза и газификации твердого углеродсодержащего топлива, а также создание вычислительного комплекса на ее основе;

- оценка благоприятных режимных параметров работы установки непрерывного пиролиза или газификации биомассы;
- разработка принципиальных схем когенерационных установок на основе ПГУ с внутрицикловым пиролизером или газификатором биомассы;
- определение параметров системы комбинированной выработки тепловой и электрической энергии в парогазовой установке с пиролизером или газификатором биомассы по энергетическим, экологическим и экономическим показателям.

Научная новизна

1. На основе термогравиметрического анализа выполнен расчет четырехкомпонентного состава биомассы с получением универсальных кинетических параметров, отвечающих за пиролиз древесных пород, широко распространенных на территории России.
2. Разработана методика и компьютерная программа (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013660842 от 20.11.2013) для расчета состава продуктов пиролиза и газификации твердого топлива, на основе которой получены оптимальные режимные характеристики реакторов термической конверсии биомассы.
3. Разработаны тепловые схемы ПГУ с пиролизером (заявка на полезную модель № 2013157316 от 25.12.2013) и газификатором биомассы с определением параметров производства тепловой и электрической энергии по энергетическим, экологическим и экономическим показателям.

Практическая значимость

1. Анализ термогравиметрических кривых термической конверсии биомассы позволяет, не проводя заново лабораторных испытаний, оценивать выход летучих, величину угольного остатка исследуемого образца.
2. Рассчитаны оптимальные режимные характеристики энергетической установки на основе биомассы, соответствующие температуре 850 – 900 °С и давлению 1 атм для пиролизера, а также следующим параметрам для газификатора: 900 – 950 °С, 20 атм при расходе воздуха 1,6 – 1,8 кг воздуха/кг сухой биомассы и расходе пара 0,4 – 0,6 кг пара/кг сухой биомассы.
3. Выбор и расчет оборудования для цикла ПГУ на основе пиролиза и газификации органического сырья позволяет сопоставить оба направления термической конверсии биомассы по энергетическим и экономическим показателям, с определением оптимальных диапазонов установленной мощности для каждого вида реактора. Применение пиролизера экономически обоснованно при мощностях от 1 до 10 МВт из-за более низких удельных вложений в оборудование, тогда как для газификатора приемлемы электрические нагрузки от 10 до 50 МВт.
4. Разработанная методика применима для расчета состава и свойств продуктов термической конверсии углеродсодержащего топлива при заданном элементарном составе исходного сырья, а также режимных

параметрах реактора, что позволяет рассчитывать свойства получаемого газа, достигаемые при термодинамическом равновесии.

Достоверность и обоснованность результатов работы обусловлены применением положительно зарекомендовавших себя методик расчетов химических процессов, балансов теплоэнергетических установок и достоверных справочных данных, а также сравнением результатов с данными других авторов.

Личное участие

Основные результаты получены лично автором под руководством д.т.н., профессора Султангузина И.А.

Обоснование соответствия диссертации паспорту научной специальности 05.14.04 – «Промышленная теплоэнергетика»

Пункты 1, 2 научной новизны соответствуют пункту 3 паспорта специальности – «Теоретические и экспериментальные исследования процессов тепло – и массопереноса в тепловых системах и установках, использующих тепло. Совершенствование методов расчета тепловых сетей и установок с целью улучшения их технико-экономических характеристик, экономии энергетических ресурсов.», пункт 3 научной новизны соответствует пункту 2 паспорта – «Оптимизация схем энергетических установок и систем для генерации и трансформации энергоносителей, основанных на принципах их комбинированного производства» и пункту 5 паспорта – «Оптимизация параметров тепловых технологических процессов и разработка оптимальных схем установок, использующих тепло, с целью экономии энергетических ресурсов и улучшения качества продукции в технологических процессах».

Апробация работы

Основные положения работы, результаты теоретических и расчетных исследований докладывались на:

- 5 Российской национальной конференции по теплообмену (НИУ МЭИ, г. Москва, 2010 г.);
- 17, 18, 19, 20 Международных научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, Электротехника и Энергетика» (НИУ МЭИ, г.Москва, 2011 – 2014 г.);
- XXVI Международной конференции «Взаимодействие интенсивных потоков энергии с веществом» (КБГУ, г.Нальчик, 2011 г.);
- 8, 9 Межрегиональной (международной) научно-технической конференции студентов и аспирантов «Информационные технологии, энергетика и экономика» (филиал НИУ МЭИ, г.Смоленск, 2011 – 2012 г.);
- II Всероссийской научно-практической конференции «Повышение надежности и эффективности эксплуатации электрических станций и энергетических систем: Энерго – 2012» (НИУ МЭИ, г.Москва, 2012 г.);

- Шестой Международной школе – семинаре молодых ученых и специалистов «Энергосбережение – теория и практика» (НИУ МЭИ, г.Москва, 2012 г.).

Публикации

Основное содержание выполненных исследований опубликовано в 19 журнальных статьях, тезисах, докладах и учебном пособии, в т.ч. 3 в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК.

Структура и объем работы

Диссертация изложена на 157 страницах и состоит из введения, пяти глав, заключения. Работа содержит 68 рисунков и 38 таблиц, 2 приложения, список использованных источников содержит 110 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, сформулирована цель и задачи исследования, показана научная новизна и практическая ценность, дана общая характеристика работы.

В первой главе приведен обзор литературы по теме диссертации, основной задачей которого являлся анализ методов исследования термической конверсии биомассы с оценкой состава и энергетического потенциала продуктов реакции, а также рассмотрение разработанных в настоящее время установок непрерывного пиролиза и газификации твердого топлива.

Для описания процесса пиролиза используются различные кинетические модели, отличающиеся количеством либо независимых параллельных (обычно от одной до трех), либо независимых последовательных (характерных для различных температурных интервалов) химических реакций, ответственных за выход летучих. В первом случае точность математического моделирования гораздо выше, что делает данный подход более приоритетным при оценке кинетики термической конверсии.

