

На правах рукописи



Свищев Денис Алексеевич

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА
СЛОЕВОЙ ОБРАЩЕННОЙ ГАЗИФИКАЦИИ БИОМАССЫ**

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2019

Работа выполнена в ФГБУН Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель: доктор технических наук,
Кейко Александр Владимирович.

Официальные оппоненты: **Стрижак Павел Александрович**, доктор физико-математических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», профессор Исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов;

Рябов Георгий Александрович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, ОАО «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени теплотехнический научно-исследовательский институт», г. Москва, заведующий лабораторией специальных котлов отделения парогенераторов и топочных устройств.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет».

Защита диссертации состоится 07 июня 2019 года в 14:00 ч на заседании диссертационного совета Д 212.285.07 на базе ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?d=51&rid=288909>.

Автореферат разослан «___» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Аронсон Константин Эрленович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Одним из перспективных способов энергетической переработки биомассы является процесс газификации. С начала 2000-х годов наблюдается увеличение интереса к данной технологии, однако она пока не получила широкого промышленного внедрения, а основная доля вырабатываемой из биомассы энергии приходится на процесс прямого сжигания. Данная ситуация обусловлена рядом технологических барьеров, препятствующих промышленному внедрению технологий газификации. Такие барьеры обусловлены недостаточной стабильностью работы термохимических реакторов во времени и низкой готовностью газогенераторного оборудования, необходимостью очистки газа от примесей смолы и твердых частиц. Газогенераторные станции характеризуются сравнительно небольшим химическим КПД преобразования энергии топлива в химическую энергию газа, полученного из него. Такой показатель часто не превышает 50-70% для большинства демонстрационных, пилотных и действующих установок.

Для повышения химического КПД газификации требуется проведение дополнительных исследований. Наиболее рациональным и результативным является сочетание физического эксперимента с математическим моделированием. Диссертация посвящена вопросам повышения химического КПД слоевой газификации биомассы.

Степень разработанности проблемы. В зависимости от области использования генераторного газа, применяются различные критерии оптимизации процесса газификации. Для энергетических целей, направленных на выработку механической или электрической энергии, важен химический КПД процесса.

При анализе процессов газификации традиционно рассматривается влияние одного-двух режимных параметров при постоянных остальных. Такой подход позволяет произвести оптимизацию процесса только для узкой области параметров. Для многопараметрической оптимизации процессов газификации используются современные методы математической статистики – методы планирования эксперимента и метод поверхности отклика. Преимуществом данных методов является относительно небольшое количество экспериментов, требующихся для наполнения статистической модели данными. Для их получения используются результаты как физического, так и численного моделирования.

Термодинамическое моделирование позволяет находить оптимальные условия газификации для широкого диапазона параметров модели. Общность данного подхода дает возможность применять его к реакторам различного типа и мощности. Недостатком подхода является нахождение оптимального начального состава потоков, поступающих в газогенератор и температуры процесса. Данные модельные параметры сложно воспроизвести в реакторе газификации, поскольку они часто являются производными параметрами процесса. В работе предложен термодинамический подход, позволяющий преодолеть данный недостаток и осуществить термодинамический анализ экспериментальных режимов на множестве расчетных.

Цели и задачи исследования. Объектом исследования выступают процессы и режимы газификации твердого топлива в энергетических установках. Предметом исследования являются показатели эффективности процесса конверсии и в частности химический КПД процесса. Цель работы состоит в оценке предельных значений химического КПД, а также поиске физико-химических ограничений, препятствующих их достижению. Исследование не сводится к нахождению оптимальных режимов работы какого-либо отдельного газогенератора, а направлено на установление общих принципов протекания термохимического процесса и ограничений при его оптимизации.

В диссертационном исследовании решались следующие целевые задачи:

– Разработка метода термодинамического анализа режимных параметров газогенераторного процесса.

– Создание лабораторного стенда с реактором обращенного типа и постановка ряда экспериментов на нем.

– Анализ экспериментальных режимов и валидация термодинамического метода с использованием полученных опытных данных.

В экспериментах на обращенном реакторе был найден ряд режимов, свойства которых недостаточно полно объясняются с позиций существующей теории горения и газификации топлива. Анализ опытных данных позволил выдвинуть гипотезу о неклассическом (нестратифицированном) механизме слоевой конверсии древесного топлива. В диссертационном исследовании проверяются основные положения данной гипотезы.

Научная новизна:

1) В работе предложен метод термодинамического анализа экспериментальных режимов на множестве расчетных. Данный метод позволяет обобщенно рассматривать влияние различных факторов на процесс конверсии. К таким факторам относятся режимные параметры, геометрические и конструкционные особенности реактора и др.

2) Работа вносит вклад в теоретические основы процесса газификации твердого топлива. Раскрыты новые закономерности протекания термохимического процесса, обусловленные законами равновесной термодинамики. Обобщены и систематизированы физико-химические ограничения, препятствующие оптимизации процесса газификации.

3) В исследовании выдвинута и обоснована гипотеза о неклассическом механизме слоевой конверсии древесного топлива в реакторе обращенного типа. Проведена экспериментальная проверка основных положений данной гипотезы. Определены границы, обуславливающие протекание процесса конверсии топлива согласно классическому и неклассическому механизмам.

Теоретическая и практическая значимость работы. Предложенный в работе подход термодинамического анализа может применяться не только в исследовании газификации, но и к любым химическим процессам, термодинамическое опи-

сание которых затруднено в силу различий в составе независимых (исходных) параметров модели и опытных режимов. Данный подход ценен не только для анализа физических опытов, но и применим при исследовании режимов полученных численно на детальных кинетических моделях. В рамках подхода возможно оценить термодинамическое совершенство того или иного экспериментального режима, произвести сопоставление друг с другом режимов работы как отдельно взятого реактора, так и нескольких реакторов, отличающихся по мощности и типу процесса.

Исследование механизма слоевой газификации имеет важное теоретическое значение. Сведения о механизме конверсии являются базовыми и существенными для его математического моделирования, анализа, объяснения экспериментальных закономерностей и пр. Режимы нестратифицированной слоевой газификации привлекательны с практической точки зрения. Для них характерна компактная реакционная зона, высокий химический КПД, низкий выход смолы и стабильность состава газа при изменении мощности реактора. Представления о различных механизмах конверсии могут стать основой прикладных НИОКР, направленных на создание нового высокоэффективного энергетического оборудования.

Прикладное значение имеет экспериментальная методика, используемая для исследования конверсии одиночных частиц, а также методика составления полного материального и энергетического балансов процесса.

Часть результатов диссертации получена в рамках работ по гранту РФ «Решение проблемы применения бедных промышленных и синтез-газов для выработки электроэнергии в комбинированном цикле» (2014–2016 гг., № 14-19-00524).

Научное исследование соответствует приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в РФ (п. 8 «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика»), а также перечню критических технологий РФ (п. 27 «Технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе»).

Методология и методы исследования. Состав продуктов газификации оценивался с помощью равновесной термодинамической модели, выбранной из-за всеобщности и универсальности термодинамического подхода. Валидация такой модели производилась по данным физического эксперимента, поставленного на лабораторном стенде обращенной газификации. В обращенном процессе образуется незначительное количество смолы, что позволяет избежать погрешностей связанных с недооценкой ее выхода в термодинамической модели.

Проверка гипотезы о нестратифицированном механизме слоевой газификации проводилась экспериментально. Для решения данной задачи был изготовлен лабораторный стенд из прозрачного кварцевого стекла, а также создан настольный стенд и методика для проведения конверсии одиночных частиц.

Основные положения, выносимые на защиту:

- 1) Термодинамический метод анализа режимов газификации на множестве расчетных.

- 2) Результаты экспериментальных исследований по обращенной газификации твердых топлив.
- 3) Закономерности протекания процесса газификации твердого топлива, обобщенные в форме физико-химических ограничений ее эффективности.
- 4) Гипотеза о неклассическом механизме протекания слоевой обращенной газификации древесной биомассы, а также экспериментальная проверка основных положений выдвинутой гипотезы.

Личный вклад автора. Общее направление экспериментальных и теоретических работ задавалось д.т.н. А.В. Кейко. Совместно с сотрудниками лаборатории Термодинамики ИСЭМ СО РАН автор участвовал в проектировании и изготовлении трех опытных стендов, осуществлении пуско-наладочных работ. Автор руководил проведением экспериментов и им лично осуществлен анализ проб, составлен материальный и энергетический балансы режимов, проведены анализ и систематизация опытных данных. Автором предложен подход для анализа режимов газификации на множестве расчетных, выдвинута и испытана гипотеза относительно механизма слоевой конверсии топлива и предложены методы ее исследования. Им создано программное обеспечение для выполнения рутинных термодинамических расчетов и осуществлены сами расчеты.

Автор признателен коллективу кафедры «Тепловые электрические станции» УрФУ и лично д.т.н. А.Ф. Рыжкову, к.т.н. Т.Ф. Богатовой и к.т.н. Г.И. Никитиной за ценные замечания и рекомендации относительно работы, доброту и всестороннюю поддержку.

Автор выражает благодарность д.т.н. А.В. Кейко, к.х.н. В.А. Шаманскому, к.т.н. А.Н. Козлову, к.т.н. И.Г. Донскому и к.х.н. М.В. Пензику за обсуждение материалов работы и ценные рекомендации, признателен за помощь в создании экспериментального оборудования и проведении экспериментов на нем.

