



ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Нига́й Наталья Андреевна

**ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЕ ПРИ
ТЕРМИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКЕ К СЖИГАНИЮ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Томск – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Научный руководитель:

Сыродой Семён Владимирович

кандидат технических наук, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», доцент научно-образовательного центра И.Н. Бутаква Инженерной школы энергетики.

Официальные оппоненты:

Крайнов Алексей Юрьевич

доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», Физико-технический факультет, заведующий кафедрой математической физики.

Низовцев Михаил Иванович


доктор технических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук», заведующий лабораторией проблем энергосбережения.

Защита диссертации состоится 11 октября 2022 г. в 12 часов 00 минут на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.04 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, пр. Ленина, д. 43, уч. корпус 3, ауд. 401.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте dis.tpu.ru.

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук



Гвоздяков Дмитрий
Васильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Процессы сушки изучаются уже более двух столетий. Но несмотря на богатую историю исследований процессов влагоудаления из дисперсных и пористых материалов на сегодняшний день остаётся ещё много нерешённых задач в этой области знания. Например, не разработано автономных (не опирающихся на апостериорную информацию) прогностических моделей, адекватно описывающих процессы тепло- и массопереноса при сушке древесной биомассы в условиях радиационно-конвективного нагрева.

За последнее десятилетие древесная биомасса (отходы лесозаготовок и деревообработки: древесные опилки, стружка, щепа; лесные горючие материалы (ЛГМ): листья, хвоя, ветки деревьев) всё активнее привлекает внимание мирового сообщества ученых, работающих в области энергетики, как одно из перспективных топлив или компонент топливных смесей (например, биомасса/уголь) паровых и водогрейных котлов промышленных предприятий и тепловых электрических станций [1]. При этом рассматриваются три наиболее перспективных варианта использования древесной биомассы: первый – прямое сжигание 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 [2].

Перспективность использования древесной биомассы в качестве топлива обусловлена несколькими объективными и субъективными причинами. Во-первых, антропогенная нагрузка на окружающую среду объектов теплоэнергетики, использующих биомассу в качестве топлива, существенно меньше, чем у сжигающих уголь или продукты переработки нефти. Так как при горении древесной биомассы образуется углекислый газ, который не нарушает общего баланса CO_2 в геохимическом цикле углерода. Деревья и растения, составляющие основной объем энергетической биомассы, поглощают углекислый газ в процессе фотосинтеза. Другими словами, происходит рециркуляция углерода: сколько CO_2 поглощено, столько и выделяется при сжигании биомассы. В результате концентрация диоксида углерода в атмосфере остается практически неизменной. Также при сжигании древесной биомассы выделяется значительно меньше оксидов азота (NO_x) по сравнению с углем и практически не образуется оксидов серы (SO_x) [3], соответственно, внедрение биомассы в качестве топлива приведет к существенному снижению негативного антропогенного воздействия объектов теплоэнергетики на окружающую среду. В то же время древесное биотопливо (ЛГМ, отходы деревообработки и лесопиления) является относительно дешевым

энергоносителем доступным практически во всех регионах планеты. Но даже обладающая наибольшей теплотворной способностью древесина (дуба) по энергоэффективности существенно уступает самому низкосортному углю (бурому). Эффективность использования биомассы в энергетике можно повысить за счет разработки новых технологических решений по её термической подготовке к сжиганию (за счет снижения энергозатрат на сушку), а также, например, использованием древесных брикетов, пеллет или древесно-угольных смесей.

Во-вторых, древесная биомасса является одним из самых перспективных возобновляемых ресурсов на планете [4]. По оценкам специалистов из Массачусетского технологического института [4] биомасса и продукты её переработки (биогаз, биоуголь, биоэтанол) в будущем могут напрямую заменить уголь (или дополнить его за счет создания эколого- и энергоэффективных смесевых древесно-угольных топлив) в общем балансе тепло- и электрогенерации.

Однако любая древесная биомасса в исходном состоянии является существенно влагонасыщенным материалом (влажность может достигать 70 %). Сжигание влажной биомассы в топочных устройствах котельных агрегатов значительно снижает коэффициент полезного действия котла. Последнее обусловлено низкой теплотой сгорания влажного древесного биотоплива, а также увеличением тепловых потерь с уходящими газами, вследствие роста энтальпии продуктов сгорания. Также высокая влажность биомассы приводит к интенсификации осаждения золы на поверхностях теплообмена и в трактах внутренних, и внешних газоходов котельного агрегата [5]. Соответственно, неизбежным этапом, предшествующим сжиганию биомассы, является проведение процедуры её дегидратации (сушки). В этих условиях разработка энергетически эффективных методов и высокоэффективных установок по удалению влаги из древесного биотоплива является одним из приоритетных направлений развития энергомашиностроения. Но для проектирования высокоэффективного сушильного оборудования необходимы знания о закономерностях процессов тепло- и массопереноса, протекающих при сушке биомассы. Поэтому установление по результатам экспериментов основных механизмов и характеристик процессов тепло- и массопереноса, протекающих в условиях интенсивных фазовых превращений (испарение внутрипоровой и адсорбционно-связанной влаги, а также её удаление), во влажной древесной биомассе при её термической подготовке (сушке) к сжиганию является актуальной задачей.

Степень разработанности темы исследования. Существенный вклад в развитие теории и практики процессов тепло- и массопереноса, протекающих при сушке

влажных пористых материалов, в условиях интенсивного нагрева внесли: А.В. Лыков, О. Кришер, Ю.П. Семёнов, П.С. Коссович, П.Д. Лебедев, Б.А. Поснов, В.А. Баженов, И.В. Кречетов, О.Р. Дорняк, Г.С. Шубин, Р.Р. Сафин, Р. Bengtsson, N. Hofmann, K.Y. Pin и др. Но стоит отметить, что на сегодняшний день в мировой научной периодике практически нет примеров публикаций с описанием результатов теоретических и экспериментальных исследований процессов тепло- и массопереноса, протекающих при сушке перспективной для целей энергетики древесной биомассы на основе типичных отходов лесопиления и деревообработки (опилки, щепа, стружка, древесная пыль, кора и т.д.), а также лесных горючих материалов (лиственной и хвойный опад, ветки деревьев). В большинстве известных публикаций приведены результаты исследований процессов сушки биомассы на основе отходов сельскохозяйственных производств (рисовая шелуха, стебли растений, солома и др.), при этом анализ энергетических затрат на процесс влагоудаления в этих статьях не проводился.

Также остаются практически неизученными связи массовой скорости влагоудаления (W_{eva}) при сушке биомассы с основными значимыми факторами (температура внешней среды, вид биомассы, плотность засыпки и др.). В то же время скорость влагоудаления является определяющей характеристикой при разработке общей теории процессов сушки, которая необходима для фундаментального обоснования перспективности использования древесной биомассы в качестве топлива паровых и водогрейных котлов тепловых электрических станций, а также промышленных предприятий. В связи с этим в настоящее время для древесной биомассы, используемой в качестве топлива, остаются актуальными проблемы установления механизмов тепло- и массопереноса, протекающих в условиях интенсивных фазовых превращений, при радиационно-конвективном нагреве в типичном (для современной сушильной техники) диапазоне температур внешней среды ($T_g=333-393$ К).

Целью работы является установление по результатам экспериментальных исследований основных закономерностей (механизмов, характеристик, условий) процессов тепло- и массопереноса, протекающих при интенсивных фазовых превращениях (испарение внутрипоровой и адсорбционно-связанной влаги), во влажной древесной биомассе при её радиационно-конвективном нагреве.