Отдельно рассматриваются вопросы, связанные с составом продуктов термической конверсии. Отмечено, что при низких температурах 200 - 400 °C вклад в образование газообразных продуктов пиролиза и газификации вносят преимущественно два компонента биомассы – гемицеллюлоза и целлюлоза. Продуктами пиролиза в этом диапазоне температур являются CO, CO_2, H_2O, CH_4, H_2, причем, более 60 % от общего объема газа составляют монооксид и диоксид углерода приблизительно в равных долях. Их пики выхода наблюдаются при температурах 350 - 400 °C, далее следует резкое уменьшение генерации этих газов. Для метана характерны два максимума выхода при 300 °C и 520 °C, в зоне высоких температур его доля быстро уменьшается. Интенсивность образования водорода резко нарастает от 200 до 340 °C и затем отмечается постоянный небольшой прирост во всем

интервале температур. В области 350 - 500 °С происходит преимущественно разложение лигнина. На этот компонент приходится почти 60 % водорода и 50 % монооксида углерода от общего производства пиролизного газа. С повышением температуры пиролиза отмечается рост образования газа и снижение массовой доли угольного остатка. Для жидкой фазы характерен пик при 600 °С, затем следует резкое снижение вклада этой фракции в продукты распада лигнина, что объясняется ее переходом в газообразную фазу.

Анализ реакторов термической конверсии и принципиальных схем когенерационных установок на их основе показывает, что современные технологии пиролиза биомассы могут быть разделены по таким характерным признакам, как скорость нагрева (быстрый, медленный пиролиз) и среда, в которой происходит пиролиз (вакуумный, гидропиролиз, метанопиролиз). Наибольшее применение находят технологии быстрого пиролиза биомассы, которые можно подразделить на следующие основные типы: пиролиз в кипящем слое, пиролиз в циркулирующем кипящем слое, абляционный пиролиз, пиролиз в циклонных реакторах, вакуумный пиролиз. Среди основных типов реакторов газификации принято выделять следующие три класса: реактор с неподвижным или подвижным слоем, реактор с кипящим слоем, реактор с вдуваемым потоком газа. Упомянутые типы газификаторов в общем случае являются не конкурентными между собой и применимы в разных диапазонах мощностей, что объясняется соответствующими удельными затратами на подготовку сырья, параметрами реакции (давление, температура), расходами окисляющей среды.

В главе рассматривается методология расчета вредных выбросов, широко применяемая в передовых европейских странах, в которых платы за выбросы достаточно велики. В Российской Федерации суммы штрафов за вредные выбросы уступают зарубежным показателям, но, тем не менее, экологический аспект может сыграть важную роль как в выборе системы тепло- и электроснабжения, так и в способах подготовки и очистки горючего топлива.

Проведен анализ отечественной и зарубежной литературы, в частности, трудов Аверьянова В.К., Будыко М.И., Гюльмалиева А.М., Канторовича Б.В., Масленникова В.М., Панцхавы Е.С., Сергеева В.В., Фортова В.Е., Христиановича С.А., Шейндлина А.Е., Школлера М.Б., Басу П., Бриджвотера А.В., Вархеги Г., Ларсона Е.Д., Рабля А., Фенгела Д. и др. На основе проанализированной информации из отечественной и зарубежной литературы сформулированы задачи дальнейшего исследования.

Во второй главе проводится экспериментальное исследование термогравиметрических характеристик биомассы и продуктов ее термической конверсии. В ходе работы были исследованы несколько образцов древесных пород, наиболее часто встречающиеся в средней полосе Российской Федерации, среди которых береза, дуб, сосна. В экспериментах нагревание проводилось в среде инертного газа (аргона) от комнатной

температуры до температуры 1000 °С со скоростью нагрева – 10 °С/мин. Расход инертного газа через камеру нагрева составлял 150 см^3/мин.

Для интерпретации экспериментальных данных предложена схема, состоящая из четырех независимых параллельных реакций, каждая из которых описывает термическое разложение одного из компонентов, входящих в состав исходного сырья (гемицеллюлоза, целлюлоза, лигнин, остальное). Рассматриваемый диапазон температур: 200 - 1000°С. Изменение концентрации компонента исследуемого образца (массовая доля угольного остатка компонента), связанное с выходом летучих, можно записать в виде:

$$-\frac{dC_i}{dt} = k_i \cdot C_i^{\,n}, \qquad (1)$$

где C_i – концентрация i-го компонента в исходном сырье; k_i – константа скорости химической реакции, $с^{-1}$; n – порядок реакции; t – время, с.

Процесс пиролиза сопровождается тепло- и массопереносом, обусловленным выделением летучих веществ из биомассы при постоянном подводе тепла в неизотермических условиях. Это приводит к необходимости учитывать зависимость констант скорости реакции от температуры. Константы скорости реакции записывались в Аррениусовском виде:

$$k_i = k_{o_i} \cdot \exp(-E_i / RT), \qquad (2)$$

где k_{oi} – предэкспоненциальный множитель, $с^{-1}$; E_i – энергия активации, кДж/моль; R – газовая постоянная, кДж/(моль·К); Т – абсолютная температура, К.

Более наглядное представление о деструкции материала из древесины дуба дает дифференциальная термогравиметрическая характеристика (ДТГ), позволяющая оценить скорость разложения не только всего образца, но и каждого из четырех компонентов, входящих в его состав (рис. 1).

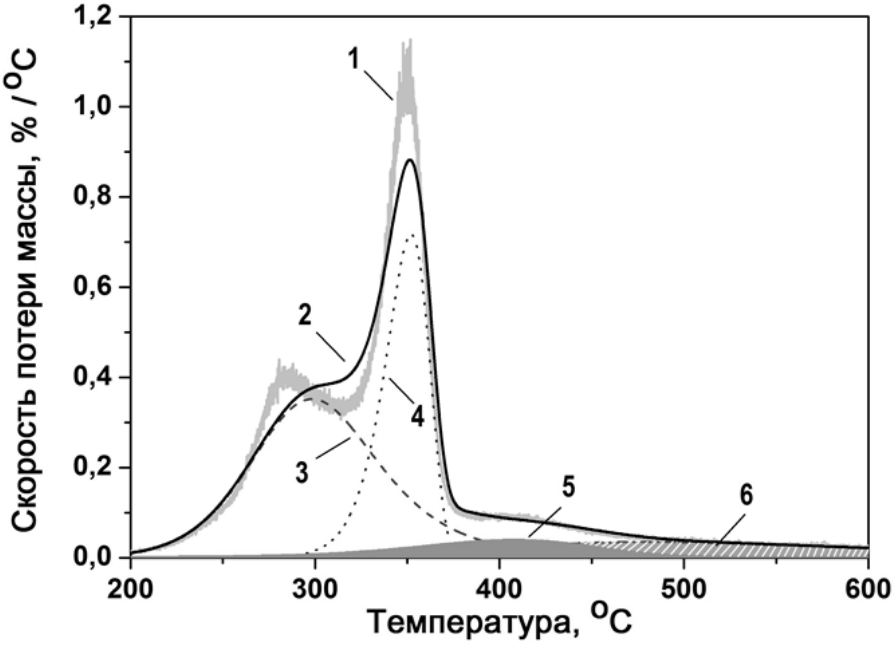

Рис. 1. ДТГ-кривые (1 - экспериментальная и 2 - расчетная) для древесины дуба
3 – гемицеллюлоза, 4 – целлюлоза, 5 – лигнин, 6 - остальное