Достоверность результатов работы. Обоснованность и непротиворечивость научных положений исследования обеспечивается теоретической и методологической основой, которую составляют труды зарубежных и отечественных ученых. Достоверность результатов физического эксперимента обуславливается применением современного контрольно-измерительного и аналитического оборудования. Результаты термодинамического моделирования прошли валидацию с использованием полученных в исследовании экспериментальных данных. Полученные в работе данные и закономерности сопоставлялись со сведениями из открытых литературных источников.

Апробация результатов. Представление и обсуждение результатов диссертационного исследования проходило на следующих мероприятиях: 10-й Международной конференции по прикладной энергетике («ICAE», Китай, 2018); 2-й Международной конференции и выставке по биоэнергетике («IBSCE», Китай, 2017); 9-ом Международном семинаре по структуре пламени (Новосибирск, 2017); нескольких Международных конференциях по энергетическим технологиям для устойчи-

вого развития («SET», 2012, 2013, 2015); 4-ом Международном симпозиуме по газификации и ее приложениям («iSGA-4», Австрия, 2014); Всероссийских конференциях с международным участием «Горение твердого топлива» (Новосибирск, 2012, 2018).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 27 работ, 16 из которых напечатаны в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК (из них 15 проиндексированы международными системами цитирования WoS и Scopus), 7 работ издано в трудах российских и международных конференций. В список работ также вошли 3 главы монографий и 1 препринт.

Структура работы. Работа изложена на 142 страницах, содержит 5 глав, 28 рисунков и 15 таблиц. При подготовке работы использовано литературных 240 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** диссертации приведены предмет, объект, цели и задачи работы; обоснована актуальность темы исследования и указана степень ее разработанности; даны сведения о научной новизне, теоретической и практической значимости, методах и подходах исследования; отражены защищаемые положения, вклад автора и другие сведения.

В **первой главе** работы приведен обзор литературных источников по теме исследования. Дана классификация процессов газификации и приведена краткая характеристика основных из них. Рассмотрено влияние на показатели процессов таких свойств топлива и режимных параметров как: крупность частиц биомассы и ее влажность, интенсивность подачи дутья, его химический состав и температура. Приведен анализ барьеров коммерциализации технологий газификации.

В первой главе выделены основные направления современных термодинамических исследований процессов газификации. Одна часть таких работ направлена на совершенствование термодинамических моделей по пути учета образования неравновесных количеств продуктов конверсии, например смолы, углеродного остатка, газообразных углеводородов, неравновесного соотношения компонентов газа. Целью другой части исследований является оптимизация начальных параметров термодинамических моделей. Критериями оптимизации выступают химический КПД, выход водорода, теплота сгорания получаемого газа и его выход с определенным соотношением H_2/CO .

Термодинамические расчеты свидетельствуют о принципиальной возможности совершенствования процесса газификации. Расчетный КПД хим. автотермического процесса достигает при оптимальных условиях 80-85%. Термодинамические модели предсказывают оптимальный состав входящих в реактор потоков и температуру (или тепло обмениваемое реактором с окружающей средой). Данные параметры сложно воспроизвести на реакторе установки в силу следующих особенностей: (а) Число экспериментальных параметров превышает число расчетных. Такие

параметры как крупность частиц топлива, геометрические размеры реактора, порозность слоя и др., не могут быть учтены в термодинамической модели непосредственно. (б) В рамках термодинамической модели не учитывается интенсивность потоков веществ, поступающих в реактор или покидающих его. (в) Некоторые исходные параметры модели являются производными параметрами в эксперименте, например температура и, в ряде случаев, коэффициент расхода дутья (см. рис. 1).

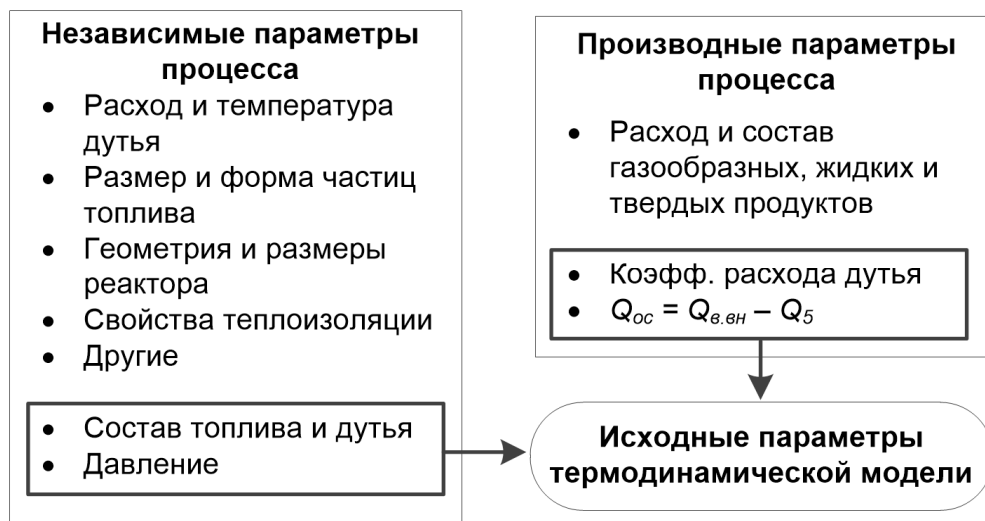


Рисунок 1 – Сопоставление исходных параметров процесса и термодинамической модели; Q_{oc} – тепло обмениваемое реактором с окружающей средой, $Q_{в.вн}$ – тепло, вносимое в реактор нагретым воздухом, Q_5 – теплопотери от наружного охлаждения реактора.

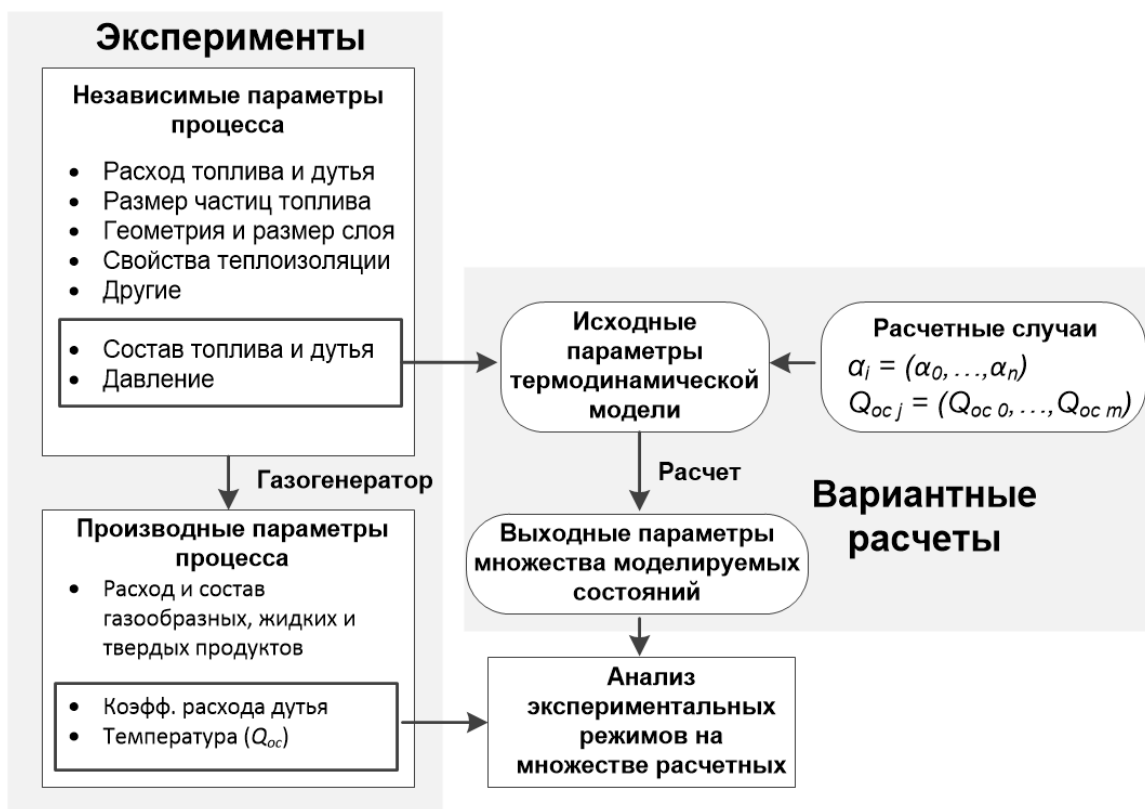


Рисунок 2 – Общая схема термодинамического анализа режимов газификации на множестве расчетных, α – коэффициент расхода окислителя.

В работе предложен новый метод анализа режимов газификации на множестве расчетных. Схема предлагаемого в работе подхода включает экспериментальную и

расчетную часть (рис. 2). Экспериментальная часть представлена одним или несколькими опытными режимами. Для каждого режима требуется определить коэффициент расхода дутья и тепло, обмениваемое реактором с окружающей средой (Q_{oc}). Расчетная часть генерирует множество равновесных состояний реакционной системы, полученных на прошедшей валидации термодинамической модели.

