

*На правах рукописи*

**СЫЧЕВ Георгий Александрович**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ  
ПРОЦЕССА ТОРРЕФИКАЦИИ БИОМАССЫ РАСТИТЕЛЬНОГО  
ПРОИСХОЖДЕНИЯ**

05.14.01 – энергетические системы и комплексы

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2020

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

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

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Косивцов Юрий Юрьевич**  
ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», г. Тверь

кандидат технических наук  
**Литун Дмитрий Степанович**  
ОАО «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени Теплотехнический научно-исследовательский институт», г. Москва

Ведущая организация: Национальный исследовательский центр «Курчатовский Институт», г. Москва.

Защита состоится “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2020 г. в \_\_ ч. \_\_ мин. на заседании диссертационного совета Д 002.110.03 при ФГБУН ОИВТ РАН по адресу: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2, экспо-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ОИВТ РАН [www.jiht.ru](http://www.jiht.ru)

Автореферат разослан “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д 002.110.03  
к.т.н.

С. Е. Фрид

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, 2020

**Актуальность темы.** Перспективным направлением развития распределенной энергетики является использование в качестве альтернативы традиционным ископаемым топливам местных топливно-энергетических ресурсов, в частности, биомассы растительного происхождения.

Российская Федерация занимает лидирующее место по запасам торфа и древесины: 37 % мировых запасов торфа и около 25 % имеющихся в мире ресурсов древесины сосредоточено на территории нашей страны.

В настоящее время наиболее распространенным форматом топлива из биомассы являются гранулы или пеллеты. Основным недостатком топливных пеллет заключается в их высокой гигроскопичности, которая накладывает ряд ограничений на условия транспортировки и хранения, практически исключающих контакт пеллет с окружающей средой. Несоблюдение данного требования влечёт за собой значительное повышение влажности топлива (вплоть до его разрушения), а также снижение удельной теплоты сгорания, что, в совокупности, делает топливо непригодным к дальнейшему использованию.

Торрефикация (низкотемпературный пиролиз сырья в интервале температур 200–300 °С) является наиболее перспективной технологией предварительной подготовки пеллет к последующему использованию в энергетических целях.

Препятствием для промышленного внедрения технологии торрефикации являются высокие энергетические затраты на реализацию процесса. Энергоэффективность технологии можно обеспечить двумя путями: использованием бросового тепла отходящих высокотемпературных газов и тепла экзотермических реакций деструкции биомассы. Первое направление предполагает включение реактора торрефикации в состав когенерационных энерготехнологических комплексов, второе связано с необходимостью подавления произвольного саморазогрева обрабатываемого сырья.

Для создания эффективных промышленных технологий торрефикации необходимо проведение комплекса исследований, направленных на изучение поведения биомассы различных видов при торрефикации, выяснение влияния режимных параметров на теплофизические свойства конечного продукта и механизмы возникновения и протекания эндо- и экзотермических реакций, решение технологических проблем, связанных с организацией непрерывного процесса производства торрефицированного продукта.

**Цель работы.** Целью диссертационной работы является экспериментальное исследование особенностей физико-химических процессов при торрефикации растительной биомассы, а также разработка и апробация метода повышения энергоэффективности реактора торрефикации, входящего в состав энерготехнологического комплекса, за счет использования тепла экзотермических реакций.

### **Научная новизна работы**

1. Получены новые экспериментальные результаты, описывающие влияние режимных параметров процесса торрефикации на теплофизические свойства биомассы трех типов: отходы деревообрабатывающей промышленности (древесные опилки), отходы сельскохозяйственного производства (солома) и торф.

2. Предложен универсальный критерий сопоставления характеристик торрефицированного сырья.

3. Экспериментально показана возможность интенсификации процесса торрефикации за счет использования тепла экзотермических реакций, сопровождающих процесс термической деструкции биомассы растительного происхождения.

4. Экспериментально доказана возможность получения синтез-газа с заданным составом путем последовательного использования процессов торрефикации и двухстадийной пиролизической конверсии.

### **Практическая значимость работы**

1. Предложен и реализован непрерывный процесс торрефикации гранулированной биомассы растительного происхождения, позволяющий в значительной мере снизить удельное энергопотребление при производстве твердого кондиционного биотоплива за счет частичного использования тепла экзотермических реакций.

2. Получены новые экспериментальные данные по теплофизическим свойствам торрефицированной биомассы, их зависимости от режимных параметров процесса термообработки, что может быть использовано при проектировании промышленных установок и энерготехнологических комплексов с реактором торрефикации.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Аппаратная реализация энергоэффективной технологии торрефикации пеллет из биомассы растительного происхождения с частичным использованием тепла экзотермических реакций.

2. Результаты экспериментальных исследований влияния режимных параметров процесса торрефикации на теплофизические свойства конечных продуктов.

3. Универсальный критерий сопоставления потребительских свойств торрефицированной биомассы.

4. Способ получения синтез-газа с заданным составом на основе совместного использования процессов торрефикации и двухстадийной пиролизической конверсии.

**Апробация работы.** Результаты исследований докладывались на V, VI, VIII Школах молодых ученых им. Э.Э. Шпильрайна «Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов (Махачкала, 2012, 2013, 2015); V Международной конференции "Возобновляемая энергетика: Проблемы и перспективы" (Махачкала, 2017); Всероссийской молодежной научно-технической конференции «Энергосбережение в секторе исследований и разработок: существующий потенциал и перспективы развития» (Москва, 2012); XXVII, XXIX, XXXI, XXXIII International Conference on Equations of State for Matter (Elbrus, 2012, 2014, 2016, 2018); XXVIII, XXX, XXXII, XXXIV International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter (Elbrus, 2013, 2015, 2017, 2019); IV, V International Conference on Bioenvironment, Biodiversity and Renewable Energies (BIONATURE, Lisbon 2013, Chamomix 2014); Конференции Международной ассоциации по твердым отходам (ISWA) "Твердые бытовые отходы: системы управления и технические решения" (Москва, 2013); Международном конгрессе «Возобновляемая энергетика XXI век: Энергетическая и экономическая эффективность» REENCON-2015 (Москва, 2015); International Conference on Thermophysical and Mechanical Properties of Advanced Materials (Baku, 2015); 7th International Meeting "Photosynthesis Research for Sustainability - 2016" in honor of Nathan Nelson and T. Nejat Veziroglu (Pushchino, Russia, 2016); Первом Международном Симпозиуме по трудноизвлекаемым и нетрадиционным ресурсам (Ухта, 2017); II Всероссийской специализированной научно-практической конференции молодых специалистов (с международным участием) (Москва, 2018); 26<sup>th</sup>, 27<sup>th</sup> European Biomass Conference and Exhibition (EUBCE, Copenhagen 2018, Lisbon 2019).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 17 печатных работ в журналах, входящих в реферативные базы данных Scopus и Web of Science, из которых 5 статей в журналах из перечня ВАК. В процессе работы над диссертацией получено 2 патента на изобретение и 1 патент на полезную модель.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, определены цели и направления исследований.