Цель диссертационной работы достигается путем решения следующих задач:

1. Разработка методик экспериментальных исследований процессов тепло- и массопереноса, протекающих при сушке древесной биомассы, отличающихся от из-

вестных комплексным изучением тепловых режимов слоя измельчённой древесной биомассы в условиях интенсивных фазовых превращений.

2. Определение по результатам экспериментальных исследований основных закономерностей процессов тепло- и массопереноса в слое влажной древесной биомассы (лесной горючий материал: листья, хвоя, ветки деревьев; отходы лесопиления и деревообработки: опилки, щепа, древесная стружка) в период её радиационно-конвективного нагрева.

3. Установление значений времени дегидратации древесной биомассы в типичном (для сушильного оборудования) температурном диапазоне внешней среды ($T_g=333\text{--}393\text{ K}$).

4. Определение значений массовых скоростей влагоудаления в период сушки древесной биомассы при варьировании основных значимых параметров: вид биомассы, температура внешней среды, плотность засыпки.

5. Оценка по результатам проведенных экспериментов энергетических затрат на сушку древесной биомассы.

6. Разработка физических моделей процессов тепло- и массопереноса, протекающих при сушке измельчённой древесной биомассы, в условиях радиационно-конвективного нагрева.

Научная новизна работы.

1. Впервые на основании результатов экспериментальных исследований установлен механизм процессов тепло- и массопереноса, протекающих при сушке массивного слоя (толщиной $h=100\pm 1$ мм) древесной биомассы, характеризующийся не только непосредственным испарением воды, но и фильтрацией водяных паров как к поверхности нагрева, так и вглубь этого слоя, где происходит их последующая конденсация, приводящая к повышению температуры и перенасыщению части слоя влагой.

2. По результатам исследований процессов тепло- и массопереноса при сушке лесных горючих материалов на основе веток деревьев установлены ранее незарегистрированные немонотонные зависимости значений массовых скоростей влагоудаления от времени дегидратации $W_{\text{eva}}(\tau)$ в условиях низкотемпературного нагрева ($333\leq T_g\leq 353\text{ K}$).

3. Впервые показано влияние плотности засыпки влажной древесной биомассы на характеристики и условия протекания процесса влагоудаления. Установлено, что увеличение плотности засыпки биомассы (древесные опилки) в 2 раза приводит к существенному (почти в 10 раз) росту значений скорости влагоудаления в идентичных

условиях нагрева. Показано, что фильтрационные характеристики (плотность запытки, проницаемость, пористость, размер пор) слоя биомассы наряду с условиями нагрева (температура внешней среды, интенсивность теплообмена) являются факторами, значительно влияющими на процесс влагоудаления.

4. Энергетический анализ процесса сушки показал, что процедуру влагоудаления из древесной биомассы на основе типичных отходов лесопиления (древесная щепа) и лесных горючих материалов (веточки деревьев, лиственной и хвойный опад) эффективнее всего проводить в условиях относительно низких температур внешней среды ($T_g \leq 353$ К).

Практическая значимость работы. По результатам экспериментальных исследований обоснована возможность использования в энергетике лесных горючих материалов (листья, хвоя, ветки деревьев) и отходов деревообрабатывающих производств (опилки, щепа) в качестве перспективного топлива паровых и водогрейных котельных агрегатов промышленных предприятий, а также тепловых электрических станций. 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 лесозаготовок пожароопасных отходов лесопиления и лесных горючих материалов. Последнее существенно снизит пожароопасность лесов и приведет к росту числа рабочих мест в регионах богатых лесными угодьями.

Результаты диссертационной работы могут являться основой при обосновании конструктивных характеристик камер сушильных установок в период проведения опытно-конструкторских работ. Также результаты диссертационного исследования используются в Национальном исследовательском Томском политехническом университете в рамках подготовки магистров по направлению 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника ООП «Промышленная теплоэнергетика».

Теоретическая значимость. Результаты выполненных экспериментальных исследований существенно расширяют современные представления о механизмах и процессах тепло- и массопереноса, протекающих совместно в условиях интенсивных фазовых превращений, при проведении процедуры влагоудаления из древесной биомассы. Также результаты проведенных экспериментов являются основой для разработки новых физических и математических моделей, наиболее адекватно описывающих процессы сушки древесной биомассы.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертация соответствует паспорту специальности 1.3.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника» в части пункта 1 – «Фундаментальные, теоретические и экспериментальные исследования молекулярных и макросвойств веществ в твердом, жидком и газообразном состоянии для более глубокого понимания явлений, протекающих при тепловых процессах и агрегатных изменениях в физических системах».

Методы исследования. Экспериментальные исследования теплофизических процессов, протекающих совместно при интенсивных фазовых трансформациях (испарение воды), выполнены с использованием современных методов и высокоточных средств измерения: регистрация массы навески биомассы проводилась непрерывно с помощью лабораторных весов Aczet CY-1003 (погрешность измерения массы 0,001 г) и программного обеспечения LabVIEW; температура в слое древесной биомассы и над её поверхностью регистрировалась при помощи термоэлектрических преобразователей – хромель-алюмелевых термопар (диаметр спая термопар $d=0,3$ мм; температурный диапазон измерения 273–1373 К; погрешность измерения 0,1 К); температура внутри сушильной камеры SU 32 задавалась с помощью терморегулятора ТРМ 500.

Положения, выносимые на защиту:

1. Экспериментально установлен ранее незарегистрированный механизм процессов тепло- и массопереноса, протекающих при сушке массивного слоя (толщиной $h=100\pm 1$ мм) древесной биомассы (сосновая стружка) в условиях радиационно-конвективного нагрева ($T_g=333-393$ К), описывающий помимо непосредственного испарения внутрипоровой и адсорбционно-связанной влаги также движение водяных паров во внутрипоровой структуре слоя биомассы и их конденсацию в относительно холодной области навески (значительная часть водяных паров не успевает выйти на поверхность слоя биомассы и фильтруется вглубь навески в относительно холодные слои, где конденсируется). Показано, что последующий нагрев приводит к испарению вторичного конденсата.

2. Установлено два температурных режима сушки древесной биомассы (высокотемпературный $T_g \geq 373$ К и низкотемпературный $T_g < 373$ К с условной границей раздела по температуре внешней среды $T_g = 373$ К), в которых вид биомассы оказывает кардинально отличающееся влияние на характеристики (скорость влагоудаления, время сушки) и условия протекания процесса влагоудаления. В условиях высокотемпературного нагрева ($T_g = 373-393$ К) отличия значений максимальных скоростей вла-

гоудаления составляют около 30 %, при низкотемпературном ($T_g=333\text{--}353\text{ К}$) тепловом воздействии значения максимальных скоростей влагоудаления исследованных видов биомассы могут отличаться в четыре раза.

3. При нагреве влажной древесной биомассы на основе веточек лиственных пород деревьев в условиях относительно низких температур воздуха ($T_g<373\text{ К}$) зависимости значений массовых скоростей влагоудаления от времени немонокотны в течение всего периода сушки. При температурах внешней среды $T_g=373\text{--}393\text{ К}$, такого немонотонного изменения значений массовых скоростей влагоудаления не зарегистрировано.

4. Плотность навески влажной древесной биомассы (сосновые опилки) оказывает существенное влияние на характеристики (скорость влагоудаления, время сушки) процесса влагоудаления в исследуемом диапазоне температур внешней среды ($T_g=333\text{--}393\text{ К}$). Так, уплотнение навески биомассы в два раза приводит к значительному, почти в 10 раз, увеличению скорости удаления влаги в идентичных условиях нагрева. Установлено, что уплотненный слой биомассы, при условии идентичности масс навесок сушится в 1,5 раза быстрее, чем слой с естественной насыпкой.

