

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по науке и трансферу технологий
Национального исследовательского Томского
политехнического университета,
доктор физико-математических наук

Сухих Л.Г.
«30» декабрь 2021 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Диссертация «Тепломассоперенос в древесной биомассе при термической подготовке к сжиганию» выполнена в Научно-образовательном центре И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

В период подготовки диссертации соискатель Нигаи Наталья Андреевна работала в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» в должности инженер организационного отдела Инженерной школы энергетики.

В 2021 г. Нигаи Н.А. окончила аспирантуру федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по направлению подготовки 03.06.01 – Физика и астрономия, профиль 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Диплом об окончании аспирантуры по научной специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника выдан 05 июля 2021 года федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Научный руководитель:

Сыродой Семён Владимирович, кандидат технических наук, доцент НОЦ И.Н. Бутакова, основное место работы: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Инженерная школа энергетики, НОЦ И.Н. Бутакова, научный сотрудник.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Общая характеристика работы

Диссертация Нигаи Натальи Андреевны представляет законченную научно-квалификационную работу, в которой изложены результаты экспериментальных исследований основных закономерностей процессов тепло- и массопереноса, протекающих в условиях интенсивных фазовых превращений в слое влажной древесной биомассы при её термической подготовке к сжиганию.

Полученные экспериментальные результаты и сформулированные выводы обладают единством изложения результатов выполненных исследований. Оформление и стиль написания диссертации отвечают требованиям, предъявляемым к научно-квалификационным работам на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Актуальность темы исследования

Процессы сушки изучаются уже более 190 лет (первые работы датируются 1826 годом). Но несмотря на богатую историю исследований процессов влагоудаления из дисперсных и пористых материалов, на настоящее время остаётся ещё много нерешённых задач в этой области знания. На сегодняшний день не разработано единой физической теории и обеспечивающей её математической базы, адекватно описывающих процессы сушки влажной древесной биомассы в условиях радиационно-конвективного нагрева.

В последние годы (10 лет) древесина всё активнее привлекает внимание мирового сообщества ученых, работающих в области энергетики, как перспективное топливо паровых и водогрейных котлов промышленных предприятий, и тепловых электрических станций. При этом рассматриваются три варианта использования древесной биомассы: первый – прямое сжигание биотоплива в топках водогрейных и паровых котлов; второй – совместное сжигание биомассы с углём в камерах сгорания котельных агрегатов; третий – газификация древесной биомассы с получением синтез-газа. Такая «популярность» древесной биомассы обусловлена несколькими объективными и субъективными причинами. Во-первых, древесина представляет собой так, называемое углерод-нейтральное топливо. При её сжигании образуется углекислый газ, который не нарушает общего баланса CO_2 в геохимическом цикле углерода. Также биомасса является относительно дешевым энергоносителем, доступным практически во всех регионах планеты. Однако, даже самая теплотворная древесина по показателям энергоэффективности существенно уступает углю. Эффективность использования биомассы в энергетике можно повысить за счет разработки новых технологий подготовки и сжигания древесной биомассы, например, совместно с углем в топочных устройствах котельных агрегатов. Во-вторых, древесная биомасса является одним из самых перспективных возобновляемых ресурсов на планете. По оценкам многих специалистов биомасса и продукты её переработки (биогаз, биоуголь, биоэтанол) в будущем (ближайшие 30 – 40 лет) могут напрямую заменить уголь (или дополнить его за счет создания эколого- и энергоэффективных смесевых топлив) во многих областях энергетики.

