

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



**Нига́й Наталья Андреевна**

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

**1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника**

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:  
кандидат технических наук  
Сыродой Семён Владимирович

Томск – 2022

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ .....	4
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА, ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ СУШКЕ ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ.....	20
1.1 Экономические и экологические предпосылки к использованию древесной биомассы в энергетике .....	20
1.2 Проблемы и перспективы использования древесной биомассы в энергетике.....	23
1.3 Примеры объектов энергетики, работающих на древесной биомассе .....	29
1.4 Обзор результатов экспериментальных и теоретических исследований процессов сушки древесной биомассы.....	35
1.4.1. Сушка лесных горючих материалов и отходов деревообработки .....	35
1.4.2. Экспериментальные и теоретические исследования температурных полей при нагреве влагонасыщенных пористых материалов .....	40
Основные результаты и выводы по первой главе .....	44
ГЛАВА 2. МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА, ПРОТЕКАЮЩИХ В ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЕ ПРИ ЕЁ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКЕ К СЖИГАНИЮ.....	45
2.1 Методика подготовки древесной биомассы к проведению экспериментов.....	45
2.2 Методика проведения экспериментальных исследований процессов тепло- и массопереноса, протекающих при сушке древесной биомассы.....	48
2.3 Методики определения массовой скорости влагоудаления.....	52
2.3.1 Методика определения массовой скорости влагоудаления при сушке лесных горючих материалов на основе листьев деревьев и хвои ели, а также отходов деревообработки.....	52
2.3.2 Методика определения массовой скорости влагоудаления при сушке лесных горючих материалов на основе веточек деревьев.....	53
2.4 Методика подготовки древесной биомассы при проведении анализа влияния плотности засыпки на характеристики и условия процесса влагоудаления .....	55
2.5 Методика расчета погрешностей измерений.....	56
Основные результаты и выводы по второй главе .....	58

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА В ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЕ ПРИ ЕЁ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКЕ К СЖИГАНИЮ.....	59
3.1 Поля температур в массивном слое древесной биомассы при радиационно-конвективном нагреве .....	59
3.1.1 Анализ влияния условий теплообмена и выхода паров воды на характеристики процесса влагоудаления в массивном слое древесной биомассы.....	64
3.1.2 Параметрический анализ процесса сушки массивного слоя древесной стружки .....	66
3.2 Анализ влияния вида древесной биомассы на характеристики и условия процесса дегидратации.....	72
3.2.1 Сушка тонкого слоя древесной биомассы на основе листьев деревьев .....	73
3.2.2 Сушка массивного слоя древесной биомассы на основе листового и хвойного опада, а также древесных опилок и щепы .....	75
3.2.3 Сушка лесных горючих материалов на основе веток деревьев .....	78
3.3 Анализ влияния плотности засыпки древесной биомассы на характеристики процесса влагоудаления.....	87
Основные результаты и выводы по третьей главе .....	92
ГЛАВА 4. ОЦЕНКА ЗАТРАТ ЭНЕРГИИ НА ПРОЦЕСС ВЛАГОУДАЛЕНИЯ.....	95
4.1 Энергоэффективность процесса сушки тонкого слоя древесной биомассы .....	96
4.2 Энергоэффективность процесса сушки массивного слоя древесной биомассы.....	98
Выводы по четвертой главе.....	100
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	102
СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	105
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	109
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Акт об использовании результатов диссертационного исследования .....	131
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Список публикаций по теме диссертации .....	132
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Рекомендации по практическому использованию результатов диссертационной работы .....	135

## ВВЕДЕНИЕ

Процессы сушки пористых дисперсных влагонасыщенных материалов изучаются уже более двух столетий (первые научные публикации датируются 1826 годом [1]). Но несмотря на богатую историю исследований процессов влагоудаления из таких 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: опилки, щепа, стружка, кора и др.; лесные горючие материалы (ЛГМ): хвоя, листья, 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 [2]) паровых и водогрейных котлов промышленных предприятий и тепловых электрических станций. При этом рассматриваются три наиболее перспективных варианта использования древесной биомассы: первый – прямое сжигание в топках водогрейных и паровых котлов [3–5]; второй – совместное сжигание биомассы с углём в камерах сгорания котельных агрегатов [6–11]; третий – газификация древесной биомассы с получением синтез-газа [12].

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 [13], чем у сжигающих уголь или продукты переработки нефти. Так как при горении древесной биомассы образуется углекислый газ, который не нарушает общего баланса  $\text{CO}_2$  в геохимическом цикле углерода. Деревья и растения, составляющие основной объем энергетической биомассы, поглощают углекислый газ в процессе фотосинтеза. Другими словами, происходит рециркуляция углерода: сколько  $\text{CO}_2$



поглощено, столько и выделяется при сжигании биомассы. В результате концентрация диоксида углерода в атмосфере остается практически неизменной [14]. Также при сжигании древесной биомассы выделяется значительно меньше оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ), по сравнению с углем и практически не образуется оксидов серы ( $\text{SO}_x$ ) [15]. Соответственно, внедрение биомассы в качестве топлива приведет к существенному снижению негативного антропогенного воздействия объектов теплоэнергетики на окружающую среду. В то же время древесное биотопливо является относительно дешевым энергоносителем доступным практически во всех регионах планеты [16]. Но даже обладающая наибольшей теплотворной способностью древесина (дуба) по энергоэффективности существенно уступает самому низкосортному углю (бурому) [17]. 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 древесноугольных смесей. К вышеприведенному стоит добавить, что использование биомассы на основе лесных горючих материалов (ветки деревьев, лиственный и хвойных опад) в качестве энергетического топлива существенно снижает негативное влияние на окружающую среду [13], обусловленное гниением древесины и природными катаклизмами, связанными с неконтролируемым горением (лесные пожары).

Во-вторых, древесная биомасса является одним из самых перспективных возобновляемых ресурсов на планете [18]. По оценкам многих специалистов (например, [19–21]) биомасса и продукты её переработки (биогаз [22], биоуголь [23], биоэтанол [24]) в будущем (ближайшие 30–40 лет) могут напрямую заменить уголь (или дополнить его за счет создания эколого- и энергоэффективных смесевых топлив) в общем балансе тепло- и электрогенерации [25]. Анализ данных основных торговых площадок показал, что спрос на древесную биомассу растёт во всём мире [26, 27]. При этом площади ( $S_{\text{for}}$ ), занимаемые лесами, постоянно сокращаются. Это существенно затрудняет обеспечение устойчивого производства всех видов древесного биотоплива. Например, в период с 1990 по 2010 год площадь лесов

сократилась на 68 млн. га (на 1,6 %) [28] за счёт вырубки и лесных пожаров. Такое снижение  $S_{\text{for}}$  (поглощающих  $\text{CO}_2$ ) привело к увеличению концентрации парниковых газов в атмосфере (с 355 до 390 ppm) [29]. Одним из возможных решений проблемы уменьшения лесных угодий является внедрение в энергетику топлив на основе отходов сельского хозяйства. Однако, как показывают исследования [30] энергетический потенциал сельскохозяйственной биомассы сильно ограничен. К последнему стоит добавить, что производить сельскохозяйственную продукцию объёмом превышающем её потребление пищевой промышленностью экономически нецелесообразно [31]. В этих условиях одним из наиболее оптимальных вариантов энергетического использования древесной биомассы является сжигание биоматериалов на основе типичных отходов лесопиления (горбыль, пни, ветви, кора), деревообработки (опилки, щепа, стружка, древесная пыль) и отходов жизнедеятельности леса или, другими словами, лесных горючих материалов (листовой и хвойный опад, сухостой, сухая трава, ветки и др.) в топках паровых и водогрейных котлов.

На настоящее время плантации быстрорастущих пород деревьев и кустарников увеличиваются во всем мире [32]. Энергетические леса срезаются через 3–10 лет после высаживания высокомеханизированным методом. Выращиваются быстрорастущие культуры, такие как эвкалипт, тополь, ива и другие. Каждые 4–7 лет деревья срезают и годовой урожай может составлять около 7 т/га [33]. Собранная биомасса используется для производства тепловой и электрической энергии. В ряде стран, таких как Италия, Германия, Аргентина, Польша и других на сегодняшний день широко практикуется создание специальных плантаций быстрорастущих и пригодных для целей энергетики пород древесины на основе тополя и ивы. Ежегодно на таких плантациях заготавливается около 3,7 миллионов тонн древесины [34]. В умеренной климатической зоне для энергетических лесов наиболее пригодны быстрорастущие сорта тополя (волосистоплодного и канадского) и ивы (корзиночной и козьей), а в южной части России – акации и эвкалипта. Период ротации растений составляет 6–7 лет [35].

Одним из перспективных топлив для тепловых электростанций и локальных котельных в настоящее время является лесной горючий материал (ЛГМ). Так, результаты экспериментов [36] показали, что использование ЛГМ в качестве добавки к водоугольному топливу (ВУТ) существенно ускоряет процесс воспламенения капель ВУТ. При этом по результатам экспериментальных исследований [36] установлено, что добавление лесных горючих материалов в водоугольное топливо приводит к снижению уровня выбросов оксида азота ( $\text{NO}_x$ ) в 1,8 раз и оксидов серы ( $\text{SO}_2$ ) в 3 раза (по сравнению со сжиганием однородного угля) и повышению эффективности процесса топливосжигания. Последнее создает предпосылки для существенной диверсификации сырьевой базы объектов теплоэнергетики.

При этом стоит отметить, что обширные лесные угодья Южной Америки и западной Сибири могут производить до 26 т/га [37, 38] лесных горючих материалов в год. В свою очередь сбор и использование ЛГМ позволит существенно улучшить экосистему лесного хозяйства за счёт исключения из неё существенно пожароопасного материала [39]. Последнее является немаловажным фактором. Так как пример крупномасштабных пожаров в штате Калифорния (США) [40] показал, что принятие подзаконных актов в сенате штата без консультации с представителями академической науки (в области экологии леса) привело к существенному материальному ущербу и гибели людей. Законы, фактически запрещающие вырубку старых лесов и их утилизацию, принятые под предлогом улучшения цикла поглощения углекислого газа старыми деревьями привели к формированию обширных угодий сухостоя [41]. В результате благоприятных метеорологических условий, включая долгосрочные тенденции потепления, сухого климата и экстремально прогретых воздушных масс с сильным морским ветром возникли пожары, которые привели к серьезным социально-экономическим разрушениям и значительным человеческим жертвам. Также вследствие пожаров в атмосферу было выброшено огромное количество углекислого газа, оксидов азота и др. [42]. Соответственно, можно обосновано предположить, что введение в общий баланс тепло- и электрогенерации лесных горючих материалов (в составе

эколого- и энергоэффективных топливных композитов), существенно снизит риск возникновения подобных природных катастроф. При этом стоит отметить, что себестоимость производства топлива на основе лесных горючих материалов и отходов лесопиления обусловлена только затратами на их сбор и транспортировку [43]. Также внедрение древесной биомассы в качестве топлива на промышленных предприятиях и тепловых электрических станциях будет способствовать формированию новых низкоквалифицированных (не требующих специального и длительного обучения) рабочих мест. Последнее будет способствовать экономическому развитию любого богатого лесными угодьями региона.

Однако широкомасштабное использование древесной биомассы в энергетике (как основного топлива, так и в составе древесноугольного композита) тормозится за счет того, что любая древесина в исходном состоянии является существенно влагонасыщенным материалом (влажность может достигать 70 %) [44]. Сжигание влажной биомассы в топочных устройствах котельных агрегатов 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) [45]. Также можно сказать, что увеличение влажности исходного топлива приводит к интенсификации осаждения золы на поверхностях теплообмена и в трактах внутренних, и внешних газоходов котельного агрегата [46]. Соответственно, неизбежным этапом, предшествующим сжиганию биомассы, является проведение процедуры предварительной термической подготовки, а именно сушки. В этих условиях разработка энергетически эффективных методов и высокоэффективных установок по удалению влаги из древесной биомассы 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. 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), во влажной древесной биомассе при её термической подготовке (сушке) к сжиганию является актуальной задачей.

Степень разработанности темы. 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, Г.С. Шубин, О.Р. Дорняк, Р.Р. Сафин, Р. Bengtsson, N. Hofmann, K.Y. Pin и другие. 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 (например, [47–49]) приведены результаты исследований процессов дегидратации биомассы на основе отходов сельскохозяйственных производств (рисовая шелуха, стебли растений, солома и др.), при этом анализ энергетических затрат на процесс сушки в этих статьях не проводился. Также остаются практически неизученными связи массовой скорости влагоудаления ( $W_{eva}$ ) при сушке древесной 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 на 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 [50]) 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 внутриводной 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 известных 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 ( $T_g=333-393$  К).

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 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 ( $333\leq T_g\leq 353$  К).

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 засыпки, 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 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.

Достоверность результатов диссертационных исследований. 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 подготовке 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 находится в сфере критических технологий федерального

уровня, получивших высокий рейтинг по показателям состояния и перспективам развития («Технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе», «Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии», «Технологии новых и возобновляемых источников энергии, включая водородную энергетику»).

Диссертационное исследование процессов тепло- и массопереноса в древесной биомассе при её 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.

Научные 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 влагоудаления составляют около 30 %, при низкотемпературном ( $T_g = 333-353$  К) тепловом воздействии значения максимальных скоростей влагоудаления исследовавшихся 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 ( $T_g < 373$  К) зависимости значений массовых скоростей влагоудаления от времени немонотонны в течение всего периода сушки. При температурах внешней среды  $T_g = 373-393$  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 ( $T_g=333\text{--}393\text{ K}$ ). 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 ( $T_g=333\text{ K}$ ), 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 ( $T_g\geq 393\text{ K}$ ).

Апробация работы. 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 энергетики» (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=6,87, 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 13 публикаций в сборниках материалов международных и всероссийских научных конференций.

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

#### Краткое содержание работы.

Во введении обоснована актуальность темы и определена основная проблема. Сформулированы цель диссертационной работы и задачи для её достижения. Показана практическая значимость и научная новизна проведенных исследований, личный вклад автора. Обоснована достоверность полученных

результатов, приведены положения, выносимые на защиту и сведения об их апробации.

В первой главе содержится анализ современного состояния теории и практики исследований процессов тепло- и массопереноса при сушке влажных пористых материалов в условиях высокотемпературного 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 влажных 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, методики измерения температур в массивном слое влажной биомассы и её подготовки при проведении анализа влияния плотности засыпки на характеристики процесса влагоудаления. Также в диссертационной работе представлены методики расчета массовых скоростей влагоудаления при сушке лесных горючих материалов и отходов деревообработки. Приведены оценки погрешностей результатов экспериментальных исследований.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований процессов тепло- и массопереноса, протекающих при сушке влажной древесной биомассы. Установлены времена дегидратации типичных лесных горючих материалов (листовой и хвойный опад, веточки деревьев) и отходов деревообработки (опилки, щепы, стружка), а также рассчитаны массовые скорости влагоудаления. Приведены результаты исследований динамики температурного поля при сушке массивного слоя биомассы на основе сосновой стружки, а также экспериментальные исследования влияния плотности засыпки влажной древесной биомассы на характеристики и условия её влагоудаления. Показано какое влияние оказывает температура внешней среды и вид биомассы (древесные опилки, щепы, листья, хвоя, ветки деревьев) на скорость влагоудаления и время сушки.

Четвертая глава посвящена оценке энергетических затрат на сушку древесной биомассы. С целью проведения энергетического анализа эффективности процесса влагоудаления введен безразмерный параметр энергоэффективности сушки.

В заключении подведены основные итоги выполненного диссертационного исследования и сформулированы соответствующие выводы.

# ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА, ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ СУШКЕ ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ

## 1.1 Экономические и экологические предпосылки к использованию древесной биомассы в энергетике

Анализ публикаций в мировой научной периодике, посвященный экономическому базису современной энергетической политики [51, 52] показал, что рост основных показателей (в частности, валовой внутренней продукт (ВВП)) национальных экономик зависит от потребления тепловой и электрической энергии промышленными предприятиями и городскими агломерациями. В настоящее время наибольшую долю в общем балансе тепло- и электрогенерации в мире занимает угольное топливо (рисунок 1.1.1) [25, 53]. Его применение обусловлено относительной дешевизной разработки и эксплуатации месторождений (по сравнению с нефтью [54] и газом [55]), а также распространенностью на планете [53]. Но экстенсивный рост потребления угля (главным образом в качестве топлива для теплоэнергетического комплекса), начиная с середины XIX века, привел к насыщению атмосферы планеты продуктами его сгорания ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ), существенно ускоряющими процесс глобального потепления [56].



Рисунок 1.1.1. Производство энергии в мире по видам топлива на 2020 год [25, 53]



В середине 2016 года установлено [57], что земная атмосфера и биосфера прошли «точку» невозврата по возможности переработки диоксида углерода. При этом попытки внедрения в энергетику возобновляемых источников энергии (ветроэлектрогенераторы и фотоэлектрические преобразователи) не привели к ощутимым успехам в замещении угля на экологически «чистые» энергоустановки [58]. По оценкам специалистов [25, 59, 60] на настоящее время одним из наиболее перспективных видов возобновляемых энергоносителей является биомасса (рисунки 1.1.2, 1.1.3). Что создает предпосылки для активного внедрения в производство тепловой и электрической энергии новых экологически «чистых» топлив или топливных композиций на основе биомассы [61–63].

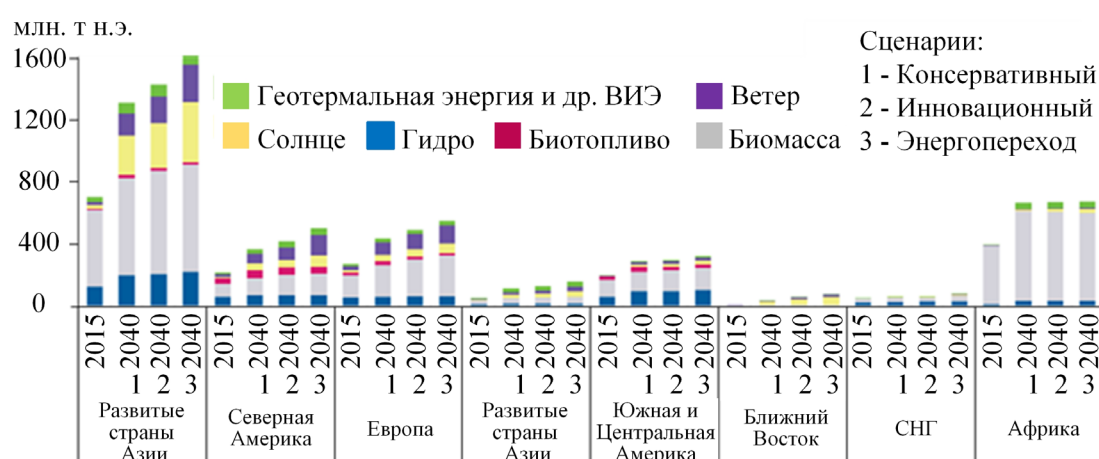


Рисунок 1.1.2. Доминирующие виды возобновляемых источников энергии по регионам мира и показатели прироста их потребления [25]

На рисунке 1.1.3 приведены результаты эконометрического прогностического моделирования потребления энергоресурсов [25]. Можно отметить, что по прогнозам специалистов [25] к 2040 году древесная биомасса должна занимать около 15 % в общем топливно-энергетическом балансе. Возможно поэтому энергетическая политика большинства развитых европейских государств (Германия, Дания, Швеция) направлена на прямое материальное субсидирование активного внедрения биомассы в цикл производства тепловой и электрической энергии [64–67].

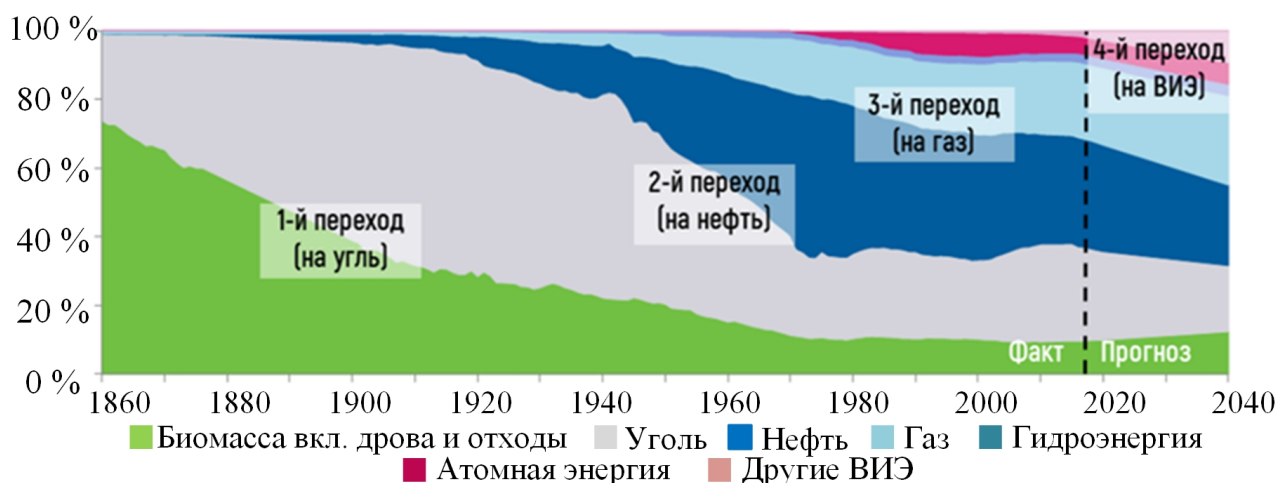


Рисунок 1.1.3. Изменение структуры мирового энергопотребления по видам топлива с 1860 по 2020 гг. [25]

Вторым фактором, существенно стимулирующим внедрение биомассы в производство тепловой и электрической энергии, является значительное снижение экологических штрафов при использовании в качестве топлива древесины или топливных смесей на её основе [68]. Это обусловлено тем, что древесная биомасса не содержит в своей структуре соединений серы. Соответственно, при её сжигании не образуется токсичных оксидов серы ( $SO_x$ ). В исследовании [69] установлено, что при сжигании топливных композиций на основе угля и биомассы или однородной биомассы (без угля) существенно снижаются выбросы оксидов азота ( $NO_x$ ) и диоксида углерода ( $CO_2$ ). При этом эффективность сжигания топлива увеличивается с 95 % до 98 %.

Также древесная биомасса может являться не только важным экономическим, но и политическим фактором, оказывающим значительное влияние на динамику развития любого государства [70]. Внедрение последней в топливно-энергетический комплекс (ТЭК) позволит существенно снизить энергетическую зависимость стран, не обладающих нефтяными и угольными запасами, от государств поставщиков энергоресурсов [71, 72] и, соответственно, укрепить национальную энергетическую безопасность [73, 74]. Внедрение биомассы в теплоэнергетику будет способствовать созданию новых рабочих мест

в регионах с развитыми сельскохозяйственными и деревообрабатывающими производствами [75].

Постоянно возрастающие экологические требования к выбросам антропогенных газов создают предпосылки для проведения политических решений по более активному внедрению биомассы в топливный баланс теплоэнергетики. Приведённый в [76, 77] эконометрический анализ показал, что региональные лесные ресурсы могут достаточно стабильно обеспечивать промышленные предприятия, ТЭС и локальные котельные топливом даже на территории Северной и Восточной Европы. По данным Мирового энергетического совета [78] к 2050 году потребление энергии в мире возрастет более чем в 2 раза. При этом предполагается [79], что более 40 % всей энергии в рамках энергосбережения промышленных предприятий и городских агломераций будет вырабатываться за счет работы возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Доля же биомассы в ВИЭ составит около 32 % [79]. Очевидно, что развитие биоэнергетики в ближайшие 10–15 лет получит приоритетный статус в энергетической политике развитых государств. Обобщая вышеизложенное, можно констатировать, что в условиях, сформировавшихся в мире экономических и политических парадигм будущего мировой энергетики древесная биомасса достаточно органично вписывается в общую концепцию производства тепловой и электрической энергии [80].

## **1.2 Проблемы и перспективы использования древесной биомассы в энергетике**

Древесная биомасса является возобновляемым энергоресурсом, который в отдалённой перспективе может напрямую заменить уголь (или дополнить его за счет создания смесевых топлив) во многих областях энергетики [81]. Однако применение биомассы сопряжено с решением ряда проблем: сбор, транспортировка, хранение и измельчение биотоплива [82]. Также стоит отметить, что древесная биомасса распределена на обширных территориях [83] (например, рисунок 1.2.1) с относительно низкой плотностью [84].

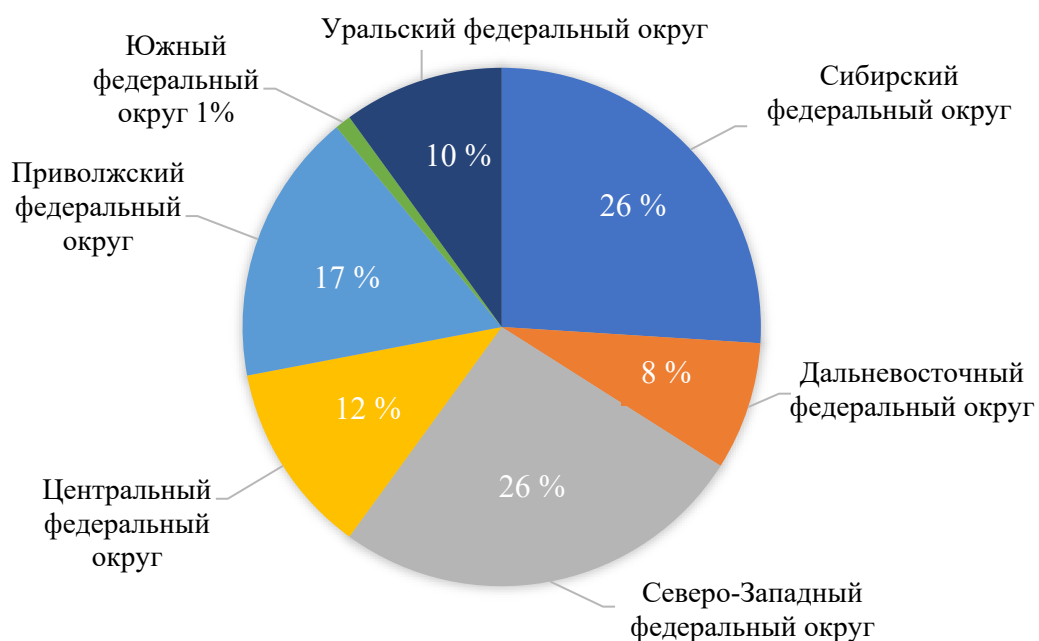


Рисунок 1.2.1. Структура ресурсов древесного топлива по федеральным округам России [83]

В то же время авторы [85, 86] установили, что внедрение в энергетику биомассы значительно уменьшает выбросы  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$  и, соответственно, снижает антропогенную нагрузку объектов теплоэнергетики на атмосферу. При этом снижается цена за единицу произведённой электроэнергии за счет уменьшения экологических штрафов.

Анализ публикаций (за последние 2 года), посвященных биоэнергетике [87–90], показал, что одним из наиболее перспективных видов древесной биомассы в настоящее время являются лесные горючие материалы (или отходы жизнедеятельности леса: хвойный и лиственный опад, ветки, сухостой, мхи, пни, сухая лесная подстилка). Это обусловлено тем, что ЛГМ являются дешевым энергоносителем, стоимость которого обуславливается только расходами на сбор и транспортировку. Также стоит сказать, что обширные лесные угодья Сибири или Южной Америки могут ежегодно обеспечивать до  $6 \cdot 10^6$  тонн лесной биомассы [91]. Применение лесных горючих материалов позволит существенно расширить сырьевую базу промышленных предприятий или обеспечивающих их теплом и электроэнергией тепловых электрических станций, работающих на древесной

биомассе, и существенно снизить зависимость стран импортеров энергоносителей от государств монополистов в области экспорта нефти, газа и угля. Однако стоит сказать, что до сих пор в мировой научной периодике нет примеров с описанием результатов оценки энергетической эффективности использования лесного горючего материала в качестве топлива.

Древесная щепа и опилки являются достаточно распространенными видами энергетической биомассы, использующейся как топливо. Последние образуются на деревообрабатывающих фабриках и при лесозаготовках в больших объемах. При этом такое биотопливо может как напрямую сжигаться [92] в топочных устройствах котельных агрегатов, так и выступать в роли исходного сырья для производства пеллет или брикетов [93], а также в виде одной из компонент смесового топлива на основе угля [94, 95]. Но стоит сказать, что крупномасштабному внедрению биомассы в общий баланс тепло- и электрогенерации препятствует ряд объективных и субъективных причин. К субъективным причинам относится организация логистики доставки биомассы с обширных территорий лесов на промышленные предприятия [96]. Это обусловлено, в первую очередь тем, что лесные горючие материалы распределены на обширных территориях с низкой плотностью. Для обеспечения бесперебойного питания котлов промышленных предприятий и тепловых электрических станций топливом необходимо сформировать систему из связанных между собой (по средству автомобильного, железнодорожного и пневматического транспортов) станций и подстанций с накопителями (например, силосные хранилища) и башнями пересыпки биомассы. Скорее всего, такая система будет существенно разветвленной и с высокой цикломатической сложностью (с числами Бетти в несколько десятков [97]), а также будет обладать всеми свойствами графа не эйлеровского типа.

К объективным можно отнести низкую (относительно угля) теплоту сгорания биомассы. Так, даже у древесины дуба, обладающей наибольшей теплотворной способностью, теплота сгорания ( $Q_n^r$ ) меньше [98], чем у самого низкосортного угля – бурого [99]. Стоит отметить, что любая древесина в исходном состоянии

содержит большое количество влаги [100]. Соответственно, неизбежным этапом, предшествующим сжиганию биомассы, является проведение процедуры её дегидратации (сушки). В этих условиях самой важной характеристикой, определяющей энергетическую ценность древесного биотоплива, является влажность. Она подразделяется на абсолютную ( $\varphi_{abs}$  – величина, характеризующая отношение массы влаги, содержащейся в образце, к массе абсолютно сухой древесины) и относительную (рабочую) влажность ( $\varphi_{rel}$  – величина, характеризующая отношение количества имеющейся влаги к общей массе образца и применима для практических теплотехнических инженерных расчетов). На практике абсолютная влажность обычно больше, чем относительная.

Влажность древесины зависит от породы дерева (таблица 1.2.1) [101], времени года (зимой растения переходят в «спящий режим» и процесс транспирации замедляется, поэтому влажность древесины в летний период много больше, чем в зимний), от строения древесины (рисунок 1.2.2) [102], её пористости и состояния окружающей среды (хранение на открытом воздухе, под навесом или в помещении). Значение влажности древесной биомассы оказывает существенное влияние на обоснование выбора оптимального режима сушки с целью достижения необходимых (по условиям эксплуатации) параметров сухой биомассы.

Таблица 1.2.1. Влажность свежесрубленной древесины [101]

Порода	Влажность, %		
	ядра	заболони	средняя
Берёза	–	70 – 90	78
Дуб	50 – 80	70 – 80	70
Ясень	35 – 40	35 – 40	38
Ель	30 – 40	100 – 120	91
Сосна	30 – 40	100 – 120	88
Пихта	–	–	101
Лиственница	30 – 40	100 – 120	82

Влага внутри ствола делится на капиллярную (свободную), которая содержится в волокнах и адсорбционную (связанную), содержащуюся в клетках растения [103]. Свободная влага – основная часть воды, которая содержится в просвете клетки и удерживается только капиллярными силами. Она не связана химически и удаляется значительно легче, а также оказывает меньшее влияние на механические свойства древесины. Адсорбционная влага – связана с древесиной посредством водородных связей, хранится в оболочке клеток и удерживается физико-химическими связями. Удаление этой влаги сопряжено с дополнительными затратами энергии и существенно отражается на большинстве свойств древесины.



Рисунок 1.2.2. Макроскопическое строение древесины [102]

В зависимости от величины влажности стволую древесину подразделяют на мокрую, свежесрубленную, воздушно-сухую, комнатно-сухую и абсолютно сухую (таблица 1.2.2) [101].

Таблица 1.2.2. Влажность стволуой древесины [101]

Состояние древесины (по терминологии [101])	Влажность, %	Примечание
Мокрая	> 100	Древесина, длительное время находившаяся в воде

Продолжение таблицы 1.2.2.