5. По результатам анализа энергоэффективности процессов дегидратации древесной биомассы установлено, что сушку веточек деревьев, хвойного и лиственного опада (листья берёзы и хвоя ели), а также отходов деревообработки (на основе щепы) эффективнее проводить в условиях относительно низких температур внешней среды ($T_g=333\text{ К}$), так как увеличение T_g приводит к существенному (более чем на 30 %) уменьшению параметра энергоэффективности сушки. В то же время сушку тонкого слоя (толщиной $h\approx 1\text{--}1,5\text{ мм}$) листьев деревьев лучше всего проводить в условиях высокотемпературного нагрева ($T_g\geq 393\text{ К}$).

Степень достоверности результатов. Достоверность полученных результатов подтверждается оценками систематических и случайных погрешностей выполненных измерений, удовлетворительной повторяемостью результатов серий экспериментов при идентичных начальных условиях, использованием современного и высокоточного оборудования и программно-аппаратных комплексов.

Связь работы с научными программами и грантами. Диссертационная работа проводилась в рамках стратегического плана развития Национального исследовательского Томского политехнического университета, как одного из ведущих университетов мира. Разработанные экспериментальные методики используются в Национальном исследовательском Томском политехническом университете при подго-

товке магистров техники и технологии по направлениям: «Экологически чистые технологии преобразования энергоносителей», «Теплоэнергетика и теплотехника», а также аспирантов по направлению: «Физика и астрономия».

Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в Российской Федерации (Указ Президента РФ № 899 от 7 июля 2011 г.): «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика». А также критическим технологиям Российской Федерации: «Технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе». Диссертационное исследование процессов тепло- и массопереноса в древесной биомассе при радиационно-конвективном нагреве выполнено при поддержке грантов: Российского научного фонда (РНФ) 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» (2018–2021 гг.); гранта Президента МК-89.2021.4 «Разработка основных элементов теории воспламенения капель существенно неоднородных водоугольных композитов в условиях высоких температур и давлений» (2021–2022 гг.); гранта РНФ 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» (2020–2022 гг.); гранта РНФ 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» (2021–2023 гг.), а также Государственных заданий (Гос. задания «Наука» проекты №FSWW-2020-0022 и № 8.13264.2018/8.9).

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; формулировании защищаемых положений и основных выводов диссертационной работы; апробации результатов на научных конференциях и подготовке статей к опубликованию в изданиях, включенных в перечень ВАК РФ и индексируемых базами данных Scopus и Web of Science.

Апробация результатов. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях: на V Международном молодежном форуме «Интеллектуальные энергосистемы»

(г. Томск, 2017 г.), Седьмой Российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ–7) (г. Москва, 2018 г.), XXII Международном симпозиуме имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных «Проблемы геологии и освоения недр» (г. Томск, 2018 г.), Всероссийской научной конференции с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий» (г. Томск, 2017 г., 2019 г., 2020 г.), XXII Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (г. Москва, 2019 г.), Всероссийской научной конференции с международным участием «XI Семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике» Scientific Conference «Thermophysics and Power Engineering in Academic Centers», ТРЕАС–2019 (г. Санкт-Петербург, 2019 г.), Международной молодёжной научной конференции «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования» (г. Томск, 2017 г., 2018 г., 2019 г.), Всероссийской конференции с элементами научной школы для молодых учёных «XXXIV–XXXVI Сибирский теплофизический семинар» (г. Новосибирск, 2018 г., 2019 г., 2020 г.), III Международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетике» (г. Москва, 2020 г.), 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») (г. Москва, 2021 г.), VI Всероссийской научной конференции с элементами школы молодых учёных «Теплофизика и физическая гидродинамика» (г. Севастополь, Республика Крым, 2021 г.), XVI Минском международном форуме по тепломассообмену (г. Минск, Беларусь, 2022 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 18 печатных работ, в том числе 4 – в высокорейтинговых 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=6,870, 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 13 публикаций в сборниках материалов международных и всероссийских научных конференций.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Диссертация изложена на 137 страницах машинописного текста, содержит 40 рисунков, 8 таблиц и 3 приложения. Библиография включает 206 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы и определена основная проблема. Сформулированы цель диссертационной работы и задачи для её достижения. Показана практическая и теоретическая значимости, а также научная новизна проведенных исследований и личный вклад автора. Обоснована достоверность полученных результатов, приведены положения, выносимые на защиту и сведения об их апробации.

Первая глава содержит анализ современного состояния теории и практики исследований процессов тепло- и массопереноса при сушке влажных пористых материалов в условиях интенсивного нагрева. Приведены экономические и экологические предпосылки, а также проблемы и перспективы использования древесной биомассы в энергетике. Показано, что на сегодняшний день недостаточно изучены процессы тепло- и массопереноса, протекающие при сушке лесных горючих материалов и отходов деревообработки.

Во второй главе приведено описание методик проведения экспериментальных исследований процессов тепло- и массопереноса в древесной биомассе при термической подготовке к сжиганию (сушке). Представлены схемы разработанных экспериментальных стендов, методика измерения температур в массивном слое влажной биомассы, методики расчета массовых скоростей влагоудаления при сушке лесных горючих материалов и отходов деревообработки. Также во второй главе представлен пример расчета погрешностей результатов экспериментальных исследований.

Экспериментальные исследования выполнены для различных видов древесной биомассы, представленной на рисунке 1: листья, хвоя, ветки деревьев, древесные опилки и щепы. С целью обеспечения необходимой (по условиям экспериментов) начальной влажности навески биомассы перед началом каждой серии

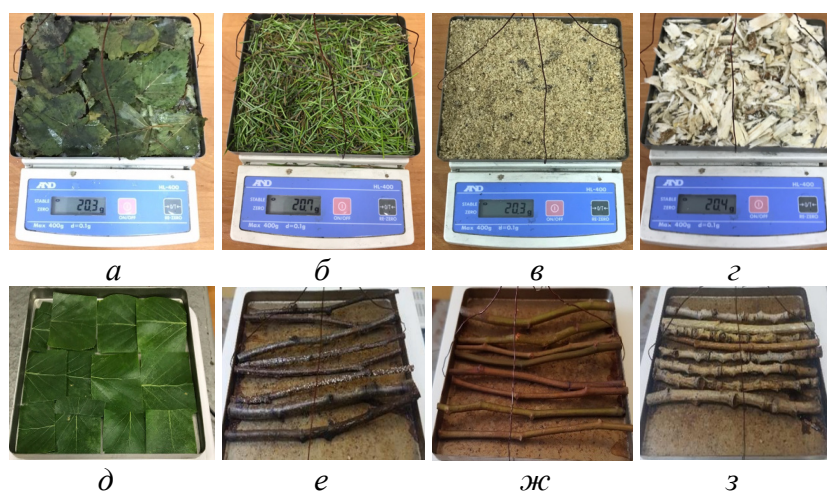


Рисунок 1 – Навески древесной биомассы: *а* – листья берёзы; *б* – хвоя ели; *в* – сосновые опилки; *г* – щепы; *д* – листья тополя; *е* – ветки берёзы; *ж* – ветки липы; *з* – ветки тополя

экспериментов проводилась процедура её обезвоживания. Сперва древесная биомасса выдерживалась в сушильном шкафу (при температуре внутрикамерного воздуха $T_g=323$ К) до полного удаления влаги из материала ($\varphi \leq 2$ %). Затем уже сухая биомасса опрыскивалась с пульверизатора (либо вымачивалась в дистиллированной воде) для достижения типичной (для каждого вида биомассы) влажности. В случае если влажность древесной биомассы превышала контрольные значения ($\varphi \geq \varphi_{kon}$), то её вновь высушивали и всю процедуру наведения влажности проводили повторно. Значения влажности древесной биомассы вычислялись по формуле:

$$\varphi = \frac{m_{bio}^0 - m_d}{m_{bio}^0} \cdot 100 \%,$$

где m_{bio}^0 – масса влажной навески биомассы в начальный момент времени ($\tau=0$), кг; m_d – масса сухой навески биомассы, кг.