Минимизация функционала ошибок (отклонения экспериментальной кривой от расчетной) проводилась с помощью алгоритма оптимизации DSFD 4, разработанного зарубежными специалистами. С использованием данного алгоритма была составлена программа расчета в компьютерной среде C++ Builder, которая позволяет подобрать кинетические параметры пиролиза древесины, так что ошибка описания экспериментальной кривой по методу наименьших квадратов составляет менее 0,5 %.

Анализ результатов проведенного расчета показывает (табл. 1), что для целлюлозы значения соответствующих кинетических параметров весьма близки: отклонение от средних значений менее 10%. Для лигнина и гемицеллюлозы разброс значений кинетических параметров несколько больше, что объясняется различным химическим строением данных полимеров. Для четвертого компонента (остальное) количественный разброс в данных наиболее велик. Так температурный пик выхода данного компонента для сосны равен 250 °С, для дуба - 400 °С. Поэтому не всегда возможно точно идентифицировать четвертый компонент как воду или другую составляющую биомассы, отличную от трех выше упомянутых.

Таблица 1. Кинетические параметры пиролиза древесины

Компонент	Кинетические параметры	Дуб	Береза	Сосна
Гемицеллюлоза	$\ln k_0$	14,99	17,19	16,56
	E (кДж·моль$^{-1}$)	109,6	119,9	122,9
	n	2,045	1,263	2,210
Целлюлоза	$\ln k_0$	45,26	44,62	49,08
	E (кДж·моль$^{-1}$)	273,0	273,8	299,6
	n	1,001	1,001	1,001
Лигнин	$\ln k_0$	0,001	0,001	0,001
	E (кДж·моль$^{-1}$)	58,85	63,23	69,25
	n	2,487	4,044	2,864
Остальное	$\ln k_0$	5,795	5,747	21,46
	E (кДж·моль$^{-1}$)	81,79	79,66	125,4
	n	1,106	1,001	1,064

В третьей главе проводятся теоретические исследования продуктов пиролиза и газификации биомассы с разработкой математической модели и методики расчета продуктов термической конверсии углеродсодержащего топлива. Разработанная методика рассчитывает системы уравнений для оценки равновесного состава многокомпонентной системы. Целевой функцией оптимизации является дифференциал энергии Гиббса, который в равновесном состоянии равен нулю. Разработанная методика реализована в качестве программы для ЭВМ - Fuel Thermal Conversion, которая позволяет проводить анализ режимных параметров на продукты пиролиза и газификации.

По результатам расчета, представленным на рис. 2 можно наблюдать увеличение доли водорода и монооксида углерода при уменьшении

содержания метана в газовой фазе с ростом температуры. Это приводит к некому понижению теплоты сгорания продуктов пиролиза. Однако с повышением температуры растет общий объем газовой фазы, отнесенной к массе начального образца, а также уменьшается доля паров воды, углекислого газа в смеси и величина угольного остатка. В связи с этим увеличивается теплота сгорания пиролизного газа на массу исходной древесины, максимум этой кривой достигается в температурном диапазоне 825 - 875 °С. Соответственно, данный интервал температур является наиболее благоприятным с точки зрения максимальной теплоты сгорания газа.

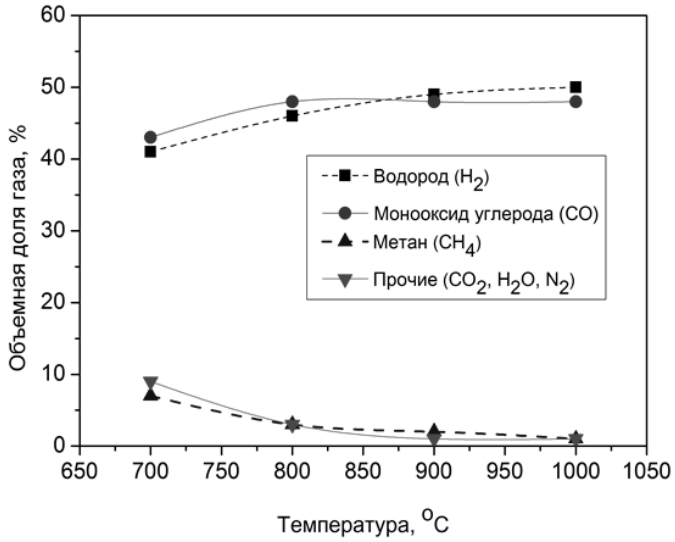

Рис. 2. Состав газа в зависимости от температуры пиролиза (расчетные данные)

Для образца из древесины был проведен расчет процесса пиролиза с учетом выхода ароматических соединений, которые в случае конденсации могут приводить к забиванию рабочих полостей пиролизера жидкими фракциями тяжелых углеводородов и, как следствие, аварийному останову всего агрегата. При пиролизе древесины наибольший вклад в процесс образования ароматических соединений вносят $C_{24}H_{12}$ (коронен) и C_6H_6 (бензол), доли остальных компонентов, включая бензапирен значительно меньше. Установлено, что доля ароматических углеводородов при температурах 850 - 900 °С не превышает 0,5 % по объему и 9 % по массе, а с увеличением температуры до 1000 °С их концентрация снижается до минимальных значений. Это позволяет рассматривать увеличение температуры в качестве положительного фактора для снижения выхода ароматических соединений.

Важным параметром при расчете процесса газификации является давление в реакторе непрерывной термической конверсии. Как следует из рис. 3, давление в реакторе оказывает существенно меньшее влияние на процесс, чем температура. С увеличением давления наблюдается рост балластных составляющих: азота, углекислого газа и паров воды. Также растет доля метана, однако за счет снижения выхода водорода и монооксида

углерода, теплота сгорания смеси уменьшается, наряду с полным объемом выделившейся газообразной фракции. Несмотря на это важно отметить, что увеличение номинального давления в реакторе приводит к снижению его габаритных размеров и, как следствие, удешевлению стоимости всего агрегата.