Состояние древесины	Влажность, %	Примечание
Свежесрубленная	45 – 100	Древесина, сохранившая влагу растущего дерева
Воздушно-сухая	15 – 20	Древесина, длительное время находившаяся на открытом воздухе
Комнатно-сухая	8 – 12	Древесина, продолжительное время находившаяся в отапливаемом и вентилируемом помещении
Абсолютно сухая	0	Древесина, высушенная в сушильной камере при температуре $T_g=103\pm 2$ °С до постоянной массы

Использование влажной древесной биомассы в качестве топлива приводит к снижению низшей теплоты сгорания и повышенному образованию конденсата в дымоходах котельных агрегатов [104]. Последнее приводит к интенсификации коррозии низкотемпературных поверхностей теплообмена [105], а также процессу формирования твёрдых сцементированных отложений золы во внешних газоходах паровых и водогрейных котлов промышленных предприятий [106]. При большой исходной влажности биомассы много теплоты будет затрачиваться на испарение влаги, в результате коэффициент полезного действия цикла парогенерации существенно снижается. Соответственно, влажную древесную биомассу перед её сжиганием необходимо предварительно подсушивать.

Сушка биотоплива на стадии подготовки к сжиганию сопряжена с дополнительными затратами энергии на испарение свободной и связанной влаги, а также на её выведение во внешнюю газовую среду. Кроме того, сушка биомассы – пожароопасный процесс [107]. Её нагрев допустим только до определенных температур [108]. По этой причине разработка основных элементов теории низко- и высокотемпературной сушки древесной биомассы в условиях широкой вариации влияющих параметров (вид биомассы, температура внешней среды, режим нагрева и т.д.) является важной и нерешенной до настоящего времени задачей.



### 1.3 Примеры объектов энергетики, работающих на древесной биомассе

Как показывает анализ современного политического дискурса, посвященного проблемам энергетики, одной из основных задач, развитых (в экономическом и технологическом планах) государств (страны Евросоюза, США, Китай) является борьба с изменением климата [109, 110]. Последнее, как правило, обеспечивается директивным внедрением в цикл производства тепловой и электрической энергии нетрадиционных возобновляемых источников энергии. С этой целью ведущими экономически развитыми странами было подписано Парижское соглашение, направленное на удержание глобального повышения температуры в этом столетии на уровне  $2\text{ K}/(100\text{ лет})$ , по сравнению с доиндустриальными уровнями и поддержанию усилий по ограничению этого повышения температуры до  $1,5\text{ K}/(100\text{ лет})$  [111]. Целевой показатель по изменению глобальной температуры будет достигнут только в случае значительного сокращения выбросов парниковых газов, что подразумевает глобальный переход к нулевому показателю по выбросам  $\text{CO}_2$  к середине 21 века [112]. Использование древесной биомассы в энергетике позволит существенно снизить антропогенное воздействие на атмосферу планеты.

Реализация во многих регионах России многочисленных программ по внедрению котельных, работающих на древесной щепе и других древесных отходах, показала, что строительство новых источников теплоснабжения или реконструкция существующих с целью замены ископаемых видов топлива (таких как мазут или уголь) на древесную биомассу и использование современных технологий её сжигания вполне оправданны с точки зрения экономики и экологии. В настоящее время в мире достаточно примеров промышленных предприятий [113–115], локальных котельных [116] и тепловых электрических станций (например, станция Avedore [117]), работающих на древесной биомассе (опилки [118], щепы [119], отходы сельского хозяйства [120] и др. [121]). Такие биоматериалы достаточно дешёвые и остаются в большом количестве (особенно в регионах с развитыми лесозаготовительными и агропромышленными комплексами) после переработки древесины и сельхозпродуктов.

По данным одного из ведущих мировых производителей котельного оборудования на биотопливе – компании Polytechnik Biomass Energy [122] (имеющей более чем сорокалетний опыт работы на этом рынке), за последние 10 лет спрос на котельные агрегаты, сжигающие биотопливо, увеличился в 10 раз. К примеру, реализация проекта по энергетическому использованию древесных отходов на Цигломенском участке ЗАО «Лесозавод 25» (один из лидирующих лесопильных комплексов на Северо-Западе России), осуществленного немецкой компанией Polytechnik Biomass Energy, позволила уменьшить выбросы SO<sub>2</sub> на 187,4 тонны в год, CO на 21 тонну в год, NO<sub>2</sub> на 6,2 тонны в год и CO<sub>2</sub> на 10667 тонн в год [122]. При этом фактическая стоимость затрат на получение 1 Гкал тепла уменьшилась более чем в 10 раз. Компания Polytechnik Biomass Energy специализируется на выпуске энергетического и утилизационного оборудования в диапазоне мощностей от 300 до 30 000 кВт в 25 странах мира. Котельные установки Polytechnik работают на биотопливе: древесная щепа, опилки, стружка, измельченная древесина, сельскохозяйственные отходы. Компанией Polytechnik разработаны топочные устройства, конструкция которых позволяет сжигать с высокой эффективностью (и низким содержанием диоксида углерода в продуктах сгорания) не только высококачественное сырье, такое как древесная биомасса, но и низкокачественные (малая теплота сгорания, высокая влажность и т.д.) сельскохозяйственные отходы или другое биогенное топливо для производства тепловой и электрической энергии.

Также можно отметить компанию «Илим», которая является крупнейшим лесозаготовительным предприятием в России и в Европе [113], а в мире занимает шестое место. На заводах группы «Илим» в Ленинградской, Архангельской и Иркутской областях производится около 70 % российской товарной целлюлозы, 20 % отечественного картона и 32 % бумаги. При этом котельные агрегаты, работающие в рамках энергообеспечения мануфактур «Илим», в основном используют в качестве топлива древесную биомассу. Следует отметить Онежский лесопильно-деревообрабатывающий комбинат (ЛДК) (Архангельская область), где в 2006 году для обеспечения города теплом была построена отопительная

котельная АО «Онега-Энергия» мощностью 57 МВт, работающая на отходах лесопиления с Онежского ЛДК (в основном на древесной коре) [116]. Котельная обеспечивает потребности Онежского лесопильно-деревообрабатывающего комбината и населения г. Онеги в тепловой энергии. Использование на ней древесных отходов в качестве сырья снизило потребление дизельного топлива и значительно улучшило экологические показатели предприятия, а также увеличило общую мощность ОАО "Онега-Энергия" на 30 %. Проект «Онега» получил инвестиции в рамках Киотского протокола.

В 2007 году в Иркутской области на лесопильном заводе ЗАО ЛДК «Игирма» [116] была установлена котельная установка мощностью 20 МВт. Тепло, генерируемое котлами, используется в сушильных камерах лесозаготовительных предприятий, а также в системах отопления. Установка работает на отходах лесопильного производства (опилки, щепа и т.д.).

Также в мире с каждым годом увеличивается число новых тепло- и электростанций, работающих на древесной биомассе. Можно отметить введенную в 2016 году в эксплуатацию теплоэлектростанцию (Biomassefyret Kraftvarmevrk) в Лисбьерге (Дания) [123], которая использует в качестве топлива солому и древесную щепу. Станция является одной из крупнейших в своем классе: мощностью 37 МВт электроэнергии и 77 МВт тепла. ТЭЦ обеспечивает 20 % потребности в централизованном теплоснабжении г. Орхуса, второго по величине города Дании. ТЭЦ в Лисбьерге в год сжигает до 240000 тонн соломы, которую доставляют с близлежащих ферм.

Первая в Германии электростанция (BEKW Emsland) [124], использующая в качестве топлива солому, расположена в Эмлиххайме (рисунок 1.3.1). Электростанция введена в эксплуатацию в 2013 году и сжигает в год около 70000 тонн соломы с близлежащих ферм (10,2 МВт / 49,8 МВт).

ТЭЦ в Скербеке (Дания) [125] является одной из трех электростанций, принадлежащих крупнейшей энергетической компании Дании Orsted (ранее называвшейся DONG Energy). Первоначально ТЭЦ в Скербеке была построена для работы на природном газе, но в 2017 году электростанция была переоборудована

на использование биомассы. На станции установлено два новых котла мощностью по 140 МВт, в которых сжигается древесная щепа совместно с углем.

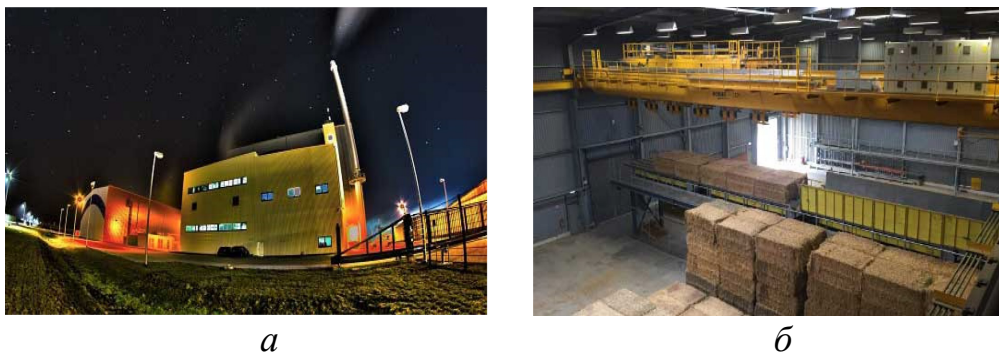


Рисунок 1.3.1. Электростанция ВЕКВ в Эмлиххайме (Германия) [124]:  
*а* – внешний вид электростанции; *б* – склад биотоплива

Также можно отметить тепловую электростанцию Amagerværket в Копенгагене (Дания) [126] (рисунок 1.3.2), которая принадлежит компании Høfor. С 2020 года всё производство электроэнергии и тепла на электростанции Amager основано на возобновляемых источниках энергии в виде сертифицированной устойчивой биомассы. Станция работает на основе типичных отходов деревообработки – щепе. Планируется, что электростанция Amager внесёт решающий вклад в реализацию цели Копенгагена – стать первой в мире столицей с нейтральным выбросом CO<sub>2</sub> к 2025 году [126], а к 2030 – сделать городское централизованное теплоснабжение, использующее только углеродно-нейтральное топливо.

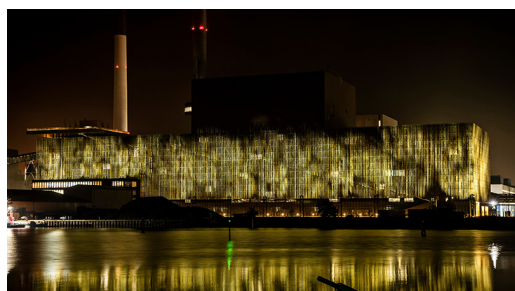


Рисунок 1.3.2. Электростанция Amagerværket в Копенгагене (Дания) [126]

В 2016 году в Стокгольме была введена в эксплуатацию новая ТЭЦ Fortum Värtaverket KVV8 (Швеция) [127] (рисунок 1.3.3) производительностью 130 МВт

электроэнергии и 280 МВт тепла, работающая на биотопливе. В штатном режиме установка потребляет в день около 12000 м<sup>3</sup> древесной щепы и отходов лесного хозяйства. Введение в эксплуатацию ТЭЦ Fortum Värtaverket KVV8 позволило увеличить долю углеродно-нейтрального топлива в централизованном теплоснабжении Стокгольма до 70 %. Для работы предприятию нужно примерно 3–4 судна в неделю. От причала к самой ТЭЦ древесная стружка, щепа и ветви деревьев доставляются по тоннелю под землей, который не мешает машинам и пешеходам (рисунок 1.3.3*в–г*). Объем подземного хранилища топлива составляет 50000 м<sup>3</sup>.

*а**б**в**г*

Рисунок 1.3.3. ТЭЦ Fortum Värtaverket KVV8 [127]: *а, б* – внешний вид теплоэлектростанции; *в* – подземный тоннель, разделенный на секции; *г* – конвейер с топливом и коридор для погрузчиков

Также следует отметить ТЭЦ Маасвлакте 3 (Maasvlakte) (рисунок 1.3.4) мощностью 1100 МВт [128], которая расположена в западной части Нидерландов (введена в эксплуатацию с 2016 г). Электростанция сжигает смешанное топливо типа уголь/биомасса, снабжая потребителей электричеством, теплом и газом.



Рисунок 1.3.4. ТЭЦ Маасвлакте 3 (Maasvlakte) [128]

Одним из лидеров по эксплуатации тепловых электростанций, сжигающих древесную биомассу, можно назвать Германию. Например, электростанция Бёблинген (Böblingen) введена в эксплуатацию в 2016 году [129]. Установленная мощность ТЭЦ Бёблинген 6 МВт. В качестве топлива используются типичные отходы деревообработки. Также можно отметить электростанцию в Дрездене (STEAG Dresden, 2003) [130], которая работает на биомассе. Одно из основных (наряду с углем) топлив – промышленные и крупногабаритные древесные отходы. ТЭЦ Фехенхайм (Mainova Biomasse Kraftwerk Fechenheim, Германия) мощностью 44 МВт [131] также, как и электростанция в Дрездене работает на древесном биотопливе. Такая активная политика по внедрению и производству тепловой и электрической энергии из биомассы привела в Европе к значительному увеличению доли экологически «чистых» электростанций. Скорее всего, в недалеком будущем такие теплоэлектростанции станут ключевыми источниками тепло- и электроэнергии для крупных промышленных предприятий.

В [132] приведены результаты показывающие, что совместное сжигание древесной биомассы и угля может рассматриваться как наилучший вариант энергетического использования древесины. В этих условиях наиболее эффективным с точки зрения экологии и энергетики методом использования древесной биомассы является сжигание последней в торрефикационном состоянии совместно с углем. При этом по оценкам авторов [132] это приведет (в отдаленной перспективе) к 12 % сокращению содержания диоксида углерода в атмосфере.



Стоит отметить, что попытки сжигания древесной биомассы проводились более чем на 150 станциях по всему миру и несмотря на отдельные примеры относительно успешного опыта использования биомассы для производства тепловой и электрической энергии на сегодняшний день в мире стабильно работает около 30 электростанций [133], сжигающих древесную биомассу. Такая ситуация, скорее всего, обусловлена неизученностью основных процессов, протекающих при термической подготовке (сушке) древесной биомассы к сжиганию.

## **1.4 Обзор результатов экспериментальных и теоретических исследований процессов сушки древесной биомассы**

### **1.4.1. Сушка лесных горючих материалов и отходов деревообработки**

Как было показано выше, процессы сушки изучаются уже более двух столетий [1]. Но несмотря на это в данной области знания остается ещё много актуальных и нерешённых на настоящее время задач. За последние 10 лет опубликовано достаточно много работ, посвященных изучению динамики процессов влагоудаления из дисперсных и пористых материалов (например, [134–136]), но в большинстве этих публикаций приведены результаты экспериментальных исследований процессов дегидратации отходов сельского хозяйства [134], древесных гранул [135] или деловой (непредусмотренной для сжигания) древесины [136–138]. В то же время процессы тепло- и массопереноса при сушке лесного горючего материала (несмотря на все его преимущества) остаются практически неизученными. Можно отметить лишь несколько работ с описанием результатов экспериментальных и теоретических исследований процессов влагоудаления из слоя древесной биомассы. Например, в [139] приведены результаты экспериментальных исследований процессов гидротермической обработки свежих веток норвежской ели и берёзы при высокотемпературном нагреве. Установлены характеристики процесса формирования биоугля при обработке древесных веток в условиях высоких

температур ( $T_g=448-498$  К) и давлений (35–40 бар) внешней среды. По результатам экспериментов [139] установлено, что увеличение температуры в камере газификатора и времени выдержки приводит к существенному повышению теплоты сгорания древесного угля.

В [140] приведены результаты экспериментальных исследований процесса атмосферной сушки древесной биомассы на основе отходов лесопиления (древесные опилки, щепа). По результатам проведенных экспериментов установлено существенное влияние погодных условий на характеристики процесса влагоудаления. Показано, что в зимний период сушка длится значительно дольше, чем в летний. В исследовании [141] приведены результаты основных физических закономерностей процесса влагоудаления из каучуковой древесины, представляющей собой блоки в форме прямоугольного параллелепипеда размерами  $3 \times 4 \times 2,8$  см. Эксперименты проводились в сушильной камере, выполненной в виде стеклянной колбы, внутрь которой подавался высокотемпературный воздух. Авторами [141] разработано аналитическое решение задачи определения значений равновесного влагосодержания в древесине. При этом, стоит отметить, что по результатам экспериментов [139–141] не установлены значения массовых скоростей влагоудаления при нагреве древесной биомассы и не определены температурные режимы сушки.

В статье [142] рассматривалась микроволновая сушка смеси бурого угля (месторождение Mengdong) и древесного кокса, полученного посредством пиролиза древесной биомассы (кукурузная и пшеничная солома, стебли, древесина сосны). Результаты показали, что при добавлении древесной биомассы (10 %) к углю эффективный коэффициент диффузии водяных паров во внешнюю среду существенно растет. Сравнительный анализ [142] показал, что скорость сушки угля при высокочастотном излучении (СВЧ) с добавлением к последнему древесного кокса незначительно отличается от аналогичной характеристики, полученной при сушке смеси угля и железа. Однако, стоит отметить, что авторами [142] не изучено влияние плотности засыпки смеси биомасса/уголь и не установлены массовые скорости влагоудаления.



В [143] приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований процессов сушки отходов деревообработки (хвойные опилки) и просо в псевдосжиженном кипящем слое в условиях импульсной подачи высокотемпературного воздуха. По результатам экспериментов установлена динамика изменения влажности в процессе нагрева биомассы при различных режимах (по температуре и частоте импульсов) теплового воздействия. В реальной практике применение данной технологии весьма затруднительно вследствие больших энергозатрат на нагрев воздуха и на привод высоконапорных дутьевых вентиляторов.

Следует отметить, что лесные горючие материалы на основе листьев деревьев и растений в основном сушат в целях фармакологии и пищевой промышленности [например, 144–152]). В [144] приведен обзор методов сушки листьев различных пород деревьев и кустарников. Сделан вывод о том, что сушка в условиях атмосферы экономически выгодна и при этом не оказывает антропогенного воздействия на атмосферу. Но использование естественной сушки не позволяет контролировать процесс влагоудаления и, соответственно, его завершенность.

В [145] приведены результаты экспериментов и численного моделирования процессов сушки листьев мяты в условиях высокотемпературного радиационно-конвективного нагрева. Установлены эффективные значения коэффициентов диффузии влаги из тонкого слоя листьев. По результатам экспериментов построены безразмерные зависимости влажности древесной биомассы от времени при различных интенсивностях обдува биомассы воздухом. Результаты экспериментальных и теоретических исследований процессов сушки листьев бетеля (*Piper betle L.*) в условиях конвективного нагрева приведены в [146]. Авторами установлены характерные скорости сушки при различных условиях нагрева и зависимости влажности листьев от времени при разных температурах внешней среды. Логарифмическая модель показала наилучшее соответствие теоретических и экспериментальных значений скорости влагоудаления. Также можно отметить работу [147], в которой приведены значения кинетических

характеристик (времени влагоудаления) процесса сушки листьев четырех сортов тунисского оливкового дерева (*Chemlali*, *Chemchali*, *Zarrazi* и *Chetoui*). Эксперименты проведены в закрытой циркуляционной камере, где в качестве источника нагрева использовалось солнечное излучение. Эксперименты проводились при трех температурах воздуха (313, 323 и 333 К) и относительной влажности окружающей среды в диапазоне от 29 до 32 %. Авторами показано, что температура оказывает значительное влияние на изменение соотношения влажности в зависимости от времени дегидратации. Характерные кривые сушки оливковых листьев определяют эмпирически с использованием соответствующих уравнений сушки. Они зависят от сорта листьев и температуры. Но авторами [145–147] не были установлены значения массовых скоростей влагоудаления с единицы поверхности площади испарения. По этой причине применение результатов [145–147] на практике достаточно затруднительно.

В [148, 149] приведены результаты экспериментальных исследований процессов сушки листьев оливкового и померанцевого деревьев солнечным излучением. Установлены характерные зависимости влагосодержания листьев от температуры окружающей среды. Рассчитаны кинетические характеристики процессов влагоудаления. Аналогичные характеристики получены при сушке листьев кориандра [150]. В [151] приведены результаты экспериментальных исследований сушки листьев крапивы и травяных стеблей в условиях конвективного нагрева воздухом. По результатам проведенных экспериментов получены характерные скорости влагоудаления. В [152] приведены результаты исследований процессов влагоудаления из листьев моринги (*Moringa Oleifera*) при различных температурах в сушильной камере (313, 323 и 333 К). По результатам экспериментов разработана математическая модель процесса сушки. Авторами [152] установлен достаточно тривиальный результат: время высыхания значительно сокращается при повышении температуры. Также установлены характерные значения скорости влагоудаления. Показано, что в начальный период сушки скорость испарения воды резко возрастает и быстро достигает наибольшей интенсивности. После этого скорость влагоудаления постепенно падает. При этом

авторами [152] показано, что максимальные значения массовых скоростей влагоудаления не зависят от температуры внешней среды.

Как показывают результаты, приведенные в публикациях мировой научной периодики (например, [139–153]), пока нет теоретических методов прогнозирования основных характеристик процессов влагоудаления из биомассы на основе лесных горючих материалов, обеспечивающих достоверные результаты для всех известных видов древесного биотоплива. При этом опубликованные результаты экспериментальных и теоретических исследований [139–153] процессов сушки биомассы не могут использоваться при оценке массовых скоростей выхода влаги в зависимости от условий нагрева. В связи с этим исследование процессов, протекающих при термической подготовке (сушке) лесного горючего материала к сжиганию, является актуальной и нерешённой на настоящее время задачей.

Как уже говорилось выше, сейчас становится очевидным, что одним из наиболее перспективных видов древесной биомассы является лесной горючий материал. Последний представляет собой лиственный и хвойный опад, веточки деревьев, сухой подлесок, бурелом, сухостой. Внедрение такого биоматериала в общий топливно-энергетический комплекс позволит существенно расширить сырьевую базу объектов теплоэнергетики и вывести из лесной экосистемы существенно (по данным [154]) пожароопасный материал. Такой глобальный синергетический подход человечества к обращению с лесными отходами позволит существенно улучшить экологическую и (главным образом) климатологическую обстановку за счет интенсификации процессов поглощения диоксида углерода в атмосфере. При этом данный подход имеет и значительный положительный экономический эффект. Как отмечалось ранее, в [76, 77] приведено экономическое обоснование использования ЛГМ в качестве топлива для малых объектов теплоэнергетики (локальные котельные и малые ТЭЦ, работающие в рамках энергообеспечения промышленных предприятий) при выполнении условий грамотной организации логистических цепочек поставок топлива на станцию. Однако стоит сказать, что на настоящее время не разработано фундаментальной

базы (на основе информации о динамике процессов тепло- и массопереноса, протекающих при их сушке) по обоснованию использования лесных горючих материалов в качестве топлива.

#### **1.4.2. Экспериментальные и теоретические исследования температурных полей при нагреве влагонасыщенных пористых материалов**

Одним из важнейших этапов разработки общей теории процессов тепло- и массопереноса, протекающих при сушке древесной биомассы, является изучение температурных режимов (структуры и динамики температурных полей). Однако стоит сказать, что до настоящего времени опубликовано достаточно мало работ по этой тематике.

Анализ публикаций в современной научной периодике показал, что в основном температурные поля при сушке древесины исследуются методом численного моделирования [155]. Экспериментально температура в слое влажной древесной биомассы в период её дегидратации ранее практически не измерялась. В исследованиях (например, [156]) обычно измеряют температуру подложки (стенки), на которой находится влажный материал или поверхности этого материала. Преимущественно экспериментальные исследования температурных полей в слое влажной древесной биомассы проводятся в рамках изучения процессов тепло- и массопереноса при сушке строительных материалов [157, 158]. Результаты же аналогичных исследований для «энергетической» биомассы в современной научной периодике практически отсутствуют. Так, в [159] приведены результаты теоретических исследований процесса теплообмена в пористом материале (на примере SiC). Авторами [159] представлена «двухтемпературная» (с решением двух уравнений энергии – материала и внутрипорового газа) математическая модель процесса фильтрационного тепломассопереноса при продувке газа сквозь слой, нагретого до высоких температур (1200 К) карбида кремния. Установлено существенное влияние внутрипорового теплового

излучения на характеристики теплопереноса через слой карбида кремния (SiC). При этом авторами статьи не рассматривались процессы фазовых превращений.

В [160] представлены результаты исследований конвективной сушки пористого слоя влажного песка. Экспериментальный стенд включал цилиндрический контейнер (расположенный на электронных весах), в котором были установлены термопары. По результатам экспериментов установлено, что процесс дегидратации влажного пористого слоя песка можно разделить на три отдельные взаимосвязанные стадии, характеризующиеся различной динамикой изменения температуры: начальная – быстрый нагрев; промежуточная стадия – медленный рост температуры (квазистационарный режим); конечная – быстрый рост температуры в слое песка. Авторами [160] установлено, что процесс испарения проходит в два этапа: первый – нестационарный, второй – устойчивый [160] период. При этом в устойчивый период сушки температура слоя песка практически не меняется.

В [161] приведены результаты экспериментальных исследований нагрева влажных кубических частиц (размером 7 мм) древесной биомассы (на основе ели) в псевдооживленном слое кварцевого песка, нагретого до высоких температур. В центральной части древесных частиц фиксировалась термопара. По результатам экспериментальных исследований установлена динамика температуры в центре частицы. Но стоит сказать, что характеристики тепло- и массопереноса в слое биомассы (состоящем из множества частиц) существенно отличаются от аналогичных характеристик при нагреве одиночных частиц древесины. При этом авторами [161] не изучено распределение температуры в слое биомассы.

В [162] приведен анализ эффективности процесса влагоудаления из слоя древесной биомассы при высокотемпературной сушке воздухом на ленточном конвейере. Для целей исследования [162] в качестве сырья использовались типичные отходы деревообработки на основе древесной щепы и коры, а также смеси твердых продуктов горения древесины и опилок. Результаты исследований [162] показали, что высота слоя древесной биомассы, при которой эффективность сушки максимальна составляет: для коры – 250 мм; для щепы – 500 мм.

Температура воздуха при сушке коры должна составлять  $T_g \approx 383$  К, для щепы  $T_g \approx 363$  К. В этих температурных режимах сушка древесины наиболее эффективна независимо от начальной влажности. В случае же обезвоживания бинарной смеси сажа/древесные опилки наименьшие энергетические затраты на сушку достигаются при максимальной температуре воздуха  $T_g = 573$  К. При этом установлено, что увеличение высоты слоя навески биомассы с 200 мм до 300 мм приводит к увеличению затрат на сушку. Это указывает на то, что при сушке древесной биомассы на ленточном конвейере существует некая оптимальная высота слоя, которая зависит от материала и его влажности. По результатам экспериментов [162] показано, что для сохранения условий максимальной эффективности процесса сушки увеличение начальной влажности биомассы приводит к уменьшению высоты слоя. Однако стоит сказать, что авторами не определялись температурные поля слоя влажной древесной биомассы в период её нагрева. Также необходимо отметить, что ленточные сушильные агрегаты достаточно энергозатратны вследствие необходимости обеспечения электроэнергией привода конвейера. При этом, можно с уверенностью утверждать, что такие сушильные агрегаты менее надежны по сравнению с сушилками бункерного типа.

Авторами [163] приведены результаты низкотемпературной сушки массивного слоя древесных опилок и щепы в процессе газификации. Показана перспективность использования влажной древесной биомассы в качестве исходного сырья для газификатора. В [163] температура слоя исследовавшегося биоматериала измерялась комплексом из девяти хромель-алюмелевых термопар. По результатам экспериментов установлены температурные тренды в точках расположения термопар. Можно отметить, что авторами [163] установлен эффект уменьшения температуры в слое биомассы во время её нагрева в начальный период дегидратации и после полного испарения внутрипоровой влаги вновь её повышения, но объяснения динамики температурного поля и физического описания механизма тепло- и массопереноса в период нагрева древесной биомассы авторами не приведено. Скорее всего, авторы [163] не смогли сформировать

соответствующую гипотезу, описывающую процессы, протекающие в слое влажной древесной биомассы при её нагреве. В [164] представлены исследования по измерению температур в массивном слое (толщиной  $h \leq 600$  мм) древесной биомассы на основе опилок и щепы при низкотемпературном нагреве. Но эффекта понижения температуры при сушке биомассы авторами [164] не установлено.

Также известны работы Красникова В.В. (например, [165, 166]), который впервые сделал попытку детально изучить механизм сушки целлюлозы при кондуктивном нагреве. В [165] приведены результаты исследований процессов тепло- и массопереноса, протекающих при сушке тонких (толщиной от 0,16 до 1,0 мм) слоев спрессованной целлюлозы в условиях кондуктивного нагрева (теплогенерирующей плитой). Можно отметить, что автором установлено четыре этапа сушки: нагрев целлюлозы (возрастание температуры), стратификация (температура не изменяется), охлаждение и снова рост температуры. Другими словами, в [165] установлено, что в слое биомассы после некоторого периода нагрева происходит снижение температуры в условиях продолжающегося теплового воздействия. Автором [165] выдвинута гипотеза, что это обусловлено началом термического разложения и выходом адсорбционно-связанной влаги. Но стоит сказать, что по данным [81] термическое разложение древесной биомассы начинает происходить при нагреве её свыше 393 К. Соответственно, в условиях низких температур внешней среды ( $T_g = 333\text{--}353$  К) термическое разложение не происходит.

Анализ результатов экспериментальных и теоретических исследований [155–166] показал, что конвективная сушка влажных пористых материалов представляет собой сложный физический процесс. При этом объективные данные о температурных режимах сушки древесной биомассы имеют важное значение для анализа и моделирования процессов тепло- и массопереноса. Подводя итог можно сказать, что на настоящее время в мировой научной периодике практически нет публикаций с подробным описанием механизма влагоудаления при исследованиях температурных режимов процессов сушки пористого слоя влажной древесной биомассы при радиационно-конвективном нагреве. В этой связи исследование

процессов тепло- и массопереноса, протекающих при термической подготовке древесной биомассы к сжиганию и определение температурных полей в её слое является важной и нерешенной задачей в современной теплоэнергетике.

### **Основные результаты и выводы по первой главе**

1. Публикационная активность по тематике: «Сушка древесной биомассы», свидетельствует о двух существенных факторах, обосновывающих актуальность исследований. Первый – изучение процессов тепло- и массопереноса, протекающих при сушке древесной биомассы, является актуальным направлением исследований в теории о тепловых системах и установках использующих тепло. Второй – в этом направлении исследований есть еще много открытых проблем современной теплотехники.

2. Анализ приведенных в современной научной периодике результатов показывает, что на настоящее время практически не изучены процессы тепло- и массопереноса, протекающие при сушке лесных горючих материалов (листья, хвоя, ветки деревьев) при радиационно-конвективном нагреве.

3. До настоящего времени не проводился анализ влияния основных значимых параметров факторного пространства (температура внешней среды, вид биомассы, плотность засыпки) на значения массовой скорости влагоудаления при сушке ЛГМ и отходов лесопиления (древесные опилки, щепа и др.).

4. На сегодняшний день в мировой научной периодике нет примеров публикаций с описанием результатов исследований температурных полей, формирующихся в массивном слое влажной древесной биомассы в период её высокотемпературного радиационно-конвективного нагрева.

5. Анализ приведенных в современной научной периодике результатов показал, что на настоящий момент обоснования перспективности использования древесной биомассы в энергетике (на основе анализа энергетической эффективности процесса сушки и последующего её сжигания в топочных устройствах котельных агрегатов) практически не проводилось.



## **ГЛАВА 2. МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА, ПРОТЕКАЮЩИХ В ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЕ ПРИ ЕЁ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКЕ К СЖИГАНИЮ**

Проведение экспериментальных исследований процессов тепло- и массопереноса, протекающих при дегидратации древесной биомассы, представляет собой достаточно трудоёмкое мероприятие вследствие того, что сушка биомассы является продолжительным процессом. По этой причине для установления характеристик и условий протекания процесса влагоудаления все экспериментальные процедуры должны тщательно планироваться, а результаты экспериментов обрабатываться в соответствии с каноническими принципами статистической обработки закономерностей динамики случайных величин [167] и теорией распределений [168]. В этой главе приведены основные методики, использовавшиеся при проведении экспериментальных исследований процессов влагоудаления из древесной биомассы в рамках диссертационной работы.

### **2.1 Методика подготовки древесной биомассы к проведению экспериментов**

В качестве объекта экспериментальных исследований рассматривается древесная биомасса (рисунок 2.1.1) в виде лесных горючих материалов (листья, хвоя, ветки деревьев), типичных отходов лесопиления и деревообработки (древесные опилки, щепа, стружка) на основе наиболее распространенных и перспективных (для целей энергетики) видов хвойных (ель, сосна) и лиственных (берёза, тополь, клён, липа, дуб) пород деревьев.

