

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Сычёва Георгия Александровича

«Экспериментальные исследования особенностей процесса торрефикации биомассы растительного происхождения»,

представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.14.01– «Энергетические системы и комплексы».

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка используемой литературы из 111 наименований, изложена на 125 страницах текста и содержит 50 рисунков и 9 таблиц.

Работа посвящена исследованию особенностей физико-химических процессов при торрефикации растительной биомассы, а также разработке и апробации метода повышения энергоэффективности реактора торрефикации в составе энерготехнологического комплекса.

Тема диссертации, результаты исследований соответствуют паспорту научной специальности 05.14.01 – «Энергетические системы и комплексы», а именно п. 2 «Исследования нетрадиционных источников энергии и новых технологий преобразования энергии в энергетических системах и комплексах».

Актуальность темы диссертации определяется с одной стороны развитием использования в России местных энергоресурсов для обеспечения нужд локальных потребителей тепло- и электроэнергии, а с другой нарастающим интересом к возобновляемым энергетическим ресурсам (ВИЭ) в мире в связи с неуклонным ростом энергопотребления, а также с ростом выбросов парниковых газов в атмосферу. В мировой структуре потребления энергии на основе ВИЭ традиционно значительное место занимает биомасса растительного происхождения. Одним из перспективных направлений её использования является сжигание и газификация гранулированного и пеллетированного биотоплива. Для России характерно использование биотоплива в малых котельных и на ТЭС предприятий целлюлозно-бумажной и лесоперерабатывающей промышленности. В крупных энергоустановках применяется двухстадийное сжигание в кипящем слое неподготовленного древесного топлива, преимущественно коро-древесных отходов и щепы. Пеллеты и гранулы из биомассы, представляют собой более качественное биотопливо, обладающее по сравнению с исходной биомассой более высокой теплотой сгорания и меньшей влажностью, что позволяет использовать его для совместного сжигания с ископаемыми топливами в существующих пылеугольных котлах. Вместе с тем, распространение гранул и пеллет в качестве топлива в энергетике помимо относительно высокой стоимости изготовления сдерживается также рядом ограничений на условия транспортировки и хранения, обусловленных их высокой гигроскопичностью. Поэтому пеллетизированные и гранулированные биотоплива в России, в настоящее время в основном используются в качестве местного топлива в малых котельных. Создание энергоэффективной технологии торрефикации пеллет и гранул и решение связанных с этим научных и технологических проблем представляет собой способ улучшения потребительских свойств и энергетической ценности пеллет из биомассы и преодоления существующих ограничений для расширения их использования. Поэтому актуальность темы работы не вызывает сомнений.

В первой главе дан аналитический обзор 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 пеллет из древесины (ДП), соломы (СП) и торфа (ТП) на выход и теплофизические свойства конечных продуктов. Дано описание методов

исследования, средств измерения и характеристик исходного сырья. В результате проведенных исследований показано, что в процессе торрефикации биомассы растительного происхождения происходит термическая деструкция органической составляющей (в основном гемицеллюлозы) и изменение элементного состава, характеризующееся значительным уменьшением доли кислорода. Получены экспериментальные данные, свидетельствующие об улучшении потребительских свойств твердого биотоплива из трех видов биомассы (древесина, солома, торф), прошедшего термическую обработку. Показано, что в результате торрефикации происходит уменьшение содержания летучих продуктов, повышение теплоты сгорания и уменьшение предела гигроскопичности. Представляется очень важным как в теоретическом, так и в прикладном плане сделанный автором в результате анализа экспериментальных данных вывод о возможности использования величины массовых потерь в расчете на сухое беззольное состояние исходного сырья в качестве универсального параметра для сопоставления свойств продуктов торрефикации, полученных при различных режимных параметрах процесса. В результате выполненных с использованием литературных данных расчетов теплофизических свойств летучих продуктов торрефикации лиственных и хвойных пород получена аппроксимирующая зависимость теплоемкости летучих продуктов торрефикации от температуры в интервале 300 – 1300 К.