**Первая глава** посвящена аналитическому обзору существующих способов переработки и энергетического использования биомассы растительного происхождения. Приведено обоснование актуальности проведения исследований технологии торрефикации: отсутствие систематизированных данных о влиянии процесса торрефикации на теплофизические свойства конечных продуктов, ограниченное количество

данных о механизмах протекания экзотермических реакций, отсутствие эффективной промышленной технологии торрефикации.

Во **второй** главе представлены результаты исследований влияния режимных параметров процесса торрефикации на выход и теплофизические свойства конечных продуктов. В качестве сырья в экспериментах использовались пеллеты из трех видов биомассы: древесина (ДП), солома (СП) и торф (ТП). Торрефикация исследуемых образцов и последующие измерения содержания летучих, фиксированного углерода, а также зольности проводились на термоанализаторе SDT Q600. Для определения содержания летучих и фиксированного углерода нагрев исследуемого образца проводился в инертной среде (азот), для определения зольности – в окислительной среде (воздух). Элементный состав образцов измерялся с помощью анализатора элементного состава Vario MACRO Cube, который позволял определять массовое содержание элементов С, Н, N, S. Для измерения элементного состава использовались как минимум три пробы, результаты измерений по которым усреднялись. Массовое содержание кислорода вычислялось по остаточному принципу на основе полученных данных по содержанию С, Н, N, S и зольности. Высшая теплота сгорания  $Q_H^{exp}$  измерялась с помощью калориметрической бомбы БКС-2Х, а также рассчитывалась ( $Q_H^{cal}$ ) по формуле Менделеева с использованием экспериментальных данных по элементному составу. Предел гигроскопичности  $W_L$  определялся как отношение максимальной массы влаги, сорбированной исследуемым образцом, длительное время находившимся в воздухе влажностью 100% при температуре 26 °С, к массе сухого образца. Характеристики необработанного сырья приведены в таблице 1.

Таблица 1

**Характеристики необработанного сырья**

Сырье	Влажность, масс. %	Зольность, масс. %	Содержание летучих соединений, масс. %	Элементный состав, масс. %					Теплота сгорания, МДж/кг		
				на сухое состояние					$Q_H^{exp}$	$Q_H^{cal}$	$Q_L^{cal}$
	$W$	$A$	$VP_L$	С	Н	N	О	S			
ДП	4,20	0,32	82	47,8	6,3	0,1	45,4	0,01	20,5	19,2	17,8
ТП	5,24	5,71	64	51,5	5,4	1,35	35,9	0,16	21,2	20,4	19,2
СП	5,05	7,07	72	43,6	5,7	0,30	43,3	0,05	18,3	17,2	15,9

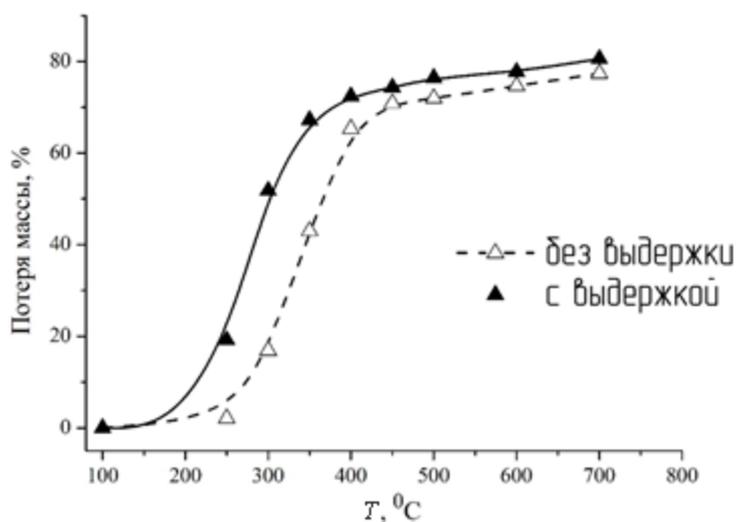
В таблице 2 приведены результаты измерений содержания летучих соединений в необработанном и торрефицированном сырье, полученные на термоанализаторе SDT Q600. Массовая доля летучих соединений в пробе рассчитывалась по потере массы навески.

**Массовая доля летучих соединений в необработанных и торрефицированных пеллетах в расчете на сухое состояние (% масс.)**

Температура торрефикации, °С	Вид биомассы		
	Древесина	Торф	Солома
230	81	60	66
250	79	57	62
270	76	53	51
Необработанные пеллеты	82	64	72

Поскольку использование двух режимных параметров процесса торрефикации (температура и время выдержки) значительно усложняет интерпретацию и сопоставление полученных результатов, были проведены эксперименты в обоснование возможности описания теплофизических свойств твердого остатка и летучих продуктов, полученных в результате торрефикации биомассы, с помощью однопараметрической зависимости. Для этого были измерены величины массовых потерь при пиролизе древесины и элементного состава твердого остатка от пиролиза. Пиролиз проводился на термоанализаторе SDT Q600 при различных конечных температурах в интервале температур  $T = 200\text{--}700$  °С (темп нагрева 10 град/мин) без выдержки и с временем выдержки 60 мин.

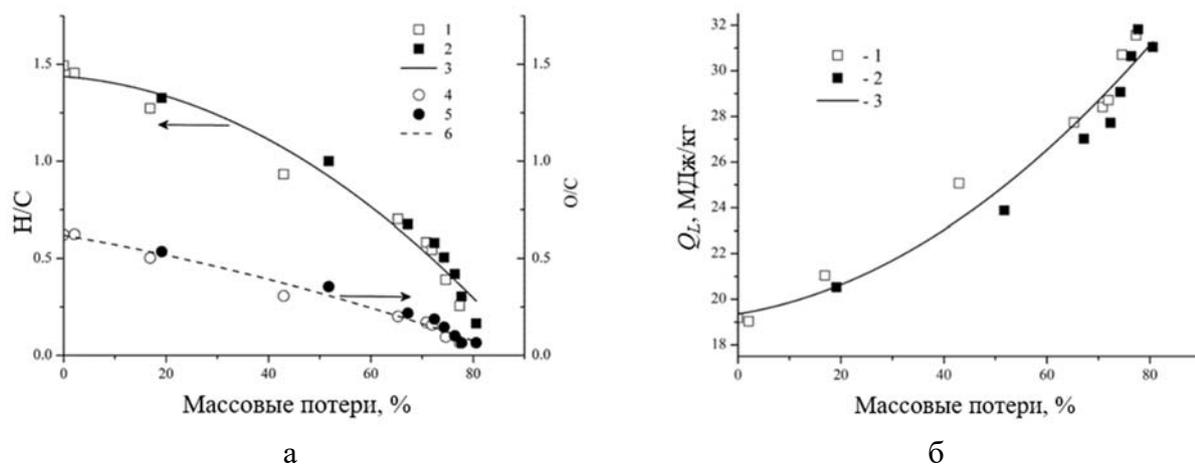
На рис. 1 представлены зависимости величины массовых потерь в расчете на сухое беззольное состояние от конечной температуры процесса. Из представленных данных следует, что одно и то же значение величины массовых потерь может быть получено при различных температурах за счет изменения времени выдержки.