В ходе диссертационной работы проведено 5 групп экспериментов: первая группа – исследование динамики температурного поля в массивном слое влажной древесной биомассы (сосновая стружка) при радиационно-конвективном нагреве (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 хвой и веточек – диаметр); во 2-й, 3-ей и 4-й группах экспериментов изучалось влияние вида биомассы (листья, хвоя, опилки, щепы, ветки) 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 её слое при нагреве в сушильной камере.

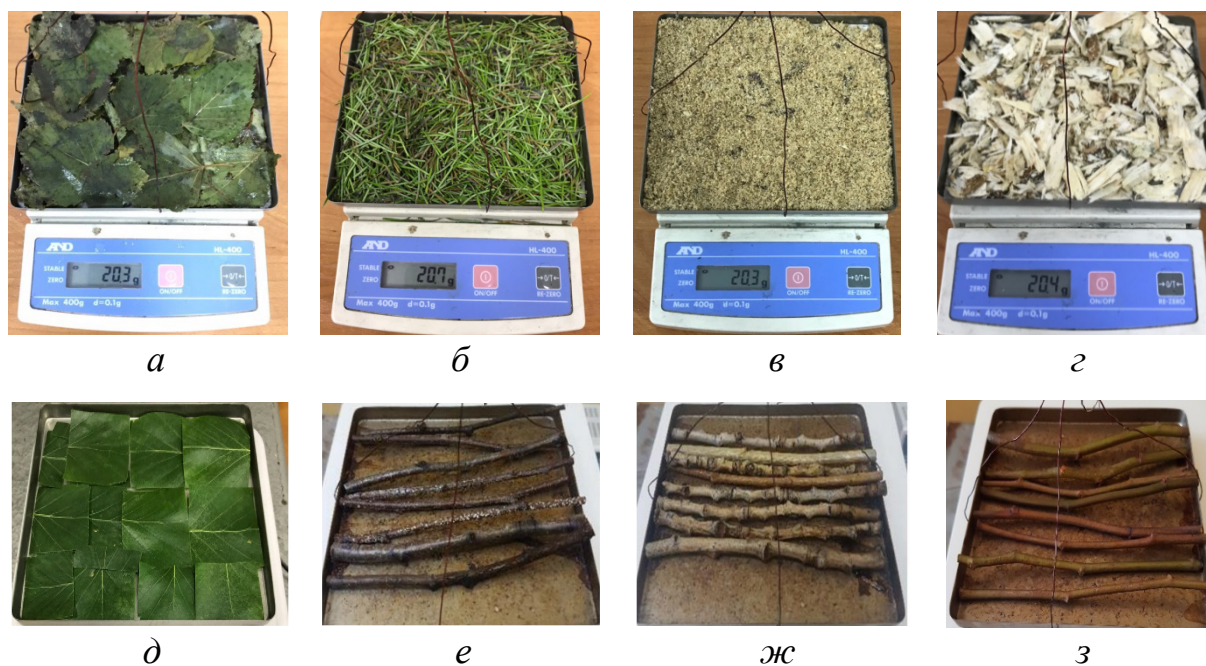


Рисунок 2.1.1. Навески исследовавшихся видов древесной биомассы: *а* – листья берёзы; *б* – хвоя ели; *в* – сосновые опилки; *г* – сосновая щепы; *д* – листья тополя; *е* – ветки берёзы; *ж* – ветки тополя; *з* – ветки липы

При экспериментальном исследовании процессов тепло- и массопереноса в массивном слое влажной древесной биомассы при радиационно-конвективном нагреве использовался листовая и хвойный опад деревьев, древесные опилки, щепы (рисунок 2.1.1*а-г*) и древесная стружка (рисунок 2.2.2*б*). Типичный характерный размер отходов деревообработки и лесных горючих материалов составлял: длина листьев берёзы 40–45 мм, толщина 1–1,5 мм; длина хвой 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.

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 свежесрезанные листья и веточки лиственных пород деревьев. Из листьев вырезались пластины прямоугольной формы (рисунок 2.1.1д), которыми заполнялся металлический поддон (размерами 145×125×10 мм, площадь открытой поверхности  $F_{\text{eva}}=0,018 \text{ м}^2$ ). Веточки лиственных пород деревьев (рисунок 2.1.1е-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  $d \approx 6 \pm 1$  мм. Число веток в навеске для каждой серии экспериментов составляло восемь штук.

С целью обеспечения необходимой (по условиям экспериментов) типичной начальной влажности древесной биомассы перед началом каждой серии экспериментов проводилась процедура её обезвоживания. Сперва навеска древесной биомассы с естественной влажностью выдерживались в сушильном шкафу (при температуре внутрикамерного воздуха  $T_g=323 \text{ К}$ ) до момента, пока вся влага из биомассы не удалится ( $\varphi \leq 2 \%$ ). Затем уже сухая биомасса опрыскивалась с пульверизатора (либо вымачивалась в дистиллированной воде) для достижения типичной [101] (для каждого вида биомассы) влажности (таблица 2.1.1). В случае если влажность древесной биомассы превышала контрольные значения ( $\varphi \geq \varphi_{\text{kon}}$ ), то её вновь высушивали и всю процедуру наведения влажности проводили заново. В том случае если влажность навески была меньше  $\varphi_{\text{kon}}$ , то процедура влагонасыщения биомассы продолжалась. Значения влажности древесной биомассы вычислялись по формуле

$$\varphi = \frac{m_{\text{bio}} - m_d}{m_{\text{bio}}} \cdot 100 \%, \quad (2.1.1)$$

где  $m_{\text{bio}}$  – масса влажной навески биомассы, кг;  $m_d$  – масса сухой навески биомассы, кг.

Таблица 2.1.1 Наведённая (в рамках эксперимента) влажность древесной биомассы

	Вид биомассы					
	Веточки деревьев	Сосновая стружка	Сосновая щепка	Сосновые опилки	Хвоя ели	Листья деревьев
Влажность $\varphi$ , %	45	50	50	60	60	70

После обеспечения контролируемой типичной влажности ёмкость с древесной биомассой помещалась в заранее нагретую до заданных (по условиям эксперимента) температур полость внутрикамерного пространства (размерами 500×500×600 мм) сушильной установки для проведения процедуры дегидратации.

Пористость слоя навески биомассы рассчитывалась из выражения [169]:

$$\Pi = \left(1 - \frac{m_{\text{bio}}}{m_{\text{мон}}}\right) \cdot 100 \%, \quad (2.1.2)$$

где  $m_{\text{мон}}$  – масса монолитной древесины, кг.

## 2.2 Методика проведения экспериментальных исследований процессов тепло- и массопереноса, протекающих при сушке древесной биомассы

Первая группа экспериментальных исследований процессов тепло- и массопереноса в массивном слое влажной древесной биомассы при интенсивном нагреве проводилась на установке, приведенной на рисунке 2.2.1. В качестве объекта исследований рассматривались типичные отходы деревообработки (сосновая стружка).

На рисунке 2.2.2. представлена навеска влажной древесной биомассы (кубическая ёмкость с открытой верхней гранью и характерным размером 100 мм с толщиной стенок куба 5 мм, заполненная влажной сосновой стружкой) с установленным комплексом термоэлектрических преобразователей. Навеска массой  $m_{\text{био}}=300\pm 1$  грамм помещалась в заранее нагретую до заданных (по условиям эксперимента) температур полость внутрикамерного пространства (размерами 500×500×600 мм) сушильной установки (рисунок 2.2.1). Температура сушильного агента (воздуха) с помощью терморегулятора варьировалась в

диапазоне от 333 до 393 К. Регистрация температуры в слое биоматериала и убыли массы навески проводилась непрерывно в течение всего эксперимента. Каждый опыт продолжался до тех пор, пока значение массы навески ( $m_{\text{bio}}$ ) не переставало изменяться. Период времени от начала теплового воздействия до момента наступления режима, при котором выполнялось условие  $\frac{dm_{\text{bio}}}{d\tau} = 0$  считался временем дегидратации ( $\tau_d$ ). Каждая серия экспериментов состояла из пяти опытов, проведенных при идентичных условиях нагрева (по температуре внешней среды).

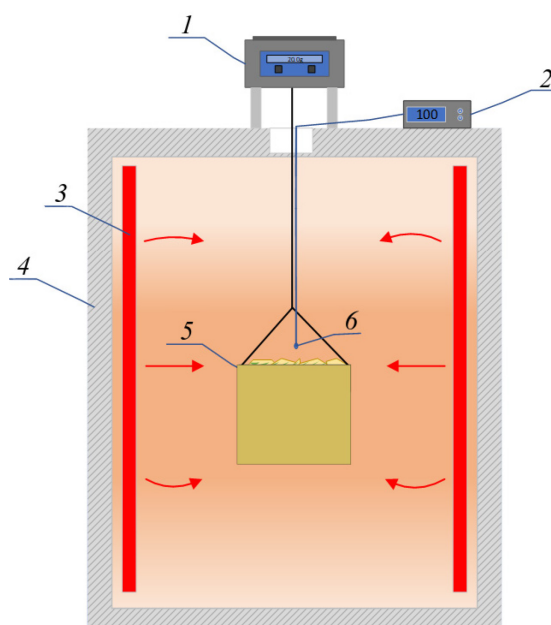


Рисунок 2.2.1. Принципиальная схема экспериментальной установки: 1 – лабораторные весы Aczet (Citizen) CY-1003 (погрешность измерения массы 0,001 г); 2 – терморегулятор ТРМ 500; 3 – электрический нагреватель; 4 – сушильная камера SU 32; 5 – навеска древесной биомассы; 6 – комплекс термоэлектрических преобразователей (хромель-алюмелевые термопары)

С целью измерения температур в массивном слое (толщиной  $h=100\pm 1$  мм) древесной биомассы использовался комплекс из шести хромель-алюмелевых термопар (толщина проволоки 0,1 мм; диаметр спая термопар 0,3 мм; погрешность измерения 0,1 К; температурный диапазон измерения 273–1373 К). Термопары устанавливались на оси симметрии в центральной части кубической ёмкости на равноудалённом расстоянии друг от друга (20 мм) по высоте. Схема расположения

термопар в слое древесной стружки представлена на рисунке 2.2.2*а*. Значения температур с термоэлектрических преобразователей регистрировались непрерывно в течение всего эксперимента.

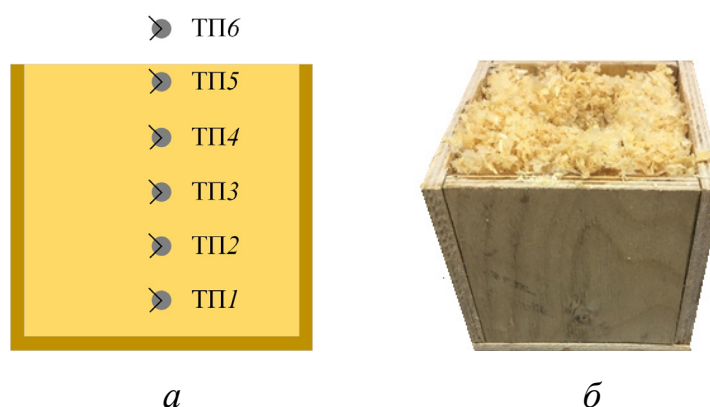


Рисунок 2.2.2. Навеска древесной биомассы: *а* – схема расположения термопар (ТП) ТП1–5 в слое древесной стружки, ТП6 – над поверхностью навески биомассы; *б* – кубическая ёмкость с древесной стружкой

Остальные группы (со второй по пятую) экспериментальных исследований проводились на установке, которая по принципиальной схеме, методам регистрации и обработки результатов исследований соответствует стенду, приведенному выше на рисунке 2.2.1. Отличия заключались только в том, что во внутрикратерном пространстве сушильной установки к весам крепилась не кубическая ёмкость, а металлический поддон размерами  $145 \times 125 \times 10$  мм и открытой площадью поверхности влагоудаления  $F_{\text{eva}} = 0,018 \text{ м}^2$ , заполненный древесной биомассой (рисунок 2.2.3). В качестве объектов экспериментальных исследований рассматривались типичные отходы лесопиления и деревообработки (опилки, щепа), а также лесные горючие материалы (листья, хвоя и ветки деревьев).

Эксперименты проведены на установке, представленной на рисунке 2.2.3. Основной её частью является сушильная камера SU 32 (максимальная температура нагрева  $T_{\text{max}} = 423 \text{ К}$ , скорость нагрева  $10 \text{ К/с}$ ) с регистратором температуры внутрикамерного пространства (хромель-алюмелевая термопара (ТХА), погрешность измерения температуры  $0,1 \text{ К}$ ) и лабораторными весами Aszet (Citizen) CY-1003 (погрешность измерения массы  $0,001 \text{ г}$ ).

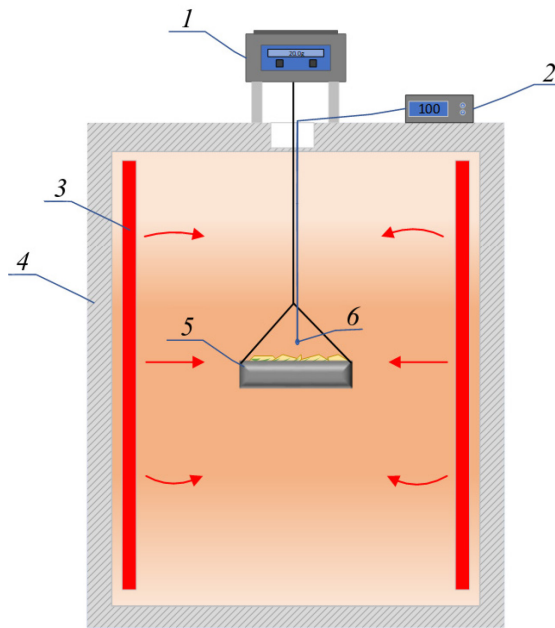


Рисунок 2.2.3. Принципиальная схема экспериментальной установки: 1 – высокоточные лабораторные весы Aczet (Citizen) CY-1003; 2 – терморегулятор TRM 500; 3 – электрический нагреватель; 4 – сушильная камера SU 32; 5 – навеска древесной биомассы; 6 – термоэлектрический преобразователь (хромель-алюмелевая термопара (ТХА))

Экспериментальные исследования проводились по следующей схеме: навеска влажной древесной биомассы массой  $20 \pm 1$  грамм (рисунок 2.1.1а–з) помещалась в заранее нагретую до заданных (по условиям эксперимента) температур полость внутрикамерного пространства сушильной установки (рисунок 2.2.3). Температура сушильного агента с помощью терморегулятора варьировалась в диапазоне от 333 до 393 К и регистрировалась в программе LabVIEW. Каждый эксперимент выполнялся в идентичных условиях не менее пяти раз.

С целью определения доверительного интервала результаты каждой серии эксперимента статистически обрабатывались [167]. На первом этапе определялось математическое ожидание искомой величины. На следующем этапе рассчитывались дисперсия и среднеквадратичные отклонения. После отбраковки промахов по критерию Романовского [170] определялись доверительные интервалы.

## 2.3 Методики определения массовой скорости влагоудаления

Одной из важнейших характеристик процесса сушки любого влагонасыщенного пористого материала является массовая скорость влагоудаления ( $W_{\text{eva}}$ ) и зависимости её значений от условий нагрева, теплофизических и фильтрационных свойств материала. Знания о динамике изменения  $W_{\text{eva}}$  при различных температурах внешней среды позволят адекватно рассчитывать рабочие параметры, а также обосновывать конструктивные характеристики сушильных агрегатов, проводящих термическую подготовку древесной биомассы к сжиганию, в период проведения опытно-конструкторских работ. Также зависимости массовой скорости влагоудаления от времени сушки, условий нагрева (температура внешней среды) и вида древесной биомассы являются 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.

### 2.3.1 Методика определения массовой скорости влагоудаления при сушке лесных горючих материалов на основе листьев деревьев и хвои ели, а также отходов деревообработки

При проведении экспериментальных исследований процессов дегидратации древесной биомассы при заданных температурах внешней среды ( $T_g=333-393$  К) первоначально определялась масса испарившейся влаги. Регистрация массы навески древесной биомассы ( $m_{\text{bio}}$ ) проводилась непрерывно в течение всего эксперимента. Каждый опыт продолжался до тех пор, пока значения  $m_{\text{bio}}$  не переставали изменяться. Период времени от начала теплового воздействия до момента наступления режима, при котором выполнялось условие  $\frac{dm_{\text{bio}}}{d\tau} = \frac{d\varphi}{d\tau} = 0$ ,



считался полным временем дегидратации ( $\tau_d$ ). Массовая скорость влагоудаления ( $W_{\text{eva}}$ , кг/(м<sup>2</sup>·с)) вычислялась из выражения:

$$W_{\text{eva}} = \frac{1}{F_{\text{eva}}} \cdot \frac{dm_{\text{bio}}}{d\tau} = \frac{|m_{i+1} - m_i|}{F_{\text{eva}} \cdot \Delta\tau}, \quad (2.3.1.1)$$

где  $dm_{\text{bio}}$  – изменение массы навески биомассы за период времени  $d\tau$ , кг;  $F_{\text{eva}}$  – площадь влагоудаления (для навесок листьев, хвои, древесных опилок, щепы и стружки принималась равной площади открытой поверхности ёмкости), м<sup>2</sup>;  $d\tau$  – интервал времени сушки, с;  $m_i$  – масса навески в  $i$ -й момент времени, кг;  $\Delta\tau$  – период времени между измерениями массы навески, с.

### 2.3.2 Методика определения массовой скорости влагоудаления при сушке лесных горючих материалов на основе веточек деревьев

Стоит отметить, что лесной горючий материал может представлять собой не только листовую и хвойный опад, но и веточки (или сучья) деревьев. В связи с этим использование методики расчета массовой скорости влагоудаления, приведенной в п. 2.3.1, применительно к процессам сушки веточек деревьев необоснованно. Последнее обусловлено тем, что конфигурация слоя биомассы, состоящего из хвои или листьев, не гомотопна слою биомассы из веточек. В совокупности хвоинки или листья формируют «условно» монолитный слой с малой пористостью и проницаемостью, в то время как веточки деревьев при складировании наоборот образуют высокопористую структуру.

При исследовании процессов сушки ЛГМ на основе веточек деревьев расчет массовой скорости влагоудаления проводился по аналогичной приведенной выше схеме (пункт 2.3.1). С целью установления площади поверхности влагоудаления веточек выполнялось измерение основных геометрических характеристик. Характерные размеры (значения эталонных длин и среднего диаметра) веточек деревьев составляли: длина  $l=145$  мм, средний диаметр веточек  $d=6\pm 1$  мм. Если характерные размеры отличались от эталонных более чем на 1 мм, то такие образцы

отбраковывались. Для определения площади влагоудаления каждая веточка модельно представлялась (с соблюдением условия гомеоморфизма [171]) в виде составного цилиндра (рисунок 2.3.2.1). Это обусловлено тем, что линейный размер и форма веточек по длине существенно неравномерны. На рисунке 2.3.2.1 представлена схема расчета площади влагоудаления для веточек. Площадь поверхности влагоудаления определялась из выражения:

$$F_{\text{eva}} = \sum_{i=n}^m S_i^{\text{cil}} \quad (2.3.2.1)$$

где  $S_i^{\text{cil}}$  – площадь элементарного цилиндра  $S_i^{\text{cil}} = l_i \cdot \pi \cdot d_i \text{ м}^2$ ,  $i=1,2..n$  (каждой веточки).

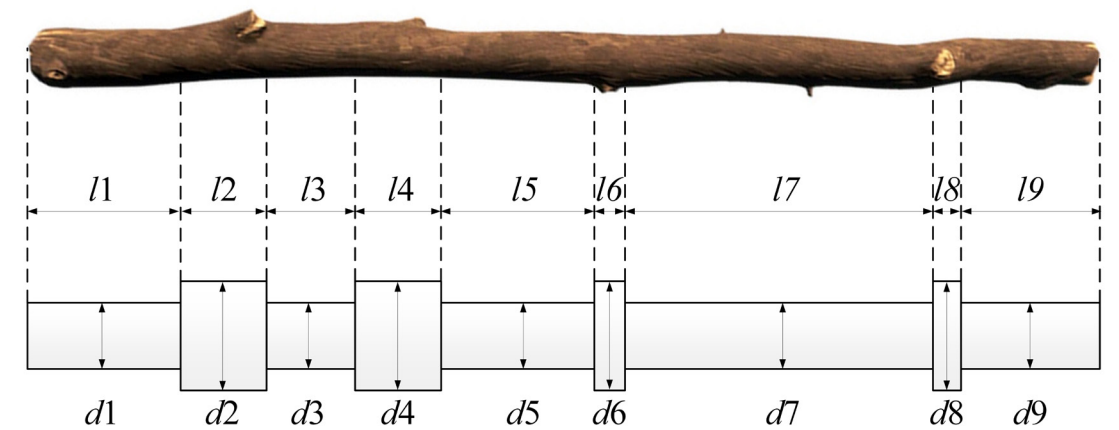


Рисунок 2.3.2.1. Схема расчета площади влагоудаления для веточки

Диаметр веточек по всей длине изменяется стохастически. На рисунке 2.3.2.2 приведена эпюра значений диаметров ( $d$ ) для веточек. По этой причине для вычисления площади влагоудаления каждая веточка представлялась в виде нескольких составных цилиндров (рисунок 2.3.2.1). Увеличение числа таких цилиндров приводит к повышению точности измерения площади влагоудаления:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (\sum_{i=1}^m S_i^{\text{cil}}) \Rightarrow F_{\text{tru}} = \pi \int_0^l d \cdot dl \quad (2.3.2.2)$$

где  $F_{\text{tru}}$  – истинное значение площади влагоудаления (для веточки),  $\text{м}^2$ ;  $d$  – диаметр веточки,  $\text{мм}$ ;  $l$  – длина веточки,  $\text{мм}$ . Применение же среднего по длине диаметра при вычислении площади влагоудаления, очевидно, приведет к увеличению погрешности вычисления скоростей влагоудаления. По этой причине принято

решение о представлении геометрии веточки в рамках модели гладкого односвязного составного цилиндра.

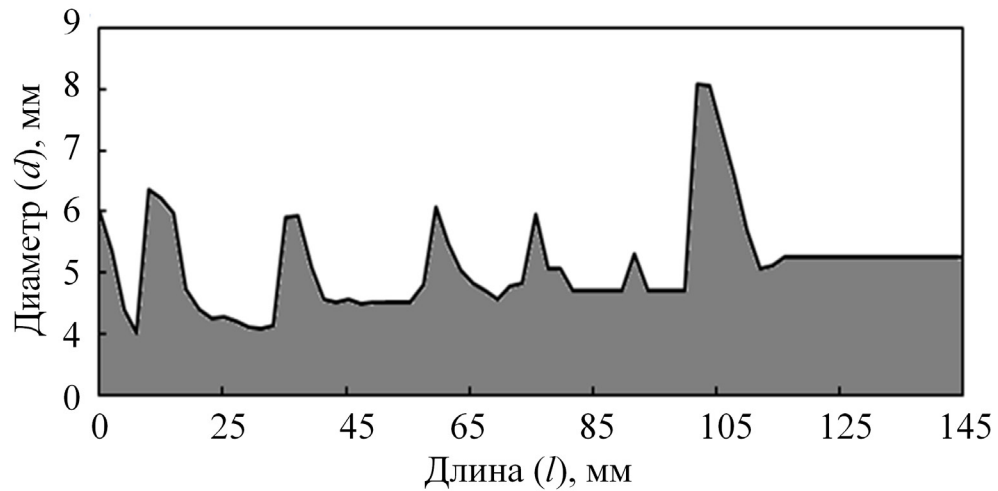


Рисунок 2.3.2.2. Эпюра диаметров веточки

## 2.4 Методика подготовки древесной биомассы при проведении анализа влияния плотности засыпки на характеристики и условия процесса влагоудаления

В пятой группе экспериментальных исследований изучалось влияние плотности засыпки влажной древесной биомассы на характеристики процесса влагоудаления. Рассматривались типичные отходы деревообработки (сосновые опилки). Эксперименты проводились при разной степени уплотнения ( $\gamma$ ) навески древесной биомассы ( $\gamma = \rho_p / \rho_0$ , где  $\rho_p$  – плотность спрессованной биомассы,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\rho_0$  – насыпная (естественная) плотность навески биомассы,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ). На рисунках 2.4.1а–в представлены навески влажной древесной биомассы с разными степенями уплотнения.

Подготовка древесной биомассы проводилась по аналогии с приведенной в пункте 2.1 методикой. Уплотнение навески биомассы (сосновых опилок) достигалось методом прессовки. Металлический поддон с биомассой через подвесное соединение крепился к электронным весам (рисунок 2.2.3). Навеска размещалась в центральной части сушильной камеры.

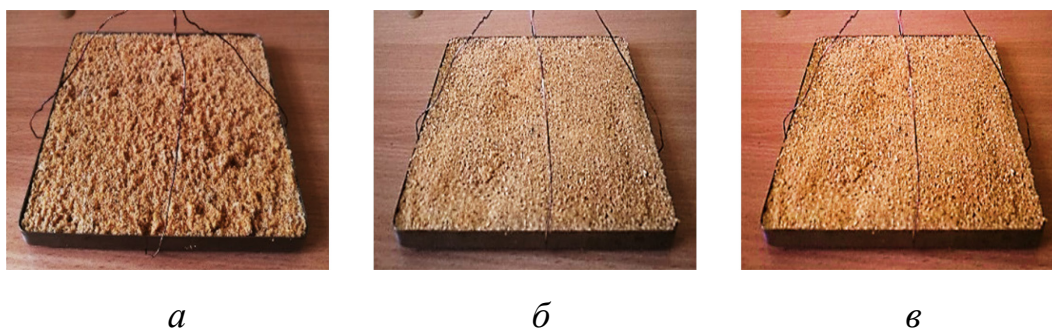


Рисунок 2.4.1. Навески древесной биомассы (сосновые опилки) с разными степенями уплотнения: *a* – естественная плотность засыпки ( $\gamma=1$ ); *б* – навеска биомассы, уплотненная в 1,5 раза ( $\gamma=1,5$ ); *в* – навеска биомассы, уплотненная в два раза ( $\gamma=2$ )

## 2.5 Методика расчета погрешностей измерений

Результаты экспериментов обрабатывались в соответствии с теорией погрешностей и гипотезой о нормальном распределении значений случайных величин [167]. В таблице 2.5.1 приведён пример обработки результатов экспериментов при сушке берёзовых веточек при температуре в сушильной камере 393 К.

Таблица 2.5.1. Значения начальной массы навески древесной биомассы на примере веточек берёзы (полученные экспериментально)

	Эксперимент $i=1..n$ ( $n=5$ )				
	Момент времени $\tau=600$ с				
Серия экспериментов	1	2	3	4	5
Масса навески биомассы $m_{\text{bio}}$ , Г	9,860	9,953	9,958	9,948	9,961

Так как значения массы навески ( $m_{\text{bio}}$ ) не повторяются, то вероятность регистрации каждой из них составляет  $P(m_i)=0,2$ . Соответственно, математическое

ожидание (для дискретной случайной величины) значений массы навески в момент времени ( $\tau$ ) вычислялось из выражения:

$$M[m_i] = \sum_{i=1}^n m_i \cdot P_i = 9,936 \text{ м}^2. \quad (2.5.1)$$

Затем рассчитывалась дисперсия  $D[m_i]$  и среднеквадратичное отклонение  $\sigma[m_i]$  (с учетом оценки смещения):

- дисперсия

$$D[m_i] = \sum_{i=1}^n P_i (m_i - M[m_i])^2 = M[(m_i - M[m_i])^2]; \quad (2.5.2)$$

- исправленная дисперсия (с учетом оценки смещения)

$$\dot{D}[m_i] = \frac{n}{n-1} D[m_i]; \quad (2.5.3)$$

- среднее квадратичное отклонение

$$\sigma[m_i] = \sqrt{\dot{D}[m_i]}. \quad (2.5.4)$$

После этого проводилась отбраковка промахов в соответствии с критерием Романовского [170]:

$$q_i = \frac{|m_i - M[m_i]|}{\sigma}. \quad (2.5.5)$$

В соответствии с принятой гипотезой о нормальном распределении дискретной случайной величины (масса навески) определялись значения доверительных интервалов  $\Delta m_i$  по критерию Стьюдента  $\Delta m_i = t \cdot \sigma[m_i]$  (где  $t$  – критерий Стьюдента). Затем определялась погрешность измерения массы навески  $\delta[m_i] = \Delta m_{\text{био}} / M[m_i]$ . После обработки результатов экспериментов вычислялись значения массовой скорости влагоудаления по известному выражению:

$$W_{\text{eva}} = \frac{m_{\text{био}}}{F_{\text{eva}}} \cdot \frac{d\varphi}{d\tau} = \frac{1}{F_{\text{eva}}} \cdot \frac{dm_{\text{био}}}{d\tau} = \frac{|m_{i+1} - m_i|}{F_{\text{eva}} \cdot \Delta\tau} \quad (2.5.6)$$

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

При этом необходимо отметить, что массовая скорость влагоудаления ( $W_{\text{eva}}$ ) не зависит от площади «зеркала» испарения, а зависит только от разности давлений водяных паров вблизи фронта фазового перехода и давления насыщения на его

поверхности. Обработка результатов измерения температуры в массивном слое биомассы (на основе древесной стружки) проводилась по аналогичной схеме.

Погрешности измерения температуры и массы исследовавшихся видов древесной биомассы в экспериментах при доверительной вероятности 0,95 составили  $\delta(T_g)=17,3\%$  и  $\delta(m_{\text{bio}})\approx 3,0\%$  соответственно. Погрешность вычисления значений массовой скорости влагоудаления  $\delta(W_{\text{eva}})$  не превышала 11 %.

### **Основные результаты и выводы по второй главе**

1) Разработаны методики подготовки и проведения экспериментальных исследований процессов тепло- и массопереноса, протекающих при сушке древесной биомассы.

2) Разработаны экспериментальные стенды по комплексному изучению процессов тепло- и массопереноса, протекающих при сушке древесной биомассы, позволяющие с минимальным уровнем погрешности изучать температурные режимы (температурные поля) и динамику процесса влагоудаления (масса навески биомассы, скорость влагоудаления) из слоя биомассы.

3) Разработаны методики расчёта массовых скоростей влагоудаления и измерения температур в массивном слое влажной древесной биомассы в период её интенсивного радиационно-конвективного нагрева.

4) Обосновано применение подхода статистической обработки случайных величин к установлению значений массовой скорости влагоудаления при различных конфигурациях факторного пространства.

### ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА В ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЕ ПРИ ЕЁ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКЕ К СЖИГАНИЮ

Одним из важнейших этапов термической подготовки древесной биомассы к сжиганию на объектах теплоэнергетики (ТЭС, локальные котельные) является сушка. Как правило, удаление влаги из отходов лесопиления и деревообработки (опилки, щепа, стружка, древесная пыль) проводится в массивных сушильных камерах бункерного типа [172]. При этом температурные режимы в таких термически массивных слоях до настоящего времени практически не исследовались. В то же время современные представления о процессах тепло- и массопереноса, протекающих при сушке древесной биомассы, основаны на гипотезе о её равновесном и стационарном состоянии в период нагрева [173]. По этой причине определение динамики температурного поля в слое влажной древесной биомассы при радиационно-конвективном нагреве представляет особый интерес.