На рис. 1 существует связь между независимыми (исходными) параметрами модели и производными параметрами процесса, препятствующая воспроизведению оптимальных расчетных режимов. На рис. 2 такая связь отсутствует. Для этого коэффициент расхода дутья и тепло, обмениваемое реактором с окружающей средой, варьируются в широком интервале значений. Данные интервалы выбираются произвольно, но должны включать в себя экспериментальные значения. Ключевым звеном предложенного метода является анализ опытных режимов относительно множества расчетных (рис. 2). Он позволяет исследовать возможности и пути достижения в эксперименте оптимальных с точки зрения термодинамики условий.

Для оптимизации процесса конверсии можно применять традиционные методы поиска экстремума целевой функции математической модели или методы планирования численных и физических экспериментов. Предложенный в работе подход отличается от данных методов следующими особенностями: (а) Термодинамическое моделирование позволяет находить глобальный максимум КПД. Другие методы оптимизации могут приводить к отысканию локальных максимумов вследствие погрешности измерений, либо макрокинетических ограничений. (б) При анализе процесса в соответствии с предложенным подходом заранее известны оптимальное значение эффективности и термодинамические условия, при которых такое значение достигается. При использовании методов планирования экспериментов для оптимизации газогенераторов заранее неизвестны ни предельный химический КПД, ни условия при которых он достигается. (в) Термодинамический подход является универсальным и применимым для реакторов различного типа и широкого диапазона параметров процесса. Использование математических моделей, построенных на основе уравнений химической кинетики, зачастую ограничено рамками одного процесса и даже аппарата (модели «ad hoc»).

Во **второй главе** приведены сведения о конструкции и принципе работы экспериментального стенда, методики измерений параметров процесса и составления полного материального и энергетического балансов, принципы построения и исходные данные термодинамической модели.

Эксперименты были проведены на лабораторном стенде (рис. 3), включающем стальной обращенный реактор непрерывного действия без горловины. Топливо поступало в реактор непрерывно из бункера (1), воздух подавался через электрический нагреватель (3) и шесть фурм (4). Реактор был снабжен теплоизоляцией (5). Слой топлива опирался на решетку (6), которая позволяла задавать его высоту. Измерения температуры осуществлялись с помощью термопар типа «ХА» (7). Твердые частицы отделялись от генераторного газа в циклоне (9), также позволявшем

собирают жидкие продукты (водяной конденсат и смола). Газ из циклона охлаждался в теплообменнике (10) и проходил через тонкий фильтр (11). Прокачку газа через установку обеспечивал вентилятор (12). Расход воздуха контролировался этим вентилятором и измерялся ротаметром (2). Состав газа определялся газовым хроматографом SRI 8610C (13).

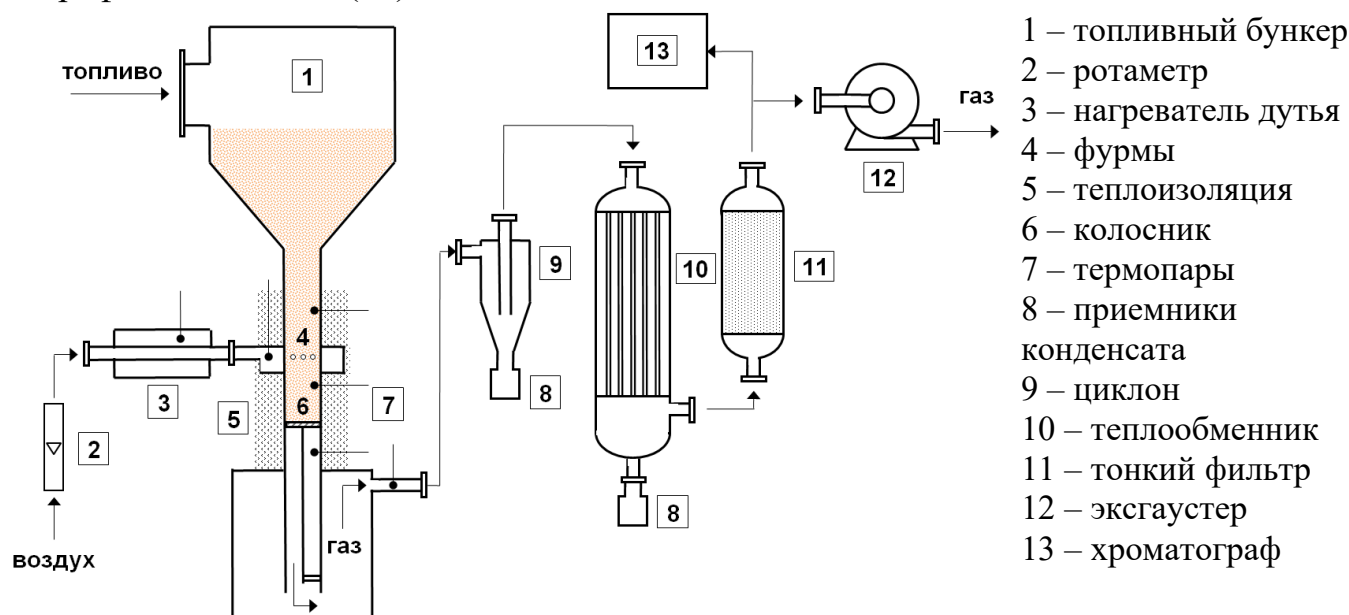


Рисунок 3 – Схема экспериментального стенда

На стенде испытывались режимы с древесным углем (9-11 мм) и древесной щепой (8-12 мм), что позволило поэтапно провести валидацию модели и предложенный термодинамический подход на различном топливе. Характеристики топлив приведены табл. 1.

Таблица 1 – Характеристики топлив (% масс.)

Топливо	C^{daf}	H^{daf}	O^{daf}	W^r	V^d	A^d	Q_H^r , МДж/кг
Березовый уголь	82,5	3,6	13,9	2,6-4,4	18,9	3,5	28,5
Осиновая щепа	49,3	5,5	45,2	6,8	84,9	0,4	16,4

Таблица 2 – Параметры процесса в экспериментальных запусках

Топливо	Запуск	Параметры процесса		
		Расход воздуха, м ³ /ч	Температура воздуха, °С	Толщина слоя теплоизоляции, см
Березовый уголь	C1	0,8-2,5	20	0
	C2		20	10
	C3		270-450	10
Осиновая щепа	B1	0,8-2,8	20	0
	B2		20	10
	B3		330-370	10

С каждым видом топлива было проведено по три экспериментальных запуска. В одном запуске регистрировалось несколько режимов, отличающихся расходом воздуха. Между собой запуски различались нагревом воздуха и толщиной теплоизоля-

ции реактора (табл. 2). Общее количество режимов, полученных в шести запусках, составило 27.

Для каждого режима был оценен ряд параметров, а также построены полный материальный и энергетический балансы. Коэффициент α оценивался как отношение фактического расхода воздуха ($V_{\text{возд.}}$, м³/ч) к количеству воздуха, теоретически необходимого для полного сгорания исходного топлива ($V_{\text{возд,гор}}$, м³/ч):

$$\alpha = V_{\text{возд}} / V_{\text{возд,гор}} \quad (1)$$

Химический КПД процесса (η_x , %) рассчитывался как отношение низшей теплоты сгорания газа к низшей теплоте сгорания топлива из которого газ был получен:

$$\eta_x = (Q_{i,\text{газа}} V_{\text{газа}}) / (Q_{i,\text{топлив}} m_{\text{топлив}}) \quad (2)$$

Расход газа находился на основе баланса азота, по уравнению:

$$V_{\text{газа}} = (V_{\text{возд}} N_2^{\text{возд}}) / N_2^{\text{газ}}, \quad (3)$$

где $N_2^{\text{газ}}$ и $N_2^{\text{возд}}$ – содержание азота в газе и воздухе соответственно, % об.

Расход топлива является производным и нерегулируемым параметром, и определяется потребностями самого термохимического процесса. Данный расход определялся из уравнения баланса углерода:

$$m_{\text{топлив}} \chi_{\text{топлив}}^C = V_{\text{газа}} Y_{\text{газа}}^C \frac{12}{\nu} + m_{\text{кокс}} \chi_{\text{кокс}}^C, \quad (4)$$

где m и χ^C – расход рабочего топлива или кокса (кг/ч) и содержание углерода в них (% масс.); $Y_{\text{газа}}^C$ – доля углерода в газе; ν – молярный объем идеального газа (м³/кмоль). Расход кокса оценивался по балансу минеральной части топлива:

$$m_{\text{кокс}} = m_{\text{топлив}} A_{\text{топлив}}^r / A_{\text{кокс}}^d. \quad (5)$$

Зольность сухого коксозольного остатка как в опытах на древесном угле, так и в опытах на древесине составляла 71-74%. Выход кокса был пренебрежимо мал и составлял от массы рабочего топлива лишь 0,12-0,14%.

В экспериментах на прозрачном кварцевом реакторе (см. главу 4) расход топлива определялся не только по балансу углерода, но и по скорости движения топливного слоя. Ширина доверительного интервала для относительных расхождений расхода топлива, определяемого различными методами, составила около 5%. Столь невысокое значение объясняется малыми погрешностями определения состава газа, расхода воздуха и состава топлива.