**Рис. 1.** Зависимость величины массовых потерь при пиролизе древесины от температуры

На рис. 2а представлено изменение элементного состава в виде атомных отношений Н/С и О/С в зависимости от величины массовых потерь (1, 4 – режим без выдержки; 2, 5 – режим с выдержкой 60 мин; 1, 2, 4, 5 – экспериментальные точки; 3, 6 – аппроксимационные кривые). На основе данных по элементному составу была рассчитана низшая теплота сгорания твердого остатка от пиролиза  $Q_L$ ,

зависимость которой от массовых потерь приведена на рис. 2б (1 – режим без выдержки; 2 – режим с выдержкой 60 мин; 1, 2 – экспериментальные точки; 3 – аппроксимационная кривая).



**Рис. 2.** Зависимость элементного состава (а) и теплоты сгорания (б) твердого остатка от величины массовых потерь

Из представленных на рис. 2 зависимостей следует, что величину массовых потерь, независимо от того, при каких значениях режимных параметров она получена, можно использовать как универсальный параметр для описания свойств твердого остатка, а, следовательно, и летучих продуктов пиролиза в диапазоне массовых потерь, существенно превышающих массовые потери при торрефикации. Теплотехнические свойства необработанных и торрефицированных пеллет из трех видов биомассы представлены в таблице 3. Торрефикация позволяет усилить и гидрофобные свойства: при массовых потерях в 30 % предел гигроскопичности  $W_L$  снижается практически в два раза.

Побочным продуктом торрефикации являются так называемые летучие, состоящие из неконденсирующихся газов ( $CO$ ,  $CO_2$ ), а также паров воды и различных органических соединений, при нормальных условиях находящихся в жидком состоянии. На основе литературных данных<sup>1</sup> по составу летучих продуктов, выделяющихся при торрефикации древесины хвойных (лиственница) и лиственных (ива) пород, был проведен расчет их теплоемкости  $C_p$  (в интервале температур 300–1300 К), низшей теплоты сгорания  $Q_{vp}$ , стехиометрического коэффициента  $St$ , плотности  $\rho$  и адиабатической температуры горения  $T_{ad}$ . Результаты расчета теплоемкости представлены на рис. 3. Из сопоставления значений теплоемкости летучих продуктов, соответствующих как различным видам древесины, так и различным значениям массовых потерь, следует, что при фиксированной температуре их максимальное отклонение от среднего значения не превышает 6 %.

<sup>1</sup> Prins, M.J. Torrefaction of wood. Part 2. Analysis of products / M.J. Prins, K.J. Ptasinski, F.J.J.G. Janssen // J. Anal. Appl. Pyrolysis. – 2006. – Vol. 77. – P. 35–40.

Теплотехнические свойства необработанных и торрефицированных пеллет из трех видов биомассы

Сырье	$T_{торр}, ^\circ\text{C}$	Массовые потери на сухое состояние, %	Массовые потери на сухое беззольное состояние, %	Элементный состав на сухое состояние, масс.%					Зольность, масс.%	$Q_L^t$ , МДж/кг	$Q_L^t/Q_L^0$
				$\delta m$	С	Н	S,	О			
Древесина	20	0	0	47,83	6,32	0,01	45,43	0,09	0,32	17,78	1,00
	270	19,85	19,91	53,50	5,93	0,09	40,06	0,03	0,40	19,89	1,12
	280	25,47	25,55	54,99	5,91	0,01	38,66	0,00	0,43	20,52	1,15
	290	31,1	31,20	55,84	5,78	0,02	37,89	0,00	0,46	20,76	1,17
	310	48,21	48,36	61,47	5,59	0,02	32,27	0,03	0,62	23,09	1,30
	350	70,56	70,79	73,41	4,62	0,02	20,87	0,00	1,09	27,37	1,54
Торф	20	0	0,00	51,49	5,42	0,16	35,88	1,35	5,71	19,15	1,00
	210	14,26	15,12	53,95	5,33	0,21	32,46	1,40	6,66	20,27	1,06
	250	22,41	23,77	57,63	4,92	0,15	28,43	1,51	7,36	21,53	1,12
	300	32,55	34,52	63,75	4,54	0,51	20,98	1,75	8,47	24,06	1,26
	350	41,34	43,84	66,91	4,35	0,17	16,93	1,90	9,73	25,35	1,32
Солома	20	0	0,00	43,57	5,70	0,05	43,31	0,30	7,07	15,94	1,00
	230	17,81	19,16	45,55	5,54	0,07	39,93	0,31	8,60	18,81	1,18
	270	37,55	40,41	53,15	5,09	0,09	30,05	0,30	11,32	20,00	1,25
	300	55,6	59,83	60,72	4,45	0,13	18,34	0,44	15,92	23,19	1,45
	350	62,34	67,08	63,14	3,92	0,12	13,65	0,40	18,77	23,97	1,50

В таблице  $T_{торр}$  – температура торрефикации,  $Q_L^t$  и  $Q_L^0$  – низшая теплота сгорания торрефицированного и неторрефицированного образцов.

Для описания температурной зависимости теплоемкости летучих продуктов торрефикации, соответствующих массовым потерям до 33 %, можно использовать осредненную аппроксимационную кривую:

$$C_p = 1,00 + 1,44 \left( \frac{T}{1000} \right) - 0,375 \left( \frac{T}{1000} \right)^2$$

В отличие от теплоемкости остальные теплофизические характеристики летучих продуктов торрефикации, рассмотренные в данной работе и приведенные в таблице 4, существенно зависят от величины массовых потерь.

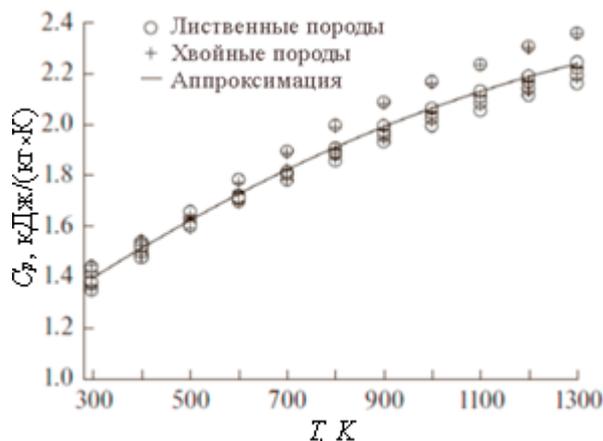


Рис. 3. Температурная зависимость теплоемкости летучих продуктов торрефикации древесины