#### 3.1 Поля температур в массивном слое древесной биомассы при радиационно-конвективном нагреве

По результатам экспериментальных исследований процессов тепло- и массопереноса, протекающих в массивном слое (толщиной  $h=100\pm 1$  мм) влажной древесной биомассы при радиационно-конвективном нагреве, получена зависимость характерных времён дегидратации ( $\tau_d$ ) навески сосновой стружки массой  $m_{\text{bio}}=300\pm 1$  грамм от температуры внешней среды ( $T_g$ ) в диапазоне от 333 до 393 К (рисунок 3.1.1). Установлено, что температура внешней среды оказывает существенное влияние на интегральные характеристики процесса дегидратации навески биомассы. При этом имеет место существенно нелинейный характер (можно сказать экспоненциальный) зависимости  $\tau_d(T_g)$ . Это обусловлено совместным влиянием комплекса теплофизических процессов (нагрев за счет

конвекции и излучения, теплопроводность), протекающих в условиях интенсивных фазовых превращений (испарение воды) и фильтрации водяных паров в слое биомассы. Аппроксимационное выражение зависимости  $\tau_d(T_g)$  имеет вид:

$$\tau_d(T_g) = 50126 \cdot e^{-0,023 \cdot T_g} \quad (3.1.1)$$

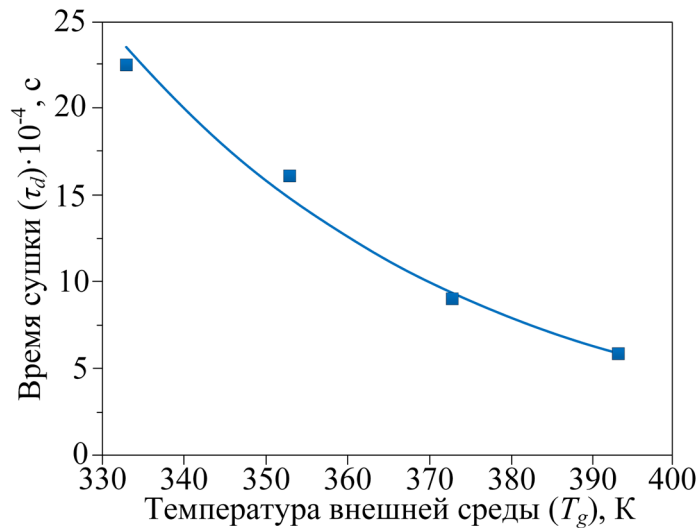


Рисунок 3.1.1. Зависимость времени сушки ( $\tau_d$ ) массивного слоя древесной стружки от температуры внешней среды ( $T_g$ )

Для измерения температур в массивном слое влажной древесной биомассы при её радиационно-конвективном нагреве использовался экспериментальный стенд, представленный в пункте 2.2 (рисунок 2.2.1). На рисунках 3.1.2а–г приведены результаты экспериментальных исследований температурных полей в массивном слое влажной сосновой стружки в период её нагрева при варьировании температуры внешней среды ( $T_g$ ) в диапазоне от 333 до 393 К. Представлены зависимости безразмерных температур в слое материала и над его поверхностью ( $\theta = T/T_g$ , где  $T$  – температура в точках размещения термопар, схема расположения термопар представлена на рисунке 2.2.2;  $T_g$  – температура внешней среды) и безразмерной массы внутрипоровой влаги ( $M_w = (m_{\text{био}} - m_d)/m_{\text{био}}$ , где  $m_{\text{био}}$  – масса влажной навески биомассы;  $m_d$  – масса сухой навески) от безразмерного времени сушки ( $\xi = \tau/\tau_d$ , где  $\tau$  – время;  $\tau_d$  – полное время сушки) при варьировании температуры внешней среды ( $T_g = 333\text{--}393$  К).



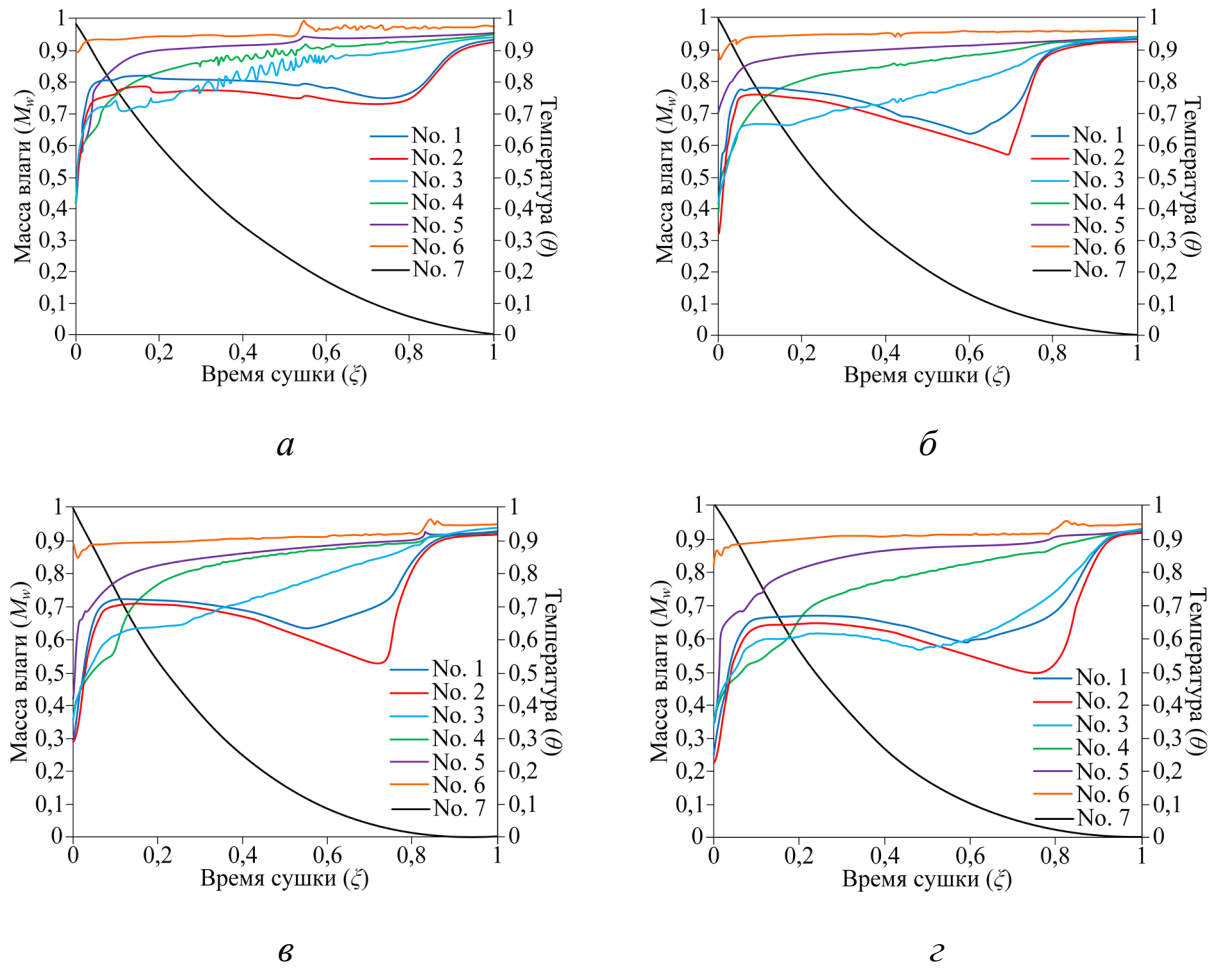


Рисунок 3.1.2. Зависимости безразмерных температур ( $\theta$ ) и массы влаги ( $M_w$ ) от безразмерного времени сушки ( $\xi$ ) при температуре в сушильной камере ( $T_g$ ): *а* – 333 К; *б* – 353 К; *в* – 373 К; *г* – 393 К, где номерами 1–6 обозначены безразмерные температуры ( $\theta$ ), соответствующие номерам термопар, приведенных на рисунке 2.2.2, 7 – безразмерная масса влаги ( $M_w$ )

Анализ зависимостей, представленных на рисунках 3.1.2*а–г* показывает, что в период нагрева влажной древесной стружки в её слое формируется немонотонно изменяющееся сложноструктурированное температурное поле. В начальный период нагрева температура во всех точках размещения термопар №1–5 быстро возрастает до значений  $\theta=0,5–0,8$ , а затем начинает уменьшаться до тех пор, пока вся влага из материала не удалится. После этого температура слоя биомассы растет до значений, сопоставимых с температурой внешней среды. Такая тенденция характерна для всего исследуемого диапазона температур внешней среды ( $T_g=333–393$  К). Термопара №6 измеряет температуру непосредственно над

поверхностью слоя навески биомассы (рисунок 2.2.2), поэтому резкого и высокоградиентного изменения температур не наблюдалось.

Динамику температур на рисунках 3.1.2а–г можно объяснить следующим: с ростом температуры повышается скорость испарения влаги. Этот фазовый переход сопровождается интенсивным поглощением теплоты в малой по размерам зоне, соответствующей окрестности границы раздела «влажная биомасса – сухая биомасса» (рисунок 3.1.3). Так как пористость навески древесной стружки велика (составляет около 55 %), водяной пар быстро заполняет поры (другими словами, пустоты между элементами древесной стружки). Давление паров воды в малой окрестности зоны интенсивного испарения растёт. Но так как температура смеси «биомасса – воздух – пары воды» в слое, прилегающем к открытой поверхности навески выше, чем в её нижней части (нагреваемой менее интенсивно), то часть водяных паров фильтруется в относительно холодную часть навески. При охлаждении водяных паров происходит их конденсация на поверхностях элементов древесной стружки. В результате концентрация 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.

Как известно из работ М. Кнудсена [174], И. Ленгмюра [175], Г. Герца [176] и Дж. Максвела [177] скорость влагоудаления в значительной степени зависит от градиента концентрации водяных паров непосредственно над поверхностью испарения. В случае же типичном для массивного слоя биомассы (на стадии сушки перед сжиганием) нет общего фронта испарения так, как если бы слой биомассы был бы частично заполнен водой. Испарение влаги происходит с поверхностей отдельных элементов древесной стружки. Конденсация, соответственно, также происходит на поверхностях этих элементов. По мере прогрева слоя древесной биомассы часть образовавшихся при испарении воды паров под действием малого (но достаточного для фильтрации) перепада давления фильтруется в нижние слои и там конденсируется.

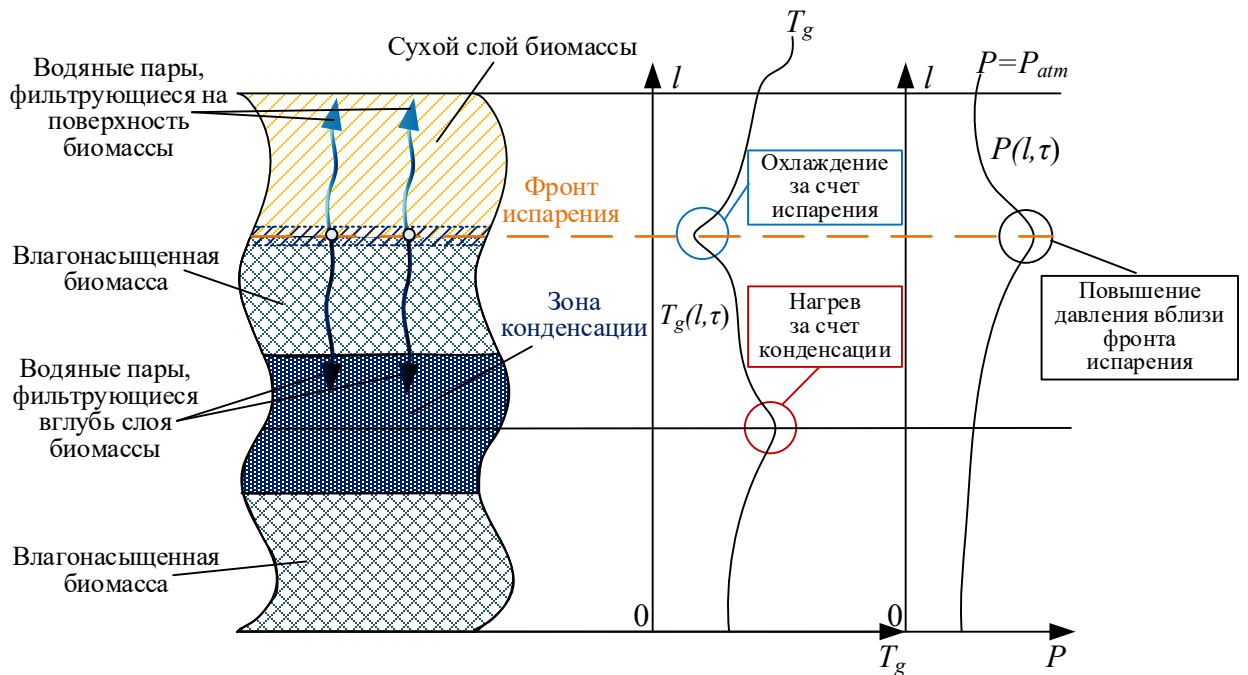


Рисунок 3.1.3. Физическая модель процессов тепло- и массопереноса, протекающих в массивном слое влажной древесной биомассы (навеска сосновой стружки) при радиационно-конвективном нагреве

В результате с ростом времени и, соответственно, продвижением фронта испарения растет отток теплоты вследствие испарения в нижних слоях навески биомассы. Этот эффект (понижение температуры) и регистрируют первая и вторая термопары (рисунок 3.1.2). Установленный механизм влагоудаления характерен для всего исследовавшегося диапазона температур внешней среды (по отношению к навеске биомассы), но с ростом  $T_g$  проявляется более отчётливо, так как увеличение температуры приводит к повышению скоростей всех процессов (испарения, фильтрации, конденсации и охлаждения). Стоит отметить, что значительная часть водяных паров не успевает выйти из слоя биомассы во внешнюю газовую среду, поэтому цикл конденсации паров и последующего испарения вторичного конденсата по мере прогрева слоя биомассы повторяется.

### 3.1.1 Анализ влияния условий теплообмена и выхода паров воды на характеристики процесса влагоудаления в массивном слое древесной биомассы

Приведённые выше (рисунок 3.1.2) закономерности процессов тепло- и массопереноса, протекающих при сушке массивного слоя древесной биомассы, существенно нетривиальны и их описание ранее практически не проводилось. По этой причине с целью проверки вышеизложенной гипотезы (физической модели тепломассопереноса в массивном слое влажной древесной биомассы при её радиационно-конвективном нагреве (пункт 3.1)) проведены дополнительные эксперименты с целью анализа влияния конфигурации ёмкости с биомассой и условий теплообмена на динамику температурного поля. На рисунках 3.1.1.1*а–в* представлены исследовавшиеся конфигурации кубической ёмкости с биомассой: *а)* открытая верхняя крышка, нижняя крышка закрыта; *б)* закрытая верхняя крышка, нижняя заменена мелкой сеткой (с целью предотвращения выпадения биомассы дно перетянута тонкой сеткой с размером зерна квадратной формы 1 мм); *в)* открытая верхняя крышка, нижняя заменена мелкой сеткой. Последние два варианта существенно отличаются от первой схемы (рисунок 3.1.1.1*а*) условиями нагрева и выхода паров воды.

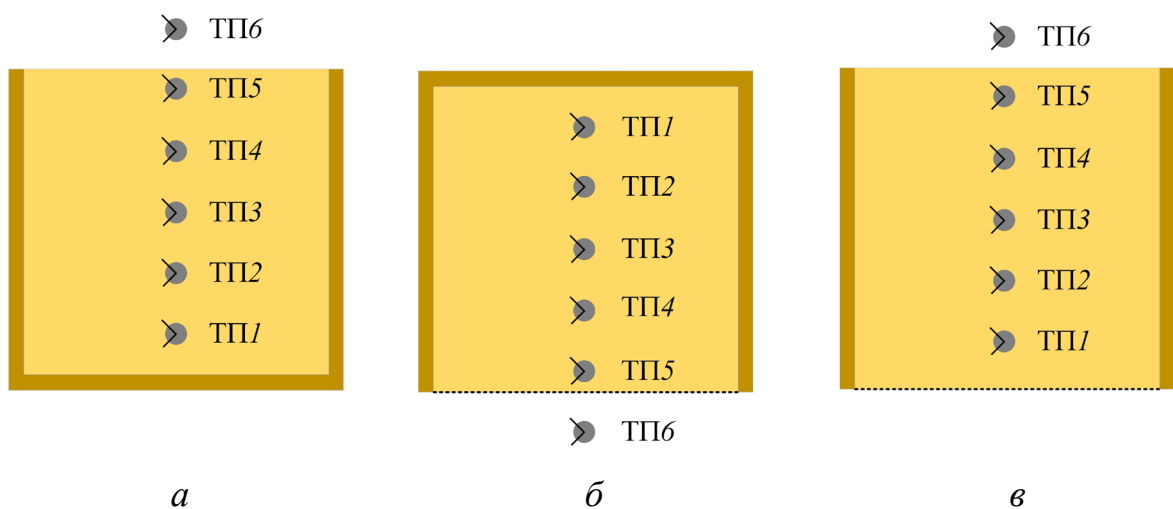


Рисунок 3.1.1.1. Конфигурации ёмкости с биомассой в сушильной камере: *а* – открытая верхняя крышка, нижняя закрыта (соответствует рисунку 2.2.2);

*б* – закрытая крышка сверху, нижняя заменена мелкой сеткой; *в* – открытая верхняя крышка, нижняя заменена мелкой сеткой, номера 1–6 соответствуют номерам термопар, установленным в слое древесной стружки

На рисунках 3.1.1.2*а–в* приведены зависимости безразмерных температур от безразмерного времени сушки  $\theta(\xi)$  для трёх вариантов конфигураций ёмкости с биомассой в сушильной камере. Анализ распределений во времени температур в характерных точках навески биомассы даёт основания для вывода о том, что изменение условий нагрева биомассы и выхода паров воды не приводит к изменению механизма теплопереноса в рассматриваемых условиях. Локальные минимумы зависимостей  $\theta(\xi)$  отчётливо видны на термограммах каждого из трёх исследовавшихся в экспериментах варианта условий нагрева и выхода водяных паров (рисунок 3.1.1.2). Координата минимума температуры на кривой  $\theta(\xi)$ , соответствующей второй термопаре, иллюстрирует время завершения процесса испарения всей влаги из слоя древесной стружки. Можно отметить, что это время в условиях третьего варианта конфигурации ёмкости с биомассой (рисунок 3.1.1.2*в*) минимально, так как проницаемыми являются и верхняя и нижняя поверхности ёмкости. Пары воды в этом случае выходят через обе поверхности.

Установленные по результатам выполненных экспериментов закономерности подтверждают вышеизложенный вывод (пункт 3.1) о том, что механизм влагоудаления из массивного пористого слоя влажной древесной биомассы существенно отличается от общепринятого [103, 178]. Если, как в рассматриваемом случае, пористость открытая и поры не заполнены водой, то при нагреве биомассы происходит движение водяных паров не только к поверхности нагрева, но и в противоположном направлении (рисунок 3.1.3). Это в конечном итоге приводит к тому, что рост температуры внешней среды не интенсифицирует процесс удаления влаги (как было бы в случае заполнения водой всех пор). Полученные результаты дают основания для вывода о том, что при сушке массивного слоя (толщиной  $h=100\pm 1$  мм) влажной древесной биомассы возможно

существенное снижение затрат энергии на удаление влаги в период подготовки биомассы к сжиганию за счет использования теплоты конденсации водяных паров в структуре биомассы.

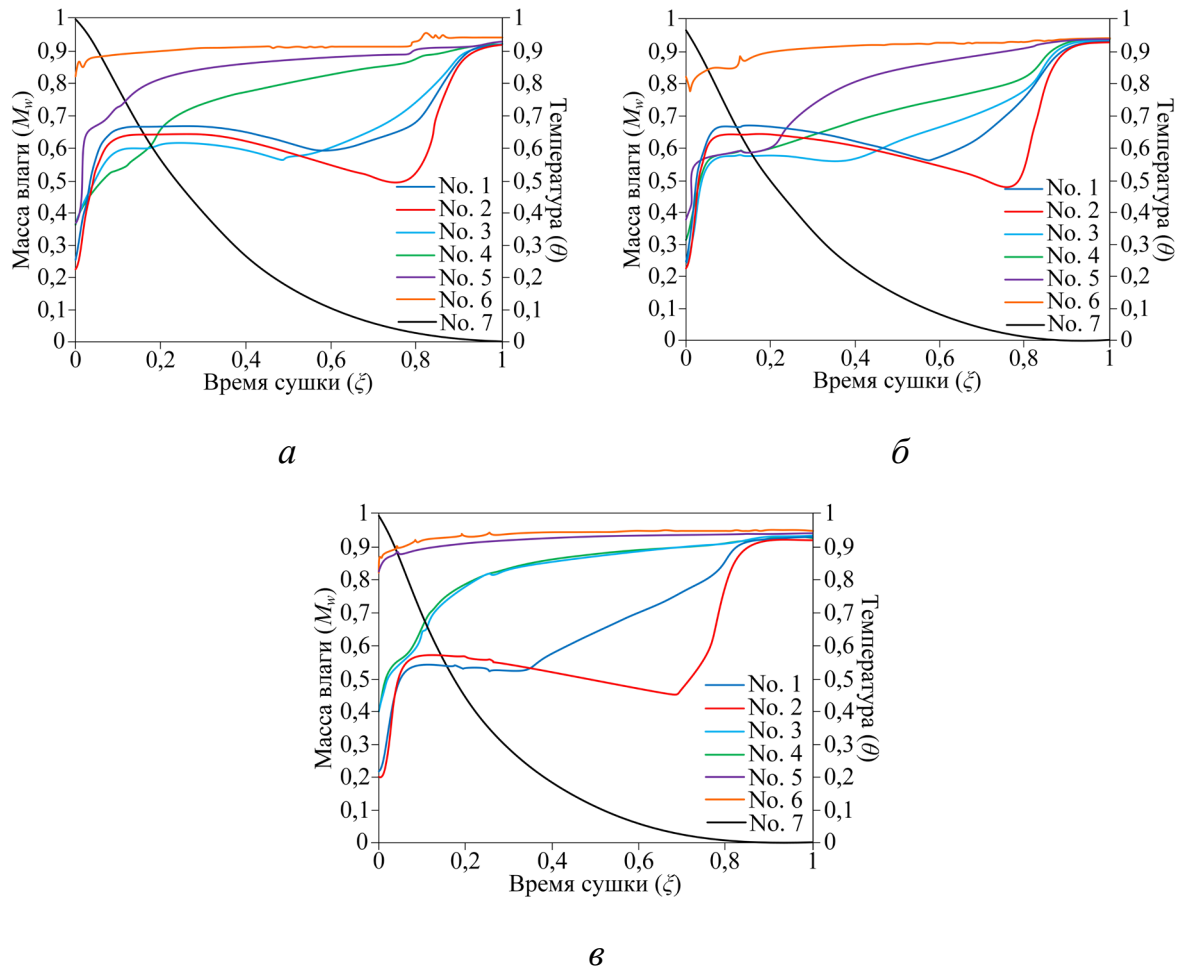


Рисунок 3.1.1.2. Зависимости безразмерной температуры ( $\theta$ ) и безразмерной массы влаги ( $M_w$ ) от безразмерного времени сушки ( $\xi$ ) при различных конфигурациях ёмкости с биомассой в сушильной камере: *а* – открытая верхняя крышка, нижняя закрыта; *б* – закрытая крышка сверху, нижняя заменена мелкой сеткой; *в* – открытая верхняя крышка, нижняя заменена мелкой сеткой, номерами 1–6 обозначены безразмерные температуры ( $\theta$ ), 7 – безразмерная масса влаги ( $M_w$ )

### 3.1.2 Параметрический анализ процесса сушки массивного слоя древесной стружки

При разработке единой теории процессов сушки древесной биомассы, на основе которой обосновываются конструктивные характеристики сушильных

установок в период опытно-конструкторских работ, требуются знания основных закономерностей физических процессов, протекающих в слое влажной древесной биомассы при её нагреве. Эти характеристики позволят определить основные фазы сушки и сформировать основные элементы теории процессов дегидратации при нагреве древесной биомассы.

Однако следует отметить, что в пункте 3.1 не был проведен параметрический анализ, который позволил бы различать фазы сушки древесной биомассы. С целью проведения такого анализа и выделения характерных фаз процесса влагоудаления из древесной биомассы введён безразмерный критерий Ребиндера, выражающий отношение теплоты затраченной на нагрев воды к теплоте затраченной на испарение воды [179]:

$$Rb = \frac{\overline{M}_w \cdot C_p \left| \frac{dT}{d\tau} \right|}{Q_{eva} \left| \frac{dM_w}{d\tau} \right|} \quad (3.1.2.1)$$

где  $\overline{M}_w$  – среднее (по времени) влагосодержание навески биомассы, кг;  $C_p$  – теплоемкость биомассы, Дж/(кг·К);  $\overline{T}$  – средняя (по объему) температура слоя биомассы, К;  $\tau$  – время сушки, с;  $Q_{eva}$  – удельная теплота испарения воды ( $Q_{eva} = 2,3 \cdot 10^6$  Дж/кг [180]);  $M_w$  – безразмерная масса испарившейся влаги.

Среднее (по времени) влагосодержание биомассы находилось из выражения:

$$\overline{M}_w = \frac{1}{\tau_d} \int_0^{\tau_d} M_w d\tau. \quad (3.1.2.2)$$

Средняя (по объему) температура слоя биомассы рассчитывалась из выражения:

$$\overline{T} = \frac{1}{V} \int_0^V T dV, \quad (3.1.2.3)$$

где  $V$  – объём ёмкости, м<sup>3</sup>.

Как было установлено выше (пункт 3.1), при удалении влаги из массивного слоя древесной биомассы в нём формируется сложноструктурированное немонотонно изменяющееся во времени температурное поле (рисунок 3.1.2.1). Такое изменение температур, скорее всего, обусловлено движением водяных паров в слое биомассы и многократной последовательной, и параллельной (для разных мест локализации фрагментов биомассы в слое) их конденсацией. В то же время по

результатам анализа температурных полей установлено, что при сушке влажной древесной стружки условно можно выделить три последовательных этапа (рисунок 3.1.2.1): первый – быстрый рост температуры; второй – температура в слое биомассы изменяется немонотонно; третий этап – характеризуется повышением температуры до значений, сопоставимых с температурой внешней среды.

На рисунке 3.1.2.1 показаны зависимости безразмерных значений средней температуры ( $\bar{\theta} = \bar{T}/T_g$ ), влагосодержания ( $\zeta = M_w/m_{\text{bio}}$ ) слоя древесной биомассы и критерия Ребиндера (Rb) от безразмерного времени сушки ( $\xi = \tau/\tau_d$ ).

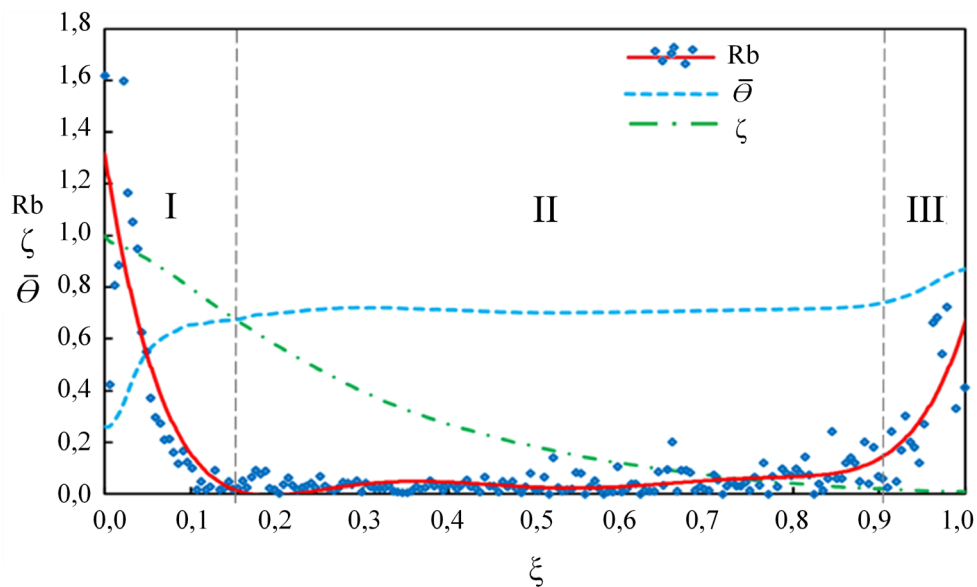


Рисунок 3.1.2.1. Зависимости безразмерных значений температур ( $\bar{\theta}$ ), влагосодержания ( $\zeta$ ) и критерия Ребиндера (Rb) от безразмерного времени сушки ( $\xi$ ) массивного слоя древесной стружки

На рисунке 3.1.2.1 можно отчетливо выделить три этапа удаления влаги: первый ( $0 < \xi < 0,15$ ) – характеризуется повышением температуры ( $\bar{\theta}$ ) в слое биомассы и снижением критерия Ребиндера (Rb); второй ( $0,15 < \xi < 0,9$ ) – температура не меняется (сушка протекает в квазиравновесном состоянии), в то время как значение критерия Ребиндера стремится к нулю ( $Rb \approx 0$ ); третий этап ( $0,9 < \xi < 1$ ) – характеризуется повышением температуры в слое биомассы и увеличением значения Rb. Такие зависимости Rb и  $\bar{\theta}$  можно объяснить следующим: в начальный период сушки происходит относительно быстрый нагрев



биомассы до температур, при которых процесс испарения влаги значительно интенсифицируется. Затем испарение влаги протекает в квазиравновесном режиме, при этом средняя температура биомассы не меняется. Последнее связано с тем, что все тепло, подводимое к биомассе, расходуется на фазовый переход. После испарения внутриводной влаги слой биомассы нагревается (3 этап сушки), а значения критерия Ребиндера ( $R_b$ ) увеличиваются. В то же время можно отметить, что в период времени  $0,9 < \xi < 1$  продолжается уменьшение массы внутриводной влаги ( $\zeta$ ). Скорее всего, это связано с тем, что после испарения всей влаги водяной пар в течение относительно продолжительного периода времени продолжает диффундировать к открытой поверхности навески биомассы. Это подтверждает вышеприведенную гипотезу (пункт 3.1) о значимости процессов фильтрации водяного пара при сушке древесной биомассы.

### **3.1.3 Сравнительный анализ, полученных температурных трендов с известными данными**

Полученные по результатам экспериментов зависимости температур в слое древесной стружки от времени сушки показывают, что при нагреве влажной биомассы в её структуре формируется существенно неоднородное и немонотонно изменяющееся температурное поле с локальными холодными и перегретыми зонами. Это обусловлено совместным влиянием комплекса процессов тепло- и массопереноса (нагрев за счет конвекции и излучения; фильтрация водяных паров сквозь пористый материал; испарение и конденсация влаги), протекающих при сушке древесной биомассы. Полученные зависимости (рисунок 3.1.2) достаточно нетривиальны. По этой причине необходимо проведение сравнительного (с целью подтверждения подобного эффекта) анализа с известными данными аналогичных экспериментов.

Можно отметить несколько работ (например, [163, 165]), авторы которых установили закономерности, которые в некоторой степени повторяют полученные при проведении диссертационной работы зависимости. В [163] приведены

результаты экспериментального определения температурных полей при сушке биомассы (на основе древесных опилок и щепы) при продувке через слой высокотемпературного воздуха в проточном теплоизолированном реакторе (рисунок 3.1.3.1). Температура биомассы измерялась комплексом из 9 хромель-алюмелевых термопар. По результатам экспериментов установлены температурные тренды в точках расположения термопар (рисунок 3.1.3.2a).