Площадь влагоудаления для навесок листьев, хвои, древесных опилок, щепы и стружки принималась равной площади открытой поверхности ёмкости. Для навесок веточек деревьев площадь влагоудаления рассчитывалась по формуле:

$$F_{eva} = \sum_{i=n}^m S_i,$$

где S_i – площадь каждой веточки, м².

Массовая скорость влагоудаления (W_{eva} , кг·м⁻²·с⁻¹) вычислялась по формуле:

$$W_{eva} = \frac{1}{F_{eva}} \cdot \frac{dm}{d\tau} = \frac{|m_{i+1} - m_i|}{F_{eva} \cdot \Delta\tau},$$

где m_i – масса навески в i -й момент времени, кг; $\Delta\tau$ – период времени между измерениями массы навески, с.

В ходе диссертационной работы проведено 5 групп экспериментов: первая группа – исследование динамики температурного поля в массивном слое (принято, что массивным слоем называется тот, толщина которого во много раз превышает характерные размеры отдельного фрагмента биомассы: для листьев, опилок, щепы и древесной стружки характерным размером является толщина, для хвои и веточек – диаметр) влажной древесной биомассы (сосновая стружка) при радиационно-конвективном нагреве; во 2-й, 3-ей и 4-й группах экспериментов изучалось влияние вида биомассы (листья, хвоя, ветки деревьев, опилки, щепка – представленные на рисунках 1а–з) и температуры внешней среды на скорость влагоудаления и время сушки; в 5-й группе проведены оценки влияния степени уплотнения древесной биомассы (сосновые опилки) на характеристики и условия протекания процессов тепло- и массопереноса в слое влажного биоматериала при его нагреве в сушильной камере. Типичный характерный размер отходов деревообработки и лесных горючих материалов: длина листьев берёзы 40–45 мм, толщина 1–1,5 мм; длина хвои ели 15–20 мм, толщина

1–1,5 мм; длина опилок 1–2 мм; толщина древесной стружки 0,2–0,5 мм, ширина 4–8 мм. Сосновая щепа представляла собой пластины длиной 20–45 мм, шириной 8 мм, толщиной 3–5 мм. Длина веток составляла 145 мм, диаметр веточек 6 ± 1 мм.

При исследовании процессов тепло- и массопереноса, протекающих при сушке тонкого слоя древесной биомассы (принято, что тонким слоем называется тот, толщина которого сопоставима с характерным размером фрагмента биомассы), использовались навески из свеже-срезанных листьев и веточек различных пород лиственных деревьев. Из листьев вырезались пластины прямоугольной формы (рисунок 1д), которыми заполнялся металлический поддон (размерами $145 \times 125 \times 10$ мм, площадь открытой поверхности $F_{\text{сва}} = 0,018 \text{ м}^2$). Веточки лиственных пород деревьев (рисунок 1е–з) на первом этапе подвергались процедуре выборки по критерию идентичности характерных линейных размеров (диаметр, длина). Длина веток, как правило, составляла $l \approx 145$ мм, диаметр веточек $d = 6 \pm 1$ мм. Число веток в навеске для каждой серии экспериментов составляло восемь штук.

Первая группа исследований проводилась на экспериментальном стенде, схема которого представлена на рисунке 2. В качестве объекта экспериментальных исследований рассматривалась навеска влажной древесной биомассы (кубическая ёмкость с открытой верхней гранью и характерным размером 100 мм, заполненная влажной сосновой стружкой) массой $m_{\text{био}} = 300 \pm 1$ грамм. На оси симметрии в центральной части кубической ёмкости на равноудалённом расстоянии друг от друга (20 мм) по высоте устанавливался комплекс из шести термоэлектрических преобразователей (рисунок 3). Навеска влажной биомассы помещалась в заранее нагретую до за-

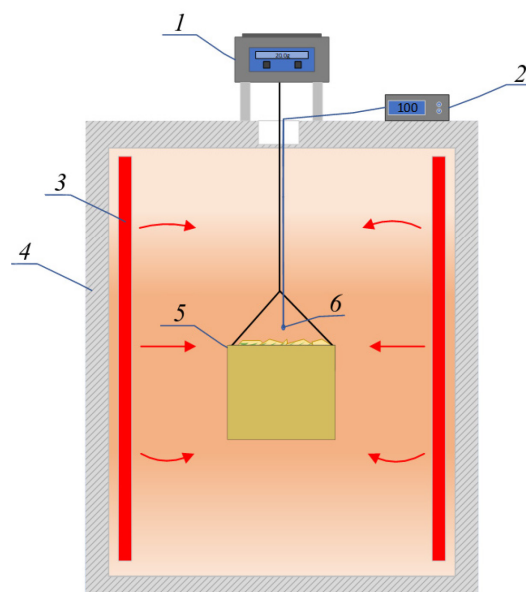


Рисунок 2 – Схема экспериментального стенда: 1 – лабораторные весы Асзет СУ-1003; 2 – терморегулятор ТРМ 500; 3 – электрический нагреватель; 4 – сушильная камера SU 32; 5 – навеска древесной биомассы; 6 – комплекс термоэлектрических преобразователей (хромель-алюмелевые термопары)

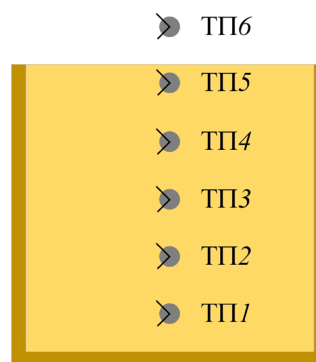


Рисунок 3 – Схема расположения термопар (ТП): ТП1–5 в слое биомассы, ТП6 над поверхностью навески биомассы

данных (по условиям эксперимента) температур полость внутрикамерного пространства (размерами 500×500×600 мм) сушильной установки. Температура сушильного агента (воздуха) с помощью терморегулятора варьировалась в диапазоне от 333 до 393 К. Регистрация температуры в слое материала и массы навески биомассы проводилась непрерывно в течение всего эксперимента. Каждый опыт продолжался до тех пор, пока значение массы навески (m_{bio}) не переставало изменяться. Период времени от начала теплового воздействия до момента наступления режима, при котором выполнялось условие $\frac{dm_{\text{bio}}}{dt} = 0$, считался временем дегидратации (τ_d). Каждая серия экспериментов состояла из пяти опытов, проведенных при идентичных условиях нагрева (по температуре внешней среды).

Остальные группы (со второй по пятую) экспериментальных исследований проводились на аналогичной (описанной выше) установке, отличающейся только используемой ёмкостью. Навеска влажной древесной биомассы (рисунок 1а–з) массой 20 ± 1 грамм укладывалась в металлический поддон (размерами 145×125×10 мм, площадь открытой поверхности $F_{\text{eva}}=0,018 \text{ м}^2$) для проведения процедуры дегидратации в сушильной камере.