Таблица 4

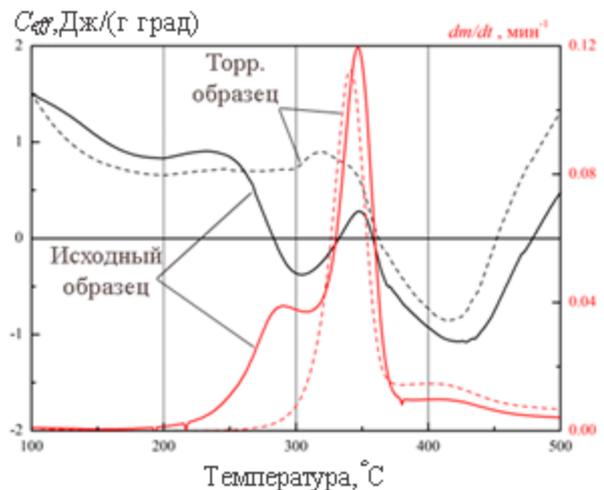
**Характеристики летучих продуктов торрефикации**

Характеристика	Лиственница				Ива				
	1,76	3,68	6,54	17,00	7,53	12,79	17,89	20,90	33,22
Масс. потери, %	1,76	3,68	6,54	17,00	7,53	12,79	17,89	20,90	33,22
$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	1,02	1,12	1,08	1,25	1,04	1,03	1,14	1,18	1,19
$Q_{vp}$ , МДж/кг	3,41	4,47	4,42	7,97	3,30	3,28	5,10	6,28	7,47
$St$ , массовый	1,00	1,34	1,34	2,50	1,03	1,03	1,60	1,98	2,37
$T_{ad}$ , °С	1157	1338	1311	1634	1127	1112	1386	1506	1581

В третьей главе представлены результаты экспериментального исследования тепловых эффектов, сопровождающих процесс низкотемпературного пиролиза древесной биомассы. Эксперименты проводились на термоанализаторе SDT Q600 и на лабораторной установке, моделирующей реактор торрефикации шахтного типа с непрямым (через стенку) нагревом перерабатываемого сырья.

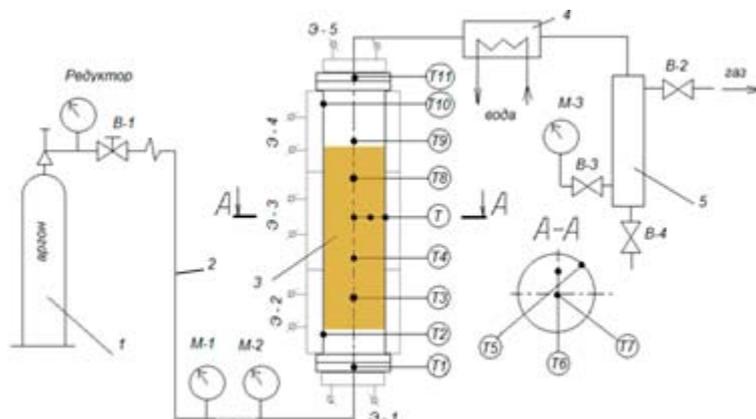
На рис. 4 представлены дифференциальные термогравиметрические (ДТГ) зависимости, описывающие скорость потери массы ( $dm/dt$ ) необработанного и торрефицированного образцов древесины при нагреве в инертной среде ( $T_{торр}=270$  °С, выдержка 60 мин), и температурные зависимости эффективной теплоемкости образцов, определенные методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК).

Падение эффективной теплоемкости при температурах выше 250 °С связано с термораспадом гемицеллюлозы, который сопровождается заметным экзотермическим эффектом. Минимум значения  $C_{eff}$  в этой области достигается при температуре, близкой к температуре, соответствующей максимуму скорости термораспада, наблюдаемому на ДТГ зависимости при температуре 290 °С. При этом выделение тепла может быть достаточным для изменения знака коэффициента эффективной теплоемкости. В отличие от необработанного образца, торрефицированная древесина не имеет в своем составе гемицеллюлозы (о чем свидетельствует отсутствие характерного пика на кривой скорости потери массы), и, как следствие, экзотермический эффект, связанный с ее распадом, не проявляется на зависимости  $C_{eff} = C_{eff}(T)$ .



**Рис. 4.** Температурная зависимость эффективной теплоемкости (черный цвет) и скорости потери массы (красный цвет) образца древесины

Принципиальная схема лабораторной установки, на которой проводились эксперименты, моделирующие процесс торрефикации биомассы в реакторе с непрямым (через стенку) нагревом, представлена на рисунке 5.

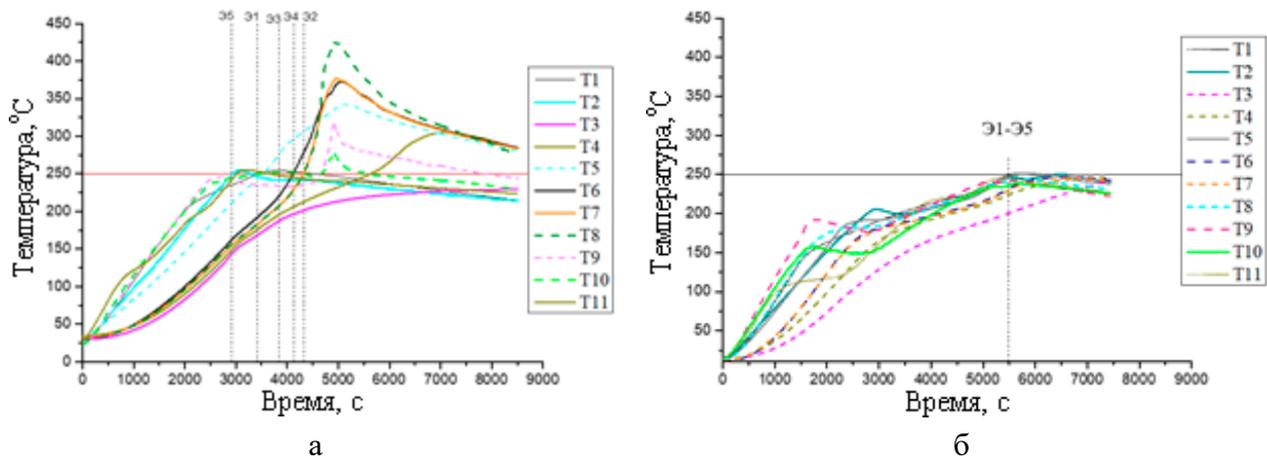


1 – баллон с аргоном; 2 – трубопровод для подачи аргона; 3 – реактор; 4 – теплообменный аппарат; 5 – ёмкость для сбора жидкости; М-1...3 – манометры; В-1...4 – вентили; Э1...5 – электронагреватели; Т1...11 – термопары

**Рис. 5.** Принципиальная схема лабораторной установки по торрефикации биомассы

Реактор представлял собой теплоизолированную металлическую цилиндрическую трубу внутренним диаметром 66 мм и длиной 1100 мм. Реактор был оснащен несколькими независимыми нагревателями и термопарами, расположение которых приведено на рис. 5. При проведении экспериментов по определению тепловых эффектов нагрев стенок реактора осуществлялся до

температуры 250 °С, при приближении к которой мощность нагревателей уменьшалась, а затем они отключались. На рис. 6 приведены зависимости изменения температуры от времени: стенки реактора (Т1, Т2, Т5, Т10, Т11) и слоя пеллет (Т3, Т4, Т6-Т9) при торрефикации необработанного сырья (рис. 6а), а также при повторном нагреве торрефицированного сырья (рис. 6б). Моменты отключения нагревателей отмечены на графиках вертикальными линиями. Отключение нагревателей производилось с целью недопущения нагрева стенки реактора до температуры выше 250 °С.