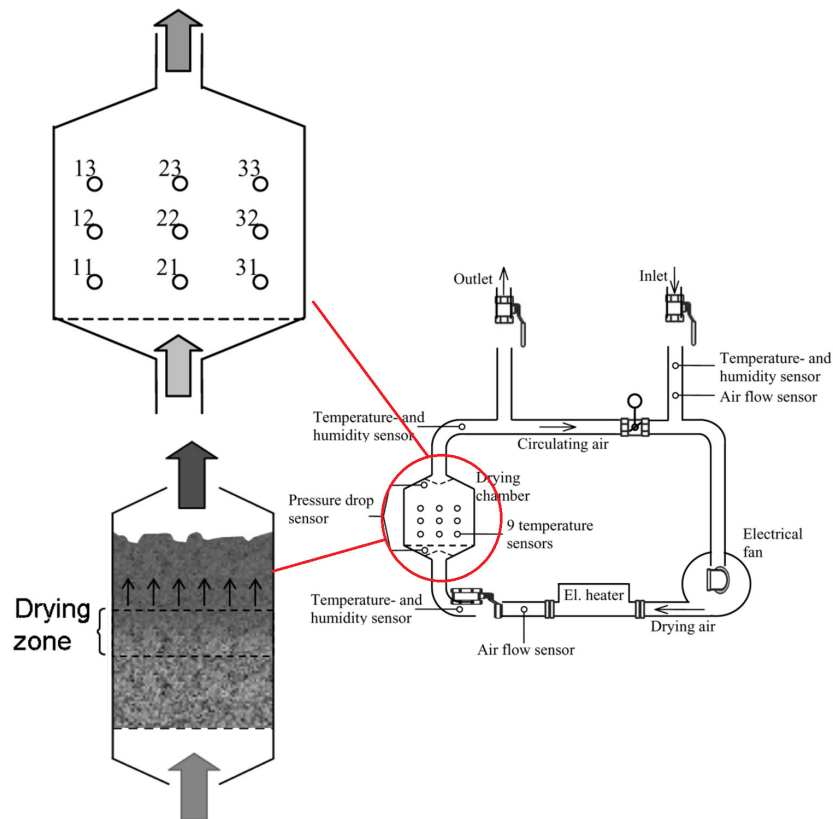
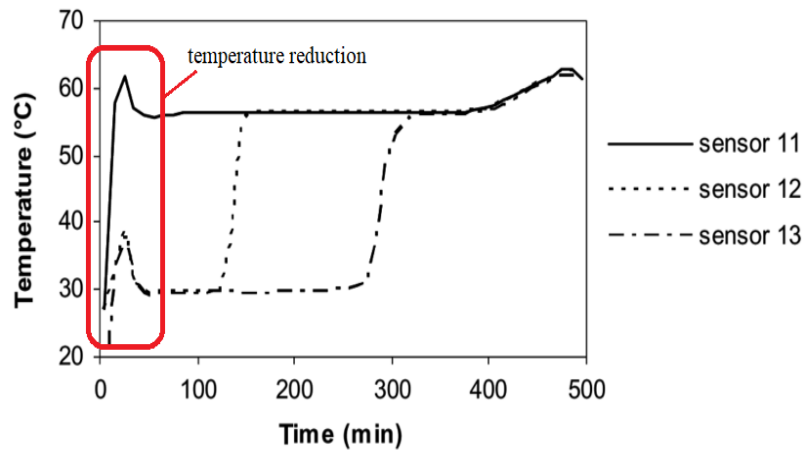


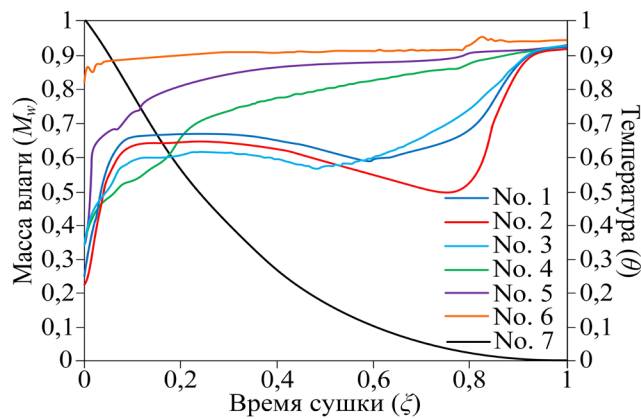
Рисунок 3.1.3.1. Схема экспериментального стенда [163]

На рисунке 3.1.3.2a приведены зависимости температур в местах установки термопар 11, 12 и 13 от времени сушки. Можно отметить, что авторами [163] установлен аналогичный эффект уменьшения температуры в слое древесной биомассы при сушке и последующее её повышение после полного испарения внутрипоровой влаги. Но объяснения динамики температурного поля и физического описания механизма тепло- и массопереноса в период нагрева древесной биомассы авторами не приведено. Скорее всего, авторы [163] не смогли сформировать соответствующую гипотезу, описывающую процессы, протекающие в слое влажной древесной биомассы при её нагреве. Для сравнения результатов на

рисунке 3.1.3.2б приведены температурные тренды в слое биомассы, установленные экспериментально по результатам диссертационного исследования.



а



б

Рисунок 3.1.3.2. Температурные тренды в слое древесной биомассы при её сушке: *а* – в проточном теплоизолированном реакторе [163]; *б* – результаты экспериментальных исследований при температуре внешней среды  $T_g=393$  К

Также известны работы Красникова [165, 166], в которых приведены результаты исследований механизма влаго- и теплопереноса при сушке тонкого (толщиной от 0,16 до 1,0 мм) слоя спрессованной целлюлозы в условиях кондуктивного нагрева. В [165] исследовалось влияние температуры источника нагрева на температурные поля слоя целлюлозы. На рисунке 3.1.3.3 приведены зависимости температуры и влажности целлюлозы от времени сушки [165]. Величина  $X$  показывает глубину крепления спая термопар. Можно отметить, что в [165] установлено четыре этапа сушки: нагрев целлюлозы (рост температуры),

стратификация (температура не изменяется), охлаждение и снова рост температуры. Другими словами, в [165] установлено, что в слое биомассы после некоторого периода нагрева происходит снижение температуры в условиях продолжающегося теплового воздействия. Авторами [165] выдвинута гипотеза, что это обусловлено началом термического разложения и выходом, соответственно, адсорбционно-связанной влаги. Но стоит сказать, что в соответствии с данными [81] термическое разложение биомассы начинает происходить при нагреве её выше 393 К. Соответственно, в условиях низких температур внешней среды  $T_g=333\text{--}353\text{ К}$  (как в экспериментальных исследованиях, приведенных на рисунках 3.1.2а–б) термического разложения древесной биомассы не происходит, при этом эффект снижения температуры внешней среды начинается уже при значениях  $T_g=333\text{ К}$ .

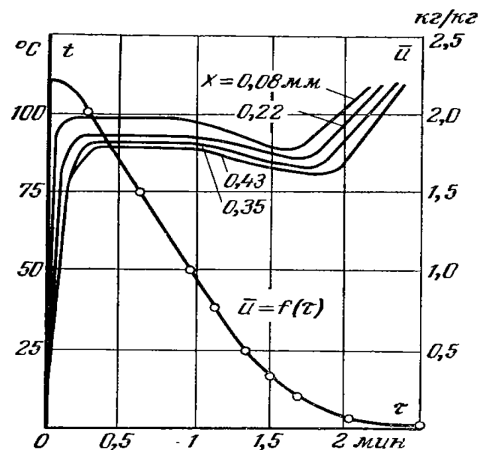


Рисунок 3.1.3.3. Зависимости температуры и влажности слоя тонкой (толщиной  $h=1,0\text{ мм}$ ) спрессованной целлюлозы от времени при её кондуктивном нагреве (температура источника тепла 403 К) [165]

## 3.2 Анализ влияния вида древесной биомассы на характеристики и условия процесса дегидратации

Очевидно, что обоснование выбора вида древесной биомассы для её использования в качестве топлива на промышленных предприятиях, локальных котельных и ТЭС является достаточно сложной многокритериальной задачей оптимизации [181], для которой не существует эффективного алгоритма выбора

доминирующих и не доминирующих вариантов. К последним относится локализация мест сбора биомассы, её энергетический потенциал, экологические характеристики сжигания и т.д.

Одним из важнейших параметров факторного пространства, оказывающего влияние на выбор режима сушки биомассы, является характер процесса её дегидратации. При этом стоит отметить, что на настоящий момент недостаточно изучено влияние вида древесной биомассы на характеристики процесса дегидратации. По этим причинам представляет интерес вопрос: «Какое влияние оказывает вид отходов деревообработки и лесных горючих материалов на характеристики и условия протекания процесса дегидратации при радиационно-конвективном нагреве?».

### **3.2.1 Сушка тонкого слоя древесной биомассы на основе листьев деревьев**

Проведены экспериментальные исследования процессов дегидратации тонкого слоя (толщиной  $h \approx 1-1,5$  мм) древесной биомассы на основе свежесрезанных листьев четырёх пород древесины: берёза, тополь, клён ясенелистный и ива (расположение и конфигурация листьев в ёмкости приведена на рисунке 2.1.1д). По результатам экспериментальных исследований установлено, что независимо от породы дерева динамика процесса удаления влаги из листьев идентична. На рисунках 3.2.1.1а-г приведены зависимости массовой скорости влагоудаления ( $W_{eva}$ ) от времени сушки ( $\tau$ ) для четырех исследованных пород лиственной биомассы при различных температурах внешней среды.

Анализ зависимостей  $W_{eva}(\tau)$ , приведенных на рисунке 3.2.1.1а-г, показывает влияние температуры внутрикамерной среды на интенсивность процесса влагоудаления. Можно отметить, что в среднем процесс влагоудаления для исследованных видов ЛГМ при температуре  $T_g=393$  К (рисунок 3.2.1.1а) заканчивается примерно через 20 минут. При уменьшении температуры сушильного агента на 60 К (до  $T_g=333$  К) полное время сушки существенно увеличивается с  $\tau_d \approx 1300$  с до  $\tau_d \approx 8000$  с (более чем в 6 раз).

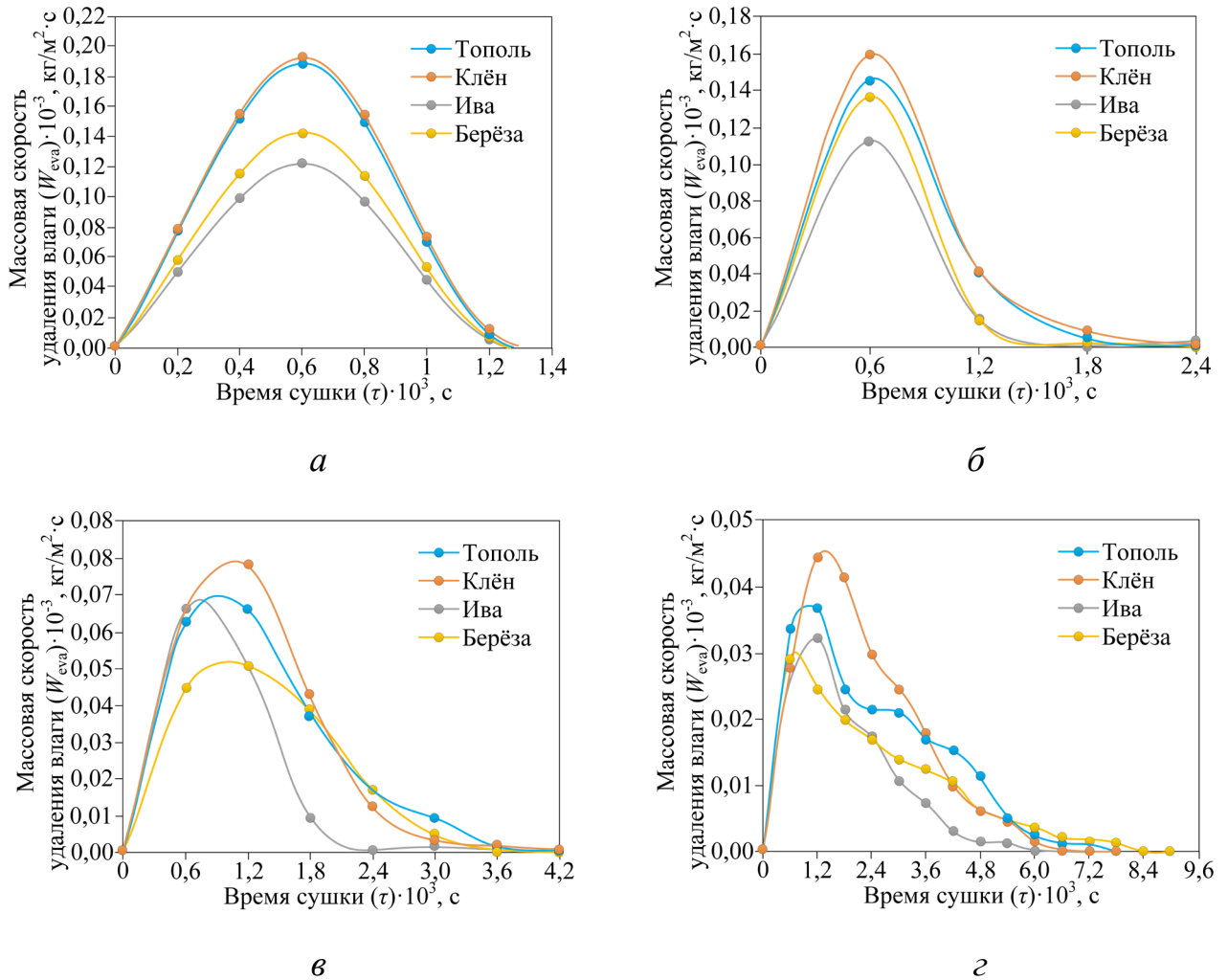


Рисунок 3.2.1.1. Зависимости массовой скорости влагоудаления от времени сушки для четырёх пород лиственных деревьев при температуре внешней среды ( $T_g$ ): *a* – 393 К; *б* – 373 К; *в* – 353 К; *г* – 333 К

При этом, можно отметить, что время дегидратации (в идентичных условиях нагрева) практически не зависит от вида биомассы (или породы дерева). Значения полного времени сушки ( $\tau_d$ ) исследуемых видов лесных горючих материалов отличались не более, чем на 8 % (рисунок 3.2.1.1). Соответственно, можно сказать, что листву различных пород деревьев можно сушить в одной сушильной камере без возникновения рисков пиролиза или возгорания биоматериала.

### 3.2.2 Сушка массивного слоя древесной биомассы на основе листового и хвойного опада, а также древесных опилок и щепы

В условиях реальной практики сушка лесных горючих материалов и отходов деревообработки проводится, как правило, в больших объёмах. Соответственно, можно обоснованно предположить, что характеристики влагоудаления из тонкого слоя биомассы и массивного будут существенно отличаться. Поэтому представляет интерес изучение динамики влагоудаления из массивного слоя древесной биомассы.

На рисунках 3.2.2.1*а–г* приведены зависимости массовых скоростей влагоудаления ( $W_{\text{eva}}$ ) от времени сушки ( $\tau$ ) массивного слоя (толщиной  $h=10\pm 1$  мм) древесной биомассы при различных температурах внешней среды ( $T_g$ ).

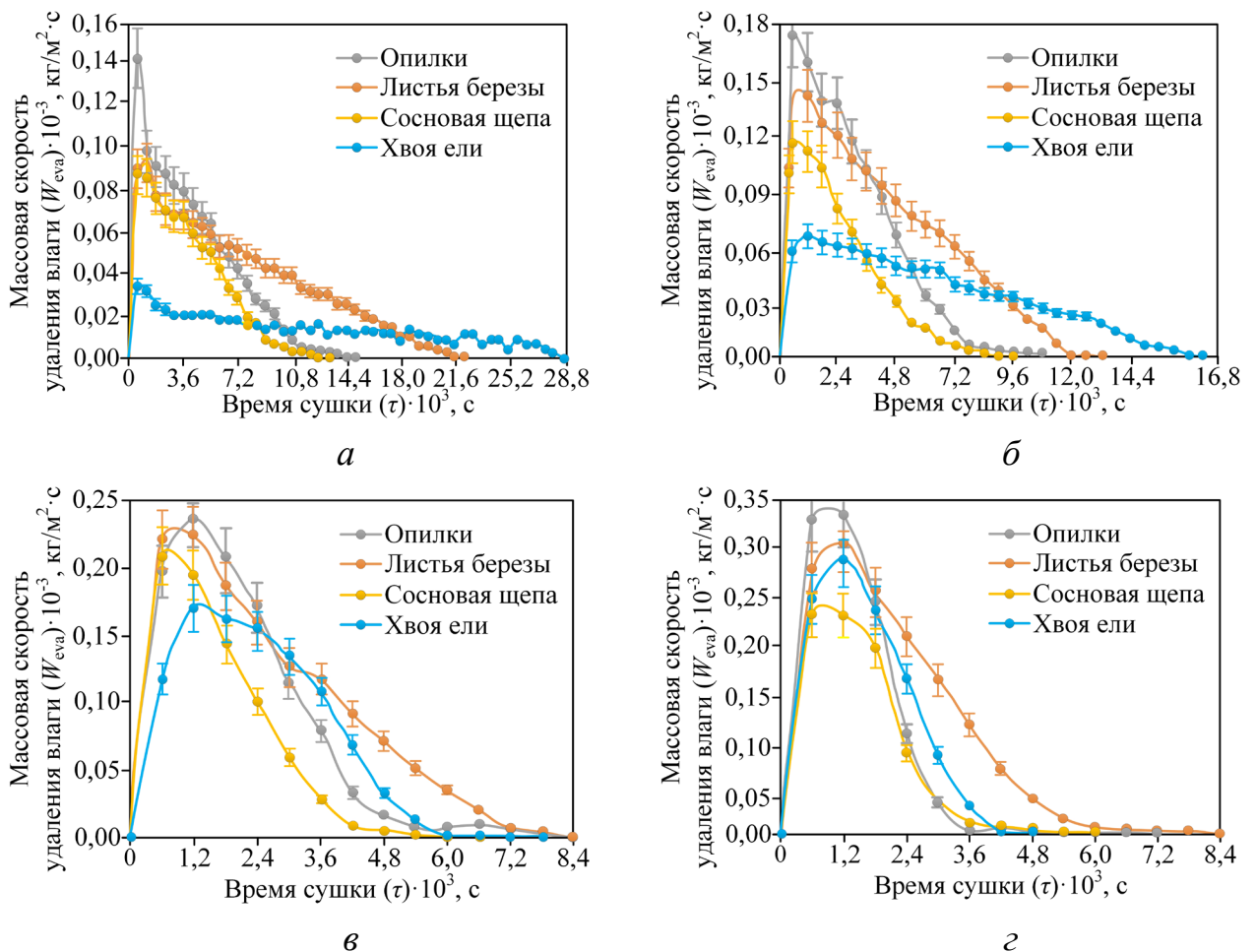


Рисунок 3.2.2.1. Зависимости массовой скорости влагоудаления от времени сушки для четырёх исследовавшихся видов древесной биомассы при температуре окружающей среды ( $T_g$ ): *а* – 333 К; *б* – 353 К; *в* – 373 К; *г* – 393 К

Анализ зависимостей рисунков 3.2.2.1а–г показывает, что при высокотемпературном нагреве ( $T_g \geq 373$  К) максимальные скорости влагоудаления ( $W_{\text{eva}}^{\text{max}}$ ) четырёх исследовавшихся видов биомассы отличаются незначительно (не более 30 %). Например, при  $T_g = 393$  К  $0,24 \leq W_{\text{eva}}^{\text{max}} \leq 0,34$  кг·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>. При этом в условиях относительно низких температур внешней среды ( $T_g < 373$  К) различия значений  $W_{\text{eva}}^{\text{max}}$  для навесок древесной биомассы более значимы (могут отличаться в 4 раза). Скорее всего, интенсивность влагоудаления в этих условиях определяется диффузией водяных паров сквозь пористую структуру древесной биомассы.

На рисунке 3.2.2.2 приведены зависимости полного времени дегидратации ( $\tau_d$ ) четырёх исследовавшихся видов древесной биомассы от температуры внешней среды. Можно отметить существенно нелинейный характер зависимостей  $\tau_d(T_g)$ . Времена процесса полной (до влажности  $\varphi \approx 0$  %) и частичной ( $\varphi \approx 20$  %) дегидратации приведены в таблице 3.2.2.1.

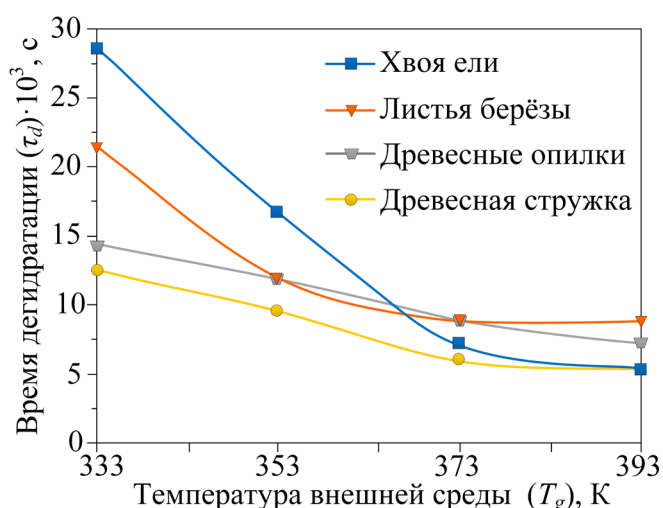


Рисунок 3.2.2.2. Зависимости времени дегидратации навесок древесной биомассы от температуры внешней среды в диапазоне от 333 до 393 К

Анализ зависимостей на рисунке 3.2.2.2 показывает, что при температурах сушильного агента  $T_g \geq 373$  К времена сушки четырёх исследовавшихся видов биомассы отличаются не более чем на 30 %. В то же время в условиях низкотемпературного нагрева (при  $T_g = 333$ – $353$  К) вид биомассы оказывает существенное влияние на характеристики и условия протекания процесса дегидратации. Времена сушки древесной биомассы могут отличаться более чем в



2 раза. Это (как уже описывалось выше) обусловлено тем, что в условиях относительно высоких температур внешней среды ( $T_g=373-393$  К) навеска биомассы быстро нагревается до температуры, при которой массовая скорость влагоудаления максимальна.

Таблица 3.2.2.1. Времена сушки древесной биомассы в условиях радиационно-конвективного нагрева

$T_g,$ К	Время сушки биомассы до влажности $\varphi \approx 0$ %; $\tau^{\varphi=0}$ , с				Время сушки биомассы до влажности $\varphi \approx 20$ %; $\tau^{\varphi=20}$ , с			
	Опилки	$\delta,$ %	Листья березы	$\delta,$ %	Опилки	$\delta,$ %	Листья березы	$\delta,$ %
333	12000	13,5	20600	13,8	6300	13,5	15000	13,8
353	7700	12,8	12500	13,2	4200	12,8	8700	13,2
373	6000	12	7800	12,7	3300	12	4800	12,7
393	3000	11,6	6800	12,3	1800	11,6	4200	12,3
	Щепа		Хвоя ели		Щепа		Хвоя ели	
333	11000	13,5	25000	14,0	4800	13,5	13500	14,0
353	5600	12,8	15000	13,6	1900	12,8	10000	13,6
373	4600	12,8	5000	12,4	1800	12,8	3300	12,4
393	3000	11,5	4000	11,0	1500	11,5	2300	11,0

Как показали проведенные эксперименты (рисунок 3.2.2.1а–г), значения массовой скорости влагоудаления существенно зависят от текущей влажности (влагосодержания) древесной биомассы. Другими словами, с течением времени значения массовой скорости влагоудаления значительно меняются. При этом зависимости  $W_{\text{eva}}(\tau)$  нелинейны и немонотонны. По этой причине более приемлемо использовать средние (по времени сушки) значения скорости влагоудаления:

$$\xi_{\text{eva}} = \frac{1}{\tau_d} \int_0^{\tau_d} W_{\text{eva}} d\tau. \quad (3.2.2.1)$$

На рисунке 3.2.2.3 приведены зависимости средней массовой скорости влагоудаления ( $\xi_{\text{eva}}$ ) от температуры внешней среды ( $T_g$ ). Можно сказать, что с увеличением  $T_g$  средняя скорость влагоудаления существенно возрастает.

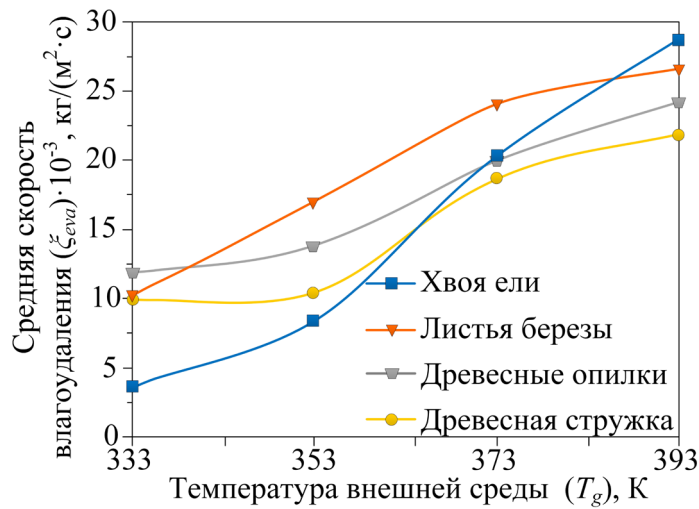


Рисунок 3.2.2.3. Зависимости средней массовой скорости влагоудаления от температуры окружающей среды в диапазоне от 333 до 393 К для навесок четырёх видов древесной биомассы

Так, изменение температуры внешней среды с 333 до 393 К (на 60 К) приводит к повышению  $\xi_{\text{eva}}$ , например, для навески хвой ели средняя массовая скорость влагоудаления возросла с  $3,5 \cdot 10^{-3}$  до  $28 \cdot 10^{-3}$  кг/(м<sup>2</sup>·с). При этом можно отметить, что вид биомассы не оказывает значимого влияния на характерные значения  $\xi_{\text{eva}}$  по сравнению с температурой внешней среды. Это, скорее всего, обусловлено тем, что теплофизические характеристики большинства видов древесной биомассы отличаются незначительно. Также стоит сказать, что в условиях высокой обводненности биомассы преобладающее влияние на значения теплоёмкости ( $C_p$ ), теплопроводности ( $\lambda$ ) и плотности ( $\rho$ ) в такой гетерогенной системе оказывает внутриводная вода.

### 3.2.3 Сушка лесных горючих материалов на основе веток деревьев

Как показали результаты эконометрического технико-экономического анализа [76, 77], одним из перспективных (в качестве топлива) видов лесных

горючих материалов являются ветки, сучья деревьев и т.д. По этой причине представляет интерес изучение процессов влагоудаления при сушке влажных веточек различных пород древесины.

На рисунке 3.2.3.1 приведены зависимости времён сушки веточек различных пород лиственных деревьев от температуры внешней среды. Можно отметить существенно нелинейный (экспоненциальный) характер зависимостей  $\tau_d(T_g)$ . Это обусловлено значимым (определяющим) влиянием процесса испарения воды на динамику влагоудаления. Как известно из работ Кнудсена (например, [174]), массовая скорость влагоудаления прямо пропорциональна разнице давлений насыщения воды ( $P_s$ ) на поверхности испарения и парциального давления водяного пара ( $P_p$ ) в окружающей среде, и обратно пропорциональна квадратному корню температуры поверхности фронта испарения. При этом, как известно из [182], значения  $P_s$  экспоненциально зависят от температуры.

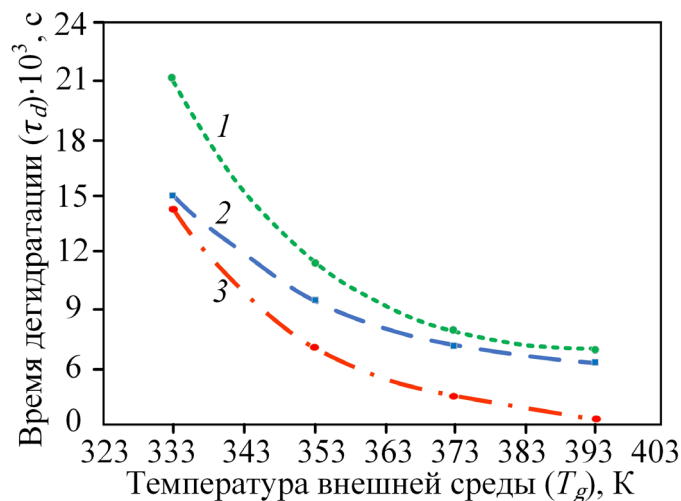


Рисунок 3.2.3.1. Зависимости времён полной дегидратации навесок древесной биомассы от температуры окружающей среды, где: 1 – ветки берёзы; 2 – ветки липы; 3 – ветки тополя

Анализ зависимостей на рисунке 3.2.3.1 показывает, что времена сушки веточек берёзы больше аналогичных времен других исследованных видов древесной биомассы. Это, скорее всего, связано с низкой температуропроводностью и высокой плотностью берёзы по сравнению с тополем и липой (таблица 3.2.3.1). В результате ветки берёзы прогреваются значительно

медленнее других видов древесной биомассы, что приводит к торможению всего процесса дегидратации. В таблице 3.2.3.1 приведены теплофизические характеристики исследовавшейся биомассы. Теплоёмкость влажной навески древесной биомассы рассчитывалась по формуле [183]:

$$C_p = \frac{0,324 \cdot (100 - \varphi_0) + 1 \cdot \varphi_0}{100} \cdot \left[ \frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})} \right]. \quad (3.2.3.1)$$

Теплопроводность влажной биомассы определялась из выражения [184]:

$$\lambda = (1 - \varphi_0) \cdot \lambda_d + \varphi_0 \cdot \lambda_w, \quad (3.2.3.2)$$

где  $\lambda_d$  – теплопроводность сухой биомассы, Вт/(м·К) [185];  $\lambda_w$  – теплопроводность воды  $\lambda_w=0,56$  Вт/(м·К) [186].

Плотность влажной биомассы определялась по формуле [184]:

$$\rho = (1 - \varphi_0) \cdot \rho_d + \varphi_0 \cdot \rho_w, \quad (3.2.3.3)$$

где  $\rho_d$  – плотность сухой древесной биомассы, кг/м<sup>3</sup> [185];  $\rho_w$  – плотность воды кг/м<sup>3</sup> [186].

Таблица 3.2.3.1 Теплофизические характеристики исследовавшихся влажных веточек лиственных деревьев

	Относительная влажность $\varphi_{\text{rel}}$ , %	Теплоёмкость $C_p$ , Дж/(кг·К)	Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·К)	Плотность, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Температуропроводность, $a = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho}$ , м <sup>2</sup> /с, [179]
Ветки липы	45	2627,5	0,367	777,5	$0,017 \cdot 10^{-5}$
Ветки берёзы	45	2627,5	0,334	806,15	$0,016 \cdot 10^{-5}$
Ветки тополя	45	2627,5	0,345	696,15	$0,019 \cdot 10^{-5}$

Также стоит отметить, что проницаемость древесины берёзы много меньше (на 50 %) по сравнению с другими исследовавшимися видами биомассы (ветки липы и тополя) [187]. Как уже говорилось ранее, в этих условиях высокое

фильтрационное сопротивление приводит к торможению процесса испарения внутрипоровой влаги.

На рисунках 3.2.3.2*а–г* приведены зависимости массовых скоростей влагоудаления ( $W_{eva}$ ) от времени ( $\tau$ ) для трёх исследовавшихся видов биомассы.

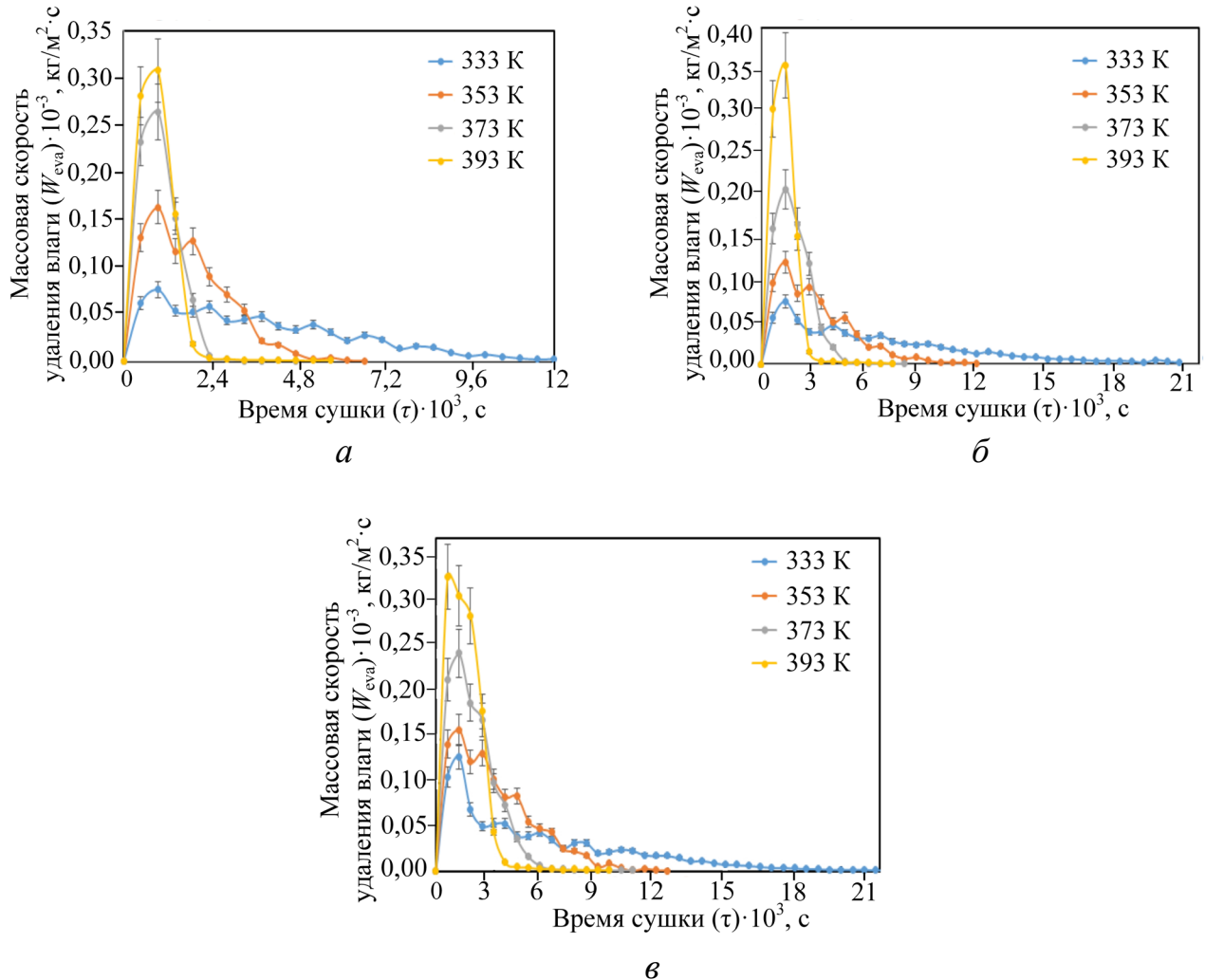


Рисунок 3.2.3.2. Зависимости массовой скорости влагоудаления от времени сушки для трёх видов ЛГМ: *а* – ветки липы; *б* – ветки берёзы; *в* – ветки тополя

Анализ зависимостей  $W_{eva}(\tau)$  показывает, что в начальный период нагрева биомассы ( $0 < \tau \leq 1000 \text{ c}$ ) массовая скорость влагоудаления быстро возрастает и достигает максимального значения при  $\tau \approx 1000 \text{ c}$ . После этого  $W_{eva}$  с течением времени убывает до нуля. Можно отметить существенные отличия зависимостей  $W_{eva}(\tau)$  в двух температурных диапазонах:  $333 \leq T_g \leq 353 \text{ K}$  и  $373 \leq T_g \leq 393 \text{ K}$ . Так, например, в условиях относительно низких температур внешней среды ( $T_g = 333 \text{ K}$ ) зависимости значений массовой скорости влагоудаления от времени немонотонны

(периодически изменяются) в течение всего периода дегидратации. При этом период колебаний ( $\mathcal{J}$ ) значений  $W_{\text{eva}}$  составляет  $\approx 2400$  с. С течением времени  $\mathcal{J}$  увеличивается. При температуре внешней среды  $T_g=353$  К немонотонный характер зависимостей  $W_{\text{eva}}(\tau)$  также сохраняется. При этом, можно отметить, что такая тенденция зависимостей скорости влагоудаления от времени имеет место для всех исследованных видов биомассы.