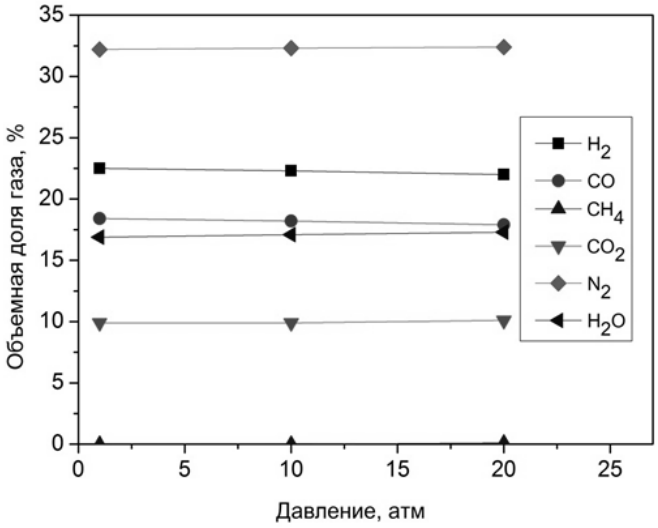

Рис. 3. Состав газа в зависимости от давления при газификации

Разработанная расчетная программа для ЭВМ может применяться как для моделирования процессов пиролиза, так и газификации любого твердого органического топлива при заданных режимных параметрах реактора непрерывной конверсии. В работе проводилось сравнение результатов расчета с данными, полученными на экспериментальном стенде кафедры энергетики высокотемпературной технологии НИУ МЭИ. Параметры газа, полученные на экспериментальном стенде схожи с аналогичными расчетными величинами равновесного процесса как с точки зрения количества газа, так и его химической энергии.

В четвертой главе выполняется разработка систем использования биомассы для производства тепловой и электрической энергии. Моделируется приоритетная схема выработки тепловой и электрической энергии в ПГУ с пиролизером биомассы (рис. 4).

Ключевыми особенностями предложенной схемы ПГУ с пиролизером биомассы являются:

- дымовые газы после котла-утилизатора используются в качестве сушильного агента для исходного топлива;
- дымовые газы после сушильного барабана подаются в конденсационный теплообменник для нагрева сырой или химически очищенной воды в паросиловом цикле;
- сконденсировавшаяся вода после сепарации используется для подпитки контура ПТУ.

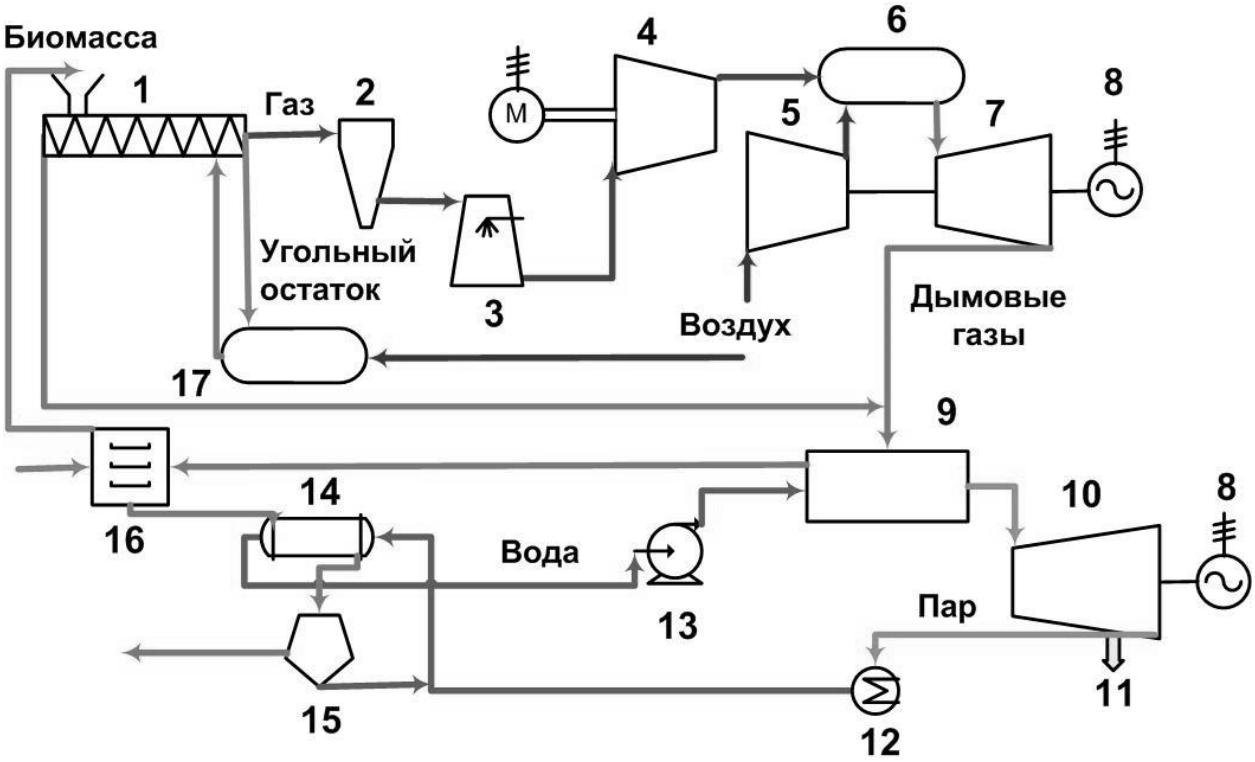

Рис. 4. Схема ПГУ на основе пиролиза биомассы
1 - пиролизер, 2 – циклон, 3 – скруббер, 4 – компрессора газа, 5 – компрессор воздуха, 6 – камера сгорания ГТУ, 7 – газовая турбина, 8 – генератор, 9 – котел-утилизатор, 10 – паровая турбина, 11 – теплофикационный отбор, 12 – конденсатор, 13 – питательный насос, 14 – конденсационный теплообменник, 15 – сепаратор, 16 – сушильный барабан, 17 – камера сгорания угольного остатка

В табл. 2 приведены основные энергетические показатели ПГУ с пиролизером биомассы.