**Рис. 6.** Изменение температуры в различных точках реактора в процессе экспериментов

Из температурных зависимостей, представленных на рис. 6а, видно, что после выключения нагревателя Э-3 температура стенки (термопара Т5) продолжала расти и спустя 21 минуту достигла величины 340 °С. Рост температуры в пристеночной области (термопара Т5 на рис. 3.7а) обусловлен тепловыделением в процессе термической деструкции древесной биомассы. Как видно из рис. 6а, прогрев центральных областей в том же сечении (термопары Т6 и Т7) вначале отставал по времени от прогрева в пристеночной области и продолжался за счет поступления тепла от нее. Спустя 13 мин после выключения нагревателя Э-3 температура в центре (термопара Т7) сравнялась с температурой на периферии, а затем превысила ее, достигнув величины 370 °С. Это свидетельствует о том, что на этот момент времени экзотермические реакции, протекающие в приосевой области, стали играть преобладающую роль. Максимальное значение температуры 425 °С наблюдалось на оси реактора в верхнем слое пеллет (термопара Т8). Увеличение степени перегрева по высоте реактора, что следует из сравнения показаний термопар Т4, Т7 и Т8, можно объяснить заметным вкладом в экзотермический эффект вторичных процессов с участием летучих продуктов торрефикации. В аналогичных экспериментах, проведенных с предварительно торрефицированными пеллетами, эффект саморазогрева обнаружен не был (см. рис. 6б), что согласуется с результатами экспериментов на термоанализаторе.

В четвертой главе приведены результаты исследований экзоэффектов при торрефикации древесной биомассы в условиях, приближенных к условиям реального технологического процесса. Исследования проводились на пилотной установке с движущимся слоем и прямым нагревом перерабатываемого сырья восходящим потоком газа-теплоносителя.

Целью работы являлась не только демонстрация проявления экзоэффектов, но и поиск возможности их использования для интенсификации процесса торрефикации и повышения производительности технологии.

В состав пилотной установки для торрефикации биомассы, схема которой представлена на рисунке 7, входили:

газопоршневая электростанция (1), газовой теплообменный аппарат (2), торрефикационная колонна (3) и дожигатель (4). Общая высота установки составляла 5,8 м. По сути, энерготехнологический

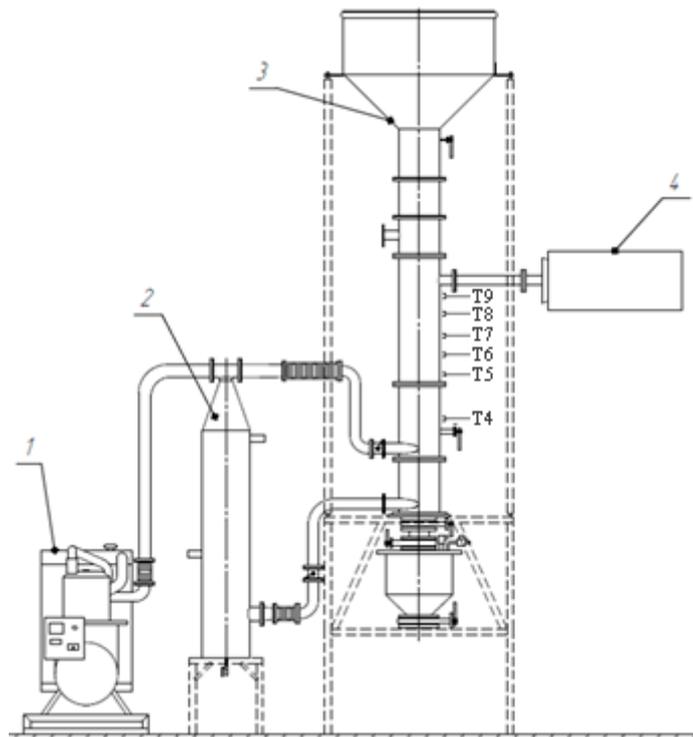
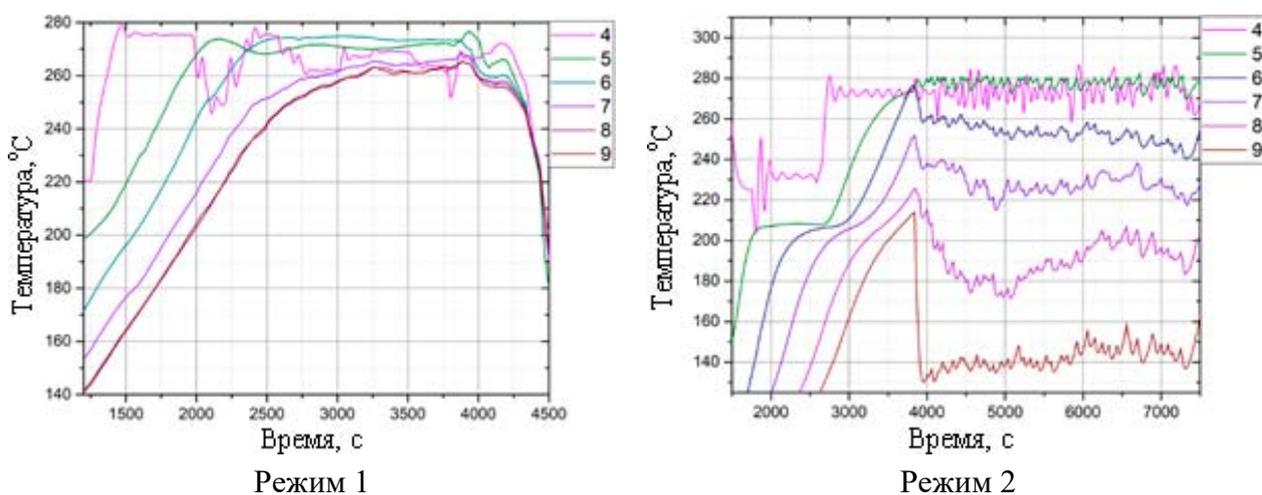


Рис. 7. Принципиальная схема пилотной установки для торрефикации биомассы

комплекс работал в когенерационном режиме, поскольку конечными продуктами являлись торрефицированное твердое биотопливо и электроэнергия. Низкое содержание кислорода в продуктах сгорания (ПС) газопоршневого двигателя ( $\leq 0,5$  % по объему) позволило применять их в качестве газа-теплоносителя для прямого нагрева перерабатываемого сырья. В качестве топлива для газопоршневого двигателя использовался сетевой природный газ. Температура ПС на выходе из двигателя составляла 600 – 700 °С. После двигателя поток ПС разделялся на два: один направлялся непосредственно в зону смешения реактора торрефикации, а другой – через теплообменный аппарат, в котором охлаждался до требуемой температуры, и зону охлаждения реактора в зону смешения. Соотношение между потоками охлажденных и горячих ПС регулировалось специальной заслонкой, расположенной в газовом тракте после теплообменника, что позволяло обеспечивать заданную температуры газа-теплоносителя (275 °С) на входе в зону торрефикации. Выходящая из верхней части реактора торрефикации смесь отработавших ПС и летучих продуктов торрефикации через отводящие патрубки поступала в дожигатель, где она сжигалась с помощью запального факела. В ходе экспериментов на пилотной установке значительное внимание было уделено исследованию двух режимов

работы реактора торрефикации, в которых были использованы различные способы управления ростом температуры, обусловленным экзотермическими реакциями (режимы 1 и 2). В режиме 1 регулирование температуры в реакторе торрефикации осуществлялось за счет изменения температуры греющего газа на входе в реактор, в режиме 2 – за счет использования специального алгоритма выгрузки торрефицированных пеллет в секцию охлаждения. Изменение температуры пеллет в различных сечениях реактора от времени для каждого из режимов представлено на рис. 8.



