

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента

на диссертационную работу Сычева Георгия Александровича

«Экспериментальные исследования особенностей процесса торрефикации биомассы растительного происхождения» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.01 – энергетические системы и комплексы

### **Актуальность темы диссертации.**

В настоящее время в мире наблюдается тенденция к переходу к безуглеродной энергетике, что подразумевает использование нетрадиционных и возобновляемых источников энергии в качестве альтернативы ископаемым топливам. Для Российской Федерации такой переход представляется актуальным, поскольку в достаточно большом числе ее регионов отсутствует централизованное энергоснабжение. Наиболее распространенным видом местных топливно-энергетических ресурсов в настоящее время является биомасса различных видов, в частности, биомасса растительного происхождения. Широкую популярность, как на малых предприятиях, так и в частном секторе, приобретает гранулированное биотопливо в виде пеллет или брикетов. Объем производства топливных гранул стремительно растет, однако зачастую такое производство является экспортоориентированным.

Для более широкого распространения твердого гранулированного биотоплива необходимо улучшить его потребительские характеристики, приблизив их к аналогичным характеристикам энергетических углей. Многообещающей в этом контексте является технология торрефикации (технологический процесс, представляющий собой нагрев обрабатываемого сырья до температур в диапазоне 200–300 °С с последующей выдержкой), которая позволяет в значительной степени повысить теплоту сгорания, а также устранить один из наиболее важных недостатков топливных гранул – высокую гигроскопичность. Несмотря на положительный эффект промышленной реализации процесс торрефикации пока не нашел.

Актуальность темы диссертации определяется тем, что использование результатов, полученных в рамках диссертационной работы Сычева Г.А., будет способствовать развитию, совершенствованию и внедрению технологии торрефикации, позволяющей получать высококачественное биотопливо.

### **Научная новизна.**

Продemonстрирована возможность использования тепла, выделяющегося при протекании экзотермических реакций, сопровождающих термическую деструкцию одного из компонентов растительной биомассы (гемицеллюлозы), в технологических целях, что позволило в значительной степени повысить энергоэффективность и, как следствие, производительность энерготехнологического комплекса для торрефикации гранулированной биомассы растительного происхождения.

Автором были проведены комплексные исследования, позволяющие описать влияние режимных параметров процесса торрефикации (температура, время выдержки) на основные потребительские характеристики конечного продукта: теплота сгорания, предел гигроскопичности, зольность, элементный состав.

Автором предложен универсальный параметр, который может быть использован для сопоставления перечисленных характеристик. Предложенный параметр (величина массовых потерь) объединяет в себе вклады двух режимных параметров процесса – температуры торрефикации и времени выдержки.

В работе предложен новый подход к утилизации летучих продуктов торрефикации с получением синтез-газа, а также экспериментально продемонстрирована возможность получения синтез-газа с заданным составом из предварительно торрефицированного сырья методом двухстадийной термохимической конверсии.

### **Практическая значимость работы.**

Практическая значимость работы заключается в том, что автором экспериментально показана возможность реализации непрерывного процесса торрефикации гранулированной биомассы растительного происхождения со сниженным энергопотреблением за счет использования тепла экзотермических реакций. Получен значительный массив данных по теплофизическим свойствам торрефицированной биомассы, зависимость теплофизических свойств от режимных параметров процесса, что в дальнейшем может быть использовано при проектировании промышленных установок.

Диссертационная работа изложена на 125 страницах текста, содержит 50 рисунков и 9 таблиц, включает введение, пять глав, заключение и список литературы (111 наименований).

Во введении обоснована актуальность работы, а также определены цели и задачи исследований.

Первая глава посвящена обзору существующих литературных источников в предметной области работы. Проведен анализ существующих способов переработки биомассы растительного происхождения, а также подходов к её энергетическому использованию. Автором приведено чёткое обоснование актуальности проведения исследований в предметной области работы. Рассмотрены теоретические аспекты процессов термической деструкции, изучены наработки в области создания установок и оборудования, генерирующих энергию с использованием биомассы. Особое внимание уделено когенерирующим установкам, в которых процесс торрефикации сочетается с газификацией или пиролизом.