Таблица 2. Основные энергетические показатели ПГУ с пиролизером биомассы

Показатель	Значение	Размерность
Электрическая мощность ГТУ	4,0	МВт
Электрическая мощность ПТУ	2,7	МВт
Электрическая мощность ПГУ	6,7	МВт
Тепловая мощность ПТУ	5,6	МВт
Электрический КПД брутто ПГУ	30,2	%
Коэффициент использования топлива ПГУ	55,6	%
Число часов использования номинальной мощности в году	7500	часов
Годовая выработка электроэнергии	50250	МВт·ч/год
Годовая выработка тепловой энергии	12015	Гкал/год
Расход биомассы в час	5,1	т/ч
Расход биомассы в год	38250	т/год
Расход топлива в год	20390	т у.т./год

В работе предлагается схема выработки тепловой и электрической на основе газификации биомассы (рис. 5). Отличительной особенностью схемы

ПГУ с газификатором по сравнению с циклом пиролиза является наличие контура подачи воздуха и пара в реактор непрерывной конверсии.

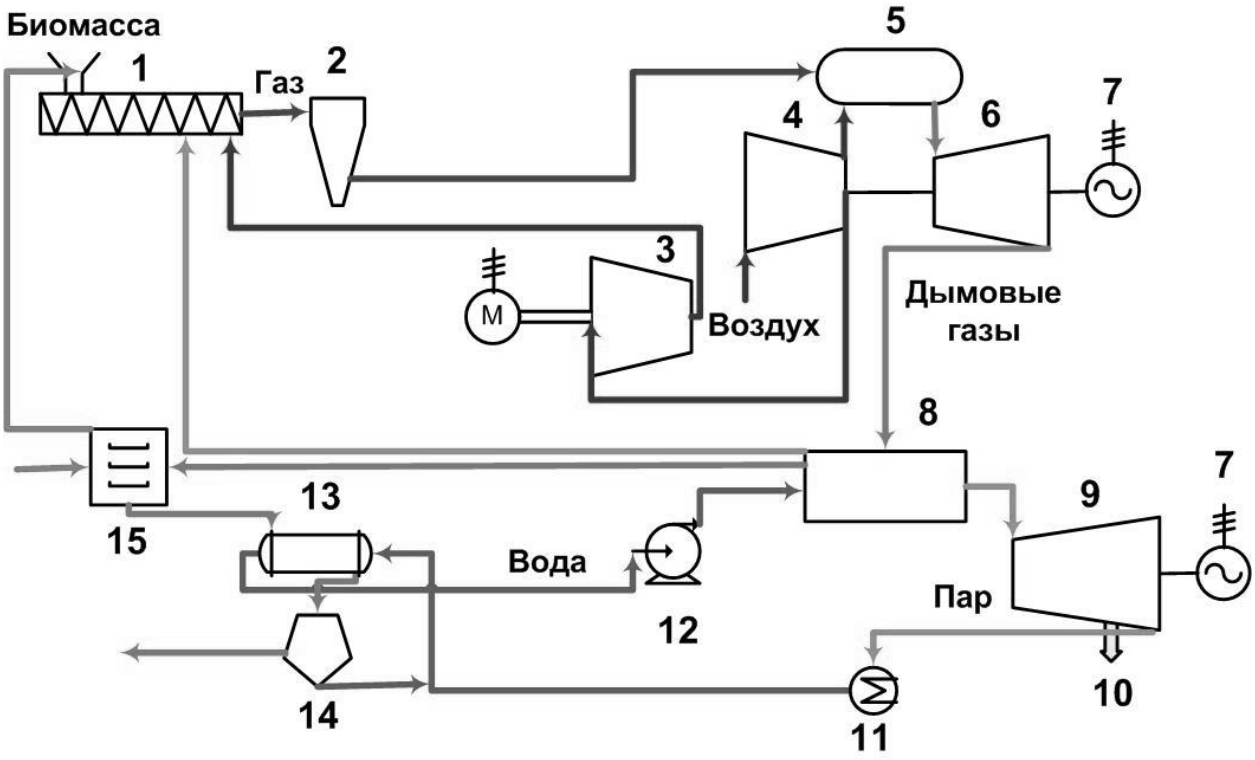

Рис. 5. Схема ПГУ на основе газификации биомассы
1 – газификатор, 2 – циклон, 3 – дожимной компрессор, 4 – компрессор воздуха, 5 – камера сгорания ГТУ, 6 – газовая турбина, 7 – генератор, 8 – котел-утилизатор, 9 – паровая турбина, 10 – теплофикационный отбор, 11 – конденсатор, 12 – питательный насос, 13 – конденсационный теплообменник, 14 – сепаратор, 15 – сушильный барабан

В табл. 3 приведены основные энергетические показатели ПГУ с газификатором биомассы.

Таблица 3. Основные энергетические показатели ПГУ с газификатором биомассы

Показатель	Значение	Размерность
Электрическая мощность ГТУ	37,2	МВт
Электрическая мощность ПТУ	10,4	МВт
Электрическая мощность ПГУ	48,7	МВт
Тепловая мощность ПТУ	20,2	МВт
Электрический КПД брутто ПГУ	41,5	%
Коэффициент использования топлива (КИТ) ПГУ	59,2	%
Число часов использования номинальной мощности в году	7500	часов
Годовая выработка электроэнергии	387750	МВт·ч/год
Годовая выработка тепловой энергии	51622	Гкал/год
Расход биомассы в час	26,4	т/ч
Расход биомассы в год	198264	т/год
Расход топлива в год	105694	т у.т./год

КПД ПГУ брутто по выработке электроэнергии в ПГУ с газификатором биомассы определяется по формуле:

$$\eta_{ЭЭ}^{ПГУ} = \frac{N_{ГТУ} + N_{ПТУ}}{B/3.6 \cdot Q_н^р} = \frac{37{,}2 + 10{,}4}{26.4/3.6 \cdot 15.62} \cdot 100\% = 41.5\%$$

Коэффициент использования топлива (КИТ) ПГУ с газификатором биомассы определяется по формуле:

$$\eta_{ТЭ+ЭЭ}^{ПГУ} = \frac{N_{ГТУ} + N_{ПТУ} + Q}{B/3.6 \cdot Q_н^р} = \frac{37{,}2 + 10{,}4 + 20{,}2}{26.4/3.6 \cdot 15.62} \cdot 100\% = 59.2\ \%$$

Суммарный коэффициент полезного использования топлива (КПИ) по электрической и тепловой нагрузке для ПГУ с пиролизером биомассы составляет 55,6 %, тогда как для ПГУ с газификатором КПИ - 59,2 %.