В третьей главе представлены результаты проведенных экспериментальных исследований процессов тепло- и массопереноса, протекающих при сушке древесной биомассы. Установлены времена дегидратации типичных лесных горючих материалов (листовой, хвойный опад, веточки деревьев) и отходов деревообработки (опилки, щепа, стружка), а также рассчитаны массовые скорости влагоудаления. Показано, что интенсивность влагоудаления из древесной биомассы обуславливается не только температурой внешней среды, но и фильтрационными свойствами слоя биомассы (плотность засыпки, пористость, проницаемость).

Впервые по результатам экспериментальных исследований полей температуры установлен механизм тепло- и массопереноса в массивном слое влажной древесной биомассы в период её дегидратации, отличающийся от известных не только описанием процесса непосредственного испарения воды, но и фильтрацией водяных паров как к поверхности нагрева, так и вглубь слоя, а также повторяющимися циклами процессов испарения/конденсации.

На рисунке 4 приведены результаты экспериментальных исследований температурных полей в массивном слое (толщиной $h=100 \pm 1$ мм) влажной сосновой стружки в период её нагрева в сушильной камере при варьировании температуры внешней среды в диапазоне $T_g=333\text{--}393$ К. Представлены зависимости безразмерных температур в слое биомассы ($\theta=T/T_g$, где T – температура в точках размещения термопар (ТП)

ТП1–6, схема расположения термопар в навеске биомассы представлена на рисунке 3; T_g – температура внешней среды) и безразмерной массы внутрипоровой влаги ($M_w = (m_{\text{bio}} - m_d) / m_{\text{bio}}$, где m_{bio} – масса влажной навески; m_d – масса сухой навески биомассы) от безразмерного времени сушки ($\xi = \tau / \tau_d$, где τ – время; τ_d – полное время сушки), где No.1–6 – безразмерные температуры (θ), No.7 – безразмерная масса влаги (M_w).

Анализ зависимостей на рисунках 4а–г показывает, что в период нагрева влажной древесной стружки в её слое формируется немонотонно изменяемое сложноструктурированное температурное поле. В начальный период нагрева температура во всех точках размещения термопар быстро возрастает, а затем начинает уменьшаться. После этого температура слоя биомассы растет до значений, сопоставимых с температурой внешней среды. Эта тенденция характерна для всего исследованного диапазона температур внешней среды ($T_g = 333\text{--}393\text{ K}$). Такую динамику изменения температур можно объяснить следующим: с ростом температуры повышается скорость испарения влаги в слое биомассы. Этот фазовый переход сопровождается интенсивным поглощением теплоты в малой по размерам зоне, соответствующей окрестности границы раздела «влажная биомасса – сухая биомасса» (рисунок 5). Так как пористость навески биомассы велика (составляет около 55 %), водяной пар быстро заполняет поры (другими словами, пустоты между древесной стружкой). Давление паров воды в малой окрестности зоны интенсивного испарения растет. Но так как температура смеси «биомасса–воздух–пары воды» в слое, прилегающем к открытой

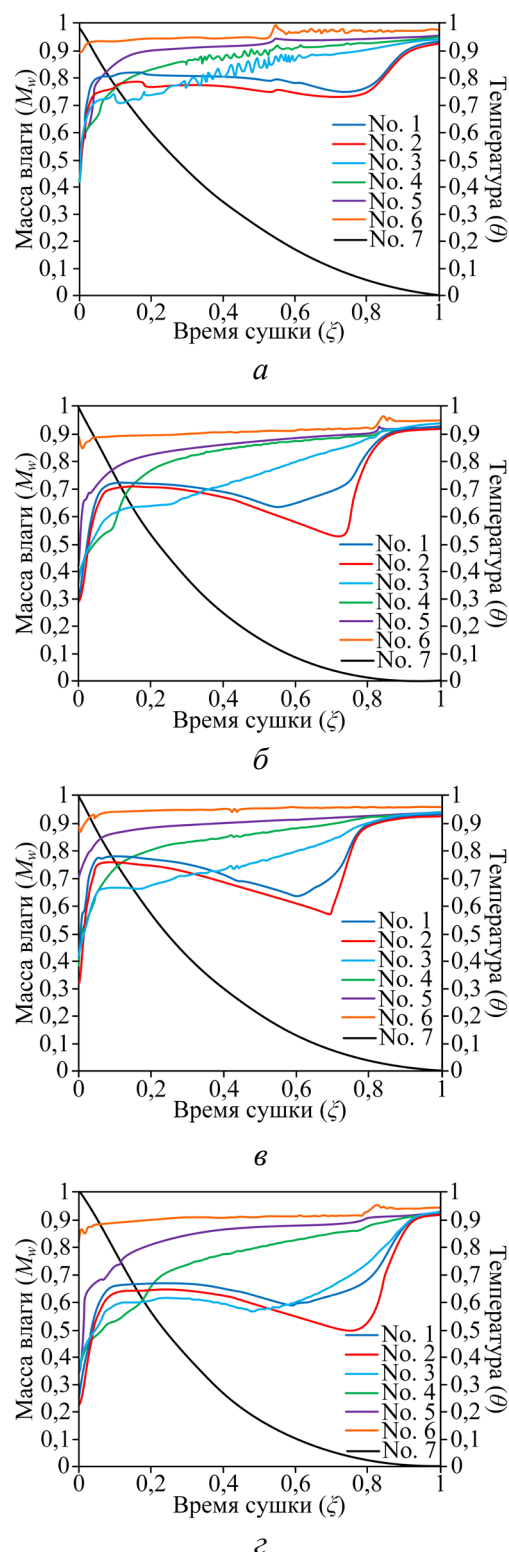


Рисунок 4 – Зависимости безразмерных температур (θ) в слое биомассы и безразмерной массы влаги (M_w) от безразмерного времени сушки (ξ) при температуре в сушильной камере (T_g): а – 333 К; б – 353 К; в – 373 К; г – 393 К

поверхности навески выше, чем в её нижней области (нагреваемой менее интенсивно), то часть водяных паров фильтруется в относительно холодную область навески. При охлаждении водяных паров происходит их конденсация на поверхностях элементов древесной стружки. В результате концентрация

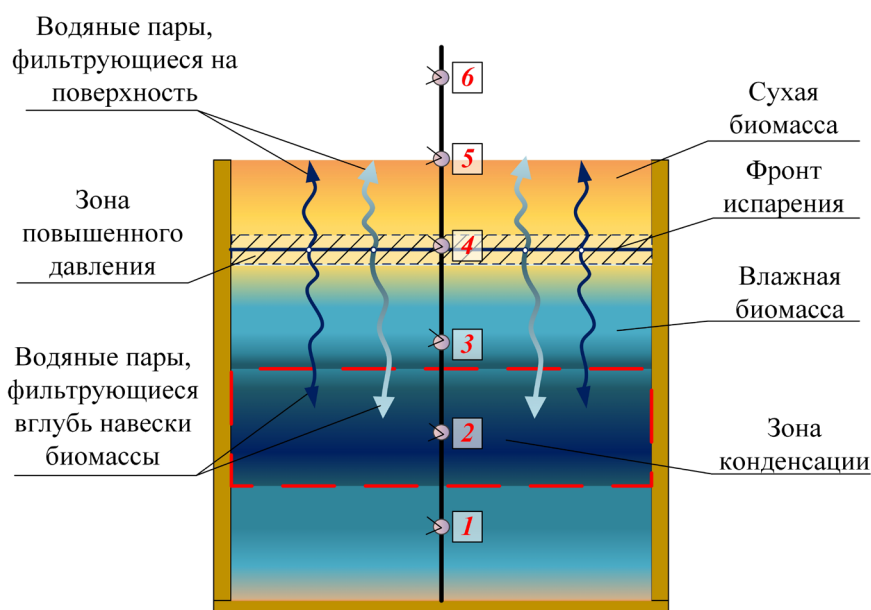


Рисунок 5 – Физическая модель процессов тепло- и массопереноса, протекающих в массивном слое влажной древесной биомассы при радиационно-конвективном нагреве

воды и температура в нижней (более холодной) части навески повышаются. Соответственно, после прогрева этой части навески растёт приток паров воды с единицы поверхности и интенсифицируется охлаждение биомассы. Этот эффект и регистрируют термодатчики №1 и №2 (рисунок 4). Установленный механизм влагоудаления характерен для всего исследованного диапазона температур внешней среды.