Обзор литературы завершается постановкой задач диссертационного исследования.

Во второй главе представлены экспериментальные результаты, описывающие влияние параметров процесса торрефикации (температура процесса, время выдержки) на характеристики конечных продуктов (твёрдый остаток и летучие продукты низкотемпературного пиролиза). В качестве сырья были использованы пеллеты из трех видов биомассы: древесные отходы, сельскохозяйственные отходы (солома) и торф. В качестве универсального параметра для сопоставления потребительских характеристик торрефицированного биотоплива автором предложена и обоснована возможность использования величины массовых потерь. Приведены результаты анализа предела гигроскопичности и теплоты сгорания торрефицированного сырья в зависимости от универсального параметра. На основании имеющихся в литературе данных по составу летучих продуктов торрефикации проведены расчеты их теплоемкости, низшей теплоты сгорания, стехиометрического коэффициента, плотности и адиабатической температуры горения.



В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований тепловых эффектов, проявляющихся в процессе торрефикации растительной биомассы. Отправной точкой исследований стал термический анализ (SDTQ600), в рамках которого было продемонстрировано наличие экзотермического эффекта, обусловленного термической деструкцией гемицеллюлозы. Дальнейшие исследования проведены на лабораторной установке, моделирующей процесс торрефикации в цилиндрическом реакторе с неподвижным слоем. На данной установке также продемонстрировано наличие значительного экзотермического эффекта, и по результатам экспериментов сделан вывод о заметном вкладе в экзоэффект вторичных процессов с участием летучих продуктов торрефикации.

В четвертой главе автор приводит результаты исследований процесса торрефикации на крупномасштабной пилотной установке непрерывного действия с движущимся слоем и прямым нагревом обрабатываемого сырья продуктами сгорания газопоршневой электростанции, входящей в состав комплекса. Исследованы два характерных режима работы установки – со стадией нейтрализации экзотермического перегрева и с использованием тепла экзотермического эффекта. Продemonстрировано значительное повышение энергетической эффективности реактора-торрефикатора (до трёх раз) при реализации процесса с использованием тепла экзотермических реакций. Определены характеристики конечного продукта, полученного в двух указанных режимах, и в обоих случаях проведена оценка производительности комплекса.

В пятой главе приведены результаты экспериментальных исследований обоснование возможности получения синтез-газа из летучих продуктов торрефикации, а также из предварительно торрефицированного сырья. В работе показано, что проведение предварительной торрефикации при определенных режимах позволяет в дальнейшем методом двухстадийной термохимической конверсии получать синтез-газ с соотношением водорода и монооксида углерода 2/1, что является оптимальным для производства компонентов жидких моторных топлив.

**В заключении сформулированы основные результаты работы, а также выводы.**

По материалам диссертации опубликовано 17 печатных работ в журналах, входящих в реферативную базу 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. Результаты диссертационной работы докладывались на многих тематических отечественных и международных конференциях.

**При чтении диссертации возникли следующие вопросы:**

1) В таблице 2.2 приводятся свойства пеллет из разной биомассы, в том числе значение зольности. При этом пеллеты из соломы обладают зольностью в 7-18%, что является очень большим показателем для этого вида биомассы. Обычно зольность соломы не превышает 4 мас.%. В связи с этим, возникает вопрос о природе этого явления (внесение неорганического связующего, аналитическая ошибка)?

2) На стр. 67 приводится методика исследования тепловых эффектов с помощью термоанализатора SDTQ600. Для исследования использовались образцы древесины дуба. Возникает вопрос об обоснованности такого выбора, в связи с незначительностью доли дубовых пеллет на рынке?

3) На странице 70-71 автор указывает «При достижении температуры в 370°C гемицеллюлоза и целлюлоза практически полностью разложились, и лигнин остается единственной органической компонентой в составе образца. Его термораспад сопровождается значительным выделением тепла, приводящим к изменению знака эффективной теплоемкости». В связи с этим возникает вопрос, на чем основывается уверенность автора в том, что термический распад лигнина сопровождается значительным выделением тепла? Обычно разрыв химических связей происходит с существенной затратой энергии, даже если учесть возможность внутреннего самоокисления получающийся положительный тепловой эффект будет крайне небольшим.