Энергетический баланс газификации составлялся на основе материального. Для его построения использовались понятия и обозначения, принятые в нормативном методе теплового расчета котлоагрегатов:

$$Q_p + Q_{\text{в.вн}} = Q_{\text{газа}} + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5, \quad (6)$$

где Q_p – располагаемое тепло, включающее физическую и химическую энергию рабочего топлива (Q_n^p), $Q_{\text{в.вн}}$ – тепло, вносимое в реактор нагретым воздухом, $Q_{\text{газа}}$ – теплота сгорания генераторного газа, слагаемые Q_i соответствуют потерям тепла. Химический недожог (Q_3) в данном случае обеспечивается не наличием горючих

компонентов в составе газа, а образующейся смолой. Расчет теплотерь от наружного охлаждения (Q_5) производился по методу М.Б. Равича на основе уравнения (6), в котором они являлись замыкающим слагаемым.

Для расчета равновесного состава продуктов газификации использовалась термодинамическая модель, в которой находился максимум энтропии реакционной системы при постоянных энтальпии и давлении. Данная задача решалась методом неопределенных множителей Лагранжа, и сводилась к решению следующей системы уравнений:

$$C: x_{C:cond} + x_{CO} + x_{CO_2} + x_{CH_4} = b_C \quad (7)$$

$$H: 2x_{H_2} + 2x_{H_2O} + 4x_{CH_4} = b_H \quad (8)$$

$$O: x_{CO} + 2x_{CO_2} + x_{H_2O} = b_O \quad (9)$$

$$x_{C:cond} + x_{CO} + x_{CO_2} + x_{CH_4} + x_{H_2} + x_{H_2O} = x_{C:cond} + x_{gas} = \sum_j x_j \quad (10)$$

$$\frac{\Delta G_j^0}{RT} + \ln\left(\frac{x_j}{x_{gas}}\right) + \ln\frac{P}{P_0} + \frac{\sum_j a_{ij} \lambda_i}{RT} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\Delta G_{C:cond}^0}{RT} + \frac{\lambda_C}{RT} \leq 0 \quad (12)$$

$$Q_{oc} = Q_{в.вн} - Q_5 = \sum_j h_j(T)x_j - \sum_j h_j(T^{in})x_j^{in} \quad (13)$$

В уравнениях баланса по элементам (7)-(9): x_j – количество вещества j , b_i – количество вещества элемента i . В уравнении материального баланса (10) $\sum_j x_j$ – общее количество молей веществ. Уравнение (11) и неравенство (12) являются частными производными функции Лагранжа по газообразным веществам и конденсированному углероду соответственно. В уравнении энергетического баланса (13): $h_j(T)$ – полная энтальпия ее j -го вещества, индекс in обозначает начальное состояние, Q_{oc} – тепло обмениваемое реактором с окружающей средой.

Верификация модели (7)-(13) проводилась по данным термодинамического моделирования паровоздушной газификации кокса, полученным на основе закона действующих масс (Smith J.M. et al., 2007). Абсолютное расхождение в значениях мольных долей веществ, оцененное на разных моделях, составило не более 0,001.

Третья глава посвящена обсуждению опытных данных, валидации равновесной модели и анализу экспериментальных режимов на множестве равновесных. Также в главе представлена гипотеза о неклассическом механизме газификации древесной щепы, выдвинутая на основе опытных и расчетных данных.

При газификации древесного угля получены закономерности, аналогичные опубликованным в классических работах Х.И. Колодцева, З.Ф. Чуханова, Ван Дер Ховена и др. Увеличение расхода воздуха, его нагрев и утепление реакционной камеры приводят к увеличению содержания горючих компонентов в газе и возрастанию химического КПД (например, см. рис. 4.С1).

В отличие от закономерностей, наблюдаемых при конверсии древесного угля, эффективность газификации древесины практически не зависит от расхода воздуха. В рамках каждого из запусков В1-В3 не наблюдалось существенных изменений состава газа, α , и относительного выхода жидких продуктов, несмотря на увеличение расхода воздуха в 1,5-3,5 раза (см. рис. 4.В1). Это явление нетипично для обращенных газогенераторов, хотя и отмечалось раньше в работах В.П. Валавендера и Р. Бильбао. Опубликованные данные, в основном, свидетельствуют о сильной зависимости состава газа от расхода воздуха.

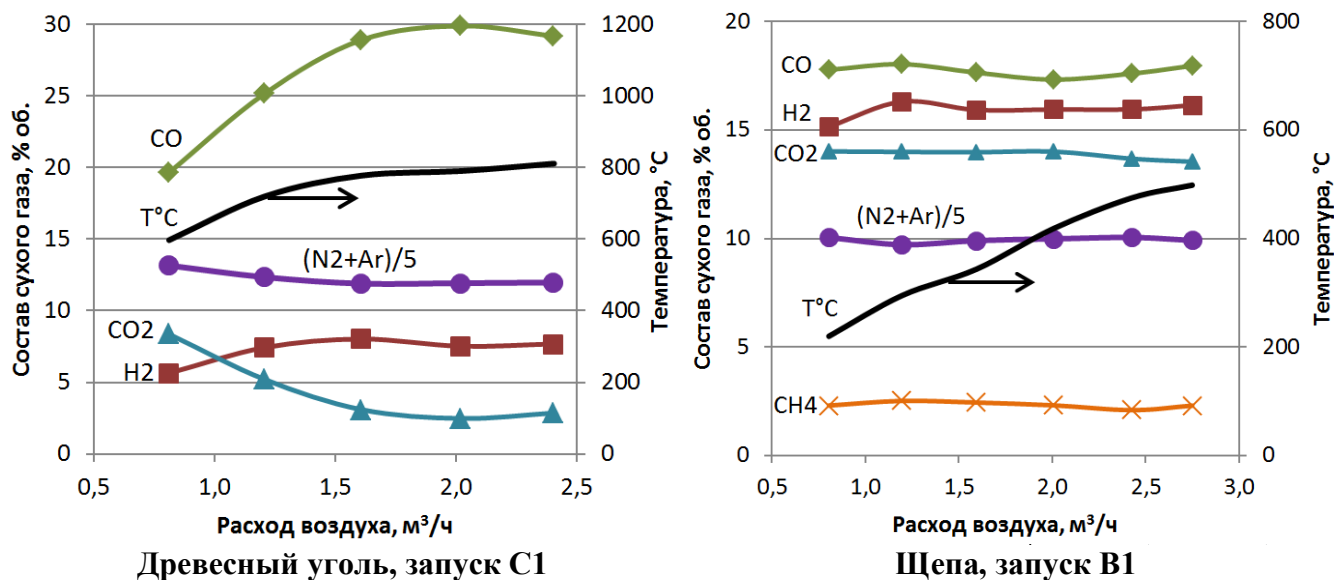


Рисунок 4 – Зависимость состава газа и температуры в конечной части слоя от расхода воздуха. Условия запусков: реактор без теплоизоляции, Твозд. – 20°C.

Опыты на древесине отличались от опытов на древесном угле также меньшими потерями тепла с охлаждением реактора (Q_5) и высоким КПД хим. (табл. 3). В запуске В1 на стенках реактора отсутствовала теплоизоляция, несмотря на этот факт КПД хим. составил 74-76% для всех режимов запуска В1. В дополнительном опыте размеры слоя топлива были уменьшены с 30 см до 3,5 см с помощью подвижного колосника. Полученный при этом газ содержал сопоставимое с другими запусками количество водорода (15,7% об.) и монооксида углерода (22 % об.).

Таблица 3 – Обобщенные характеристики экспериментальных режимов

Показатель	Древесный уголь	Щепа
Расход рабочего топлива, кг/ч	0,2–0,8	0,5–1,8
Коэффициент расхода воздуха (α), –	0,42 – 0,58	0,28 – 0,39
Теплота сгорания сухого газа ($Q_{газа}$), МДж/м ³	3,1 – 5,1	4,9 – 6,8
Удельный выход сухого газа, м ³ /кг(топл.)	4,2 – 5,0	2,1 – 2,5
Выход смолы, мг/м ³ (газа)	≈ 0	120–510
КПД хим., %	54,0 – 79,1	73,8 – 88,2
Сходимость материального баланса, %	99,3 – 101,0	99,3 – 101,4
Потери тепла с охлаждением ($q_5=Q_5/Q_p$), %	-28,2 – -3,3	-16,4 – -2,9
Теплота обмениваемая с окружающей средой ($q_{oc} = Q_{oc}/Q_p$), %	-28,3 – 2,7	-13,8 – 3,3

Компактная реакционная зона, малая чувствительность состава газа к расходу воздуха и высокий химический КПД не согласуются с классическими представле-

ниями об организации обращенного процесса, в соответствии с которыми в слое топлива принято выделять несколько реакционных зон – сушки топлива, его пиролиза, окислительного горения и восстановления. В диссертационной работе была выдвинута гипотеза о неклассическом механизме конверсии древесины. В соответствии с ней реакционные зоны располагаются не в различных частях слоя топлива, а в пределах объема отдельных реагирующих частиц. Зона окисления угля формируется в поверхностном слое частицы (рис. 5). Глубже нее располагается зона пиролиза биомассы, которая изнутри ограничена инертной сердцевиной. От поверхностных к внутренним слоям частицы идет поток тепла. Классический механизм обращенной газификации часто называют стратифицированным, чтобы подчеркнуть деление слоя на зоны. Гипотетический механизм назван в противоположность – нестратифицированным.