Однако любая древесина в исходном состоянии содержит большое количество влаги. Сжигание влажной биомассы в топочных устройствах котельных агрегатов существенно снижает коэффициент полезного действия котла. Последнее обусловлено низкой теплотой сгорания влажного биотоплива, а также повышением энтальпии дымовых газов. Увеличение влажности исходного топлива приводит к интенсификации осаждения золы на поверхностях теплообмена и в трактах внутренних и внешних газоходов котельного агрегата. Соответственно, неизбежным этапом, предшествующим сжиганию биомассы, является проведение процедуры её дегидратации. В этих условиях разработка энергетически эффективных методов и высокоэффективных установок по удалению влаги из древесины является одним из приоритетных направлений развития энергомашиностроения. Но для проектирования высокоэффективного сушильного оборудования необходимы знания о закономерностях процессов тепло- и массопереноса, протекающих при сушке влажной древесной биомассы. Также стоит отметить, что на сегодняшний день в мировой научной периодике нет примеров публикаций с описанием результатов теоретических и экспериментальных исследований процессов тепло- и массопереноса, протекающих при сушке лесного горючего материала (листовой и хвойный опад, ветки деревьев). В этой связи диссертационная работа Н.А. Нигай, в которой рассматриваются процессы тепло- и массопереноса в древесной биомассе при термической подготовке к сжиганию является актуальной. Полученные результаты экспериментальных исследований могут стать научной базой при проведении опытно-конструкторских работ по разработке конструктивных характеристик камер сушильных установок котельных агрегатов объектов промышленной теплоэнергетики. Результаты

выполненных экспериментальных исследований представляют собой новые знания о механизмах и характеристиках протекания физико-химических процессов в теории тепло- и массопереноса, а также являются основой для разработки и верификации в перспективе математических моделей и алгоритмов численного решения задач дегидратации влажной древесной биомассы при интенсивном радиационно-конвективном нагреве. Нигаи Н.А. получены новые результаты, которые полностью соответствуют критериям научной новизны фундаментальных и прикладных исследований.

Диссертационное исследование выполнено в рамках грантов и проектов, в которых Нигаи Наталья Андреевна была соисполнителем: Проект ВИУ-НОЦ И.Н. Бутакова 203/2019 «Физическое и математическое моделирование процессов термической подготовки, воспламенения и горения смесевых топлив на основе угля и лесного горючего материала применительно к камерам сгорания котельных агрегатов ТЭС», Грант РФФИ-18-79-10015 «Разработка основных элементов теории процессов термической подготовки, воспламенения и горения смесевых топлив на основе угля и древесины применительно к камерам сгорания котельных агрегатов», Грант РФФИ-20-19-00226 «Моделирование тепловых режимов объектов теплоснабжения при совместной работе газовых инфракрасных излучателей и приточно-вытяжной вентиляции в условиях интенсивного конвективно-кондуктивного и радиационного теплообмена», Грант Президента МК-89.2021.4 «Разработка основных элементов теории воспламенения капель существенно неоднородных водоугольных композитов в условиях высоких температур и давлений», Грант РФФИ 18-79-10015-П «Разработка основных элементов теории процессов термической подготовки, воспламенения и горения смесевых топлив на основе угля и древесины применительно к камерам сгорания котельных агрегатов», Государственных заданий (Гос. задания «Наука» проекты № FSWW-2020-0022 и № 8.13264.2018/8.9).

Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации

Личный вклад автора состоит в разработке методик проведения экспериментов, планировании экспериментальных исследований и их проведении, обработке, анализе и обобщении полученных результатов, оценке систематических и случайных погрешностей, установлении температурных режимов сушки древесной биомассы, в формулировке защищаемых положений и выводов, в разработке рекомендаций использования полученных результатов, подготовке статей к опубликованию в изданиях, включенных в перечень ВАК РФ и индексируемых базами данных Scopus и Web of Science.

Степень достоверности результатов проведенных исследований

Достоверность полученных результатов подтверждается оценками систематических и случайных погрешностей выполненных измерений, удовлетворительной повторяемостью результатов эксперимента при идентичных начальных значениях параметров, использованием современного и высокоточного оборудования и программно-аппаратных комплексов, а также сравнением с теоретическими и экспериментальными данными других авторов.