В то же время по результатам экспериментов установлено, что в диапазоне температур внешней среды  $373 \leq T_g \leq 393$  К такого немонотонного изменения значений  $W_{\text{eva}}$  не зарегистрировано. Такие зависимости  $W_{\text{eva}}(\tau)$  можно объяснить следующим: в условиях относительно низких температур внешней среды ( $T_g < 373$  К) при нагреве влажной древесной биомассы в её структуре комплексно протекают процессы тепло- и массопереноса: испарение воды, фильтрация водяных паров и их диффузия во внешнюю газовую среду. Как известно из [188], при фильтрации водяных паров сквозь пористую структуру любого материала давление в его внутрипоровом пространстве повышается. Последнее приводит к повышению концентрации водяных паров ( $Y_{H_2O}$ ) у границы фронта фазового перехода. При этом, как уже говорилось выше, из теории Кнудсена-Ленгмюра-Герца [189], опытов Максвелла [190] и Фукса [191] известно, что скорость испарения прямо пропорциональна значению разницы давлений ( $\Delta P = (P_p - P_s)$ , где  $P_p$  – давление паров над поверхностью испарения;  $P_s$  – давление насыщения на границе фазового перехода). В результате повышения давления (вследствие фильтрации водяного пара) во внутрипоровом пространстве значения  $\Delta P$  уменьшаются. Это приводит к уменьшению скорости испарения. В результате снижения значений  $W_{\text{eva}}$  уменьшается значение плотности теплового стока ( $N_{\text{eva}} = Q_{\text{eva}} \cdot W_{\text{eva}}$ ). Последнее приводит к повышению скорости нагрева биомассы и интенсификации процесса испарения. Физическая модель процессов тепло- и массопереноса, протекающих при сушке древесных веточек, показана на рисунке 3.2.3.3. В результате совместного протекания вышеописанных фильтрационных и тепловых процессов происходит периодическое изменение значений массовых скоростей влагоудаления (рисунок 3.2.3.2).

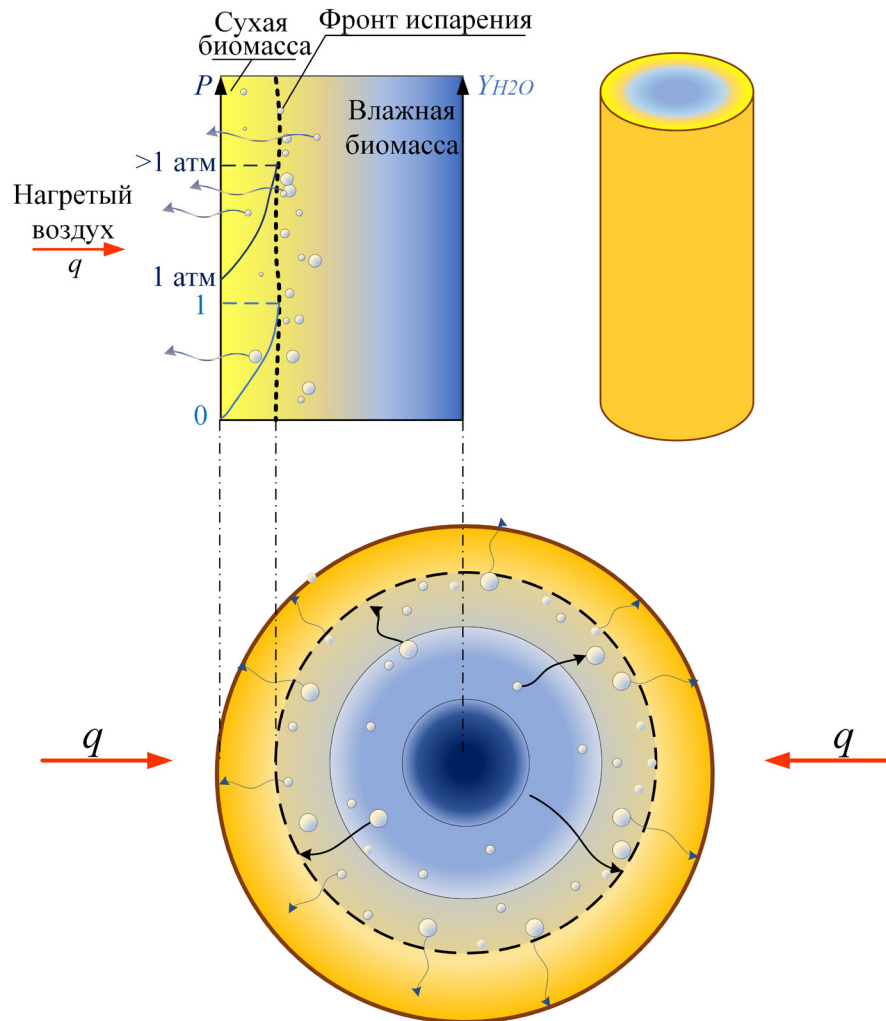


Рисунок 3.2.3.3. Физическая модель процессов тепло- и массопереноса при сушке веточек деревьев

В условиях относительно высоких температур внешней среды ( $T_g \geq 373$  К) испарение протекает в квазистационарном режиме (по терминологии [192]), при этом скорость испарения зависит только от температуры фронта фазового перехода. В этих условиях повышение давления не оказывает значимого влияния на характеристики влагоудаления. При  $T_g \geq 373$  К водяной пар находится в состоянии насыщения (при температуре больше значения  $T_s$  (температура насыщения)). В результате испарение воды протекает в квазистационарном режиме [193]). По этим причинам в условиях высокотемпературного нагрева значения  $W_{eva}$  изменяются монотонно.

С целью демонстрации вышеописанного эффекта периодического изменения скорости влагоудаления на рисунках 3.2.3.4а–г приведены аналогичные рисунку

3.2.3.2а–в зависимости скоростей влагоудаления от времени сушки для трёх исследованных видов биомассы, сгруппированные по значениям температур внешней среды. Анализ зависимостей  $W_{\text{eva}}(\tau)$  позволяет сделать аналогичный рисунку 3.2.3.2 вывод о существовании двух значительно отличающихся режимов сушки биомассы (веточек деревьев): высокотемпературный ( $T_g=373\text{--}393\text{ К}$ ) и низкотемпературный ( $T_g=333\text{--}353\text{ К}$ ), с условной границей раздела по температуре внешней среды  $T_g=373\text{ К}$ .

Анализируя зависимости, приведенные на рисунках 3.2.3.4а–г, можно сделать вывод, что в условиях относительно низких температур внешней среды в процессе дегидратации массовая скорость влагоудаления изменяется немонотонно (значения  $W_{\text{eva}}$  периодически возрастают и уменьшаются во времени). Стоит сказать, что приведенная выше (пункт 2.3) методика вычислений значений  $W_{\text{eva}}$  достаточно трудоёмка вследствие необходимости точного и тщательного измерения площади влагоудаления каждой веточки. Такой метод практически не применим в реальной практике вследствие значительного (можно сказать экспоненциального) увеличения трудозатрат на измерение площади каждой ветки. В этой связи более перспективно проводить вычисления массовой скорости удаления влаги по среднему значению площади влагоудаления. Для этого выражение (2.3.1.1) преобразуем к следующему виду:

$$W_{\text{eva}} = \frac{1}{F_{\text{eva}}} \frac{dm_{\text{bio}}}{d\tau}. \quad (3.2.3.4)$$

Средняя площадь влагоудаления находилась из выражения:

$$\overline{F_{\text{eva}}} = \frac{\pi}{l} \int_0^l d^s \cdot dl. \quad (3.2.3.5)$$

где  $d^s$  – средний диаметр веточки, мм.

Относительные отклонения значений площади влагоудаления рассчитывались по формуле:

$$\delta(F_{\text{eva}}) = 100 \cdot \frac{|F_{\text{eva}} - \overline{F_{\text{eva}}}|}{F_{\text{eva}}}, \%. \quad (3.2.3.6)$$



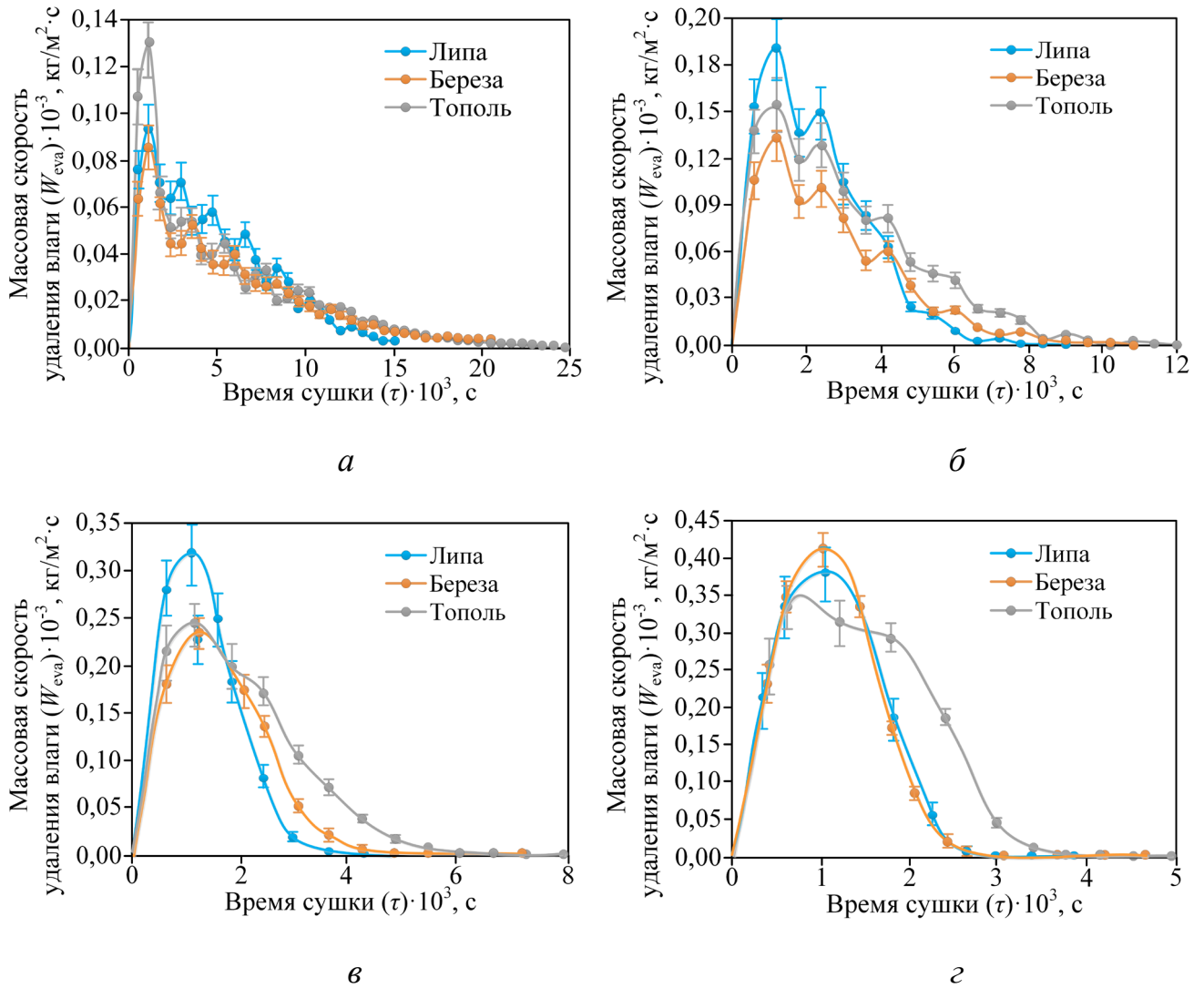


Рисунок 3.2.3.4. Зависимости массовых скоростей влагоудаления от времени сушки для трёх исследованных видов ЛГМ при температуре в сушильной камере ( $T_g$ ): *a* – 333 К; *б* – 353 К; *в* – 373 К; *г* – 393 К

В таблице 3.2.3.2 приведены значения средних (по длине) площадей влагоудаления для веточек липы (для примера приведены измерения для пяти опытов), вычисленных по формулам (2.3.2.1) и (3.2.3.5), а также относительные отклонения ( $\delta$ ) этих значений (формула 3.2.3.6). Анализ приведенных в таблице 3.2.3.2 данных показывает, что  $\delta$  значений площади влагоудаления, рассчитанные по этим формулам, изменяются в диапазоне от 2,5 до 8,0 %.

Таблица 3.2.3.2 Сопоставление площадей влагоудаления для веточек, рассчитанных по формулам (2.3.2.1 и 3.2.3.5) и (3.2.3.6)

Номер опыта, №	Площадь влагоудаления, формула (2.3.2.1) $F_{eva} = \sum_{i=n}^m S_i^{cil}, \text{ м}^2$	Средняя площадь влагоудаления, формула (3.2.3.5) $\overline{F_{eva}} = \frac{\pi}{l} \int_0^l d^s \cdot dl, \text{ м}^2$	Относительные отклонения значений $\delta(F_{eva})$ (формула 3.2.3.6): $\delta(F_{eva}) = 100 \frac{ F_{eva} - \overline{F_{eva}} }{F_{eva}}, \%$
1	0,0162	0,0176	7,96
2	0,0167	0,0173	3,44
3	0,0158	0,0163	2,77
4	0,0189	0,0194	2,53
5	0,0178	0,0194	7,96

На рисунке 3.2.3.5 приведены зависимости массовых скоростей влагоудаления от температуры внешней среды в диапазоне от 333 до 393 К для веточек липы, рассчитанные по формуле (2.3.2.1) – учитывающей форму веток и всех неровностей и средней площади влагоудаления (3.2.3.5) – не учитывающей бугры, сучки и прочие неровности. Можно отметить, что практически во всём исследованном диапазоне температур внешней среды отклонения значений  $W_{eva}$ , рассчитанные в рамках моделей (2.3.2.1) и (3.2.3.5), незначительны и находятся в пределах погрешности. Стоит отметить, что в условиях относительно высоких температур внешней среды ( $T_g \geq 373$  К) в начальный период сушки ( $\tau \leq 2000$  секунд) отличия  $W_{eva}$  более существенны ( $\approx 6\%$ ) по сравнению с сушкой в условиях относительно малых значений  $T_g$ . Это, скорее всего, обусловлено более высокими значениями скоростей влагоудаления при  $T_g \geq 373$  К, чем при относительно низких температурах внешней среды.

Анализ приведенных на рисунке 3.2.3.5 зависимостей позволяет сделать обоснованный вывод, о том, что неравномерности (бугры, впадины, каналы) поверхности веточек не оказывают существенного влияния на прогностические характеристики процесса влагоудаления. Соответственно можно обосновано предположить, что при разработке прогностических моделей процессов сушки лесного горючего материала на основе опавших веточек деревьев, каждую из

которых можно условно представлять в рамках модели гладкой односвязной ограниченной цилиндрической поверхности. При этом скорость влагоудаления из совокупности веточек можно прогнозировать на основании характеристик процесса влагоудаления одной ветки, которая принимается за типичную (или маркерную) компоненту слоя биомассы.

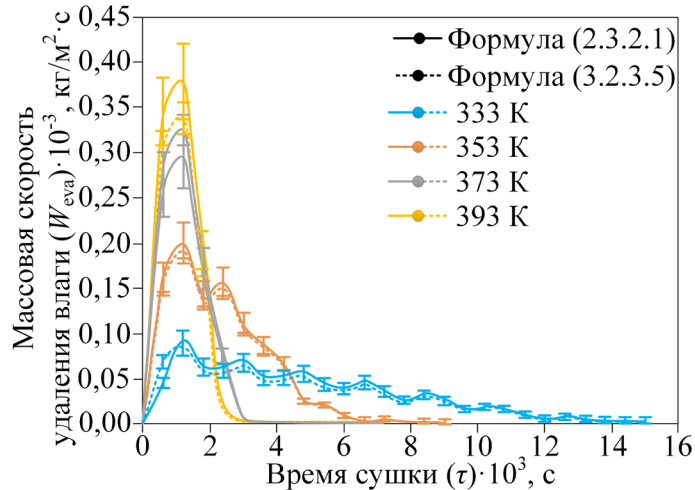


Рисунок 3.2.3.5. Зависимости массовых скоростей удаления влаги из веток липы от времени сушки при различных температурах внешней среды

### 3.3 Анализ влияния плотности засыпки древесной биомассы на характеристики процесса влагоудаления

Как уже говорилось выше, сушка древесной биомассы, как правило, производится в массивных сушильных установках бункерного типа [194]. При этом высота слоя биомассы может достигать десятки метров. В этих условиях градиенты плотности по высоте могут быть существенны. Очевидно, что характеристики влагоудаления из массивного слоя биомассы могут существенно зависеть от плотности её засыпки в сушильной камере. По этой причине проведены эксперименты по анализу влияния степени уплотнения навески влажной древесной биомассы на динамику влагоудаления в условиях радиационно-конвективного нагрева. Методика подготовки биомассы приведена в пункте 2.4.

На рисунках 3.3.1а–г представлены зависимости безразмерных массовых скоростей влагоудаления ( $\mathcal{L} = W_{eva}/W_0$ , где  $W_{eva}$  – массовая скорость влагоудаления

зарегистрированная в экспериментах;  $W_0$  – скорость испарения воды со свободной поверхности при температуре поверхности фронта испарения  $T_{\text{eva}}=T_g$ , рассчитанная в соответствии с методикой [195], представлена в таблице 3.3.1) от безразмерного времени сушки ( $\xi=\tau/\tau_d$ , значения  $\tau_d$  приведены в таблице 3.3.1) для навесок сосновых опилок при варьировании плотности засыпки навески биомассы в диапазоне изменения температур внешней среды от 333 до 393 К. Вертикальные отрезки на рисунках иллюстрируют доверительные интервалы определения безразмерной массовой скорости влагоудаления ( $\mathcal{L}$ ).

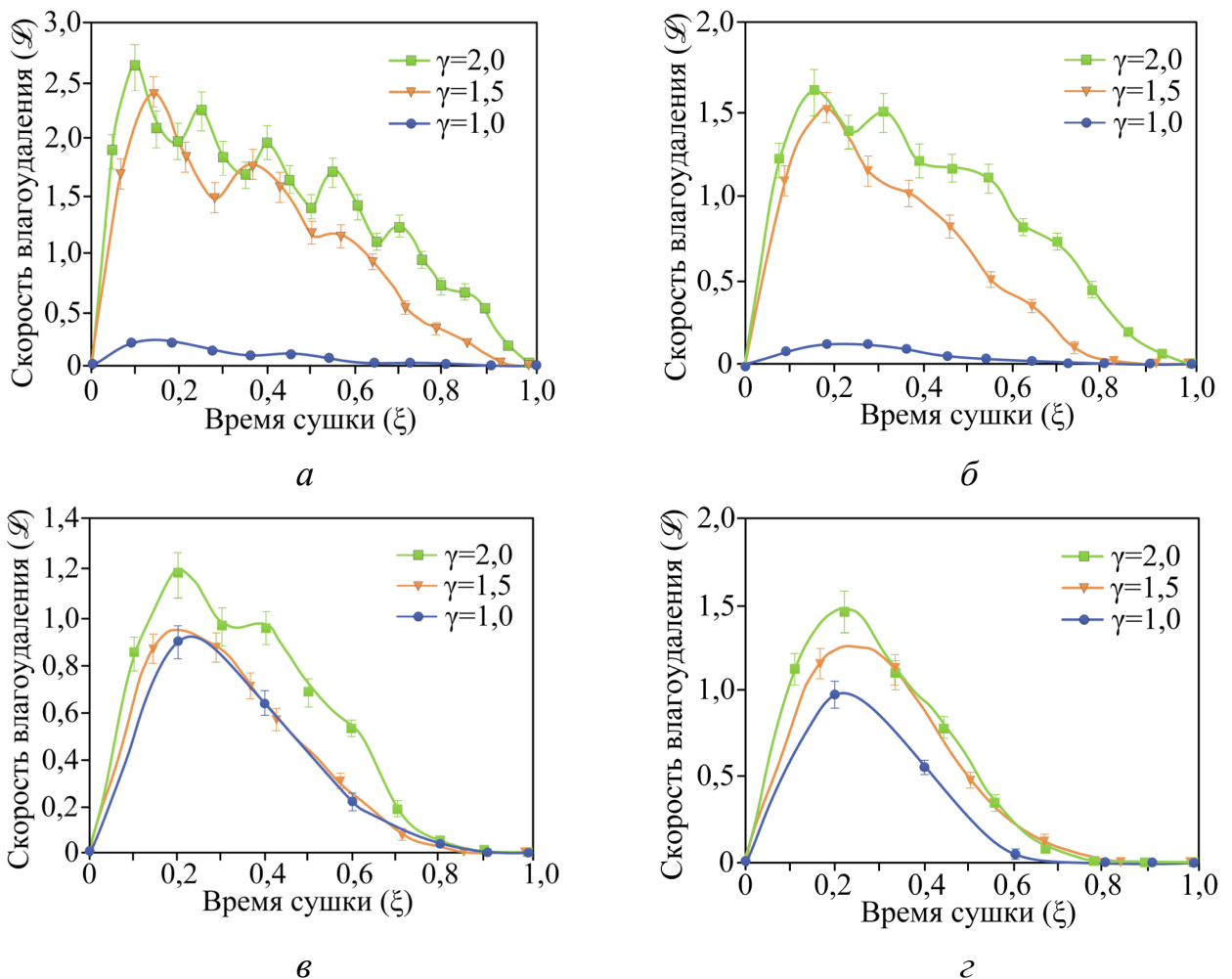


Рисунок 3.3.1. Зависимости безразмерной скорости влагоудаления ( $\mathcal{L}$ ) от безразмерного времени сушки ( $\xi$ ) при различной степени уплотнения навески сосновых опилок при температуре ( $T_g$ ) в сушильной камере: *a* – 333 К; *б* – 353 К; *в* – 373 К; *г* – 393 К

Анализ зависимостей  $\mathcal{L}(\xi)$ , приведенных на рисунках 3.3.1а–г, показывает, что степень уплотнения навески биомассы ( $\gamma = \rho_p / \rho_0$ , где  $\rho_p$  – плотность спрессованной биомассы;  $\rho_0$  – насыпная (естественная) плотность навески биомассы) оказывает существенное влияние на динамику влагоудаления. Увеличение плотности засыпки приводит к значительному росту скорости удаления влаги в идентичных (по температуре внутрикамерного пространства) условиях нагрева [196]. Это, скорее всего, связано с тем, что увеличение  $\gamma$  приводит к уменьшению пористости структуры слоя навески биомассы. В результате теплопроводность биоматериала увеличивается. Последнее приводит к тому, что слой биомассы быстрее прогревается и, соответственно, процесс испарения влаги интенсифицируется по всему объему навески.

Таблица 3.3.1 Значения массовых скоростей испарения воды ( $W_0$ ) со свободной поверхности и полного времени сушки ( $\tau_d$ ) навески биомассы (опилки) при различных плотностях засыпки

$\gamma=1; m_{\text{bio}}=20 \text{ г}$				
	$T_g=333 \text{ К}$	$T_g=353 \text{ К}$	$T_g=373 \text{ К}$	$T_g=393 \text{ К}$
$W_0, \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$	$9,08 \cdot 10^{-5}$	$22,8 \cdot 10^{-5}$	$50,18 \cdot 10^{-5}$	$50,18 \cdot 10^{-5}$
$\tau_d, \text{ с}$	6600	4200	3000	3000
$\gamma=1,5; m_{\text{bio}}=30 \text{ г}$				
$W_0, \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$	$9,08 \cdot 10^{-5}$	$22,8 \cdot 10^{-5}$	$50,18 \cdot 10^{-5}$	$50,18 \cdot 10^{-5}$
$\tau_d, \text{ с}$	8400	5400	4200	3600
$\gamma=2; m_{\text{bio}}=40 \text{ г}$				
$W_0, \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$	$9,08 \cdot 10^{-5}$	$22,8 \cdot 10^{-5}$	$50,18 \cdot 10^{-5}$	$50,18 \cdot 10^{-5}$
$\tau_d, \text{ с}$	12000	7800	6000	5400

Известно [103, 166, 197, 198], что в процессе сушки фронт испарения воды движется от поверхности нагрева в глубинные слои биомассы. В результате формируется высокопористый каркас с высоким термическим сопротивлением ( $R_{\text{hr}} = \lambda^{-1}$ ). Увеличение степени уплотнения навески древесной биомассы приводит к

уменьшению  $R_{hr}$ . В результате слой биомассы прогревается более интенсивно, по сравнению с естественной плотностью навески биомассы (при  $\gamma=1$ ).

Установлено, что в начальный период нагрева ( $\xi=0-0,2$ ) массивного слоя (толщиной  $h=10\pm 1$  мм) влажных древесных опилок массовая скорость влагоудаления быстро повышается до максимального значения, затем значения  $\mathcal{L}$  постепенно понижаются. При этом по результатам анализа рисунков 3.3.1а-г, можно отметить существенно нелинейный и немонотонный характер зависимостей  $\mathcal{L}(\xi)$  в условиях низкотемпературного (в диапазоне изменения  $T_g=333-353$  К) нагрева. В то же время при относительно высоких температурах внешней среды ( $T_g=373-393$  К) значения  $\mathcal{L}$  монотонно возрастают до момента времени  $\xi=0,2$ , а затем монотонно убывают. Как уже говорилось выше, последнее обусловлено комплексным протеканием процессов: испарение воды, фильтрация водяных паров и их диффузия во внешнюю газовую среду.

В начальный период нагрева инициируется процесс фазовых трансформаций воды. Фронт фазового перехода движется вглубь слоя биомассы, а водяные пары фильтруются сквозь пористый древесный каркас. В результате фильтрационного сопротивления последнего во внутрипоровом пространстве существенно растет давление водяных паров. Это приводит к деинтенсификации процесса испарения (или даже к конденсации пара). В результате снижается теплота испарения, а скорость нагрева слоя древесной биомассы возрастает. Соответственно, в определенный момент времени снова инициируется процесс испарения внутрипоровой влаги. Такие циклы в цепочке «испарение–конденсация» повторяются несколько раз в течение всего периода сушки.

На рисунке 3.3.2 приведены зависимости безразмерного времени сушки ( $\xi=\tau/\tau_d^0$ , где  $\tau$  – время сушки;  $\tau_d^0$  – время сушки при  $\gamma=1$ ) от степени уплотнения ( $\gamma$ ) навески влажной биомассы при варьировании температуры внешней среды в диапазоне от 333 до 393 К. Анализ зависимостей показывает, что  $\gamma$  оказывает существенное влияние на характеристики и условия протекания процесса сушки. Так, увеличение степени уплотнения навески биомассы ( $\gamma$ ) в два раза приводит к практически двукратному замедлению процесса сушки. Последнее обусловлено

тем, что в результате уплотнения навески древесной биомассы уменьшается пористость и, соответственно, проницаемость структуры слоя древесных опилок. В результате существенно возрастает сопротивление фильтрации. Последнее приводит к тому, что при  $\gamma=2$  водяным парам значительно труднее выйти на поверхность слоя биомассы, чем при степени уплотнения  $\gamma=1$ .

Стоит отметить, что по результатам экспериментов установлена практически линейная зависимость  $\xi(\gamma)$ . При этом температура внешней среды не оказывает значимого влияния на динамику влагоудаления. В этих условиях можно обосновано предположить, что фильтрационные характеристики (плотность засыпки, проницаемость, пористость, размер пор) слоя древесной биомассы также оказывают значимое влияние, как и условия нагрева (температура внешней среды, интенсивность теплообмена, радиационные характеристики поверхностей нагрева сушильной камеры).

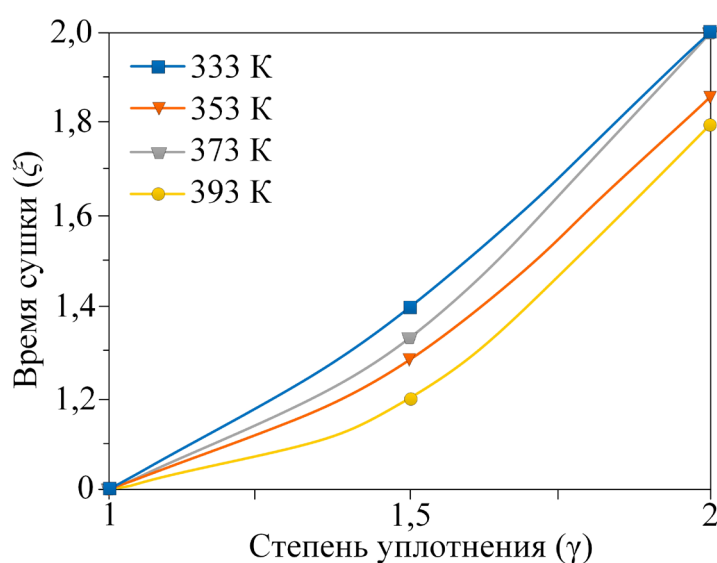


Рисунок 3.3.2. Зависимости безразмерного времени сушки ( $\xi$ ) от степени уплотнения навески древесной биомассы ( $\gamma$ ) при температуре в сушильной камере  $T_g=333\text{--}393\text{ К}$  в условиях идентичности толщины слоя ( $h$ )

Так как эксперименты проводились при условии идентичности толщины слоя навески биомассы, а массы навески при этом были различны, то этот результат можно назвать ожидаемым. Для обоснования гипотезы о значимости и нелинейности влияния степени уплотнения биомассы на характеристики и условия

её сушки проведены дополнительные эксперименты при условии идентичности масс навесок.

На рисунке 3.3.3 приведены зависимости времени сушки от температуры внешней среды для навесок биомассы с естественной (конусообразной) плотностью засыпки ( $\gamma=1$ ) и уплотнённая в два раза ( $\gamma=2$ ). Можно отметить, что во всем исследовавшемся диапазоне температур внешней среды уплотненный слой сушится значительно быстрее по сравнению со слоем с естественной плотностью засыпки. Как уже говорилось выше, это обусловлено, скорее всего тем, что при уплотнении слоя биомассы термическое сопротивление существенно снижается за счет уменьшения объема, занятого порами. В результате такой слой значительно быстрее прогревается и, соответственно, процесс испарения существенно интенсифицируется. В этих условиях процесс сушки уплотненного слоя биомассы протекает значительно быстрее, чем слоя с естественной насыпкой.