**Рис. 8.** Зависимость температуры пеллет в различных сечениях реактора от времени

**Режим 1.** При приближении температуры пеллет в нижней части реактора торрефикации (термопара Т5) к 270 °С терморегулятор, связанный с термопарой Т4, ступенчато перестраивался на более низкую температуру газотеплоносителя, что позволяло поддерживать температуру пеллет в нижней половине реактора на уровне 270 °С. При этом максимальная температура пеллет, равная 275 °С, наблюдалась в сечении, в котором располагалась термопара Т6 (см. рис. 8). Начиная с момента, соответствующего отметке времени 3000 с, максимальное различие в температуре пеллет для различных сечений реактора не превышало 15 °С. По истечении 2000 с момента выхода температуры пеллет в нижнем слое реактора (термопара Т5) на уровень 270 °С была произведена их выгрузка в бункер охлаждения. Средняя по реактору потеря массы пеллет составила ~26 %. Суммарное время обработки пеллет в реакторе торрефикации (нагрев и выдержка при фиксированной температуре) составило 4000 с, что соответствует производительности реактора ~36 кг/ч по исходному сырью.

**Режим 2.** При достижении температуры, регистрируемой термопарой Т5, значения, превышающего показания термопары Т4 более чем на 5 °С (временной интервал 4000–7500 с на рис. 8), производилась выгрузка порции торрефицированных пеллет в секцию охлаждения. Выгрузка производилась 1 раз в 80 с порциями по ~4 л. Одновременно соответствующая порция пеллет

добавлялась в верхнюю часть реактора из секции загрузки и подогрева. Периодически по сигналу соответствующего датчика уровня порция пеллет из секции охлаждения перегружалась в бункер разгрузки. Постоянство температуры газа-теплоносителя на входе в реактор торрефикации поддерживалось с помощью регулятора смешения, работавшего в автоматическом режиме. Температурные максимумы на кривой 4 соответствуют моментам выгрузки. Причиной колебаний, наблюдаемых на температурных зависимостях в сечениях расположения термопар Т5–Т9, является перемещение в данное сечение пеллет из расположенного выше слоя с более низкой температурой. Из представленных на рис. 8 зависимостей видно, что благодаря циклической выгрузке пеллет удастся стабилизировать их температуру в нижней части реактора (термопара Т5) на уровне 280 °С и не допустить неконтролируемого разогрева перерабатываемого сырья. Потеря массы пеллет в режиме 2 составила 30 %. Отметим, что характеристики торрефицированного сырья в режимах 1 и 2 практически идентичны (см. таблицу 5).

Таблица 5

**Характеристики необработанных и торрефицированных древесных пеллет**

Характеристика		Необработанное сырье	Режим 1	Режим 2
Потеря массы при торрефикации, %		-	26	30
Зольность, %		0,32	0,43	0,46
Элементный состав, %	С	49,92	54,51	55,87
	Н	6,11	6,12	6,00
	Н	0,09	0,06	0,06
	С	0,02	0	0
	О	43,54	38,88	37,61
Низшая теплота сгорания, МДж/кг		18,48	20,56	21,03

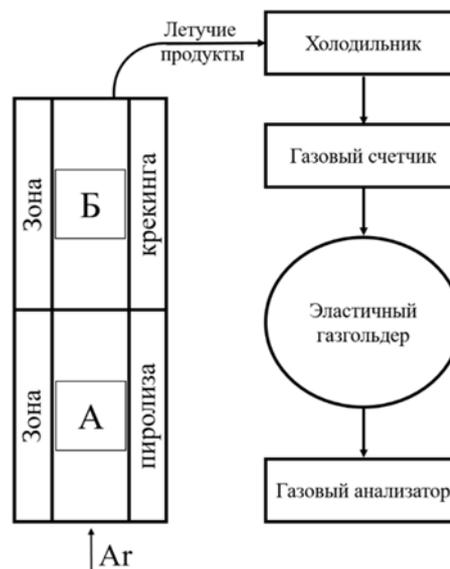
В то же время, исходя из частоты выгрузки и размера порции выгружаемых пеллет, производительность установки в режиме 2 составила 110 кг/ч, что в 3 раза выше, чем в режиме 1. Оценка энергетических затрат на процесс торрефикации при условии, что в качестве теплоносителя используются дымовые газы от сжигания перерабатываемого сырья, показала, что в режиме 1 необходимо затратить ~20 % перерабатываемой биомассы, а в режиме 2 – 6,4 %.

В пятой главе представлены результаты экспериментальных исследований процесса конверсии летучих продуктов, выделяющихся при торрефикации трех видов биомассы (древесина, солома и торф), в синтез-газ, а также влияния режимных параметров торрефикации на состав синтез-газа, который можно получить методом двухстадийной пиролитической конверсии из биомассы, прошедшей предварительную торрефикацию.

Эксперименты по исследованию процесса конверсии летучих продуктов, выделяющихся в процессе пиролиза биомассы, в синтез-газ проводились на экспериментальной установке, схема

которой представлена на рис. 9. Реактор, выполненный в виде металлической трубы диаметром 37 мм и высотой 850 мм, помещался в двухсекционную печь с независимыми нагревателями. В зонах пиролиза и крекинга устанавливались тигли, плотно прилегавшие к стенкам реактора и имевшие газопроницаемое перфорированное дно. В тигель, расположенный в зоне пиролиза (А), помещалось перерабатываемое сырье – пеллеты из древесины, соломы и торфа. В тигель, расположенный в зоне крекинга (Б), помещался древесный уголь или угольный остаток (УО), полученный путем пиролиза необработанного сырья. Перед экспериментом реактор продувался аргоном для создания инертной газовой среды. В начале эксперимента зона крекинга нагревалась до температуры  $1000 \pm 5$  °С, которая поддерживалась в процессе всего эксперимента. Затем реактор еще раз продувался аргоном, и включался нагреватель зоны пиролиза. При проведении экспериментов биомасса в зоне А нагревалась до температуры торрефикации ( $T_{торр} = 230, 250$  и  $270$  °С) с темпом нагрева  $10$  °С/мин. Время выдержки при заданной температуре выбиралось из условия, что полное время процесса с начала нагрева составляло 100 мин.