Новизна результатов проведенных исследований

По результатам проведенных экспериментов (впервые в мировой практике) установлен ранее незарегистрированный механизм влагоудаления при сушке массивного слоя древесной биомассы, отличающийся от известных не только описанием процессов непосредственного испарения воды, но и движением водяных паров во внутривещной структуре слоя биомассы, а также многократно повторяющимися циклами комплекса процессов испарение/конденсация. При экспериментальных исследованиях процессов сушки лесного горючего материала на основе древесных веточек установлена немонотонная зависимость массовой скорости влагоудаления от времени $W_{eva}(\tau)$. При этом показано, что такой режим сушки характерен для умеренных температур внешней среды ($T_g \leq 353$ К). При высокотемпературном нагреве древесной биомассы ($T_g = 373-393$ К) зависимости $W_{eva}(\tau)$ изменяются монотонно во всем временном периоде сушки. Впервые

проанализировано влияние плотности засыпки влажной биомассы на характеристики и условия влагоудаления. Показана линейная связь между степенью уплотнения биомассы и временем сушки. Экспериментально установлены значения массовых скоростей влагоудаления при сушке лесных горючих материалов (листовой и хвойный опад, веточки) и типичных отходов деревообработки (стружка, опилки, щепа) при нагреве в высокотемпературной среде. Проведён анализ энергетической эффективности сушки исследуемых видов древесной биомассы. Обоснована возможность использования лесного горючего материала в качестве топлива паровых и водогрейных котлов теплоэлектроцентралей и локальных котельных.

Полученные результаты диссертационной работы существенно расширяют современные представления о процессах влагоудаления из пористых дисперсных материалов, протекающих в трактах установок, проводящих процедуру влагоудаления.

Практическая значимость диссертации и использование полученных результатов

Обоснована возможность использования в энергетике лесных горючих материалов, отходов деревообрабатывающих производств в качестве топлива паровых и водогрейных котельных агрегатов промышленных предприятий, а также тепловых электрических станций. Результаты диссертационной работы являются основой при фундаментальном обосновании конструктивных характеристик камер сушильных установок в период проведения опытно-конструкторских работ. Экологический эффект от использования древесной биомассы на объектах теплоэнергетики в качестве топлива определяется, в первую очередь, снижением концентраций основных антропогенных газов (оксидов азота и серы), формирующихся при сжигании угля, а также выводом с территорий лесоповалов пожароопасных отходов лесопиления и лесных горючих материалов. Экономический эффект заключается в сжигании в топках паровых и водогрейных котлов вместо основных видов топлив (угля, мазута, газа) перспективных смесей на основе древесной биомассы, стоимость которых много ниже и зависит в основном от расходов на транспортировку. Положительный синергетический социально-экономический эффект достигается за счет фундаментального обоснования эффективности внедрения в общий баланс тепло- и электрогенерации лесного горючего материала и соответственно вывода ЛГМ из лесной экосистемы.

Теоретическая значимость

Результаты выполненных экспериментальных исследований существенно расширяют современные представления о механизмах процессов тепло- и массопереноса, протекающих совместно в условиях интенсивных фазовых превращений, при проведении процедуры влагоудаления из древесной биомассы. Результаты проведённых экспериментов являются основой для разработки новых математических моделей, наиболее адекватно описывающих процессы сушки влажной древесной биомассы. Установленные закономерности могут использоваться при дальнейшем уточнении механизма удаления влаги из пористой структуры влагосодержащих материалов и развития общей теории сушки.

Апробация результатов исследования

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на V Международном молодежном форуме «Интеллектуальные энергосистемы» (Томск, 2017), Седьмой Российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ-7) (Москва, 2018), XXII Международном симпозиуме имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных «Проблемы геологии и освоения недр» (Томск, 2018), Всероссийской научной конференции с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий» (Томск, 2016, 2019, 2020), XXII Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепло- массообмена в энергетических установках»

(Москва, 2019), Всероссийской научной конференции с международным участием «XI Семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике» Scientific Conference «Thermophysics and Power Engineering in Academic Centers», ТРЕАС–2019 (Санкт-Петербург, 2019), Международной молодёжной научной конференции «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования» (Томск, 2017, 2018, 2019), Всероссийской конференции с элементами научной школы для молодых учёных «XXXIV–XXXVI Сибирский теплофизический семинар» (Новосибирск, 2018, 2019, 2020), III Международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетике» (Москва, 2020), Всероссийском конкурсе с международным участием «Возобновляемая энергия планеты – 2020» для студентов, аспирантов и молодых учёных (лауреат в номинации «Работа перспективного характера в области создания новых видов генерации с использованием ВИЭ» по направлению «Биоэнергетика и новые виды генерации, в том числе комбинированные») (Москва, 2021), VI Всероссийской конференции с элементами школы молодых ученых (Севастополь, 2021).