Сравнительный анализ энергетических установок на основе пиролиза и газификации биомассы позволяют сделать следующие основные выводы:

- применение циклов с пиролизером биомассы наиболее экономически целесообразно при электрических нагрузках до 10 МВт, вследствие меньших капиталовложений по сравнению со схемами на основе газификации. Помимо этого, применение газопоршневых установок (ГПУ) в диапазоне мощности до 4 МВт позволяет достичь более высокий КПД и срок службы в сравнении с ПГУ;
- электрический КПД ГПУ, работающей на газе пиролизера биомассы, находится в интервале 30 - 40 %. Дополнительная выработка тепловой энергии от системы охлаждения ГПУ и от котла-утилизатора за установкой приблизительно составляет 40 - 45 %. Суммарный коэффициент использования топлива в пиролизере биомассы, газопоршневой установке и котле-утилизаторе может достигать 70 – 85 %;
- установка с газификатором биомассы, в свою очередь, становится экономически привлекательной при электрических мощностях свыше 10 МВт. Это обуславливается снижением относительных затрат на осушку и измельчение исходного топлива в сравнении с циклом пиролиза, а также возможностью уменьшения габаритных размеров реактора непрерывной газификации при повышении давления в нем;
- электрический КПД ПГУ с газификатором биомассы составляет более 40% при мощности установки приблизительно равной 50 МВт. В то время как электрический КПД ПГУ с пиролизером при аналогичной нагрузке находится в диапазоне 30 - 35 %. Соответственно, с ростом установленной мощности всей станции эффективность ПГУ с реактором непрерывной газификации является одним из определяющих факторов выбора типа и схемы конструкции.

В работе выполнено компьютерное моделирование схемы ПГУ на основе газификации биомассы в программе Aspen Plus, разработанной фирмой Aspen Tech Inc. Данный продукт позволяет выполнять построение и расчет блоков газификации или пиролиза твердого органического топлива (рис. 6).

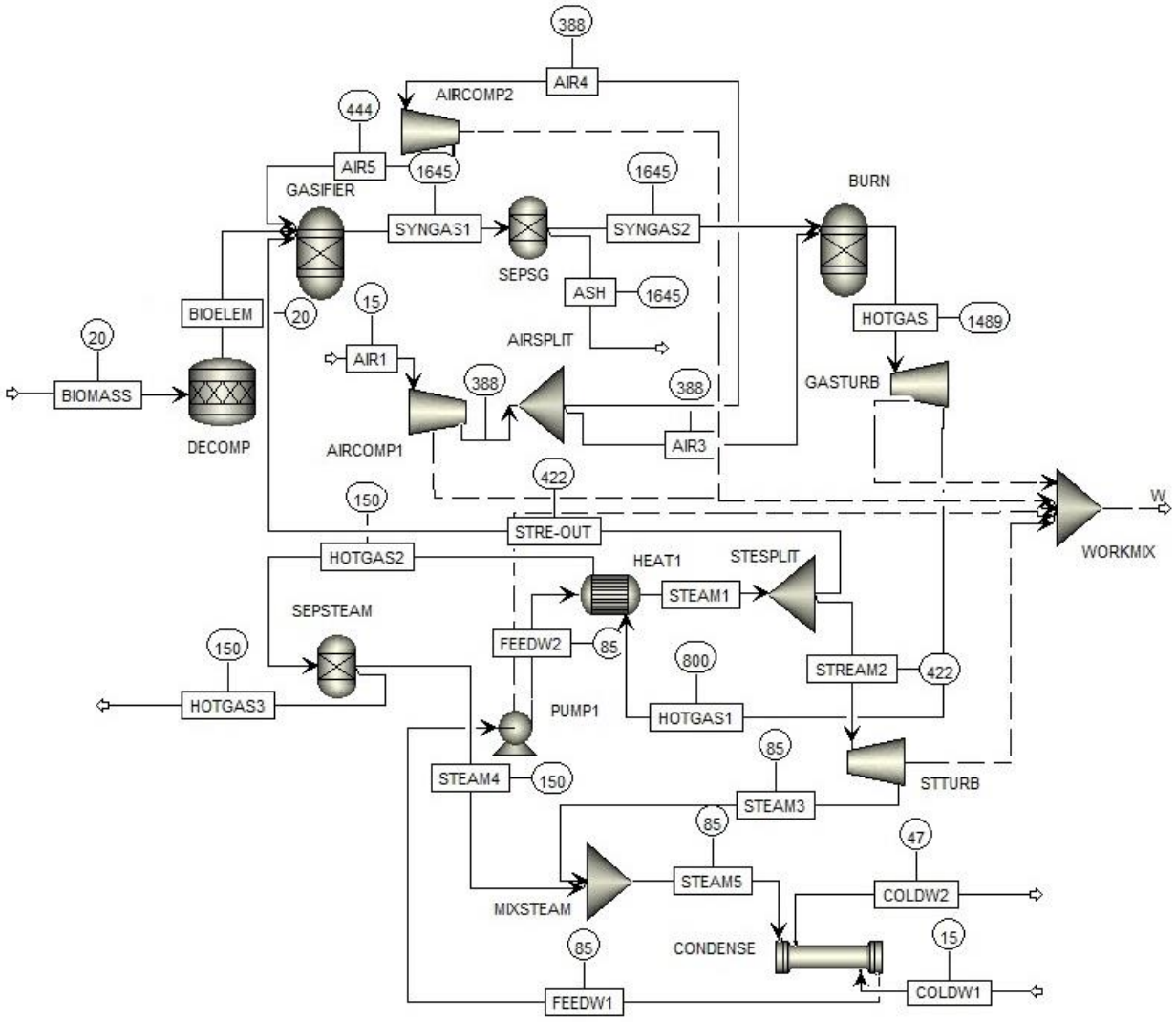

Рис. 6. Моделирование схемы ПГУ в программе Aspen Plus

Блок газификации включает в себя два компонента: блок расчета декомпозиции биомассы и реактор Гиббса, где непосредственно осуществляется процедура расчета равновесного состава газа. Для каждого потока вещества на рис. 6 указана его температура в градусах Цельсия. В программе были проведены расчеты для определения оптимальных режимных параметров различных компонентов тепловой схемы и всей системы ПГУ. Показано, что уменьшение количество подаваемого воздуха в камеру сгорания ГТУ приводит к увеличению температуры дымовых газов и росту выработки электрической энергии для того же самого расхода исходного топлива. Однако для современных газовых турбин существует верхняя температурная граница (1400 - 1500 °C), которая обусловлена эксплуатационными параметрами и характеристиками металла, применяемого для производства рабочих лопаток.