На рисунках *ба-г* приведены зависимости массовых скоростей влагоудаления от времени сушки при температурах внешней среды $T_g=333-393$ К для ЛГМ на основе веток деревьев. Можно отметить существенные отличия зависимостей $W_{eva}(\tau)$ в двух температурных диапазонах: до 373 и выше 373 К. При $T_g=333-353$ К зависимости массовых скоростей

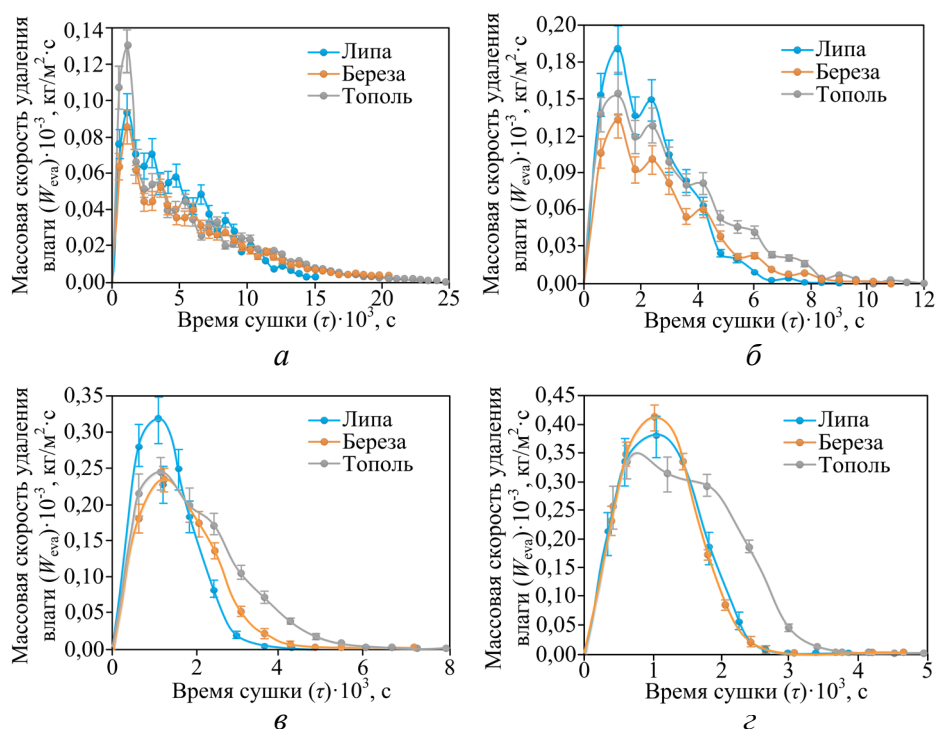


Рисунок 6 – Зависимости массовых скоростей влагоудаления (W_{eva}) от времени сушки (τ) для трёх исследованных видов лесных горючих материалов при температуре в сушильной камере (T_g):

a – 333 К; *б* – 353 К; *в* – 373 К; *г* – 393 К

влагоудаления от времени немонотонны в течение всего периода дегидратации для всех исследованных видов биомассы. В то же время в диапазоне температур внешней среды $T_g=373\text{--}393\text{ К}$, такого немонотонного изменения значений скоростей влагоудаления не зарегистрировано (другими словами, $W_{\text{eva}}(\tau)$ изменяются монотонно).

Полученные в экспериментах зависимости $W_{\text{eva}}(\tau)$ (рисунок 6) можно объяснить следующим: в условиях относительно низких температур внешней среды ($T_g=333\text{--}353\text{ К}$) при нагреве влажной древесной биомассы в её структуре совместно протекает комплекс процессов тепло- и массопереноса: испарение воды, фильтрация водяных паров и их диффузия во внешнюю газовую среду. Фронт испарения движется от поверхности нагрева вглубь слоя древесной биомассы. При фильтрации водяных паров через пористую структуру древесного материала давление в его внутрипоровом пространстве повышается (за счет сопротивления каркаса биомассы). Последнее приводит к повышению концентрации водяных паров у границы фронта фазового перехода. В результате давление (и, соответственно, концентрация) водяного пара, находящегося непосредственно вблизи поверхности испарения, растет. Вследствие этого скорость влагоудаления уменьшается. При снижении скорости (W_{eva}) существенно уменьшается значение плотности теплового стока ($N_{\text{eva}}=Q_{\text{eva}}\cdot W_{\text{eva}}$, где Q_{eva} – удельная теплота испарения $Q_{\text{eva}}=2,3\cdot 10^6\text{ Дж/кг}$) и интенсифицируется нагрев биоматериала. Слой биомассы прогревается, следовательно, увеличивается скорость влагоудаления. В результате совместного протекания фильтрационных и тепловых процессов происходит периодическое изменение значений массовой скорости влагоудаления. При $T_g\geq 373\text{ К}$ водяной пар находится в состоянии насыщения. В результате испарение воды протекает в квазистационарном режиме. По этой причине зависимости $W_{\text{eva}}(\tau)$ монотонны.

На рисунке 7 приведены зависимости массовых скоростей влагоудаления (W_{eva}) от времени сушки (τ) при различных температурах внешней среды (T_g) для четырёх видов древесной биомассы. Анализ зависимостей показывает, что при высокотемпературном нагреве ($T_g\geq 373\text{ К}$) максимальные скорости влагоудаления (W_{max}) четырёх исследованных видов древесной биомассы отличаются незначительно (не более 30 %). При этом в условиях относительно низких температур внешней среды ($T_g<373\text{ К}$) значения W_{max} отличаются в 4 раза. Скорее всего, интенсивность влагоудаления в этих условиях определяется диффузией водяных паров сквозь пористую структуру древесной биомассы.

Также проведена оценка влияния плотности засыпки влажной древесной биомассы на характеристики и условия её сушки. В качестве объекта экспериментальных исследований использовались типичные отходы деревообработки (древесные опилки, рисунок 1в).

Эксперименты проводились при разной степени уплотнения (γ) навески биомассы ($\gamma = \rho / \rho_0$, где ρ – плотность спрессованной биомассы; ρ_0 – насыпная (естественная) плотность биомассы).