На рис. 10 представлены данные по объемному выходу водорода и монооксида углерода, полученных путем высокотемпературного гетерогенного крекинга летучих продуктов, выделяющихся при торрефикации древесных, соломенных и торфяных пеллет. Отметим, что водород и монооксид углерода являлись основными компонентами получаемых газовых смесей. Содержание



**Рис. 9.** Схема лабораторной установки для двухстадийной пиролитической конверсии биомассы

примесей других газов (диоксид углерода и метан) не превышало нескольких процентов (объемных).

Из полученных данных следует, что мольное соотношение водорода и монооксида углерода в полученном синтез-газе независимо от температуры торрефикации и вида использованного сырья в пределах  $\pm 15\%$  составляло 1:1.

На основе анализа элементного состава древесных, соломенных и торфяных пеллет, прошедших торрефикацию при различных температурах в интервале от 230 до 350 °С, а также аналогичных данных по древесине<sup>2</sup>, был проведен расчет состава и объемного выхода синтез-газа, который можно получить методом двухстадийной пиролизической конверсии биомассы, прошедшей предварительную торрефикацию при различных условиях (см. рис. 11: расчет: 1 – ДП, 2 – древесина<sup>2</sup>, 3 – СП, 4 – ТП). На рис. 11 также приведены результаты измерений состава и объемного выхода синтез-газа, полученного путем двухстадийной пиролизической конверсии торрефицированных древесных пеллет (рис. 11, поз. 5). Из представленных данных видно, что результаты расчета и эксперимента хорошо согласуются между собой. Таким образом, за счет предварительной торрефикации биомассы и последующей ее переработки методом двухстадийной пиролизической конверсии из древесины, соломы и торфа можно получать синтез-газ с отношением мольных долей водорода и монооксида

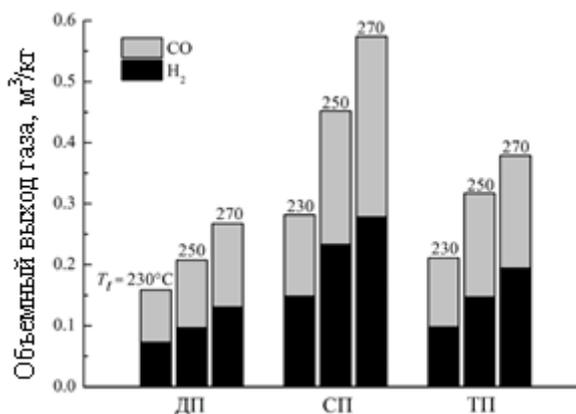


Рис. 10. Объемный выход водорода и монооксида углерода в расчете на 1 кг торрефицируемого сырья

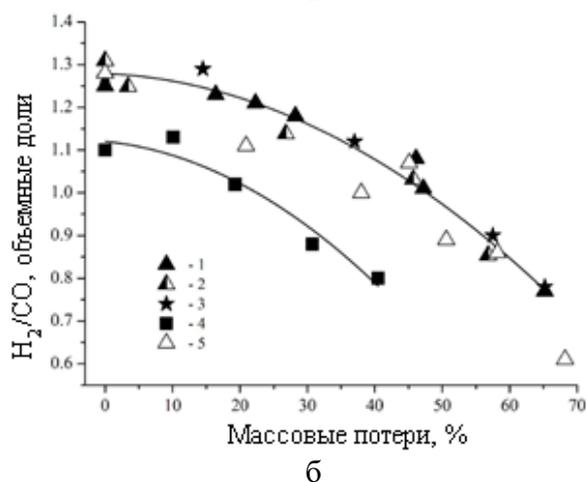
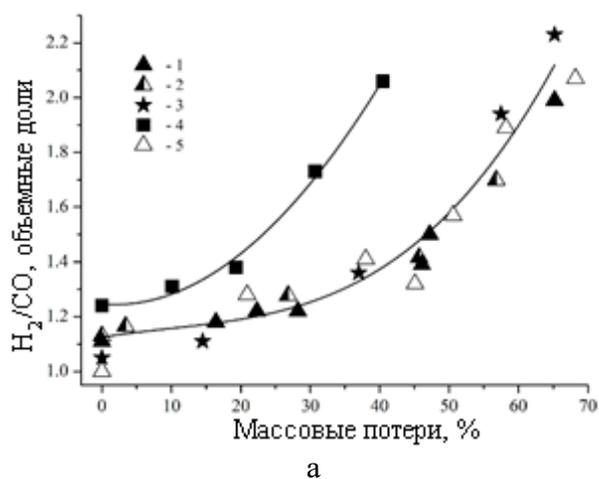


Рис. 11. Отношение объемных долей H<sub>2</sub>/CO в синтез-газе и удельный объемный выход синтез-газа

<sup>2</sup> Peng, J.H. Torrefaction and densification of different species of softwood residues / J.H. Peng, X.T. Bi, S. Sokhansanj [et al.] // Fuel. – 2013. – Vol. 111. – P. 411–421.

углерода в диапазоне от 1 до 2. Как следует из рис. 11а заметное увеличение объемного содержания водорода в синтез-газе, полученном из торрефицированных древесных и соломенных пеллет, начинается, когда массовые потери при торрефикации составляют 30 %, для торфяных пеллет аналогичный показатель равен 20 %. Одновременно с ростом содержания водорода падает удельный объемный выход синтез-газа (см. рис. 11б).

**В заключении** сформулированы основные результаты работы и выводы.

1. На основе комплексных экспериментальных исследований характеристик гранулированного топлива из трех видов растительной биомассы (древесина, солома, торф), прошедшего торрефикацию, показано существенное улучшение потребительских свойств торрефицированного биотоплива: уменьшение содержания летучих продуктов, повышение удельной теплоты сгорания, уменьшение предела гигроскопичности.

2. Показано, что для описания теплофизических свойств как торрефицированной биомассы, так и летучих продуктов торрефикации в качестве универсального параметра целесообразно использовать величину массовых потерь в расчете на сухое беззольное состояние исходного сырья. Использование указанного параметра дает возможность проводить сопоставление свойств твердых и летучих продуктов торрефикации, полученных при различных режимных параметрах процесса.

3. Проведен расчет теплоемкости, низшей теплоты сгорания, стехиометрического коэффициента, плотности и адиабатической температуры горения летучих продуктов торрефикации древесины, предложена аппроксимационная зависимость для описания теплоемкости летучих продуктов торрефикации в интервале температур 300 – 1300 К.

4. С помощью методов термогравиметрического и дифференциального термогравиметрического анализа, а также дифференциальной сканирующей калориметрии в интервале температур 50 – 500 °С определены температурные зависимости скорости термической деструкции древесины и ее эффективной теплоемкости. Показано соответствие между процессами термической деструкции основных органических составляющих древесины (гемицеллюлоза, целлюлоза и лигнин) и характерными эндо- и экзотермическими пиками на кривой эффективной теплоемкости. Определены температурные области, в которых тепло, выделяющееся за счет экзотермических эффектов, может приводить к изменению знака эффективной теплоемкости.