В пятой главе представлена оценка системы выработки тепловой и электрической энергии на основе биомассы по экологическим и экономическим показателям. В табл. 4 приведены результаты расчетов приземной концентрации вредных веществ от установки с газификацией

биомассы мощностью 50 МВт. Перемножая количество вероятных случаев смертности, количества лет потери жизни на стоимость среднестатистической жизни, стоимости года сокращения жизни и стоимости излечения заболевания, получена экономическая оценка ущерба здоровью населения вредными выбросами.

Таблица 4. Экологические характеристики различных видов установок

Установка N=50 МВт	Выбросы, г/кВт·ч				Смертность, чел.	Ущерб, млн.руб
	Пыль	SO_2	NO_X	CO_2		
Уголь						
ПТУ	0,057	0,29	0,52	781	1,85	83,64
Жидкое топливо						
ПТУ	0,12	1,93	0,92	750	5,96	269,4
Природный газ						
ПТУ	0,01	0,00	1,05	526	0,11	5,15
ПГУ	0,00	0,00	0,21	348	0,04	1,90
Биомасса						
ПТУ	0,12	0,055	1,03	0	0,12	5,51
ПГУ	0,044	0,032	0,242	0	0,039	1,76

С помощью программы ISC Manager (Industrial Source Complex, ГИС Карта 2008) проведен расчет влияния вредных выбросов на окружающую среду и здоровья людей для населенных пунктов в республике Карелия от установки с газификацией биомассы электрической мощностью 50 МВт с получением снимков рассеивания. Согласно проведенной оценке экологического воздействия ПГУ на биомассе можно сделать следующие основные выводы:

- приземные концентрации вредных веществ в месте расположения ПГУ на биомассе находятся в диапазоне до 0,03 мкг/м^3 (за исключением NO_x, максимальная концентрация которого составляет 0,27 мкг/м^3). Так в самом месте расположения ПГУ на биомассе вредные выбросы составляют 0,03 мкг/м^3 пыли, 0,27 мкг/м^3 оксидов азота, 0,01 мкг/м^3 оксида углерода, что является высоким экологическим показателем;
- влияние вредных выбросов на смертность и экономический ущерб ПГУ на биомассе по отношению к паросиловым ТЭЦ сократилось пропорционально уменьшению концентрации каждого типа вредных выбросов. При этом показатель смертности населения от энергетической установки на биомассе меньше примерно на 90 %.

С помощью программного комплекса Energy Invest была выполнена оценка ежегодных инвестиционных затрат и срока окупаемости ПГУ на основе газификации биомассы для снабжения тепловой и электрической энергией малого населенного пункта. Срок строительства ПГУ составляет 2 года при нормальном периоде эксплуатации - 30 лет. В качестве топлива рассматривались отходы деревообрабатывающего предприятия, состоящие

преимущественно из хвойных пород. Исходя из зарубежных литературных данных, себестоимость топлива может достигать 0,7 - 0,9 руб./кВт·ч выработанной электрической энергии. В стоимости сырья закладывается в том числе транспортные затраты на доставку древесины на расстояние от 50 до 100 км. Для республики Карелия затраты на производство щепы из лесосечных отходов без учета доставки составляют около 400 - 450 руб./т у.т., т.е. не более 0,15 руб./кВт·ч. Расчеты показывают, что срок окупаемости инвестиций ПГУ на биомассе с учетом дисконтирования составляет около 7 лет. При этом себестоимость выработки электроэнергии в цикле ПГУ на основе биомассы составляет 1,5 - 2 руб./кВт·ч, а тепловой энергии - 400 - 600 руб./Гкал, что позволяет рассматривать данную установку в качестве приоритетной для автономного энергоснабжения малых населенных пунктов Российской Федерации.

В завершении работы проводится технико-экономическая оценка рыночного потенциала полученных результатов. Рынки для схем перспективных когенерационных установок на основе ПГУ для различных местных видов углеродсодержащего топлива обычно не превышают 10-15% (в краткосрочном периоде - 3 млрд. руб.) от всего объема рынка из-за сильной зависимости от наличия местного высококалорийного топлива. Достаточно либеральные экологические нормы и наличие дешевого и сравнительно экологически чистого природного газа сужает рынок ПГУ на биомассе в несколько раз. Для разработанного программного комплекса Fuel Thermal Conversion рынок проектирования и разработок, а также инвестиционного анализа перспективных схем когенерационных установок с применением технологий газификации и пиролиза исходного углеродсодержащего топлива может составлять не более 10-15% (в краткосрочном периоде – 300 млн. руб.) от всего объема рынка.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В работе изучен процесс термической конверсии нескольких образцов древесных пород, распространенных на территории Российской Федерации. Для этого путем нагрева материала с постоянной скоростью в среде инертного газа были экспериментально получены термогравиметрические характеристики разложения каждого образца с оценкой влажности, зольности, выхода летучих и угольного остатка. Экспериментальные кривые пиролиза рассматривались как независимые реакции конверсии основных компонентов исходного растительного сырья.

Предложено математическое описание процесса пиролиза с использованием Аррениусовских зависимостей и получением универсальных кинетических параметров пиролиза древесины.

Разработана методика оценки состава и энергетического потенциала продуктов пиролиза и газификации твердого углеродсодержащего топлива, реализованная в качестве программы для ЭВМ и зарегистрированная в государственном Реестре.

Разработаны тепловые схемы ПГУ с пиролизером и газификатором биомассы с определением параметров производства тепловой и электрической энергии по энергетическим, экологическим и экономическим показателям.

Определены оптимальные схемы и режимные параметры установки производства тепловой и электрической энергии с использованием газа при пиролизе и газификации биомассы на основе системного анализа и математического моделирования.