На рисунке 8 приведены зависимости безразмерных массовых скоростей влагоудаления ($\mathcal{L} = W_{\text{eva}} / W_0$, где W_{eva} – скорость влагоудаления, зарегистрированная в экспериментах; W_0 – скорость испарения воды со свободной поверхности при температуре поверхности фронта испарения $T_{\text{eva}} = T_g$) от безразмерного времени сушки ($\xi = \tau / \tau_d$) при различных

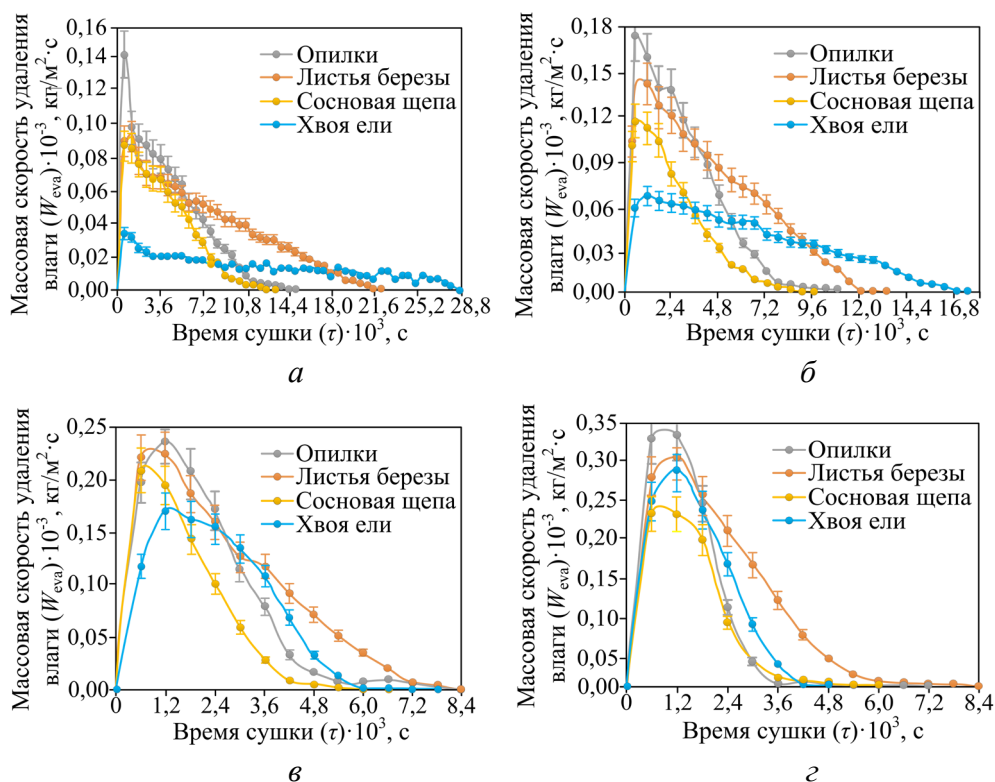


Рисунок 7 – Зависимости массовых скоростей влагоудаления (W_{eva}) от времени сушки (τ) для четырёх видов исследовавшейся древесной биомассы при температуре окружающей среды (T_g):
 а – 333 К; б – 353 К; в – 373 К; з – 393 К

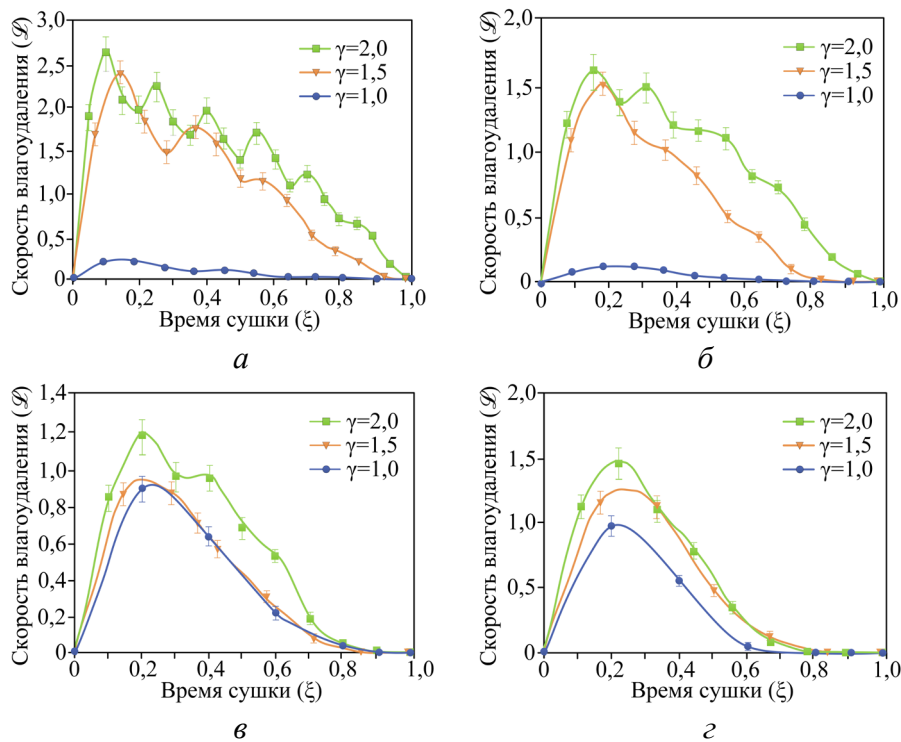


Рисунок 8 – Зависимости безразмерной скорости влагоудаления (\mathcal{L}) от безразмерного времени сушки (ξ) при температуре в сушильной камере (T_g): а – 333 К; б – 353 К; в – 373 К; з – 393 К

степенях уплотнения (γ) древесной биомассы в диапазоне изменения температур внешней среды от 333 до 393 К.

Анализ зависимостей $\mathcal{A}(\xi)$ на рисунке 8 показывает, что степень уплотнения биомассы оказывает существенное влияние на скорость влагоудаления. Увеличение плотности засыпки приводит к значительному росту скорости удаления влаги в идентичных (по температуре внутрикамерного пространства) условиях нагрева. Это, скорее всего, обусловлено тем, что увеличение степени уплотнения (γ) навески биомассы приводит к уменьшению пористости структуры её слоя. В результате теплопроводность биоматериала увеличивается. Последнее приводит к тому, что слой биомассы быстрее прогревается и, соответственно, процесс испарения влаги интенсифицируется.

Четвертая глава посвящена оценке энергетических затрат на процесс влагоудаления из древесной биомассы. С целью проведения энергетического анализа эффективности процесса сушки введен в рассмотрение безразмерный параметр энергоэффективности ($\theta = Q_n^r / Q_\Sigma$), представляющий собой отношение низшей теплоты сгорания (Q_n^r) древесной биомассы к суммарной теплоте (Q_Σ), затраченной на сушку биомассы. Полная теплота процесса сушки рассчитывалась из выражения:

$$Q_\Sigma = Q_d + Q_1 + Q_2,$$

где Q_d – удельная теплота, затраченная на испарение воды (фазовые превращения), Дж/кг; Q_1 – теплота, затраченная на непосредственный нагрев древесной биомассы, Дж/кг; Q_2 – теплота, затраченная на нагрев внутрипоровой воды, Дж/кг.

На рисунке 9 приведены зависимости значений θ от безразмерной температуры внешней среды ($J = T_g / 1000$), где: *a*, *б* – тонкий слой биомассы (навески исследовавшихся видов биоматериала представлены на рисунке 1*д–з*); *в* – массивный слой биомассы (рисунок 1*а–г*). Анализ зависимостей $\theta(J)$ на рисунке 9*а* показывает, что увеличение температуры внешней среды приводит к снижению относительных затрат энергии на удаление влаги из