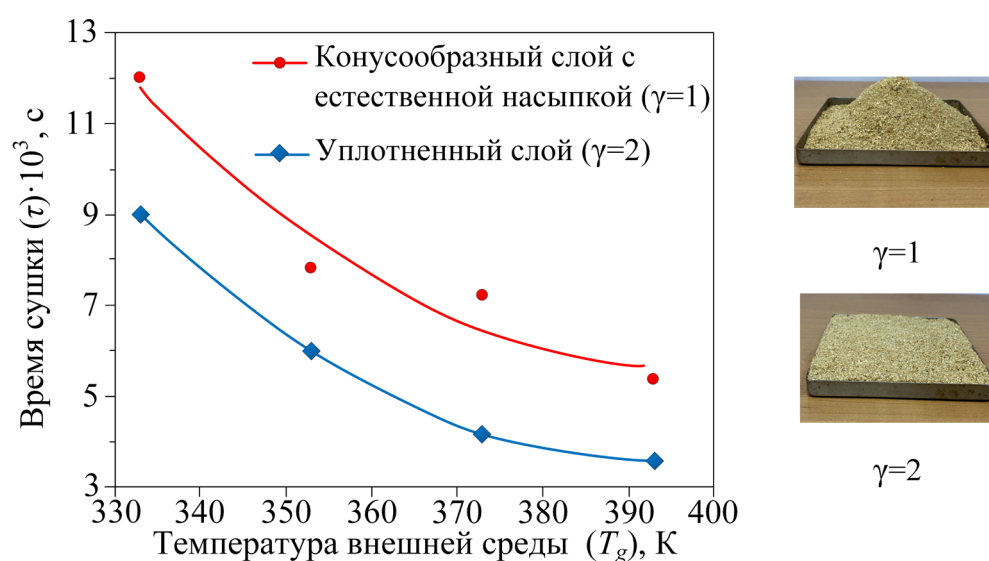


Рисунок 3.3.3. Зависимости времени сушки от температуры внешней среды при различных степенях уплотнения навески древесной биомассы в условиях идентичности масс навесок ( $m_{\text{био}}=20\pm 1$  грамм)

### Основные результаты и выводы по третьей главе

1. По результатам экспериментов установлен ранее незарегистрированный механизм тепло- и массопереноса при влагоудалении из



массивного высокопористого слоя влажной древесной биомассы (сосновая стружка) в период её интенсивного нагрева. Установлено, что при сушке древесной биомассы приповерхностная область (зона нагрева) 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 биомассы, где конденсируются. Последнее приводит к росту температуры и влажности в этих зонах. Последующий нагрев древесной биомассы приводит к интенсификации процесса испарения воды в её глубинных слоях и, как следствие, охлаждению последних. После полного влагоудаления температура слоя биомассы повышается до значений сопоставимых с температурой внешней среды.

2. По результатам параметрического анализа температурных полей установлено, что при сушке массивного слоя древесной биомассы условно можно выделить три последовательных этапа (фазы сушки): первый – быстрый рост температуры; второй – температура в слое биомассы изменяется немонотонно; третий этап – характеризуется повышением температуры до значений, сопоставимых с температурой внешней среды.

3. Установлено, что в условиях низкотемпературного нагрева влажных древесных веточек механизм влагоудаления существенно отличается от общепринятого. Показано, что в условиях относительно низких температур (от 333 до 353 К) внешней среды в период дегидратации значения массовой скорости влагоудаления изменяются немонотонно. Такой характер зависимости  $W_{\text{eva}}(\tau)$  идентичен для всех исследованных видов биомассы (древесные опилки, щепа, хвойный и лиственный опад). При этом показано, что при относительно высокой температуре внешней среды ( $T_g \geq 373$  К) значения  $W_{\text{eva}}$  изменяются монотонно. Сформулирована гипотеза, описывающая флуктуации скорости влагоудаления.

4. При высокотемпературном нагреве ( $T_g \geq 373$  К) установлено, что максимальные скорости влагоудаления ( $W_{\text{eva}}^{\text{max}}$ ) четырёх исследованных видов древесной биомассы (древесные опилки, щепа, хвойный и лиственный опад) отличаются незначительно (не более 30 %). При этом в условиях относительно

низких температур внешней среды ( $T_g < 373$  К) различия значений  $W_{\text{eva}}^{\text{max}}$  для навесок древесной биомассы более значимы (могут отличаться в 4 раза).

5. По результатам анализа влияния вида древесной биомассы на характеристики процесса сушки установлено, что независимо от породы дерева динамика процесса влагоудаления из листьев деревьев идентична.

6. Установлено, что неравномерности (бугры, впадины, каналы) поверхности веточек не оказывают существенного влияния на прогностические характеристики процесса влагоудаления. Соответственно, скорость влагоудаления при сушке ЛГМ на основе веточек деревьев можно рассчитывать по средней площади влагоудаления одной ветки, которая принимается за типичную (маркерную).

7. Степень уплотнения биомассы оказывает существенное влияние на динамику влагоудаления. Увеличение плотности засыпки приводит к значительному росту скорости удаления влаги в идентичных (по температуре внутрикамерного пространства) условиях нагрева.

8. По результатам выполненных экспериментальных исследований установлено, что уплотнение навески древесной биомассы в два раза ( $\gamma=2$ ) приводит к значительному ускорению процесса влагоудаления по сравнению с сушкой навески биомассы с естественной плотностью засыпки ( $\gamma=1$ ).

9. Показано, что фильтрационные характеристики (плотность засыпки, проницаемость, пористость, размер пор) слоя древесной биомассы также оказывают значимое влияние, как и условия нагрева (температура внешней среды, интенсивность теплообмена, радиационные характеристики поверхностей нагрева сушильной камеры).

## ГЛАВА 4. ОЦЕНКА ЗАТРАТ ЭНЕРГИИ НА ПРОЦЕСС ВЛАГОУДАЛЕНИЯ

Одним из важнейших параметров, определяющих конструктивные и технические характеристики (температура и интенсивность подачи воздуха) сушильных камер, являются затраты энергии на удаление одного килограмма влаги. Эта характеристика является одной из определяющих при проведении прогностического технико-экономического анализа в период проведения опытно-конструкторских работ по проектированию сушильных агрегатов. В связи с этим при проведении экспериментальных исследований были рассчитаны затраты энергии на удаление одного килограмма влаги из ЛГМ (листья, хвоя, веточки) и отходов деревообработки (опилки, сосновая щепа).

С целью проведения энергетического анализа эффективности процесса влагоудаления древесной биомассы введён в рассмотрение параметр энергоэффективности процесса сушки ( $\theta$ ), характеризующий отношение теплотворной способности биомассы ( $Q_n^r$ ) [199], к затратам теплоты на полное влагоудаление ( $Q_\Sigma$ ):

$$\theta = Q_n^r / Q_\Sigma. \quad (4.1)$$

Удельная теплота, затраченная на испарение воды (фазовые превращения), определялась из выражения:

$$Q_d = \frac{r \cdot F_{eva}}{m_{bio}} \int_0^{\tau_d} W_{eva} d\tau, \quad (4.2)$$

где  $r$  – теплота парообразования, Дж/кг [182];  $d\tau$  – интервал времени.

Теплота, затраченная на непосредственный нагрев древесной биомассы:

$$Q_1 = \frac{1}{m_{bio}} \cdot C_p \cdot (T_g - T_0) \cdot m_d, \quad (4.3)$$

где  $C_p$  – теплоёмкость древесной биомассы [185];  $T_0$  – начальная температура, К.

Теплота, затраченная на нагрев внутрипоровой воды, рассчитывалась из выражения:

$$Q_2 = \frac{1}{m_{bio}} \cdot C_{pw} \cdot (T_g - T_0) \cdot m_w, \quad (4.4)$$

где  $C_{pw}$  – теплоёмкость воды [182];  $m_w$  – масса воды, кг.

Полная (суммарная) теплота процесса сушки, затраченная непосредственно на испарение, нагрев листьев и адсорбированной влаги:

$$Q_{\Sigma} = Q_d + Q_1 + Q_2; \quad (4.5)$$

#### 4.1 Энергоэффективность процесса сушки тонкого слоя древесной биомассы

На рисунке 4.1.1 приведены зависимости безразмерного параметра энергоэффективности сушки ( $\theta = Q_n^r/Q_{\Sigma}$ ) от безразмерной температуры внешней среды ( $J=T_g/1000$ ) для лесных горючих материалов на основе свежесрезанных листьев четырёх пород лиственных деревьев. Можно отметить, что увеличение  $T_g$  приводит уменьшению относительных затрат на сушку. Это обусловлено тем, что при высоких температурах внешней среды ( $T_g=373-393$  К) скорость испарения жидкости возрастает экспоненциально [200] и процесс влагоудаления из тонкого слоя в условиях высоких температур внешней среды протекает значительно быстрее, чем при умеренных температурах внешней среды ( $T_g=333-353$  К).

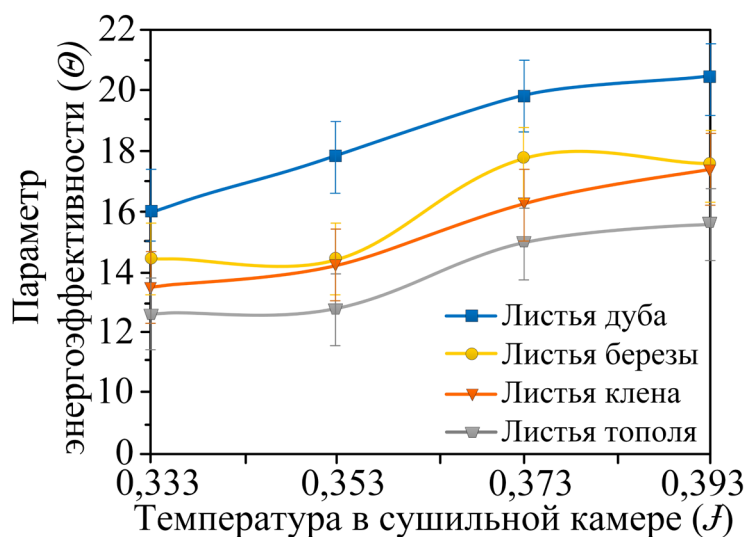


Рисунок 4.1.1. Зависимости безразмерного параметра энергоэффективности сушки ( $\theta$ ) от безразмерной температуры ( $J$ ) для ЛГМ на основе листьев деревьев

Соответственно, можно сделать вывод, что проведение процедуры сушки лесного горючего материала на основе листьев деревьев перед их сжиганием на промышленных предприятиях, локальных котельных или тепловых электрических

станциях, скорее всего, нецелесообразно. Наиболее приемлемо прямое сжигание такой влагонасыщенной биомассы в топочной камере. Для этого в камере сгорания можно организовать вихревые зоны рециркуляции факела или специальный предтопок по аналогии с [201].

Проведенный анализ полученных результатов показал, что значения температуры внешней среды существенно влияют на скорость влагоудаления. При этом необходимо иметь ввиду, что в топочных камерах котельных агрегатов температура газов, которые будут окружать частицу влажной древесной биомассы много выше – до 1300 К. Поэтому скорость влагоудаления будет существенно выше установленной в экспериментах при  $T_g=393$  К. Соответственно, параметр энергоэффективности сушки ( $\theta$ ) будет также много выше установленных значений. Кроме того, при высоких температурах внешней среды пары воды будут деформировать частицу биомассы и возможны процессы её диспергирования или фактического разрушения (распада на более мелкие фрагменты) под действием сил, обусловленных перепадом давления в пористой структуре древесной биомассы (аналогичные процессы описаны в [202]).

На рисунке 4.1.2 приведены зависимости безразмерного параметра энергоэффективности процесса сушки ( $\theta$ ) от безразмерной температуры внешней среды ( $J$ ) для ЛГМ на основе веточек лиственных пород деревьев. Можно отметить, что увеличение  $J$  приводит к увеличению относительных затрат на испарение влаги. Такая монотонно убывающая с ростом температуры зависимость  $\theta(J)$  типична для веток березы и тополя, но не для веток липы. Можно отметить, что в условиях относительно низких температур внешней среды ( $T_g=333-353$  К) энергоэффективность ( $\theta$ ) процесса дегидратации веток липы больше значений  $\theta$  веток тополя и ниже аналогичной характеристики для веток березы. Это обусловлено, в первую очередь, значениями теплоты сгорания древесной биомассы: теплотворная способность ( $Q_n^r$ ) липы больше, чем  $Q_n^r$  тополя и меньше теплотворной способности берёзы.

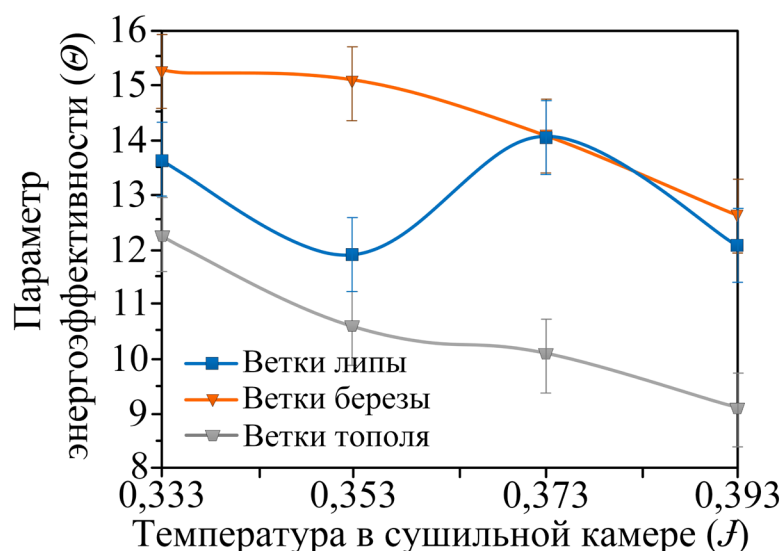


Рисунок 4.1.2. Зависимости безразмерного параметра энергоэффективности ( $\theta$ ) от безразмерной температуры ( $J$ ) в сушильной камере при сушке ЛГМ на основе веточек лиственных пород деревьев

Однако при сушке веток липы установлено, что с увеличением температуры внешней среды с 353 до 373 К энергоэффективность процесса дегидратации веток резко возрастает и становится сопоставима со значениями  $\theta$  для березовых веток. Это, скорее всего, обусловлено тем, что как показано на рисунках 3.2.3.1 (пункт 3.2.3) процесс сушки веточек липы заканчивается быстрее, чем веточек березы. При этом теплота сгорания липы достаточно большая и сопоставима с аналогичной характеристикой для березы  $(Q_n^r)_{\text{березы}}=0,8(Q_n^r)_{\text{липы}}$ . В целом можно сделать обоснованный вывод, что наиболее эффективно сушить лесной горючий материал на основе веток (липы, тополя и березы) в условиях относительно низких температур внешней среды ( $T_g \approx 333$  К).

## 4.2 Энергоэффективность процесса сушки массивного слоя древесной биомассы

На рисунке 4.2.1 приведены зависимости безразмерного параметра эффективности сушки ( $\theta$ ) от безразмерной температуры внешней среды ( $J$ ) для массивного слоя (толщиной  $h=10 \pm 1$  мм) древесной биомассы. Показано, что во

всем типичном для практики диапазоне изменения температур внешней среды  $333 \leq T_g \leq 393$  К сушка навесок сосновой щепы, хвойного и лиственного опада наиболее эффективна по сравнению с сосновыми опилками. Можно отметить, что хвою ели и листья берёзы лучше всего сушить в условиях относительно низких температур внешней среды ( $T_g=333$  К). Увеличение значений  $T_g$  на 20 К (с 333 до 353 К) для навески еловой хвои приводит к существенному уменьшению параметра энергоэффективности сушки ( $\approx 30\%$ ). Для сосновой щепы увеличение  $T_g$  на 20 К, наоборот, приводит к повышению  $\theta$  (на 16%). Это обусловлено тем, что даже незначительное увеличение температуры внешней среды приводит к существенному уменьшению периода дегидратации навески древесной щепы (в отличие от слоя хвои).

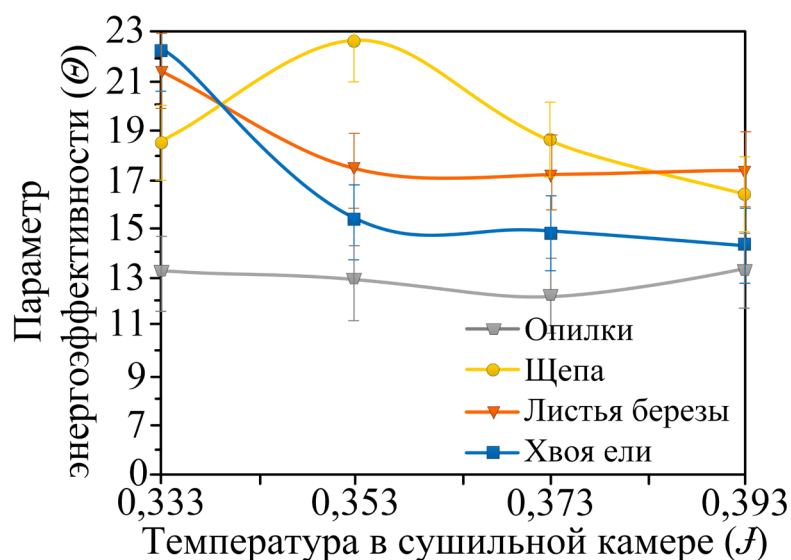


Рисунок 4.2.1. Зависимости безразмерного параметра эффективности сушки ( $\theta$ ) от безразмерной температуры в сушильной камере ( $J$ ) для четырёх видов исследовавшейся древесной биомассы

Как говорилось ранее, слой хвои более плотный по сравнению с другими исследовавшимися навесками биомассы и, соответственно, менее пористый [101]. Водяные пары не успевают выйти из слоя биоматериала (из-за высокого сопротивления) и остаются внутри него. Скорее всего, существует «некая» максимально возможная скорость выхода водяных паров из слоя хвои, обусловленная его пропускной способностью. В случае сушки сосновой щепы,

повышение температуры внешней среды приводит к более быстрой дегидратации всего материала. Соответственно, энергозатраты на удаление влаги из навески щепы обуславливаются затратами энергии на аккумуляцию теплоты древесиной и свободной влагой, а также теплотой, расходуемой на непосредственное испарение внутрипоровой воды. Вследствие высокой пористости слоя сосновой щепы водяные пары свободно (с малым сопротивлением) диффундируют сквозь слой биоматериала. Для навески сосновых опилок увеличение температуры внешней среды не приводит к существенным изменениям значений параметра  $\theta$ .

Обобщая результаты выполненных экспериментов, можно сказать, что при сжигании, например, топливных смесей на основе угля и лесных горючих материалов или отходов деревообработки сушку компонентов топливной смеси необходимо проводить отдельно для каждого из них. Например, удаление влаги из угольного топлива может происходить в условиях высокотемпературного ( $T_g \approx 700$  К) нагрева (продуктами сгорания топлива или нагретым до высоких температур воздухом), влагоудаление из слоя древесной биомассы (например, хвои) лучше проводить в условиях относительно низких температур. Для сушки такой биомассы можно использовать низкопотенциальную энергию уходящих газов котельного агрегата.

### **Выводы по четвертой главе**

1. Проведение процедуры влагоудаления из тонкого слоя (толщиной  $h \approx 1-1,5$  мм) лесных горючих материалов на основе листьев деревьев перед их сжиганием в котельных агрегатах промышленных предприятий и на тепловых электрических станциях, скорее всего, нецелесообразно. Наиболее приемлемо прямое сжигание влажных листьев в топочной камере.

2. Во всем типичном для практики (сушильного оборудования) диапазоне изменения температур внешней среды ( $333 \leq T_g \leq 393$  К) сушка сосновой щепы, листьев берёзы (массивный слой) и еловой хвои наиболее эффективна, по сравнению с сосновыми опилками. Установлено, что сосновую щепу, хвою и



листья лучше всего сушить в условиях относительно низких температур внешней среды ( $T_g=333$  К). Увеличение значений  $T_g$  на 20 К (с 333 до 353 К) для навески еловой хвои приводит к существенному уменьшению параметра энергоэффективности процесса сушки (на 30 %).

3. Для навески сосновой щепы увеличение  $T_g$  на 20 К приводит к повышению параметра энергоэффективности на 16 %. Это обусловлено тем, что даже незначительное увеличение температуры внешней среды приводит к существенному уменьшению периода дегидратации.

4. Для навески сосновых опилок увеличение температуры внутрикамерного пространства (в диапазоне от 333 до 393 К) не приводит к существенным изменениям значений параметра энергоэффективности.

6. Установлено, что для веточек лиственных пород исследуемых видов древесины увеличение температуры приводит к повышению относительных затрат на испарение влаги. Наиболее эффективно сушить древесные веточки (липы, тополя, берёзы) в условиях относительно низких температур внешней среды ( $T_g\approx 333$  К).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполненных экспериментальных исследований установлен ранее незарегистрированный механизм влагоудаления из массивного высокопористого слоя влажной древесной биомассы. Полученные закономерности показывают, что при прогностическом моделировании процессов тепло- и массопереноса, протекающих совместно в период дегидратации древесной биомассы, необходимо учитывать не только непосредственно процесс испарения воды, но и фильтрацию водяных паров во внутриводной структуре слоя биомассы, а также их диффузию во внешнюю газовую среду. При этом по результатам экспериментов показано, что движение водяного пара возможно не только к нагреваемой поверхности, но и в обратном направлении в относительно холодные области навески биомассы. При достижении этих зон водяные пары конденсируются, что приводит к локальному росту температуры. Этот эффект установлен впервые. Последнее существенно расширяет современные представления о физических механизмах процессов тепло- и массопереноса, протекающих при сушке массивного слоя древесной биомассы при радиационно-конвективном нагреве.

Полученные по результатам проведенных экспериментальных исследований зависимости позволяют сделать обоснованный вывод о том, что разработанные к настоящему времени прогностические модели процессов влагоудаления не в полной мере описывают процессы тепло- и массопереноса, протекающие при сушке массивного слоя древесной биомассы в условиях радиационно-конвективного нагрева. Соответственно, полученные по результатам проведенных исследований зависимости создают предпосылки для разработки новых математических моделей, детально описывающих теплофизические и аэромеханические процессы, протекающие при сушке древесной биомассы.

Проведенные диссертационные исследования являются основой для обоснования выбора параметров технологии сушки древесной биомассы в больших объемах на стадии подготовки к сжиганию или газификации. Также по результатам

экспериментов установлено, что при сушке лесных горючих материалов на основе древесных веточек в условиях умеренных температур внешней среды ( $T_g=333-353$  К) массовая скорость влагоудаления изменяется немонотонно, а зависимость  $W_{eva}(\tau)$  имеет, как правило, вейвлетовый характер. Последнее обусловлено комплексным влиянием теплофизических и аэромеханических процессов: испарение воды, фильтрация водяных паров сквозь пористую структуру древесной биомассы и повышение давления водяного пара во внутриводном пространстве. Результаты экспериментальных исследований показали, что проведение процедуры предварительной термической подготовки древесной биомассы к сжиганию (на основе типичных отходов лесопиления) эффективнее всего проводить в уплотненном состоянии. В этих условиях существенно растет интенсивность нагрева слоя биомассы (за счет уменьшения пористости и, соответственно, роста эффективного коэффициента теплопроводности). В результате интенсифицируется процесс испарения воды и, как следствие, вся процедура удаления влаги ускоряется.

Одним из важнейших результатов проведенных исследований является обоснование перспективности использования лесного горючего материала (лиственной и хвойной опад, веточки деревьев) в качестве основного или компоненты смесового топлива (например, в составе био-угольного [203] или био-водоугольного [204]). По результатам проведенной работы в рамках диссертационного исследования установлены температурные режимы, в которых сушка древесной биомассы наиболее эффективна (по критерию минимизации затрат энергии на проведение термической подготовки). Показано, что массивный слой лесных горючих материалов эффективнее всего сушить в условиях относительно низких температур внешней среды ( $T_g=333$  К). В то же время установлено, что термическую подготовку тонкого слоя древесной биомассы (на основе листьев деревьев) эффективно проводить в условиях высокотемпературного нагрева (при  $T_g \geq 393$  К). Этот результат имеет важное значение для реальной практики и позволяет обосновывать выбор тех или иных параметров

технологической схемы подготовки древесной биомассы к сжиганию на тепловых электроцентралях или локальных котельных.

Проведённые эксперименты позволили разработать физические модели и сформулировать основные рекомендации по использованию результатов диссертационного исследования в реальной практике (приложение В).

## СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

*Аббревиатуры*

- ВВП – валовой внутренний продукт  
 ВИЭ – возобновляемые источники энергии  
 ВУТ – водоугольное топливо  
 ЛГМ – лесные горючие материалы  
 ЛДК – лесопильно-деревообрабатывающий комбинат  
 СВЧ – волны сверх высокой частоты  
 ТЭК – топливно-энергетический комплекс  
 ТЭС – тепловая электростанция  
 ТЭЦ – теплоэлектроцентраль

*Латинские символы*

- $C_p$  – теплоёмкость древесной биомассы, Дж/(кг·К)  
 $C_{pw}$  – теплоёмкость воды, Дж/(кг·К)  
 $d$  – диаметр, мм  
 $d^s$  – средний диаметр веточки, мм  
 $D$  – дисперсия  
 $F_{eva}$  – площадь поперечного сечения навески биомассы, м<sup>2</sup>  
 $\overline{F_{eva}}$  – средняя площадь влагоудаления, м<sup>2</sup>  
 $F_{tru}$  – истинное значение площади влагоудаления (для веточек), м<sup>2</sup>  
 $h$  – толщина слоя биомассы, мм  
 $l$  – типичный характерный размер, мм  
 $m_{bio}$  – масса влажной навески биомассы, кг  
 $m_i$  – масса навески в  $i$ -й момент времени, кг  
 $m_d$  – масса сухой навески биомассы, кг  
 $m_{mon}$  – масса монолитной древесины, кг  
 $m_w$  – масса испарившейся жидкости, кг  
 $M_w$  – безразмерная масса влаги, кг  
 $\overline{M_w}$  – среднее (по времени) содержание влаги в биомассе, кг

- $M$  – математическое ожидание  
 $N_{eva}$  – плотность теплового стока, Вт/м<sup>2</sup>  
 $P$  – вероятность  
 $P_p$  – давление паров над поверхностью испарения, Па  
 $P_s$  – давление насыщения на границе фазового перехода, Па  
 $Q_d$  – теплота, затраченная на испарение воды, Дж/кг  
 $Q_{eva}$  – удельная теплота испарения воды, Дж/кг  
 $Q_n^r$  – низшая теплота сгорания, кДж/кг  
 $Q_{\Sigma}$  – полная теплота процесса сушки, затраченная на влагоудаление, Дж/кг  
 $Q_1$  – удельная теплота, затраченная на непосредственный нагрев древесной биомассы, Дж/кг  
 $Q_2$  – удельная теплота, затраченная на нагрев внутрипоровой воды, Дж/кг  
 $r$  – теплота парообразования, Дж/кг  
 $R_b$  – безразмерный критерий Ребиндера  
 $R_{hr}$  – термическое сопротивление  
 $S_i^{cil}$  – площадь веточки, м<sup>2</sup>  
 $S_{for}$  – площади, занимаемые лесами, м<sup>2</sup>  
 $t$  – критерий Стьюдента  
 $\bar{T}$  – средняя (по объёму) температура слоя биомассы, К  
 $T_{eva}$  – температура поверхности фронта испарения, К  
 $T_g$  – температура внешней среды (внутрикамерного пространства), К  
 $T_{max}$  – максимальная температура нагрева, К  
 $T_{min}$  – минимальная температура нагрева, К  
 $T_s$  – температура насыщения воды, К  
 $T_0$  – начальная температура, К  
 $V$  – объём сушильной камеры, м<sup>3</sup>  
 $W_{eva}$  – массовая скорость влагоудаления, кг/(м<sup>2</sup>·с)

- $W_{\text{eva}}^{\text{max}}$  – максимальная скорость влагоудаления, кг/(м<sup>2</sup>·с)  
 $W_0$  – массовая скорость испарения воды, кг/(м<sup>2</sup>·с)  
 $X$  – глубина крепления спая термопар, мм

*Греческие символы*

- $\gamma$  – степень уплотнения биомассы  
 $\Delta$  – доверительный интервал  
 $\delta$  – относительная погрешность измерения  
 $\zeta$  – влагосодержание  
 $\Theta$  – безразмерный параметр энергоэффективности сушки  
 $\theta$  – безразмерная температура  
 $\bar{\theta}$  – безразмерная средняя температура  
 $\lambda$  – теплопроводность биомассы, Вт/(м·К)  
 $\lambda_d$  – теплопроводность сухой биомассы, Вт/(м·К)  
 $\lambda_w$  – теплопроводность воды, Вт/(м·К)  
 $\xi$  – безразмерное время сушки  
 $\xi_{\text{eva}}$  – среднее значение скорости удаления влаги  
 $\Pi$  – пористость, %  
 $\rho$  – плотность биомассы, кг/м<sup>3</sup>  
 $\rho_p$  – плотность спрессованной биомассы, кг/м<sup>3</sup>  
 $\rho_d$  – плотность сухой древесной биомассы, кг/м<sup>3</sup>  
 $\rho_w$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>  
 $\rho_0$  – насыпная плотность, кг/м<sup>3</sup>  
 $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение  
 $\tau$  – время дегидратации, с  
 $\tau_d$  – полное время дегидратации навески биомассы, с  
 $\varphi$  – влажность биомассы, %  
 $\varphi_{\text{abs}}$  – абсолютная влажность, %  
 $\varphi_{\text{rel}}$  – относительная влажность, %  
 $\varphi_{\text{kon}}$  – контрольное значение влажности, %  
 $\varphi_0$  – начальная влажность, %

- $\mathcal{L}$  – безразмерная скорость влагоудаления, грамм воды/грамм твердого вещества
- $\mathcal{I}$  – период колебаний, с
- $\mathcal{J}$  – безразмерная температура внешней среды



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vanherman, T. On rendering fish oil and linseed oil drying and on making cheap oil paints / T. Vanherman // *Journal of the Franklin Institute*. – 1826. – V. 1. – P. 323–326.
2. Kuznetsov, G.V. The effect of the distance between wood and coal particles on the characteristics of their joint ignition under conditions of high-temperature radiation-convective heating / S.V. Syrodoy, G.V. Kuznetsov, N.Yu. Gutareva, Zh. A. Kostoreva, D.V. Malyshev // *Journal of the Energy Institute*. – 2021. – V. 97. – P. 13–26.
3. Xu, Y. Characterization of fine particulate matter generated in a large woody biomass-firing circulating fluid bed boiler / Y. Xu, X. Liu, J. Qi, T. Zhang, J. Xu, Ch. Wen, M. Xu // *Journal of the Energy Institute*. – 2021. – V. 96. – P. 11–18.
4. Sefidari, H. An experimental study of combustion and emissions of two types of woody biomass in a 12-MW reciprocating-grate boiler / H. Sefidari, N. Razmjoo, M. Strand // *Fuel*. – 2014. – V. 135. – P. 120–129.
5. Karim, M.R. CFD modelling of combustion and associated emission of wet woody biomass in a 4 MW moving grate boiler / M.R. Karim, J. Naser // *Fuel*. – 2018. – V. 222. – P. 656–674.
6. Tamura, M. Grinding and combustion characteristics of woody biomass for co-firing with coal in pulverised coal boilers / M. Tamura, Sh. Watanabe, N. Kotake, M. Hasegawa // *Fuel*. – 2014. – V. 134. – P. 544–553.
7. Yelverton, T.L.B. Characterization of emissions from a pilot-scale combustor operating on coal blended with woody biomass / T.L.B. Yelverton, A.T. Brashear, D.G. Nash, J.E. Brown, C.F. Singer, P.H. Kariher, J.V. Ryan, P. Burnette // *Fuel*. – 2020. – V. 264. – P. 116774.
8. Namkung, H. Blending effect of sewage sludge and woody biomass into coal on combustion and ash agglomeration behavior / H. Namkung, Y.J. Lee, Ju.H. Park, G.S. Song, J.W. Choi, Y.-Ch. Choi, S.J. Park, J.G. Kim // *Fuel*. – 2018. – V. 225. – P. 266–276.