Установлено, что применение ПГУ с пиролизером экономически обоснованно при мощностях от 1 до 10 МВт из-за более низких удельных вложений в оборудование, тогда как для ПГУ с газификатором приемлемы электрические нагрузки от 10 до 50 МВт.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

По перечню рецензируемых изданий ВАК

1. Гюльмалиев А.М., Султангузин И.А., **Федюхин А.В.** Математическое моделирование процесса пиролиза биомассы для производства синтез – газа и кокса // Химия твердого топлива. – №3. – 2012. – С. 25 - 29.
2. Султангузин И.А., Замерград В.Э., Карасевич В.А., Албул А.В., **Федюхин А.В.** Оптимизация использования природного газа и возобновляемых источников энергии в энергетических компаниях // Наука и техника в газовой промышленности. – № 1. – 2013. – С. 63-76.
3. **Федюхин А.В.**, Султангузин И.А., Степанова Т.А., Волошенко Е.В., Курзанов С.Ю., Исаев М.В. Оценка эффективности выработки тепловой и электрической энергии в установке с газификатором или пиролизером биомассы // Кокс и химия. – № 8. – 2013. – С. 38 – 42.

По перечню рецензируемых изданий SCOPUS и Web of Science

4. Gyul'maliev A. M., Sultanguzin I. A., **Fedyukhin A. V.** Mathematical simulation of the pyrolysis of biomass for the manufacture of synthesis gas and coke // Solid Fuel Chemistry – 2012. - Vol. 46, No. 3, P. 164–167.
5. **Fedyukhin A. V.**, Sultanguzin I. A., Stepanova T. A., Voloshenko E. V., Kurzanov S. Yu., Isaev M. V. Improving Solid Fuel Pyrolysis and Gasification for Effective Cogeneration // Coke and Chemistry. - 2013. - Vol. 56. - No. 8. - P. 302–306.

Публикации в других изданиях

6. Майков И.А., Синельщиков. В.А., **Федюхин А.В.** Исследование термического распада органического сырья растительного происхождения // Труды 5-й Российской национальной конференции по теплообмену М.: МЭИ, 2010. Т. 3. С. 262 – 264.
7. **Fedyukhin A.V.**, Maikov I.L., Sinelshchikov V.A. Comparison of kinetic models of biomass thermal decomposition // Book of Abstracts of International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter. Nalchik. Russia. 2011. P. 114 – 115.
8. **Федюхин А.В.**, Султангузин И.А., Синельщиков. В.А. Исследование процесса пиролиза биомассы для производства синтез – газа и кокса // Труды 17-й Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, Электротехника и Энергетика» М.: МЭИ, 2011. Т. 2. С. 577 – 579.
9. **Федюхин А.В.**, Султангузин И.А. Математическое моделирование процесса пиролиза древесины для производства синтез – газа // Информационные технологии,

энергетика и экономика: Сб. трудов 8-й Межрегиональной (международной) научно-технической конференции студентов и аспирантов, Смоленск: Филиал МЭИ, 2011. Т. 2. С. 150 – 155.
10. **Федюхин А.В.**, Султангузин И.А. Установка пиролиза биомассы для выработки тепло- и электроэнергии на основе ПГУ // Труды 18-й Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, Электротехника и Энергетика» М.: МЭИ, 2012. Т. 3. С. 328.
11. **Федюхин А.В.**, Султангузин И.А. Расчет схемы комбинированный выработки тепловой и электрической энергии в ПГУ на основе пиролиза биомассы // Информационные технологии, энергетика и экономика: Сб. трудов 9-й Межрегиональной (международной) научно-технической конференции студентов и аспирантов, Смоленск: Филиал МЭИ, 2012. Т.3, С. 151 – 154.
12. Султангузин И.А., **Федюхин А.В.**, Яворовский Ю.В. Разработка установки термической конверсии биомассы и производства тепловой и электрической энергии в ПГУ // Труды Второй Всероссийской научно-практической конференции «Повышение надежности и эффективности эксплуатации электрических станций и энергетических систем». Энерго – 2012. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. С. 397 – 400.
13. **Федюхин А.В.**, Султангузин И.А., Яворовский Ю.В. Разработка установки производства тепловой и электрической энергии в ПГУ на основе пиролиза или газификации биомассы // Энергосбережение – теория и практика: труды Шестой Международной школы – семинара молодых ученых и специалистов (2012 г., Москва). – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. С. 359 – 364.
14. **Федюхин А.В.**, Волошенко Е.В. Султангузин И.А. Эффективность выработки тепло- и электроэнергии в газопоршневой установке с пиролизером биомассы // Труды 19-й Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, Электротехника и Энергетика» М.: МЭИ, 2013. Т. 3. С. 199.
15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013660842: Fuel Thermal Conversion. ООО «Эксперт Энерго» / Гюльмалиев А.М., Султангузин И.А., **Федюхин А.В.** Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 20.11.2013.
16. Гюльмалиев А.М., Султангузин И.А., **Федюхин А.В.** Полезная модель: Автономная когенерационная установка с внутрицикловым пиролизом твердого углеродсодержащего топлива (заявка № 2013157316 от 25.12.2013).
17. **Федюхин А.В.**, Гюльмалиев А.М., Султангузин И.А. Глава 9. Использование биомассы для производства тепловой и электрической энергии / В кн.: Султангузин И.А. Экологическая безопасность и энергетическая эффективность промышленных теплоэнергетических систем: Учеб. пособие. – М: Издательский дом МЭИ, 2013. 288 с.
18. Волошенко Е.В., **Федюхин А.В.**, Султангузин И.А. Повышение энергетической эффективности системы энергоснабжения на основе внутрицикловой газификации угля // Труды 20-й Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, Электротехника и Энергетика» М.: МЭИ, 2014. Т. 3. С. 201.
19. **Fedyukhin A.V.**, Voloshenko E.V. Sultanguzin I.A. Simulation of integral gasification and combined cycle power plant using Aspen Plus // The proceedings of 20-th International scientific and technical conference of students and postgraduates «Electronics, Electrical engineering and Power engineering». Moscow. Russia. – 2014. – Vol. 3. – P. 236.

ФЕДЮХИН АЛЕКСАНДР ВАЛЕРЬЕВИЧ

РАЗРАБОТКА СИСТЕМ КОМБИНИРОВАННОЙ ВЫРАБОТКИ ТЕПЛОВОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПИРОЛИЗА И ГАЗИФИКАЦИИ БИОМАССЫ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 27.03.2014
Печать трафаретная
Заказ № 9426
Тираж: 100 экз.
Типография «11-й ФОРМАТ»
ИНН 7726330900
115230, Москва, Варшавское ш., 36
(499) 788-78-56
www.autoreferat.ru