4) Улучшение потребительных свойств древесных пеллет, в том числе предотвращение изменения их влажности и размеров во время хранения, возможно не только методом термической обработки, но и гидрофобизацией поверхности путем

пропитки. Возникает вопрос, имеет ли применение торрефицированных пеллет существенное преимущество по сравнению с гидрофобизированными?

5) На стр. 78 автор указывает «Еще раз отметим, что в разделе 3.2.1 было показано, что тепловая инерция пустого реактора и реактора, заполненного торрефицированными пеллетами, могла приводить к нагреву стенки после выключения нагревателя не более чем на 5 °С, и этот нагрев продолжался не более 5 минут. Из вышесказанного следует, что рост температуры, наблюдаемый в пристеночной области (термопара Т5 на рис. 3.7а), мог быть обусловлен только тепловыделением в процессе термической деструкции древесной биомассы». Возникает вопрос, насколько полученный вывод подтвержден данными термогравиметрии и дифференциальной сканирующей калориметрии, так как, появление экзотермических эффектов также возможно в случае наличия остаточного кислорода?

#### **Основные замечания по диссертационной работе.**

1) Доля современной литературы выпущенной за последние пять лет в списке литературных источников не превышает 10%.

2) В представленной работе приведено исследование торрефикации биомассы в том числе: древесины, соломы и торфа (стр. 47, рис 2.4) однако для торфа не приводится его вид (верховой, низовой, степень разложения), что важно для понимания данных термогравиметрии.

3) На рисунке 5.2 стр. 107 приведены данные по выходу монооксида углерода и водорода, однако в работе отсутствуют данные об общем составе газовой фазы, что необходимо для понимания возможности дальнейшей очистки и использования полученного водорода и монооксида углерода.

#### **По оформлению диссертации также следует сделать несколько замечаний:**

1) Введение диссертации полностью копирует вводную часть автореферата. Если для научной новизны и практической значимости это обосновано, то какой смысл указывать в диссертации, какой она имеет объем и сколько содержит таблиц и литературных источников остается неясным.



2) В Таблице 2 (стр. 54) не следовало в заголовках использовать акроним *daf* или приписку *dry* – в таблице достаточно места для полного названия «Массовые потери на сухое беззольное состояние, %» и «Элементный состав на сухое состояние, масс. %».

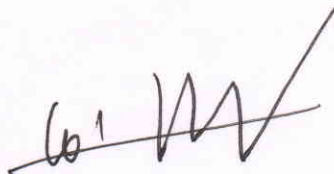
3) На оси ординат графика на рисунке 2.8а (а также в таблице 2, стр. 54) не указана размерность теплоты сгорания. Следует писать « $Q_L$ , МДж/кг».

Отмеченные замечания не снижают высокий уровень работы.

Диссертация Сычева Г.А. является завершённой научно-исследовательской квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно на высоком научном уровне. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы. Основные результаты работы в полной мере отражены в автореферате и публикациях автора. Работа полностью соответствует требованиям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения степеней № 842 от 24.09.2013 г., а её автор Сычев Георгий Александрович заслуживает присуждения ему степени кандидата технических наук по специальности 05.14.01 – энергетические системы и комплексы.

Официальный оппонент

Профессор кафедры  
биотехнологии, химии и  
стандартизации, д.т.н.



Косивцов Юрий Юрьевич

«16» 11 2020 г.

Почтовый адрес:

ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

170026, г. Тверь, набережная Афанасия Никитина, 22,

тел. +7 (4822) 44-93-48, e-mail: [kosivtsov@science.tver.ru](mailto:kosivtsov@science.tver.ru)



Подпись Косивцова Ю.Ю.  
УДОСТОВЕРЯЮ  
Учёный секретарь Совета  
Тверского государственного  
технического университета