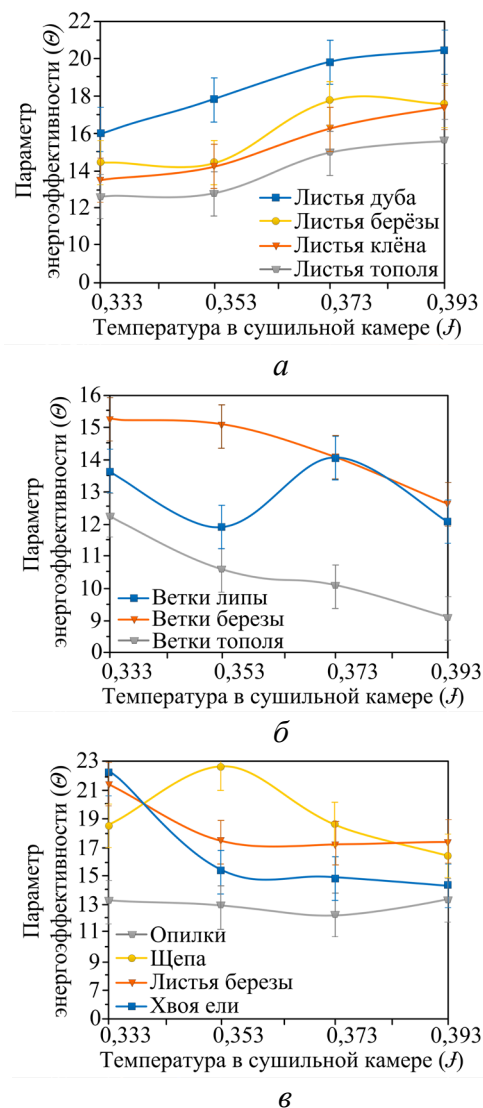


Рисунок 9 – Зависимости безразмерного параметра энергоэффективности сушки (θ) от безразмерной температуры (J)

ЛГМ на основе листьев деревьев. Стоит отметить, что высокотемпературная ($T_g > 373$ К) сушка лесного горючего материала на основе листьев более энергоэффективна, чем низкотемпературная ($T_g < 373$ К). Сушку лесных горючих материалов на основе веток деревьев (рисунок 9б), листьев и хвои (рисунок 9в), а также отходов деревообработки на основе щепы (рисунок 9в) эффективнее всего проводить в условиях относительно низких температур внешней среды ($T_g \approx 333\text{--}353$ К), так как увеличение температуры приводит к существенному уменьшению параметра энергоэффективности сушки. Для навески сосновых опилок увеличение температуры внутрикамерного пространства не приводит к существенным изменениям значений параметра θ .

В заключении сформулированы основные результаты и выводы:

1. По результатам экспериментальных исследований установлен ранее незарегистрированный механизм тепло- и массопереноса при сушке массивного слоя влажной древесной биомассы в период её интенсивного нагрева. Показано, что приповерхностная область (зона нагрева) слоя биомассы быстро прогревается, что инициирует процесс испарения воды. При этом формирующиеся водяные пары фильтруются не только к поверхности нагрева, но и в глубинные относительно холодные слои древесной биомассы, где конденсируются. Последнее приводит к росту температуры и влажности в этих зонах. Последующий нагрев слоя древесной биомассы приводит к интенсификации процесса испарения воды в глубинных слоях биоматериала и, как следствие, охлаждению последних. После полного влагоудаления температура слоя биомассы повышается до значений сопоставимых с температурой внешней среды.

2. Установлено два температурных режима процесса сушки древесной биомассы (высокотемпературный $T_g \geq 373$ К и низкотемпературный $T_g < 373$ К с условной границей раздела по температуре внешней среды $T_g = 373$ К), в которых вид биомассы оказывает кардинально отличающееся влияние на характеристики (скорость влагоудаления, время сушки) и условия протекания процесса дегидратации. В условиях высокотемпературного нагрева ($T_g = 373\text{--}393$ К) отклонения значений максимальных скоростей влагоудаления не превышают 30 %, при низкотемпературном ($T_g = 333\text{--}353$ К) тепловом воздействии значения максимальных скоростей влагоудаления исследованных видов древесной биомассы отличаются в четыре раза.

3. При сушке влажной древесной биомассы на основе веточек деревьев в условиях относительно низких температур нагрева ($T_g < 373$ К) зависимости значений массовых скоростей влагоудаления (W_{eva}) от времени (τ) немонотонны в течение всего периода дегидратации для всех исследованных видов биомассы.

4. Увеличение степени уплотнения навески влажной древесной биомассы оказывает существенное влияние на характеристики (скорость влагоудаления, время сушки) процесса дегидратации в исследуемом диапазоне температур внешней среды ($T_g=333\text{--}393\text{ К}$). Так, увеличение плотности засыпки в 2 раза приводит к значительному (почти в 10 раз) росту скорости удаления влаги в идентичных условиях нагрева. Установлено, что уплотненный слой ($\gamma=2$), при условии идентичности масс навесок, сушится в 1,5 раза быстрее, чем слой с естественной ($\gamma=1$) насыпкой.

5. Показано, что фильтрационные характеристики (плотность засыпки, проницаемость, пористость, размер пор) слоя древесной биомассы наряду с условиями нагрева (температура внешней среды, интенсивность теплообмена) являются значимыми элементами факторного пространства, существенно влияющими на процесс влагоудаления.

6. По результатам анализа энергоэффективности процесса сушки древесной биомассы показана перспективность использования в качестве топлива паровых и водогрейных котельных агрегатов промышленных предприятий и ТЭС типичных отходов лесопиления и деревообработки, а также лесных горючих материалов.

7. Установлено, что сушку веточек деревьев, массивного слоя листового и хвойного опада, а также отходов деревообработки (на основе щепы) эффективнее всего проводить в условиях относительно низких температур внешней среды ($T_g=333\text{--}353\text{ К}$).

8. По результатам проведенных экспериментов установлено, что в условиях относительно высокотемпературного нагрева (при температуре внешней среды $T_g=373\text{--}393\text{ К}$) вид древесной биомассы не оказывает существенного влияния на динамику влагоудаления. Соответственно, можно обосновано предположить, что предварительную термическую подготовку (сушку) разнотипного биотоплива (типичные отходы лесопиления и деревообработки; разного рода лесной горючий материал: листовой и хвойный опад, ветки и сучья деревьев) на тепловых электрических станциях допустимо проводить одновременно в единой сушильной камере. Последнее существенно снизит капитальные затраты на строительство ТЭС.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Syrodoy S.V. Characteristics and conditions for ignition of bio-coal mixtures based on coal and forest combustible material / S.V. Syrodoy, G.V. Kuznetsov, N.Yu. Gutareva, Zh. A. Kostoreva, A.A. Kostoreva, N.A. Nigay // Journal of the Energy Institute. – 2020. – Vol. 93. – P. 1978 – 1992.

2. Abbasi T. Biomass energy and the environmental impacts associated with its production and utilization/ T. Abbasi, S.A. Abbasi // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2010. – Vol. 14. – P. 919 – 937.

3. Syrodoy S.V. Mathematical modeling of the thermochemical processes of sequestration of SO_x when burning the particles of the coal and wood mixture / S.V. Syrodoy, G.V. Kuznetsov, N.Yu. Gutareva, N.A. Nigay // *Renewable Energy*. – 2022. – Vol. 185. – P. 1392–1409.

4. Morris J. Scenarios for the deployment of carbon capture and storage in the power sector in a portfolio of mitigation options / J. Morris, H. Kheshgi, S. Paltsev, H. Herzog // *Climate Change Economics*. – 2021. – Vol. 12. – №.1 – P. 2150001.

5. Рихтер Л.А. Газовоздушные тракты тепловых электростанций. – Москва: Энергия. – 1969. – 272 с.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ С РЕЗУЛЬТАТАМИ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Статьи в международных научных журналах, индексируемых базами данных Scopus и Web of Science:

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

2. **Nigay N.A.** A comparative analysis of the characteristics of the water removal processes in preparation for incineration of typical wood waste and forest combustible materials / G.V. Kuznetsov, N.A. Nigay, S.V. Syrodoy, N.Y. Gutareva, D.Yu. Malyshev // **Energy**. – 2022. – Vol. 239. – P. 122362.

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

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

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