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем

Всего по теме диссертации Нигай Н.А. опубликовано 17 научных работ, в том числе 4 – в международных рецензируемых научных журналах, индексируемых базами данных Scopus и Web of Science: *Renewable Energy* (ИФ=8,001, Q1); *Energy* (ИФ=7,147, Q1); *Energy Reports* (ИФ=6,87, Q1); *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects* (ИФ=3,447, Q2). Одна статья опубликована в журнале, рекомендованном ВАК РФ для публикации материалов кандидатских диссертаций: «Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов» и 12 публикации в сборниках материалов международных и всероссийских научных конференций.

Статьи в журналах из перечня рецензируемых научных изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискания ученой степени кандидата наук:

1. Kuznetsov G.V., Nigay N.A., Syrodoy S.V., Maksimov V.I., Gutareva N.Yu. Features of the processes of heat and mass transfer when drying a large thickness layer of wood biomass // *Renewable Energy*. – 2021. – Vol. 169. – P. 498-511.

2. Kuznetsov G.V., Nigay N.A., Syrodoy S.V., Gutareva N.Yu., Malyshev D.Yu. A comparative analysis of the characteristics of the water removal processes in preparation for incineration of typical wood waste and forest combustible materials // *Energy*. – 2021. – P. 122362.

3. Kuznetsov G.V., Nigay N.A., Syrodoy S.V., Gutareva N.Yu. Influence of biomass type on its characteristics of convective heating and dehydration // *Energy Reports*. – 2021. – Vol. 7. – P. 7118-7133.

4. Nigay N.A., Kuznetsov G.V., Syrodoy S.V., Gutareva N.Yu. Estimation of energy consumption for drying of forest combustible materials during their preparation for incineration in the furnaces of steam and hot water boilers // *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. – 2020. – Vol. 42 – №. 16. – P. 1–9.

5. Нигай Н.А., Сыродой С.В. Влияние плотности засыпки древесной биомассы на характеристики её сушки в условиях высокотемпературного нагрева // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. № 6. 90–97.

6. Nigay (Ivanova) N.A., Bulba E.E. Mathematical modeling of processes of heat and mass transfer during drying of wood biomass // *MATEC Web of Conferences*. – 2018 – Vol. 194, Article number 01012. – P. 1–6.

7. Nigay (Ivanova) N.A., Bulba E.E. Experimental study of liquid evaporation rate from coniferous biomass // *MATEC Web of Conferences*. – 2017 – Vol. 110. Article number 01020. – P. 1–5

8. Nigay (Ivanova) N.A., Bulba E.E. Experimental investigation of the processes of dehumidification of coniferous biomass // MATEC Web of Conferences. – 2017 – Vol. 141, Article number 01014. – P. 1–5.

Соответствие содержания диссертации избранной специальности

Диссертация является завершенной научно-квалификационной работой и соответствует специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Диссертация «Тепломассоперенос в древесной биомассе при термической подготовке к сжиганию» Нигай Натальи Андреевны рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Заключение принято на заседании Теплоэнергетической секции Научно-технического совета Инженерной школы энергетики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Присутствовало на заседании – 10 чел. Результаты голосования: «за» – 10 чел., «против» – нет, «воздержалось» – нет, протокол № 35 от 20 декабря 2021 г.

Председатель Теплоэнергетической секции
Научно-технического совета, д.ф.-м.н.,
профессор И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ

Секретарь научно-технического совета ИШЭ
ТПУ

Подписи Кузнецова Г.В. и Филимоновой С.В. заверяю

Ученый секретарь Ученого совета ТПУ,
к.т.н.


Г.В. Кузнецов


С.В. Филимонова


Е.А. Кулинич