В третьей главе представлены результаты экспериментального исследования тепловых эффектов, сопровождающих процесс низкотемпературного пиролиза древесной биомассы. С использованием результатов термогравиметрического и дифференциального термогравиметрического анализа, а также дифференциальной сканирующей калориметрии показано соответствие между процессами термической деструкции основных органических составляющих древесины (гемицеллюлоза, целлюлоза и лигнин) и характерными эндо- и экзотермическими пиками на кривой эффективной теплоемкости. Продemonстрировано наличие температурных областей, в которых тепло, выделяющееся за счет экзотермических эффектов, может приводить к изменению знака эффективной теплоемкости. В результате экспериментальных исследований, проведенных на лабораторной установке, моделирующей условия в реакторе торрефикации с нагревом перерабатываемого сырья через стенку, показано, что в процессе торрефикации древесной гранулированной биомассы при температурах выше 250 °С наблюдаются экзотермический эффект, приводящий к саморазогреву перерабатываемого сырья до температур, существенно превышающих температуру стенки реактора. Диссертант обоснованно связывает указанный эффект с термической деструкцией гемицеллюлозы.

Четвёртая глава посвящена исследованиям экзоэффектов при торрефикации древесной биомассы в условиях, приближенных к условиям реального технологического процесса с использованием пилотной установки с движущимся слоем и прямым нагревом перерабатываемого сырья восходящим потоком газа-теплоносителя. В результате проведенных исследований экспериментально показано, что тепловыделение в процессе торрефикации может привести к неконтролируемому разогреву перерабатываемой биомассы. Опробованы способы управления технологическим процессом как за счет изменения температуры греющего газа на входе в реактор, так и за счет использования специального алгоритма выгрузки торрефицированных пеллет. Автором убедительно продемонстрировано, что оба способа позволяют эффективно управлять температурой в реакторе торрефикации и, тем самым, предотвратить неконтролируемый разогрев торрефицируемой древесной биомассы. Вывод диссертанта о том, что использование второго способа позволяет более чем в два раза увеличить производительность реактора и в три раза снизить энергопотребление процесса торрефикации за счёт использования тепла экзотермических реакций убедительно подтверждён расчётной обработкой результатов, полученных на пилотной установке.

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 пиролизической конверсии из биомассы, прошедшей предварительную торрефикацию.

Оценивая работу в целом следует отметить следующее.

Диссертационная работа Сычёва Георгия Александровича представляет собой целостное, самостоятельное исследование, обладающее **научной новизной, теоретической и практической значимостью**. Автором 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. На основании анализа экспериментальных данных предложен универсальный критерий сопоставления характеристик торрефицированного сырья. Экспериментально показана возможность интенсификации процесса торрефикации за счет использования тепла экзотермических реакций, сопровождающих процесс термической деструкции биомассы растительного происхождения. Экспериментально доказана возможность получения синтез-газа с заданным составом путем последовательного использования процессов торрефикации и двухстадийной пиролизической конверсии.

Сильной стороной диссертационной работы является её прикладная направленность и **практическое значение**. Предложенный и реализованный непрерывный процесс торрефикации гранулированной биомассы растительного происхождения, позволяет в значительной мере снизить удельное энергопотребление при производстве твердого кондиционного биотоплива за счет частичного использования тепла экзотермических реакций. Полученные автором новые экспериментальные данные по теплофизическим свойствам торрефицированной биомассы, их зависимости от режимных параметров процесса термообработки, могут быть использованы при проектировании промышленных установок и энерготехнологических комплексов с реактором торрефикации. Особо следует отметить ценность доказанной автором возможности получения синтез-газа с отношением мольных долей водорода и монооксида углерода H_2/CO в диапазоне от 1 до 2 из древесины, соломы и торфа за счет предварительной торрефикации исходного сырья и последующей его переработки методом двухстадийной пиролизической конверсии. Это открывает возможности дальнейшей переработки синтез-газа, получаемого из торрефицированной биомассы в ценные химические продукты с помощью хорошо освоенных технологических процессов, например, процесса Фишера - Тропша.

Достоверность результатов и обоснованность основных положений и выводов, полученных в диссертации, подтверждается корректной постановкой задач, использованием отработанных методов экспериментальных исследований, использованием современных сертифицированных средств измерения и лабораторных анализов, а также сравнением результатов экспериментов с данными, представленными в литературных источниках. Научные положения, выносимые на защиту, в полной мере раскрыты в диссертации, автореферате и опубликованных работах.

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.

Результаты, выполненных соискателем исследований прошли широкую **апробацию**. Материалы, отражающие содержание диссертационной работы, представлены в виде докладов на 21 научной конференции, в том числе на 16 международных форумах.

Работа написана логично, доказательно, ясным и строгим научным языком. Автореферат полностью соответствует содержанию работы. Текст диссертации аккуратно оформлен, приведенный графический материал достаточно полно иллюстрирует изложение.