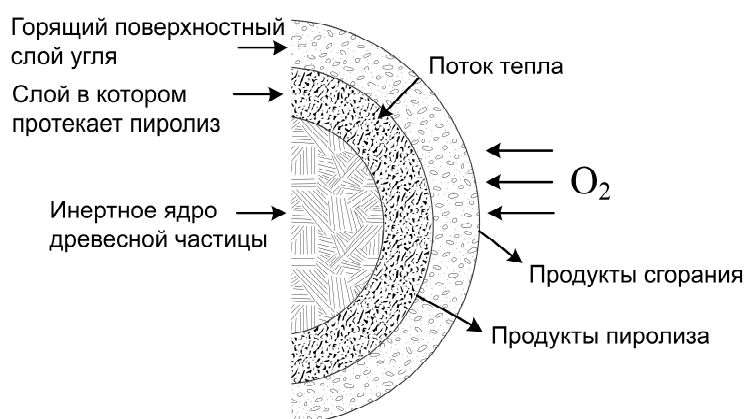


Рисунок 5 – Гипотетический механизм газификации частиц в обращенном процессе

Справедливость гипотезы подтверждается эффектом автогазификации частиц биомассы, ранее отмеченным в ряде работ (Jarvinen, 2002; Kirubakaran, 2009). Данный эффект состоит в газификации поверхностного слоя угля парогазовой смесью, которая выходит из подвергающихся сушке и пиролизу слоев, расположенных глубже угольного слоя. Выдвинутая гипотеза справедлива для достаточно крупных частиц, при горении которых возможно образование указанных реакционных слоев.

Для валидации модели (7)-(13) был рассчитан ряд режимов, воспроизводящих экспериментальные условия газификации на слоевом реакторе. Среди прочих данных в модели использовались значения α и Q_{oc} , полученные при составлении материального и энергетического баланса опытных режимов (см. рис. 1).

Для процесса газификации древесного угля и древесины было найдено хорошее совпадение расчетных и опытных значений КПД хим. Расхождение между ними не превышает 1-2% пункта. Этот факт объясняется тем, что генераторный газ является основным продуктом конверсии, а смола и угольный остаток образуются лишь в незначительных количествах. В равновесии недооценивается выход метана и C_2 -углеводородов, расчет дает близкое к нулевому содержание этих компонентов.

Низкий выход углеводородов в модели обуславливает повышенный выход CO и H₂ и пониженный выход H₂O относительно опытных значений.

Подход для анализа опытных режимов на множестве расчетов был протестирован поэтапно. На первом этапе рассматривались режимы газификации древесного угля. В соответствии со схемой подхода (рис. 2) была поставлена серия расчетов, в которой с малым шагом варьировались коэффициент расхода воздуха и передаваемое между реактором и окружающей средой тепло (q_{oc}). В модели только эти два параметра изменяются от режима к режиму. Используя эти параметры возможно воспроизвести и охарактеризовать тот или иной экспериментальный режим.

В координатах $\alpha - q_{oc}$, на рис. 6.a приведены некоторые результаты моделирования газификации древесного угля. На этом рисунке представлена область модельных режимов, которые потенциально могут быть реализованы в эксперименте. Пунктирная линия с нулевым равновесным выходом конденсированного углерода названа в диссертационной работе углеродной граничной линией. Находящиеся на этой линии режимы характеризуются максимальным КПД хим., достижимым для определенного значения q_{oc} . Правее углеродной граничной линии процесс смещается в сторону горения (безостаточной газификации), левее – к окислительному пиролизу (частичной газификации).

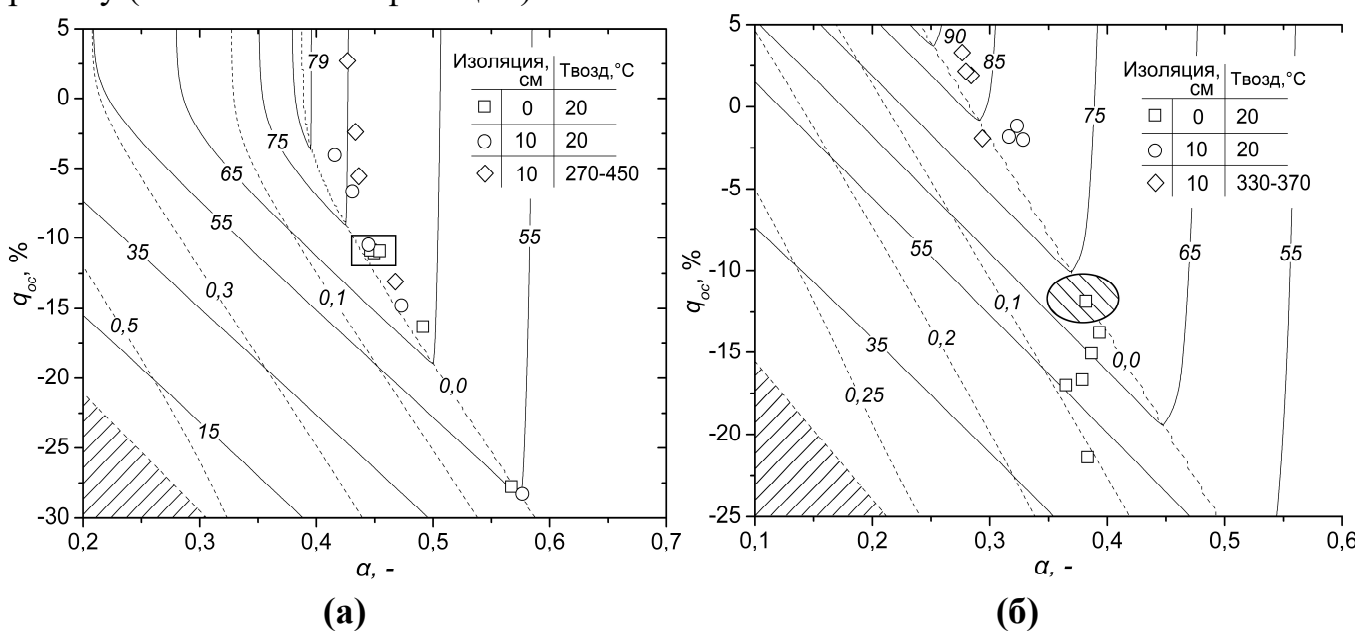


Рисунок 6 – Результаты вариантных расчетов газификации древесного угля (а) и древесины (б). Сплошными изолиниями показан расчетный КПД хим. (%), пунктирными – равновесный выход конденсированного углерода (кг/кг(топлива)), точками – экспериментальные режимы. В заштрихованной области моделируемая температура не превышает температуру начала окисления топлива

На рис. 6.a точками нанесены экспериментальные режимы. Примечательно, что точки занимают одну и ту же область на рисунке, рядом с углеродной граничной линией. В исследовании показано, что при достаточной высоте слоя топлива, превышающей высоту реакционной зоны или сопоставимой с ней, реакционная система достигает область вблизи углеродной границы (рис. 6.a). То есть система стремится максимизировать химический КПД процесса, достичь предельного пре-

вращения имеющегося у нее тепла в химическую энергию газа. Из этого вывода можно сформулировать первое ограничение эффективности газификации: для достижения углеродной граничной линии и предельного химического КПД процесса необходимо достижение реакционной системой равновесия между газовой и твердой фазой. Это состояние достигается при высокой температуре реагирования и достаточном времени контакта газа с топливом.

Друг от друга экспериментальные режимы отличаются такими параметрами процесса, как свойства теплоизоляции реактора, расход и температура воздуха. Несмотря на различную природу, параметры процесса оказывают равнозначное влияние на его относительные показатели. Например на рис. 6.а прямоугольной рамкой отмечены режимы С1.3-С1.5 и С2.3, отличающиеся расходом воздуха и толщиной теплоизоляции. Тем не менее, составы газа и КПД хим. для них оказываются близкими друг к другу. Из этого факта следует вывод о термодинамической равнозначности рассматриваемых параметров процесса.

Расход воздуха, его нагрев, а также теплоизоляция реактора, определяют термический режим и количество тепла, обмениваемое реактором с окружающей средой. При изменении какого-либо параметра изменяется термический режим процесса, и реакционная система смещается вдоль углеродной граничной линии (рис. 6.а).

Второе ограничение эффективности связано с термическим режимом процесса, определяющим положение реакционной системы вдоль углеродной граничной линии. Например, для автотермической газификации возможно уменьшение теплотеря от наружного охлаждения (q_5) лишь до определенного уровня, составляющего около 3% (см. табл. 3). Дальнейшее повышение КПД хим. может быть достигнуто только за счет подвода тепла в процесс извне.

Для режимов с интенсивным внешним подводом тепла также существует ограничение эффективности. Оно проявляется, когда значительная часть подведенного извне тепла расходуется не на увеличение химической энергии газа, а на увеличение температуры реакционной среды.

Вторым этапом тестирования термодинамического подхода был анализ режимов газификации древесины на множестве равновесных. По аналогии с газификацией древесного угля, эксперименты на биомассе располагаются преимущественно вдоль углеродной граничной линии (рис. 6.б). В опыте В1 отсутствовала теплоизоляция на стенках реактора, что вызвало переоценку теплотеря от наружного охлаждения и привело к смещению опытных точек вдоль оси q_{oc} . Ожидаемое расположение точек запуска В1 показано на рис. 6.б областью овальной формы.