5. В результате экспериментальных исследований, проведенных на лабораторной установке, моделирующей условия в реакторе торрефикации с нагревом через стенку, показано, что при температурах выше 250 °С наблюдается экзотермический эффект, приводящий к саморазогреву перерабатываемого сырья до температур, существенно превышающих температуру стенки реактора. Показано, что указанный эффект связан с

термической деструкцией гемицеллюлозы, и заметный вклад в его величину вносят вторичные процессы с участием летучих продуктов торрефикации.

6. Исследования, проведенные на пилотной установке с движущимся слоем и прямым нагревом перерабатываемого сырья восходящим потоком газа-теплоносителя, продемонстрировали возможность реализации непрерывного технологического процесса торрефикации биомассы в интервале температур, характерном для интенсивного протекания экзотермических реакций. Полученные результаты свидетельствуют о значительном повышении энергоэффективности процесса торрефикации биомассы за счет использования тепла экзотермических реакций.

7. Показана возможность получения синтез-газа заданного состава (соотношение  $\text{CO}/\text{H}_2$ ) путем последовательного использования процессов торрефикации и двухстадийной пиролитической конверсии, что существенно расширяет возможности его использования в химической промышленности, в частности, в производстве жидких моторных топлив.

### **Основные публикации по теме диссертации**

1. *Kosov, V.V.* Effect of torrefaction on properties of solid granulated fuel of different biomass types / *V.V. Kosov, V.A. Sinelshchikov, G.A. Sytchev, V.M. Zaichenko* // High Temperature. – 2014. – Vol. 52. – № 6. – P. 907-912. DOI: 10.1134/S0018151X14060170

2. *Зайченко, В.М.* Энергетическая утилизация древесных отходов / *В.М. Зайченко, Г.А. Сычев* // Энергетик. – 2015. – № 10. – С. 48-50

3. *Kuzmina, J.S.* Upgrading of consumer characteristics of granulated solid fuel from mixture of low-grade coal and biomass / *J.S. Kuzmina, ..., G.A. Sytchev, V.M. Zaichenko* // Journal of Physics: Conference Series. – 2015. – Vol. 653. – № 1. – 012030. DOI: 10.1088/1742-6596/653/1/012030

4. *Kuzmina, J.S.* Torrefaction. Prospects and application / *J.S. Kuzmina, G.A. Sytchev, V.M. Zaichenko* // Chemical Engineering Transactions. – 2016. – Vol. 50. – P. 265-270. DOI: 10.3303/CET1650045

5. *Kosov, V.F.* Challenges and opportunities of torrefaction technology / *V.F. Kosov, J.S. Kuzmina, G.A. Sytchev, V.M. Zaichenko* // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Vol. 774. – № 1. – 012139. DOI: 10.1088/1742-6596/774/1/012139

6. *Larina, O.M.* Comparison of thermal conversion methods of different biomass types into gaseous fuel / *O.M. Larina, V.A. Sinelshchikov, G.A. Sytchev* // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Vol. 774. – № 1. – 012137. DOI: 10.1088/1742-6596/774/1/012137

7. *Lavrenov, V.A.* Two-stage pyrolytic conversion of different types of biomass into synthesis gas / *V.A. Lavrenov, O.M. Larina, V.A. Sinelshchikov, G.A. Sytchev* // High Temperature. – 2016. – Vol. 54. – № 6. – P. 892-898. DOI: 10.1134/S0018151X16060092

8. *Faleeva, J.M.* Exothermic effect during torrefaction / *J.M. Faleeva, V.A. Sinelshchikov, G.A. Sytchev, V.M. Zaichenko* // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 946. – № 1. – 012033. DOI: 10.1088/1742-6596/946/1/012033

9. *Sytchev, G.A.* Plant origin biomass torrefaction process. Investigation of exothermic process during torrefaction / *G.A. Sytchev, V.M. Zaichenko* // European Biomass Conference and Exhibition Proceedings. – 2018. – P. 1236-1239. DOI: 10.5071/26thEUBCE2018-3DV.6.15
10. *Shevchenko, A.L.* Possibility of the use of exothermic-reactions heat from thermal destruction of biomass to increase the energy efficiency of the torrefaction process / *A.L. Shevchenko, G.A. Sytchev, V.M. Zaichenko* // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1147. – № 1. – 012093. DOI: 10.1088/1742-6596/1147/1/012093
11. *Isemin, R.* Application of torrefaction for recycling bio-waste formed during anaerobic digestion / *R. Isemin, D. Klimov, O. Larina, G. Sytchev [et al.]* // Fuel. – 2019. – Vol. 243. – P. 230-239. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.01.119
12. *Shevchenko, A.L.* Assessment of efficiency and operating optimization of biomass torrefaction unit. Solution for exothermic effect using / *A.L. Shevchenko, G.A. Sytchev, V.M. Zaichenko* // European Biomass Conference and Exhibition Proceedings. – 2019. – P. 1195-1198. DOI: 10.5071/27thEUBCE2019-3BV.2.8
13. *Zaichenko, V.M.* Thermal Effects during Biomass Torrefaction / *V. M. Zaichenko, A. Y. Krylova, G.A. Sytchev [et al.]* // Solid Fuel Chemistry. – 2020. – Vol. 54. – P. 2288-231. DOI: 10.3103/S0361521920040084
14. *Direktor, L.B.* Thermophysical Properties of Volatile Products of Low-Temperature Pyrolysis of Wood Biomass / *L.B. Direktor, V.A. Sinelshchikov, G.A. Sytchev* // High Temperature. – 2020. – P. 50-53. DOI: 10.1134/S0018151X20010046
15. *Larina, O.M.* Research of technologies of local fuel and energy resources using for distributed power generation / *V. M. Zaichenko, O.M. Larina, G.A. Sytchev* // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1556. – № 1. – 161646. DOI: 10.1088/1742-6596/1556/1/012019
16. *Kienzl, N.* Applicability of Torrefied Sunflower Husk Pellets in Small and Medium Scale Furnaces / *N. Kienzl, N. Margaritis, R. Isemin, ... G. Sytchev [et al.]* // Waste and Biomass Valorization. – 2020 [В печати]. DOI: 10.1007/s12649-020-01170-7
17. *Larina, O.M.* Investigation of combustion characteristics of mixed fuel of biomass and coal sludge / *O.M. Larina, V.A. Sinelshchikov, G.A. Sytchev* // Chemical Engineering Transactions. – 2020. – Vol. 80. – P. 205-210. DOI: 10.3303/CET2080035

**Сычев Георгий Александрович**  
**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ**  
**ПРОЦЕССА ТОРРЕФИКАЦИИ БИОМАССЫ РАСТИТЕЛЬНОГО**  
**ПРОИСХОЖДЕНИЯ**

Автореферат

---

Подписано в печать ____ . ____ . ____		Формат 60x84/16
Печать офсетная	Уч.-изд.л.	Усл.-печ.л.
Тираж 100 экз.	Заказ N	Бесплатно

---

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