Замечания и вопросы по диссертации

1. Обосновывая во введении актуальность выбранной темы диссертации, соискатель утверждает, что в настоящее время наиболее распространенным форматом топлива из биомассы являются гранулы или пеллеты. Этот тезис представляется спорным. Если исходить из общего количества энергоиспользуемых топлив из биомассы, основную её часть составляет не переработанная в пеллеты и гранулы древесина, сжигаемая в котлах с кипящим слоем (коро-древесные отходы, щепа), которая в соответствии с классификацией международной Единой Биоэнергетической Терминологии (UBET) также является биотопливом. В первую очередь это относится к России, где основное производство энергии из биомассы приходится на долю ТЭС предприятий целлюлозно-бумажной и деревообрабатывающей промышленности.

2. На стр. 44 представлены результаты определения теплот сгорания исследованных биотоплив калориметрическим методом и с использованием результатов определения элементного состава (по формуле Менделеева). Расхождение между соответствующими значениями теплот сгорания превышает допустимое для формулы Менделеева в случае малозольных топлив значение 630 кДж/кг. Для древесных пеллет оно составляет 1300 кДж/кг (в два раза выше допустимого). Это может быть следствием, как погрешностей использованного лабораторного оборудования, так и методическими погрешностями (отступление от требований к подготовке проб и т. п.). В дальнейшем автор использует для обработки и анализа результатов экспериментов значения теплот сгорания, полученные с помощью формулы Менделеева. В таких случаях, если невозможно добиться удовлетворительной сходимости калориметрического и элементного анализа, рекомендуется использовать значение, полученное калориметрическим методом.

3. На стр. 56 из представленных в таблице 2.3 результатов определения теплотехнических свойств исходных и торрефицированных пеллет автор заключает, что наибольшие массовые потери наблюдались для древесных пеллет, наименьшие для пеллет из торфа. Это вывод вызывает сомнение. Будучи справедливым для торрефицированных пеллет полученных при температуре процесса $t = 350^{\circ}\text{C}$, он не выглядит очевидным для других значений температуры. При $t = 270^{\circ}\text{C}$ потеря массы соломенных пеллет превышает потерю массы древесных пеллет, а при $t = 250^{\circ}\text{C}$ потери массы торфяных пеллет больше чем у древесных, полученных при более высокой температуре ($t = 270^{\circ}\text{C}$). Точно также потери массы соломенных пеллет при $t = 300^{\circ}\text{C}$, больше потерь массы древесных пеллет при $t = 310^{\circ}\text{C}$. Анализ влияния свойств исходного сырья на теплотехнические свойства торрефицированных пеллет затрудняет, то, что промежуточные значения температуры процесса для всех трех видов пеллет не совпадают. Не понятно, почему для исследований всех трёх видов биомассы не был выбран один и тот же ряд значений температур?

4. В диссертации значительное место занимают исследования влияния температуры и потери массы на эффективную теплоёмкость материала пеллет в процессе термораспада. Эффективная теплоёмкость определяется как косвенно измеряемая величина по результатам прямых измерений теплового потока q , темпа нагрева $\delta T = \Delta T / \Delta t$ и текущей массы образца $m(T)$. Исследование выиграло бы, если бы автор выполнил оценку погрешности определения эффективной теплоёмкости в соответствии с существующими методическими рекомендациями по расчёту погрешностей определения косвенно измеряемых величин.

5. В тексте диссертации автореферата встречаются неточности и опечатки. Например, в автореферате на рис. 11б неверно указано название оси ординат (рисунок показывает зависимости от величины массовых потерь удельного объёма синтез-газа, а не соотношения H_2/CO , как указано на рисунке), в заголовках разделов 5.2 и 5.3 очевидно пропущено слово «получение», грамматические ошибки на стр. 59 и 87.

Заключение.

Приведенные замечания не затрагивают существа основных положений и выводов диссертации. Диссертация Сычева Г. А. является завершённой научно-квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно и на высоком научно-техническом уровне, в

которой на основании выполненных автором исследований разработаны и научно обоснованы теоретические положения и технические разработки, имеющие существенное значение для развития страны. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы. Работа полностью соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (п.9), а ее автор, Сычёв Георгий Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.01– «Энергетические системы и комплексы».

Официальный оппонент
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
ОАО «Всероссийский теплотехнический
научно-исследовательский институт» (ОАО ВТИ),
115280, г. Москва, ул. Автозаводская, 14,
e-mail: litoun@gmail.com, vti@vti.ru
тел. (495) 137-7770, д. 2644

Подпись Д.С. Литуна заверяю
Руководитель отдела управления
персоналом ОАО ВТИ



Литун Дмитрий Степанович

И. А. Картошкина