Близость экспериментальных точек к граничной углеродной линии свидетельствует о близости реакционной системы к равновесию между газовой и твердой (топливной) фазой (рис. 6.б). Для режимов газификации древесного угля первое ограничение эффективности связано со временем реагирования топлива с газифицирующим агентом. Для экспериментов на древесине данное ограничение оказыва-

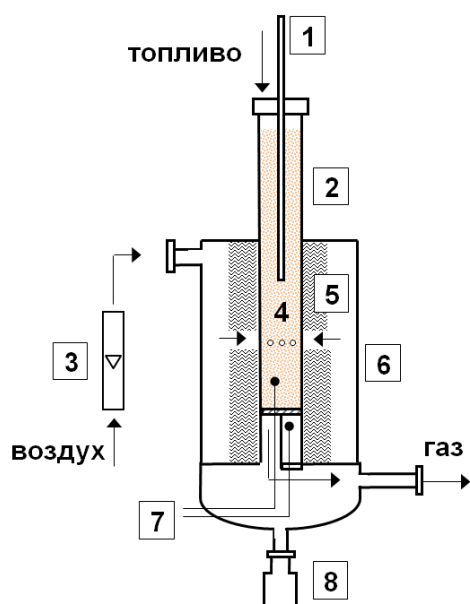
ется менее значимо из-за высоких скоростей конверсии. Процесс протекает в узкой реакционной зоне слоя, высота которой не превышает 35 мм.

Как и в случае конверсии древесного угля, термический режим газификации древесины определяет местоположение того или иного опытного режима вдоль углеродной граничной линии. В автотермических условиях КПД хим. достигает 83,5% при уровне теплопотерь от наружного охлаждения 1-2%. Дальнейшее увеличение эффективности может быть достигнуто при внешнем подводе тепла.

Третье ограничение эффективности связано с возможностью ее увеличения при движении системы вдоль граничной углеродной линии. Оно оказывается значимо при воздушной газификации сухой древесины. Для случая конверсии абсолютно сухой осины, предельная температура процесса составляет 930°C. Выше этого значения, значительная часть подведенного тепла будет расходоваться на нагрев веществ в реакторе, а не на увеличение химической энергии газа.

Четвертая глава диссертации посвящена исследованию гипотезы о нестратифицированном механизме обращенной газификации древесной биомассы. Цель исследования заключалась в установлении наличия или отсутствия отдельных реакционных зон слоя.

Для изучения особенностей протекания процесса был изготовлен обращенный реактор из кварца, позволяющий вести визуальные наблюдения за слоем (рис. 7). В экспериментальной установке использовались две кварцевые трубы. Во внутренней трубе (2) протекал непрерывный процесс конверсии под действием воздуха, поступающего через фурмы (4). На ее поверхность была уложена теплоизоляция (5), в которой имелась вертикальная смотровая прорезь шириной 10 мм. Внешняя кварцевая труба (6) выступала в роли коллектора, распределявшего воздух по фурмам.



- 1 – трубка для шуровки слоя
- 2 – кварцевая труба – реактор
- 3 – ротаметр
- 4 – фурменные отверстия
- 5 – теплоизоляция
- 6 – кварцевый коллектор
- 7 – термопары
- 8 – приемник конденсата

Рисунок 7 – Схема экспериментального стенда для исследования механизма газификации

В качестве топлива использовалась березовая щепа с размером частиц 10-12 мм. Характеристики топлива были следующими (%): $C^{daf} - 49,3$; $H^{daf} - 6,6$; $O^{daf} - 44,1$; $A^d - 0,2$; $W^r - 4,9$. На стенде было поставлено три режима с различным расхо-

дом воздуха – 0,9, 1,4 и 1,8 м³/ч. Данный диапазон параметров использовался в прошлых экспериментах (глава 3), анализ которых позволил выдвинуть гипотезу.

В режимах с крайними значениями расхода воздуха (0,9 и 1,8 м³/ч) проводились измерения температуры поверхности и центра одной из частиц. Такая частица снабжалась двумя тонкими термопарами, помещалась в слой и двигалась вместе с ним в зону реакции.

Результаты измерений представлены на рис. 8. Вертикальными линиями обозначены температура начала интенсивной сушки топлива (80°С) и начала его пиролиза (285°С). В режиме с низким расходом воздуха (0,9 м³/ч) скорость движения слоя топлива составляла 0,8 см/мин. В данных условиях процесс пиролиза поверхности частиц начинается на расстоянии 5,5 см выше фурм (рис. 8). Данный режим характеризуется выраженной зоной пиролиза и сушки топлива.

При увеличении расхода воздуха в два раза – до 1,8 м³/ч, скорость усадки топлива также удваивается. В таком режиме пиролиз топлива начинается лишь на расстоянии 1,5 см выше фурм. На столь небольшом расстоянии становится возможным поступление воздуха к поверхности частиц. Выраженная зона пиролиза при этом отсутствует и топливо без достаточной степени термopодготовки поступает в область фурм.

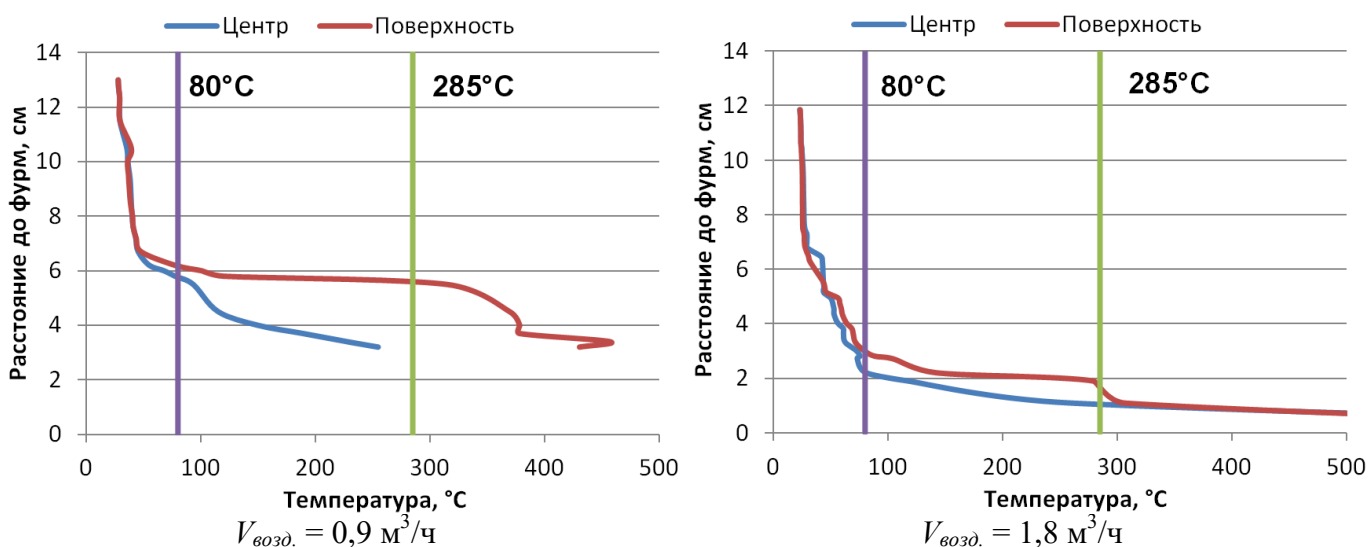


Рисунок 8 – Температура поверхности и центра индивидуальной частицы слоя, спускающейся к фурмам в направлении сверху-вниз

Формирование зоны пиролиза происходит под действием тепла, поступающего из зоны фурм. Увеличение интенсивности газификации приводит к увеличению температуры в фурменной области и увеличению теплового потока к верхним частям слоя. Одновременно с этим увеличивается и скорость движения слоя, что приводит к уменьшению времени пребывания топлива в зоне пиролиза и в конечном итоге к уменьшению размеров и исчезновению такой зоны.

Для опытов на кварцевом реакторе установлена смена механизма газификации, а для опытов на стальном реакторе (см. рис. 3) имеется широкий диапазон изменения расхода воздуха. Поскольку условия конверсии топлива в этих двух сери-

ях опытов были близки, можно предположить, что все режимы обладают общими свойствами и их можно разделить на две группы (рис. 9). Для первой группы режимов характерно наличие зоны пиролиза и зависимость параметров процесса от расхода воздуха. Во второй группе режимов такая зависимость утрачивается, и зона пиролиза в этой группе отсутствует. Переход режимов между группами происходит при скорости движения слоя 1-1,5 см/мин (рис. 9).

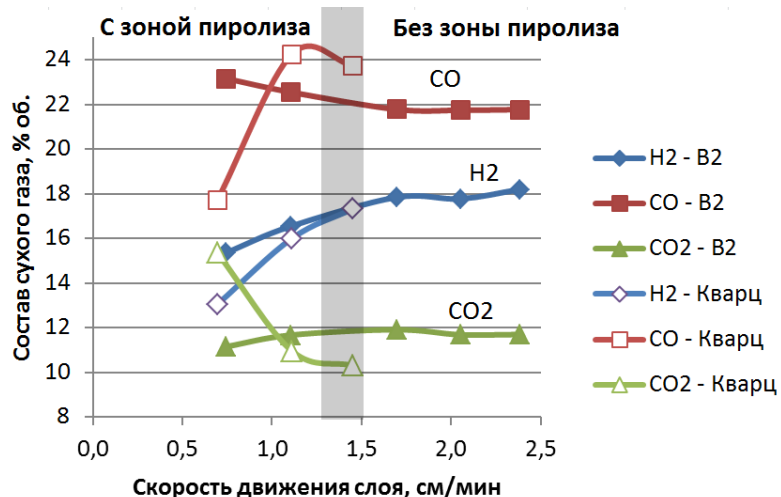


Рисунок 9 – Взаимосвязь между составом газа и скоростью движения слоя топлива. Опыты на кварцевом реакторе и березовой щепе («Кварц»), и стальном реакторе и осиновой щепе (B2)

В пятой главе диссертации приведены результаты экспериментальных исследований горения одиночных частиц древесины в интенсивном потоке фурменного воздуха. Цель данной работы состояла в воспроизведении процессов реагирования топлива в прифурменном пространстве слоевого реактора. В работе было выдвинуто предположение о том, что основные закономерности и механизмы горения одиночной частицы и частиц слоя являются общими, и результаты опытов с одиночными частицами можно использовать для объяснения особенностей реагирования топливного слоя.

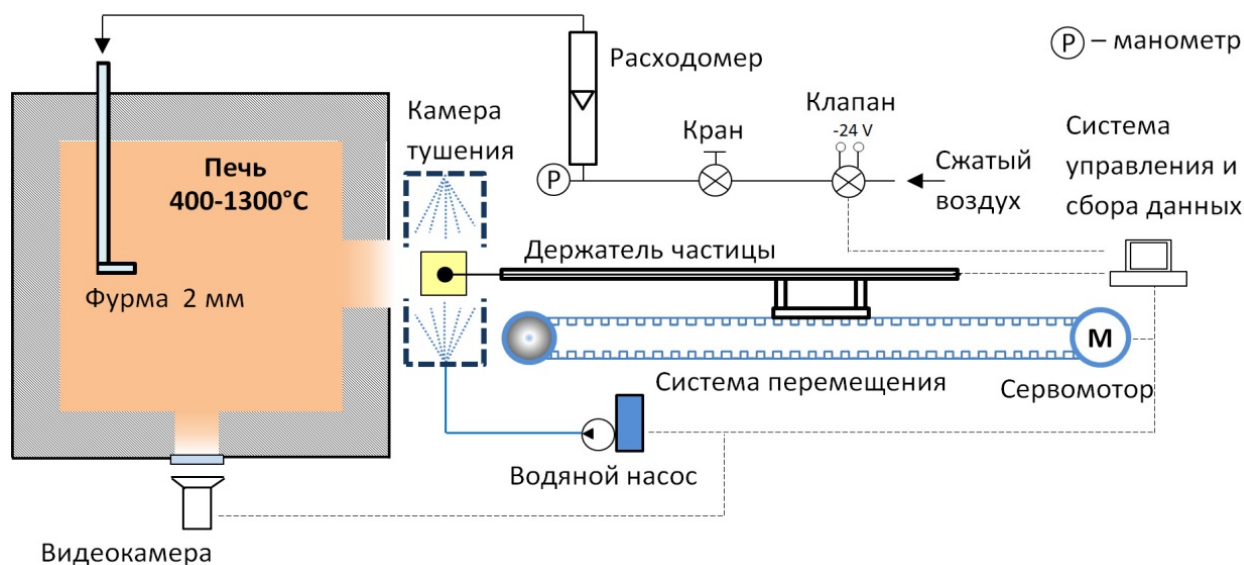


Рисунок 10 – Установка для сжигания индивидуальных частиц

Принципиальная схема установки для сжигания одиночных частиц древесины представлена на рис. 10. Основной частью установки выступает муфельная печь, в которой установлен фурменный подвод холодного воздуха. В частице просверливался канал, что позволяло установить ее на спай термопары держателя. Частица вносилась в нагретое муфельное пространство печи через порт. Через смотровое окно велась видеосъемка испытаний проб. Установка позволяла полностью сжигать частицы, а также извлекать их из печи и тушить водой через определенный интервал времени.

Опыты по полному сжиганию одиночных частиц проводились при трех температурах – 800, 1000 и 1200°C. Значение равное 1000°C соответствует диапазону температур, достигнутых слоем топлива в опытах на кварцевом реакторе. Для каждой температуры печи испытывались различные скорости подаваемого к пробе воздуха, изменяющиеся в диапазоне от 10 до 150 м/с.

Горение одиночных частиц протекает по трем возможным механизмам, зависящим от скорости дутья. Первый механизм реализуется при скорости воздуха в фурме 20 м/с и ниже. Он характеризуется стадийностью процесса. После воспламенения частицы, вокруг нее образуется пламя горящих летучих веществ (рис. 11.а).

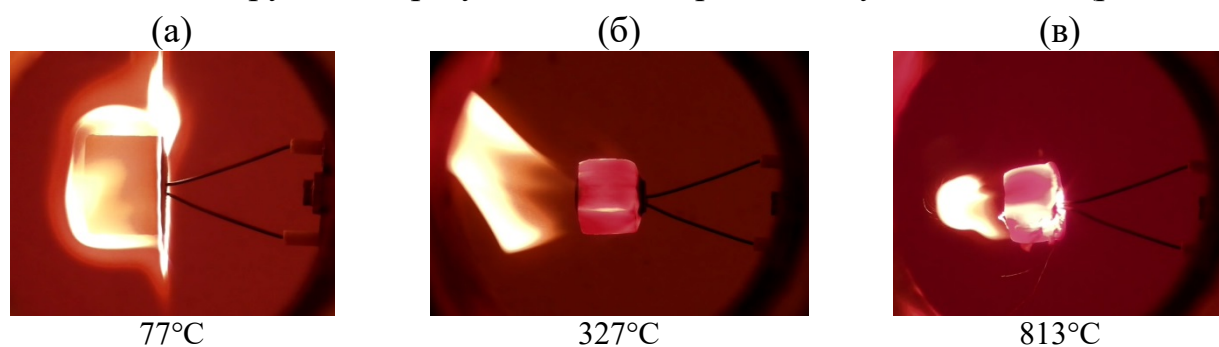


Рисунок 11 – Стадии горения частицы при температуре муфеля 800°C и скорости воздуха в фурме 20м/с. Приведены показания термопары, установленной в центре частицы

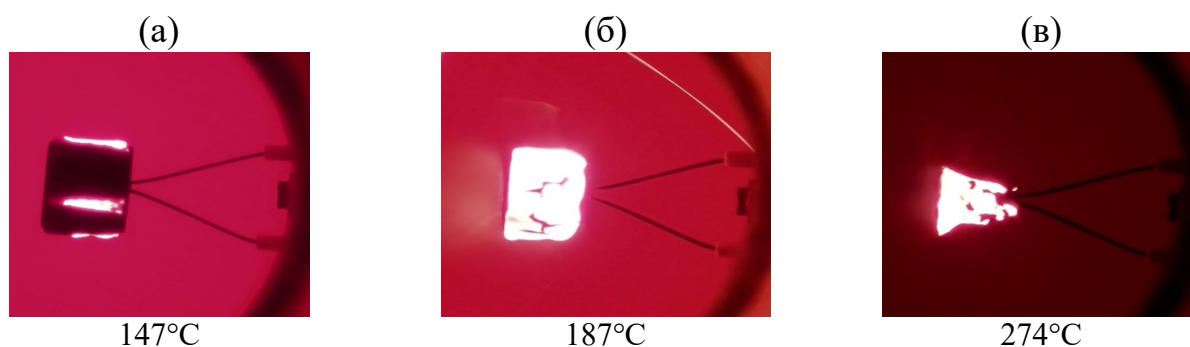


Рисунок 12 – Горение частицы при температуре печи 800°C и скорости воздуха 120 м/с

Данное пламя препятствует проникновению воздуха к поверхности частицы и окислению поверхностного слоя древесного угля. Фронтальная грань частицы остается холодной и около нее пламя отсутствует. На первой стадии протекает выделение и горение летучих веществ. Пламенная оболочка срывается с поверхности частицы когда температура в ее центре достигает 330-350°C (рис. 11.б). Основание

пламени располагается на тыльной поверхности частицы. После завершения интенсивного выделения летучих веществ, углеродный остаток частицы начинает раскаляться и интенсивно протекает стадия горения угольного остатка (рис. 11.в).

Одностадийный механизм горения частиц проявляется при скоростях воздуха превышающих 120 м/с в устье фурмы. В начале горения частицы начинают светиться ее фронтальные углы и ребра, это свидетельствует о горении слоя древесного угля в этих местах (рис. 12.а). В процессе горения не наблюдается наличие пламени. Затем светящиеся области постепенно покрывают всю частицу за исключением ее тыльной грани (рис. 12.б). Центр частицы при этом остается относительно холодным. Его температура составляет 190-200°С, что недостаточно для начала интенсивного разложения древесины. Центр частицы нагревается до температуры начала пиролиза, только когда фронт горения приближается непосредственно к нему (рис. 12.в). При одностадийном механизме горения стадии выхода летучих и горения угольного остатка протекают одновременно друг с другом.

В интервале скоростей воздуха от 20 до 120 м/с, проявляется смешанный механизм горения. По мере увеличения скорости дутья двухстадийная конверсия постепенно сменяется одностадийной. Примечательно, что не выявлено влияния температуры на диапазоны, в которых проявляется тот или иной тип механизма. Вероятно, что такое влияние несущественно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен подход для термодинамического анализа процесса газификации. Он сочетает в себе элементы термодинамического моделирования и эмпирические данные, полученные в физическом эксперименте. Данный подход позволяет: а) Единообразно рассмотреть разнородные параметры процесса, которые не учитываются в термодинамических моделях непосредственно. б) Оценить степень термодинамического совершенства и достижения процессом предельных показателей. в) Установить природу ограничений эффективности процесса, указать на влияние факторов кинетического или термодинамического характера. г) Применим в отношении реакторов различного типа, в которых также может использоваться разное топливо.

В исследовании получены следующие основные результаты:

- 1) Предложенный в работе подход позволил выявить три ограничения эффективности процессов газификации. Первое ограничение связано с достижением реакционной системой граничной углеродной линии, оцениваемой термодинамически. Данной линии соответствует максимальный химический КПД процесса. Второе ограничение связано с движением реакционной системы вдоль углеродной линии. Третье ограничение обусловлено низкой способностью системы к превращению подведенного извне тепла в химическую энергию газа.
- 2) Выдвинута гипотеза о нестратифицированном механизме слоевой обращенной газификации. В основу гипотезы легли экспериментально наблюдаемые нети-

пичные для обращенного процесса явления: узкая реакционная зона слоя, по высоте не превышающая 35 мм; малая чувствительность состава газа к расходу воздуха; малое влияние высоты слоя топлива на выход смолы. В соответствии с гипотезой, процесс газификации протекает в поверхностных слоях отдельных частиц. При этом стратификация слоя топлива по зонам не выражена или отсутствует.

3) Проведена проверка гипотезы в опытах на кварцевом реакторе специальной конструкции. При малой мощности реактора и медленном движении в нем топливной массы установлено формирование в слое выраженной зоны пиролиза. Увеличение мощности реактора приводит к исчезновению данной зоны. Подобные изменения обусловлены интенсивностью теплообменных процессов между горячим ядром горения и поступающим в него топливом.

4) В экспериментах на стенде для испытания одиночных частиц топлива установлено наличие различных механизмов их горения. В области скоростей фурменного воздуха ниже 20 м/с наблюдается двухстадийный процесс, на первой стадии которого происходит выход из частицы и горение летучих веществ. При скорости воздуха выше 120 м/с, преимущественно реализуется одностадийный механизм горения одиночных частиц. Интенсивный поток воздуха достигает поверхности топливной частицы, вызывая горение поверхностного слоя древесного угля. Стадии выхода летучих из топлива и горения коксового остатка протекают при этом одновременно.

Направление исследований механизма слоевой газификации обладает перспективами дальнейшего развития, связанными с дополнительным исследованием свойств нестратифицированного обращенного процесса, экспериментальными работами по поэтапному приближению условий горения одиночной частицы к горению частиц в слое, а также с построением математических моделей изучаемых процессов.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК:

1) Свищев Д.А. Модернизация поточного воздушного газификатора для твердо-топливной парогазовой установки / А.Ф. Рыжков, Н.А. Абаимов, И.Г. Донской, **Д.А. Свищев** // Физика горения и взрыва. 2018. т. 54. №3. С. 96-103 (0,54 п.л./0,14 п.л.). (Scopus, WoS)

2) Svishchev D.A. Thermal analysis of wood fuel pyrolysis process / G.I. Khudyakova, A.N. Kozlov, **D.A. Svishchev**, M.V. Penzik // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. – Vol. 1128. – No. 1. – С. 012080 (0,44 п.л./0,11 п.л.). (Scopus)

3) Svishchev D. Verification of the heat transfer model for screw reactor / A. Levin, A. Kozlov, **D. Svishchev**, M. Penzik // MATEC Web of Conferences. – EDP Sciences, 2018. – Vol. 240. – P. 05017 (0,38 п.л./0,10 п.л.). (Scopus)

- 4) Свищев Д.А. Кинетический анализ термохимической конверсии твердых топлив (обзор) / А.Н. Козлов, **Д.А. Свищев**, Г.И. Худякова, А.Ф. Рыжков // Химия твердого топлива. 2017. № 4. С. 12-21 (0,90 п.л./0,23 п.л.). (Scopus, WoS)
- 5) Свищев Д.А. Расчетное исследование эффективности ступенчатого процесса газификации влажной древесины / И.Г. Донской, А.Н. Козлов, **Д.А. Свищев**, В.А. Шаманский // Теплоэнергетика. 2017. № 4. С. 21-29 (0,75 п.л./0,19 п.л.). (Scopus)
- 6) Svishchev D.A. CFD-Modeling of the Multistage Gasifier Capacity of 30 KW / A.A. Levin, A.N. Kozlov, **D.A. Svishchev**, I.G. Donskoy // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 891. ID: 012229 (0,40 п.л./0,10 п.л.). (Scopus)
- 7) Svishchev D.A. Modeling of combined heat and power plant based on a multi-stage gasifier and internal combustion engines of various power outputs / G.I. Khudya-kova, A.N. Kozlov, **D.A. Svishchev** // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 891. ID: 012200 (0,46 п.л./0,15 п.л.). (Scopus)
- 8) Svishchev D.A. Coal gasification process simulations using combined kinetic-thermodynamic models in one-dimensional approximation / I.G. Donskoy, V.A. Sham-ansky, A.N. Kozlov, **D.A. Svishchev** // Combustion Theory and Modelling. 2017. P. 1-31 (1,79 п.л./0,45 п.л.). (Scopus, WoS)
- 9) Svishchev D. Development of s multi-stage biomass gasification technology to produce quality gas / A. Kozlov, **D. Svishchev**, O. Marchenko, S. Solomin, V. Sham-ansky, A. Keiko // Proc. of 25th European Biomass Conference (25thEUBCE), Stock-holm, 2017. P. 776-781, (0,45 п.л./0,08 п.л.). (Scopus)
- 10) Свищев Д.А. Превращение минеральной части древесного топлива в процес-сах термохимической конверсии / А.Н. Козлов, **Д.А. Свищев** // Химия твердого топлива. 2016. № 4. С. 22-27 (0,69 п.л./0,34 п.л.). (Scopus, WoS)
- 11) Svishchev D.A. A semi-empirical approach to the thermodynamic analysis of downdraft gasification / **D.A. Svishchev**, A.N. Kozlov, I.G. Donskoy, A.F. Ryzhkov // Fuel. 2016. Vol. 168. P. 91-106 (2,26 п.л./0,57 п.л.). (Scopus, WoS)
- 12) Svishchev D.A. A technique proximate and ultimate analysis of solid fuels and coal tar / A.N. Kozlov, **D.A. Svishchev**, I.G. Donskoy, V.A. Shamansky, A.F Ryzhkov // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2015. V. 122. No3. P. 1213 – 1220 (0,74 п.л./0,15 п.л.). (Scopus, WoS)
- 13) Свищев Д.А. Расчет режимов слоевой газификации угля с помощью термо-динамической модели с макрокинетическими ограничениями / И.Г. Донской, А.В. Кейко, А.Н. Козлов, **Д.А. Свищев**, В.А. Шаманский // Теплоэнергетика. 2013. №12. С. 56-61 (0,58 п.л./0,14 п.л.). (Scopus)
- 14) Свищев Д.А. Исследование управляемости процессов слоевой термохимиче-ской конверсии твердого топлива / А.В. Кейко, **Д.А. Свищев**, А.Н. Козлов, И.Г. Донской // Теплоэнергетика. 2012. №4. С. 40-47 (0,64 п.л./0,16 п.л.). (Scopus)
- 15) Свищев Д.А. Термодинамический анализ газификации водоугольного топли-ва в потоке / **Д.А. Свищев**, А.В. Кейко // Теплоэнергетика. 2010. №6. С. 33-36 (0,32 п.л./0,16 п.л.). (Scopus)

16) Свищев Д.А. Перспективные режимы газификации низкосортного твердого топлива / А.В. Кейко, И.А. Ширкалин, **Д.А. Свищев** // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2006. № 3. С. 55-63 (0,65 п.л./0,22 п.л.).

Монографии:

1) Svishchev D. Modeling of Pyrolysis in a Stage Scheme of Low-Grade Solid Fuel Gasification / A. Kozlov, A. Levin, **D. Svishchev**, V. Shamansky, A. Keiko // Pyrolysis. InTech, 2017. P. 71-88 (0,9 п.л./0,18 п.л.).

2) Свищев Д.А. Численные исследования работы перспективного поточного газогенератора / Н.А. Абаимов, И.Г. Донской, В.А. Кузнецов, **Д.А. Свищев**, М.Ю. Чернецкий // Анализ технологических решений для ПГУ с внутрицикловой газификацией угля / под. ред. А.Ф. Рыжкова. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. Гл. 6. С. 295-366 (2,73 п.л./0,55 п.л.).

3) Свищев Д.А. Управляемость процессов слоевой термохимической конверсии твердого топлива / А.В. Кейко, **Д.А. Свищев**, А.Н. Козлов, И.Г. Донской // Газогенераторные технологии в энергетике / под. ред. А.Ф. Рыжкова. – Екатеринбург: Со-крат, 2010. – 611 с (0,55 п.л./ 0,14 п.л.).

Отпечатано в ФГБУН Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН.
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 130.
Заказ № 38, тираж 120 экз.