9. Das, S. Single particle combustion studies of coal/biomass fuel mixtures / S. Das, P.K. Sarkar, S. Mahapatra // *Energy*. – 2021. – V. 217. – P. 119329.
10. Tabata, T. Life cycle assessment for co-firing semi-carbonized fuel manufactured using woody biomass with coal: A case study in the central area of Wakayama, Japan / T. Tabata, H. Torikai, M. Tsurumaki, Y. Genchi, K. Ukegawa // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2011. – V. 15. – P. 2772–2778.
11. Guo, F. Thermogravimetric analysis on the co-combustion of biomass pellets with lignite and bituminous coal / F. Guo, Yi He, A. Hassanpour, J. Gardy, Zh. Zhong // *Energy*. – 2020. – V. 197. – P. 117147.
12. Rabea, K. An improved kinetic modelling of woody biomass gasification in a downdraft reactor based on the pyrolysis gas evolution / K. Rabea. S. Michailos, M. Akram, K.J. Hughes, D. Ingham, M. Pourkashanian // *Energy Conversion and Management*. – 2022. – V. 258. – P. 115495.
13. Saidur, R. A review on biomass as a fuel for boilers / R. Saidur, E.A. Abdelaziz, A. Demirbas, M.S. Hossain, S. Mekhilef // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2011. – V. 15. – P. 2262–2289.
14. Sasaki, N. Timber production and carbon emission reductions through improved forest management and substitution of fossil fuels with wood biomass / N. Sasaki // *Resources, Conservation and Recycling*. – 2021. – V. 173. – P. 105737.
15. Syrodoy, S.V. Mathematical modeling of the thermochemical processes of sequestration of SO<sub>x</sub> 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. – V. 185. – P. 1392–1409.
16. Umakanth, A.V. Chapter 3 - Biomass feedstocks for advanced biofuels: Sustainability and supply chain management / A.V. Umakanth, A. Datta, B.S. Reddy, S. Bardhan // *Advanced Biofuel Technologies*. – 2022. – P. 39-72.
17. Heskestad, G. Heat of combustion in spreading wood crib fires with application to ceiling jets / G. Heskestad // *Fire Safety Journal*. – 2006. – V. 41. – P. 343–348.

18. 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. – V. 14. – P. 919–937.
19. Wang, L. 2050 World and China Energy Outlook // *CNPC Economics & Technology Research Institute*. – 2019. – P. 1–149.
20. Nagy, G. Experimental investigation of fixed-bed pyrolysis and steam gasification of food waste blended with woody biomass / G. Nagy, Z. Dobó // *Biomass and Bioenergy*. – 2020. – V. 139. – P. 105580.
21. Pang, Sh. Advances in thermochemical conversion of woody biomass to energy, fuels and chemicals / Sh. Pang // *Biotechnology Advances*. – 2019. – V. 37. – P. 589–597.
22. Wang, X. Biogas standard system in China / X. Wang, R. Yan, Yu. Zhao, Sh. Cheng, Y. Han, Sh. Yang, Di Cai, H.P. Mang, Z. Li // *Renewable Energy*. – 2020. – V. 157. – P. 1265–1273.
23. Kongprasert, N. Charcoal Briquettes from Madan Wood Waste as an Alternative Energy in Thailand / N. Kongprasert, P. Wangphanich, A. Jutilarptavorn // *Procedia Manufacturing*. – 2019. – V. 30. – P. 128–135.
24. Stolarski, M.J. Lignocellulosic biomass from short rotation woody crops as a feedstock for second-generation bioethanol production / M.J. Stolarski, M. Krzyżaniak, M. Łuczyński, D. Załuski, S. Szczukowski, J. Tworkowski, J. Gołaszewski // *Industrial Crops and Products*. – 2015. – V. 75. – P. 66–75.
25. Макаров, А.А. Прогноз развития энергетики мира и России 2019 / А.А. Макаров, Т.А. Митрова, В.А. Кулагин // *ИНЭИ РАН – Московкой школы управления Сколково*. – 2019. – С. 210.
26. Sahoo, G. Biomass from trees for bioenergy and biofuels – A briefing paper / G. Sahoo, A. Sharma, A.Ch. Dash // *Materials Today: Proceedings*. – 2022.
27. Jåstad, E.O. The role of woody biomass for reduction of fossil GHG emissions in the future North European energy sector / E.O. Jåstad, T.F. Bolkesjø, E. Trømborg, P.K. Rørstad // *Applied Energy*. – 2020. – V. 274. – P.115360.

28. Rojas-Briales, E. Global Forest Resources Assessment 2010: Main Report / E. Rojas-Briales // Food and Agriculture Organization of the United Nations. – 2010. – P. 1–340.
29. Fargione, J. Land clearing and the biofuel carbon debt / J. Fargione, J. Hill, D. Tilman, S. Polasky, P. Hawthorne // Science. – 2008. – V. 319. – P. 1235–1238.
30. Ćosić, B. Geographic distribution of economic potential of agricultural and forest biomass residual for energy use: Case study Croatia / B. Ćosić, Z. Stanić, N. Duić // Energy. – 2011. – V. 36. – P. 2017–2028.
31. Zheng, Y. Bioenergy in the Canadian Prairies: Assessment of accessible biomass from agricultural crop residues and identification of potential biorefinery sites / Y. Zheng, F. Qiu // Biomass and Bioenergy. – 2020. – V. 140. – P. 105669.
32. Willer, H. The World of Organic Agriculture Statistics and Emerging Trends 2022 / H. Willer, J. Trávníček, C. Meier, B. Schlatter // Research Institute of Organic Agriculture FiBL. – 2022. – P. 341.
33. Thomas, A. Growth dynamics of fast-growing tree species in mixed forestry and agroforestry plantations / A. Thomas, P. Priault, S. Piutti, E. Dallé, N. Marron // Forest Ecology and Management. – 2021. – V. 480. – P. 118672.
34. Степанов, В.И. Отходы лесной промышленности и их использование в национальном хозяйстве / В.И. Степанов, Н.А. Мезина // Вестник Российского экономического университета. – 2012. – №3. – С. 83–88.
35. Li, D. Understanding the relationship between biomass production and water use of *Populus tomentosa* trees throughout an entire short-rotation / D. Li, J. Liu, A. Verhoef, B. Xi, V. Hernandez-Santana // Agricultural Water Management. – 2021. – V. 246. – P. 106710.
36. 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.Y. Gutareva, Zh.A Kostoreva, A.A. Kostoreva, N.A. Nigay // Journal of the Energy Institute. – 2020. – V. 93. – P.1978–1992.

37. Guo, M. Bioenergy and biofuels: History, status, and perspective / M. Guo, W. Song, J. Buhain // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015. – V. 42. – P. 712–725.
38. Koshurnikova, N. Assessment of Central Siberia Forest Ecosystems Sustainability to Forest Fires: Academic Research Outcomes / N. Koshurnikova, S. Verkhovets, O. Antamoshkina, N. Trofimova, L. Zlenko, A. Zhuikov // *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. – 2015. – V. 214. – P. 1008–1018.
39. Volkova, L. Impact of mechanical thinning on forest carbon, fuel hazard and simulated fire behaviour in *Eucalyptus delegatensis* forest of south-eastern Australia / L. Volkova, H. Bi, J. Hilton, Ch.J. Weston // *Forest Ecology and Management*. – 2017. – V. 405. – P. 92–100.
40. Qian, W. Opposite anomalous synoptic patterns for potential California large wildfire spread and extinguishing in 2018 cases / W. Qian, Y. Ai, J.Y. Yu, J. Du // *Atmospheric Research*. – 2021. – V. 262. – P. 105804.
41. Byrne, T. Trump on California wildfires: «You got to get rid of the leaves» [Электронный ресурс] / T. Byrne // *Politics San Francisco Chronicle*. – 2020. – Режим доступа: <https://www.sfchronicle.com/politics/article/Trump-on-California-fires-You-got-to-get-rid-15500115.php>.
42. Clinton, N.E. Quantification of pollutants emitted from very large wildland fires in Southern California / N.E. Clinton, P. Gong, K. Scott // *Atmospheric Environment*. – 2006. – V. 40, No. 20. – P. 3686–3695.
43. Martinez-Valencia, L. Biomass supply chain equipment for renewable fuels production: A review / L. Martinez-Valencia, D. Camenzind, M. Wigmosta, M. Garcia-Perez, M. Wolcott // *Biomass and Bioenergy*. – 2021. – V. 148. – P. 106054.
44. Chiniforush, A.A. Water vapor diffusivity of engineered wood: Effect of temperature and moisture content / A.A. Chiniforush, H. Valipour, A. Akbarnezhad // *Construction and Building Materials*. – 2019. – V. 224. – P. 1040–1055.
45. Липов, Ю.М. Котельные установки и парогенераторы / Ю.М. Липов, Ю.М. Третьяков. – М.: Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2003. – 592 с.

46. Рихтер, Л.А. Газовоздушные тракты тепловых электростанций / Л.А. Рихтер. – М.: Энергия, 1969. – 272 с.
47. Xue, K. Development of a novel power generation system based on the co-combustion of agriculture biomass and sludge integrated with solar-aided sludge drying / K. Xue, J. Li, H. Chen, G. Xu, T. Liu // *Energy Conversion and Management*. – 2022. – V. 253, No. 1. – P. 115185.
48. Yank, A. Physical properties of rice husk and bran briquettes under low pressure densification for rural applications / A. Yank, M. Ngadi, R. Kok // *Biomass and Bioenergy*. – 2016. – V. 84. – P. 22–30.
49. Salema, A.A. Pyrolysis of corn stalk biomass briquettes in a scaled-up microwave technology / A.A. Salema, M.T. Afzal, L. Bennamoun // *Bioresource Technology*. – 2017. – V. 233. – P. 353–362.
50. Лакомкин, В.Ю. Тепломассообменное оборудование предприятий (Сушильные установки): учебное пособие / В.Ю. Лакомкин, С.Н. Смородин, Е.Н. Громова // *Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД*. – 2016. – С. 142.
51. Chitawo, M.L. Modelling sustainability of primary forest residues-based bioenergy system / M.L. Chitawo, A.F.A. Chimphango, S. Peterson // *Biomass and Bioenergy*. – 2018. – V. 108. – P. 90–100.
52. Laurén, A. Improving the financial performance of solid forest fuel supply using a simple moisture and dry matter loss simulation and optimization / A. Laurén, A. Asikainen, J.P. Kinnunen, M. Palviainen, L. Sikanen // *Biomass and Bioenergy*. – 2018. – V. 116. – P. 72–79.
53. *World Energy Balances 2020: Overview* // International Energy Agency. – 2020. – P. 157.
54. Paris, A. On the link between oil and agricultural commodity prices: Do biofuels matter? / A. Paris // *International Economics*. – 2018. – V. 155. – P. 48–60.
55. Schicks, J.M. Development, test, and evaluation of exploitation technologies for the application of gas production from natural gas hydrate reservoirs and their potential application in the Danube Delta, Black Sea / J.M. Schicks, M. Haeckel, G.

Janicki, E. Spangenberg, J. Thaler, R. Giese, B. Strauch, K. Heeschen and K. Wallmann // *Marine and Petroleum Geology*. – 2020. – V. 120. – P. 104488.

56. Paraschiv, S. Trends of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions from fossil fuels combustion (coal, gas and oil) in the EU member states from 1960 to 2018 / S. Paraschiv, L.S. Paraschiv // *Energy Reports*. – 2020. – V. 6. – P. 237–242.

57. Fitzpatrick, J.J. Environmental sustainability assessment of using forest wood for heat energy in Ireland / J.J. Fitzpatrick // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – V. 57. – P. 1287–1295.

58. Dresselhaus, M.S. Alternative energy technologies / M.S. Dresselhaus, I.L. Thomas // *Nature*. – 2001. – V. 414. – P. 332–337.

59. Titova, E.S. Analysis of the biofuel production regulation in Russia and in the world / E.S. Titova, E.D. Sivak // *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*. – 2020. – V. 7, No. 1. – P. 1 – 27.

60. Titova, E.S. Biofuel Application as a Factor of Sustainable Development Ensuring: The Case of Russia / E.S. Titova // *Energies*. – 2019. – V. 12. – P. 1–30.

61. Shafie, S.M. A review on paddy residue based power generation: Energy, environment and economic perspective / S.M. Shafie // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – V. 59. – P. 1089–1100.

62. Adeleke, A.A. Tumbling strength and reactivity characteristics of hybrid fuel briquette of coal and biomass wastes blends / A.A. Adeleke, J.K. Odusote, P.P. Ikubanni, O.O. Agboola, A.O. Balogun, O.A. Lasode // *Alexandria Engineering Journal*. – 2021. – V. 60. – P. 4619–4625.

63. Fernández, M.J. Sintering reduction of herbaceous biomass when blended with woody biomass: predictive and combustion tests / M.J. Fernández, I. Mediavilla, R. Barro, E. Borjabad, R. Ramos, J.E. Carrasco // *Fuel*. – 2019. – V. 239. – P. 1115–1124.

64. Hansen, K. Full energy system transition towards 100% renewable energy in Germany in 2050 / K. Hansen, B.V. Mathiesen, I.R. Skov // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2019. – V. 102. – P. 1–13.

65. Cadillo-Benalcazar, J.J. Why does the European Union produce biofuels? Examining consistency and plausibility in prevailing narratives with quantitative

storytelling / J.J. Cadillo-Benalcazar, S.G.F. Bukkens, M. Ripa, M. Giampietro // *Energy Research & Social Science*. – 2021. – V. 71. – P. 101810.

66. Liu, Z. Game theory-based renewable multi-energy system design and subsidy strategy optimization / Z. Liu, Sh. Wang, M.Q. Lim, M. Kraft, X. Wang // *Advances in Applied Energy*. – 2021. – V. 2. – P. 100024.

67. Safarzadeh, S. A review of optimal energy policy instruments on industrial energy efficiency programs, rebound effects, and government policies / S. Safarzadeh, M. Rasti-Barzoki, S.R. Hejazi // *Energy Policy*. – 2020. – V. 139. – P. 111342.

68. Taskhiri, M.S. Optimising cascaded utilisation of wood resources considering economic and environmental aspects / M.S. Taskhiri, H. Jeswani, J. Geldermann, A. Azapagic // *Computers & Chemical Engineering*. – 2019. – V. 124. – P. 302–316.

69. Kuznetsov, G.V. Mathematical modeling of the thermochemical processes of nitrogen oxides sequestration during combustion of wood-coal mixture particles / G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, N.Yu. Gutareva, N.A. Nigay // *Journal of the Energy Institute*. – 2021. – V. 96. – P. 280–293.

70. Nie, A. An environmental and economic assessment from bioenergy production and biochar application / A. Nie, Sh. Kung, H. Li, L. Zhang, X. He, Ch.Ch. Kung // *Journal of Saudi Chemical Society*. – 2021. – V. 25. – P. 101173.

71. Guerin, T.F. Tactical problems with strategic consequences: A case study of how petroleum hydrocarbon suppliers support compliance and reduce risks in the minerals sector / T.F. Guerin // *Resources Policy*. – 2021. – V. 74. – P. 102310.

72. Mutezo, G. A review of Africa's transition from fossil fuels to renewable energy using circular economy principles / G. Mutezo, J. Mulopo // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2021. – V. 137. – P. 110609.

73. Xu, Ch. 1.19 Biomass Energy / Ch. Xu, B. Liao, Sh. Pang, L. Nazari, N. Mahmood, M.S. Tushar, A. Dutta, M.B. Ray // *Comprehensive Energy Systems*. – 2018. – V. 1. – P. 770–794.

74. Hoekman, S.K. Biofuels in the U.S. – Challenges and Opportunities / S.K. Hoekman // *Renewable Energy*. – 2009. – V. 34. – P. 14–22.



75. Demirbas, M.F. Potential contribution of biomass to the sustainable energy development / M.F. Demirbas, M. Balat, H. Balat // *Energy Conversion and Management*. – 2009. – V. 50. – P. 1746–1760.

76. Moiseyev, A. An economic analysis of the potential contribution of forest biomass to the EU RES target and its implications for the EU forest industries / A. Moiseyev, B. Solberg, A.M.I. Kallio, M. Lindner // *Journal of Forest Economics*. – 2011. – V. 17. – P. 197–213.

77. Verkerk, H. The realisable potential supply of woody biomass from forests in the European Union / H. Verkerk, P. Anttila, J. Eggers, M. Lindner, A. Antii // *Forest Ecology and Management*. – 2011. – V. 261. – P. 2007 – 2015.

78. Kober, T. Global energy perspectives to 2060 – WEC's World Energy Scenarios 2019 / T. Kober, H.-W. Schiffer, M. Densing, E. Panos // *Energy Strategy Reviews*. – 2020. – V. 31. – P. 100523.

79. Quintana-Rojo, C. Econometric Studies on the Development of Renewable Energy Sources to Support the European Union 2020–2030 Climate and Energy Framework: A Critical Appraisal / C. Quintana-Rojo, F.E. Callejas-Albiñana, M.Á. Tarancón, I. Martínez-Rodríguez // *Sustainability*. – 2020. – V. 12. – P. 4828.

80. Gao, J. An integrated assessment of the potential of agricultural and forestry residues for energy production in China / J. Gao, A. Zhang, S.K. Lam, X. Zhang, A.M. Thomson, E. Lin, K. Jiang, L.E. Clarke, J.A. Edmonds, P.G. Kyle, S. Yu, Y. Zhou // *GCB Bioenergy*. – 2016. – V. 8. – P. 880 – 8931.

81. Solarte-Toro, J.C. Thermochemical processing of woody biomass: A review focused on energy-driven applications and catalytic upgrading / J.C. Solarte-Toro, J.A. González-Aguirre, Jh.A.P. Giraldo, C.A.C. Alzate // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2021. – V. 136. – P. 110376.

82. Albashabsheh, N.T. Optimization of lignocellulosic biomass-to-biofuel supply chains with densification: Literature review / N.T. Albashabsheh, J.L.H. Stamm // *Biomass and Bioenergy*. – 2021. – V. 144. – P. 105888.

83. Суханов, В.С. Доступные биоэнергетические ресурсы в лесопромышленном комплексе России [Электронный ресурс] / В.С. Суханов, А.Б.

Левин // Министерство промышленности и торговли российской федерации. Государственный научный центр лесопромышленного комплекса ФГУП «ГНЦ ЛПК». – 2010. – Режим доступа: <https://www.slideshare.net/atner/4-7966789>.

84. Kindermann, L. A new protocol for estimation of woody aboveground biomass in disturbance-prone ecosystems / L. Kindermann, M. Dobler, D. Niedeggen, A. Linstädter // *Ecological Indicators*. – 2022. – V. 135. – P. 108466.

85. Dogan, E. Analyzing the effects of real income and biomass energy consumption on carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions: empirical evidence from the panel of biomass-consuming countries / E. Dogan, R. Inglesi-Lotz // *Energy*. – 2017. – V. 138. – P. 721–727.

86. Bilgili, F. The influence of biomass energy consumption on CO<sub>2</sub> emissions: a wavelet coherence approach / F. Bilgili, İ. Öztürk, E. Koçak, Ü. Bulut, Y. Pamuk, E. Muğaloğlu, H.H. Bağlıtaş // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2016. – V. 23. – P. 19043–19061.

87. Manandhar, A. Chapter Eighteen - Solid biofuels / A. Manandhar, S.H. Mousavi-Avval, J. Tatum, E. Shrestha, P. Nazemi, A. Shah // *Biomass, Biofuels, Biochemicals Green-Economy: Systems Analysis for Sustainability*. – 2021. – P. 343–370.

88. Brandão, P.Ch. Forest biomass as a viable pathway for sustainable energy supply in isolated villages of Amazonia / P.Ch. Brandão, A.L. de Souza, P. Rousset, F.N.Be. Simas, B.A.F. de Mendonça // *Environmental Development*. – 2021. – V. 37. – P. 100609.

89. Briones-Hidrovo, A. Environmental and energy performance of residual forest biomass for electricity generation: Gasification vs. combustion / A. Briones-Hidrovo, J. Copa, L.A.C. Tarelho, C. Gonçalves, T.P. da Costa, A.C. Dias // *Journal of Cleaner Production*. – 2021. – V. 289. – P. 125680.

90. Simon, F. Modelling and simulation of the wood biomass supply from the sustainable management of natural forests / F. Simon, A. Girard, M. Krotki, J. Ordoñez // *Journal of Cleaner Production*. – 2021. – V. 282. – P. 124487.

91. Древесина как источник энергии в регионе ЕЭК ООН: данные, тенденции и перспективы в Европе [Электронный ресурс]. – М.: Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций. – 2018. – Режим доступа: <https://unece.org/DAM/timber/publications/SP-42-R.pdf>.

92. Lee, B.H. Effect of torrefaction and ashless process on combustion and NO<sub>x</sub> emission behaviors of woody and herbaceous biomass / B.H. Lee, L.Sh, D.-G. Lee, Ch.-H. Jeon // *Biomass and Bioenergy*. – 2021. – V. 151. – P. 106133.

93. Lela, B. Cardboard/sawdust briquettes as biomass fuel: Physical–mechanical and thermal characteristics / B. Lela, M. Barišić, S. Nižetić // *Waste Management*. – 2016. – V. 47. – P. 236–245.

94. Fogarasi, S. Assessment of coal and sawdust co-firing power generation under oxy-combustion conditions with carbon capture and storage / S. Fogarasi, C.C. Cormos // *Journal of Cleaner Production*. – 2017. – V. 142. – P. 3527–3535.

95. Marangwanda, G.T. Modelling Co-Combustion of Bituminous Coal and Pine Sawdust: Thermal Behaviour / G.T. Marangwanda, D.M. Madyira, H.C. Chihobo, T.O. Babarinde // *Fuel Communications*. – 2021. – V. 31. – P. 100035.

96. Zhang, X. A feedstock supply model integrating the official organization for China's biomass generation plants / X. Zhang, K. Luo, Q. Tan // *Energy Policy*. – 2016. – V. 97. – P. 276 – 290.

97. Дольд, А. Лекции по алгебраической топологии / А. Дольд. – М.: Мир, 1976. – 68 с.

98. Hao, H. Effect of heat flux on combustion of different wood species / H. Hao, Ch.L Chow, D. Lau // *Fuel*. – 2020. – V. 278. – P. 118325.

99. Mirkowski, Z. Petrographic composition of coals and products of coal combustion from the selected combined heat and power plants (CHP) and heating plants in Upper Silesia, Poland / Z. Mirkowski, I. Jelonek // *International Journal of Coal Geology*. – 2019. – V. 201. – P. 102–108.

100. Striūgas, N. Estimating the fuel moisture content to control the reciprocating grate furnace firing wet woody biomass / N. Striūgas, L. Vorotinskienė, R. Paulauskas,

R. Navakas, A. Džiugys, L. Narbutas // *Energy Conversion and Management*. – 2017. – V. 149. – P. 937–949.

101. Семенов, Ю.П. Лесная биоэнергетика / Ю.П. Семенов. – М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2008. – 350 с.

102. Разрезы древесины. Структура древесины и её особенности строения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.masterovoi.ru/stroy-mat/struktura-drevesiny>.

103. Лыков, А.В. Теория сушки / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.

104. Kongto, P. Enhancing the fuel properties of rubberwood biomass by moving bed torrefaction process for further applications / P. Kongto, A. Palamanit, S. Chaiprapat, N. Tipprayawong // *Renewable Energy*. – 2021. – V. 170. – P. 703–713.

105. Barskov, S. Torrefaction of biomass: A review of production methods for biocoal from cultured and waste lignocellulosic feedstocks / S. Barskov, M. Zappi, P. Buchireddy, S. Dufreche, J. Guillory, D. Gang, R. Hernandez, R. Bajpai, J. Baudier, R. Cooper, R. Sharp // *Renewable Energy*. – 2019. – V. 142. – P. 624–642.

106. Adamski, R. Influence of process parameters in superheated steam drying on fire and explosion parameters of woody biomass / R. Adamski, D. Siuta, B. Kukfisz, P.T. Mitkowski, W. Szaferski // *Fuel Processing Technology*. – 2021. – V. 211. – P. 106597.

107. ГОСТ 19773-84. Пиломатериалы хвойных и лиственных пород. Режимы сушки в камерах периодического действия. Межгосударственный стандарт. – М.: Стандартинформ. 2009.

108. Лоскутов, С.Р. Термический анализ древесины основных лесобразующих пород средней Сибири / С.Р. Лоскутов, О.А. Шапченкова, А.А. Анискина // *Сибирский лесной журнал*. – 2015. – № 6. – С. 17–30.

109. Pascoe, S. The discourses of climate change science: Scientific reporting, climate negotiations and the case of Papua New Guinea / S. Pascoe, Sh. Brincat, A. Croucher // *Global Environmental Change*. – 2019. – V. 54. – P. 78–87.

110. Bressand, A. How the decarbonisation discourse may lead to a reduced set of policy options for climate policies in Europe in the 2020s / A. Bressand, P. Ekins // *Energy Research & Social Science*. – 2021. – V. 78. – 102118.

111. Iacobuță, G.I. Aligning climate and sustainable development finance through an SDG lens. The role of development assistance in implementing the Paris Agreement / G.I. Iacobuță, C. Brandi, A. Dzebo, S.D.E. Duron // *Global Environmental Change*. – 2022. – V. 74. – P. 102509.

112. Delafield, G. Conceptual framework for balancing society and nature in net-zero energy transitions / G. Delafield, C. Donnison, Ph. Roddis, Th. Arvanitopoulos, A. Sfyridis, S. Dunnett, Th. Ball, K.G. Logan // *Environmental Science & Policy*. – 2021. – V. 125. – P. 189–201.

113. Илим. Миссия от дерева к бумаге [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ilimgroup.ru>.

114. Рябина, О. Одна из крупнейших лесопильных компаний России [Электронный ресурс] / О. Рябина // *Журнал профессионалов ЛПК*. – Режим доступа: <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=4487>.

115. Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года [Электронный ресурс]. – М.: Министерство промышленности и торговли Российской Федерации. – 2017. – Режим доступа: [https://minpromtorg.gov.ru/common/upload/files/docs/Project\\_les2030\\_20102017.pdf](https://minpromtorg.gov.ru/common/upload/files/docs/Project_les2030_20102017.pdf)

116. Онежский ЛДК [Электронный ресурс]. – М.: Ассоциация производителей машин и оборудования лесопромышленного комплекса. – Режим доступа: <https://alestech.ru/factory/64-onezhskiyk>.

117. 96/05114 Parallel powering for Avedore 2 power plant // *Fuel and Energy Abstracts*. – 1996. – V. 37. – P.359.

118. Cheng, W. Effect of spatial distribution and number of raw material collection locations on the transportation costs of biomass thermal power plants / W. Cheng, Y. Zhang, P. Wang // *Sustainable Cities and Society*. – 2020. – V. 55. – P. 102040.

119. Asfar, J.A. Thermodynamic analysis of a biomass-fired lab-scale power plant / J.A. Asfar, A. AlShwawra, N.A. Shaban, M. Alrbai, B.R. Qawasmeh, A. Sakhrieh, M.A. Hamdan, O. Odeh // *Energy*. – 2020. – V. 194. – P. 116843.

120. Kinoshita, T. Woody biomass supply potential for thermal power plants in Japan / T. Kinoshita, T. Ohki, Y. Yamagata // *Applied Energy*. – 2010. – V. 87. – P. 2923–2927.
121. Goerndt, M.E. Drivers of biomass co-firing in U.S. coal-fired power plants / M.E. Goerndt, F.X. Aguilar, K. Skog // *Biomass and Bioenergy*. – 2013. – V. 58. – P. 158–167.
122. Энергия из биомассы [Электронный ресурс]. – Polytechnik Biomass Energy. – Режим доступа: <https://biomass.polytechnik.com/ru>.
123. Lisbjerg Power Station [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.myclhs.org/871660-lisbjerg-power-station-LLEMNU>.
124. BEKW Bioenergiekraftwerk Emsland – Strom und Wärme aus Stroh [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.bekw.de>.
125. Asnaes (Аснес) – электростанция на биомассе [Электронный ресурс]. – Возобновляемая энергия и ресурсы. – 2020. – Режим доступа: <http://renewnews.ru/asnaes>.
126. Farvel til kul til fjernvarmen [Электронный ресурс]. – Sustainable district heating from HOFOR. – Режим доступа: <https://www.hofor.dk/baeredygtige-byer/amagervaerket/baeredygtig-biomasse-paa-amagervaerket/farvel-kul-fjernvarmen>.
127. Зимаков, А.В. Опыт Швеции по экологизации системы городского центрального теплоснабжения на примере ТЭЦ «Вяртаверкет» / А.В. Зимаков // *Жилищные стратегии*. – 2018. – Т. 5. – № 3. – С. 383-398.
128. McQueen, A. Colossal power by the sea [Электронный ресурс] / A. McQueen // *Evolution Technology Magazine from SLF*. – 2019. – Режим доступа: <https://evolution.skf.com/ru>.
129. Электростанция Бёблинген, работающая на биомассе [Электронный ресурс] // Cristof industries. – 2008. – Режим доступа: <https://www.christof.com/ru/projekt/stantsiya-biomassy-beblingena-herman>.
130. Wiltsee, G. Lessons Learned from Existing Biomass Power Plants / G. Wiltsee // *National Renewable Energy Laboratory*. – 2000. – P. 143.

131. Станция на биомассе Фехенхайм [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.christof.com/ru/projekt/stantsiya-biomassa-fechenheim>.

132. Sung, Y. Synergistic effect of co-firing woody biomass with coal on NO<sub>x</sub> reduction and burnout during air-staged combustion / Y. Sung, S. Lee, Ch. Kim, D. Jun, Ch. Moon, G. Choi, D. Kim // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2016. – V. 71. – P. 114–125.

133. Янковский, С.А. Особенности физико-химических превращений смесевых топлив на основе типичных каменных углей и древесины при нагреве / С.А. Янковский, Г.В. Кузнецов // *Химия твердого топлива*. – 2019. – № 1. – С. 26–33.

134. Deng, Zh. A literature research on the drying quality of agricultural products with using solar drying technologies / Zh. Deng, M. Li, T. Xing, J. Zhang, Y. Wang, Y. Zhang // *Solar Energy*. – 2021. – V. 229. – P. 69–83.

135. Ståhl, M. Industrial processes for biomass drying and their effects on the quality properties of wood pellets / M. Ståhl, K. Granström, J. Berghel, R. Renström // *Biomass and Bioenergy*. – 2004. – V. 27. – P. 621–628.

136. Resende, R.T. Air-drying of eucalypts logs: Genetic variations along time and stem profile / R.T. Resende, A.C.O. Carneiro, R.A.D.C. Ferreira, K.N. Kuki, R.U. Teixeira, Ú.R. Zaidan, R.D. Santos, H.G. Leite, M.D.V. Resende // *Industrial Crops and Products*. – 2018. – V. 124. – P. 316–324.

137. Koga, S. Drying on the Board- and Boxed Heart Squares-larch Lumbers within an Opaque Solar Drying House Covered by a Composite Surface / S. Koga, K. Kanayama, H. Tsuchihashi, H. Baba, T. Sugawara // *Energy Procedia*. – 2014. – V. 57. – P. 2966–2975.

138. Pang, Sh. Investigation of effects of wood variability and rheological properties on lumber drying: application of mathematical models / Sh. Pang // *Chemical Engineering Journal*. – 2002. – V. 86. – P. 103–110.

139. Bach, Q.V. Hydrothermal pretreatment of fresh forest residues: Effects of feedstock pre-drying / Q.V. Bach, K.Q. Tran, Ø. Skreiberg // *Biomass and Bioenergy*. – 2016. – V. 85. – P. 76–83.

140. Hofmann, N. Drying effects and dry matter losses during seasonal storage of spruce wood chips under practical conditions / N. Hofmann, T. Mendel, F. Schulmeyer, D. Kuptz, H. Borchert, H. Hartmann // *Biomass and Bioenergy*. – 2018. – V. 111. – P. 196–205.
141. Theppaya, T. Parameters influencing drying behavior of rubber wood (*hevea brazilliensis*) as determined from desorption experiment / T. Theppaya, S. Prasertsan // *Drying Technology*. – 2002. – V. 20. – P. 507–525.
142. Li, L. Microwave drying performance of lignite with the assistance of biomass-derived char / L. Li, X. Jiang, Zh. Bian, J. Wang, F. Wang, Zh. Song, X. Zhao, Ch. Ma // *Drying Technology*. – 2017. – V. 37. – P. 173–785.
143. Jia, D. Biomass drying in a pulsed fluidized bed without inert bed particles / D. Jia, X. Bi, C.J. Lim, S. Sokhansanj, A. Tsutsumi // *Fuel*. – 2016. – V. 186. – P. 270–284.
144. Babu, A.K. Review of leaf drying: Mechanism and influencing parameters, drying methods, nutrient preservation, and mathematical models / A.K. Babu, G. Kumaresan, V.A. Raj, R. Velraj // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2018. – V. 90. – P 536–556.
145. Ashtiani, S.M. Analyzing drying characteristics and modeling of thin layers of peppermint leaves under hot-air and infrared treatments / S.M. Ashtiani, A. Salarikia, M.R. Golzarian // *Information Processing in Agriculture*. – 2017. – V. 4. – P. 128–139.
146. Pin, K.Y. Drying of betel leaves (*Piper betle* L.): quality and drying kinetics / K.Y. Pin, T.G. Chuah, A.A. Rashih, C.L. Law, M.A. Rasadah, T.S.Y. Choong // *Drying Technology*. – 2009. – V. 27. – P. 149–155.
147. Nourhène, B. Experimental and mathematical investigations of convective solar drying of four varieties of olive leaves / B. Nourhène, K. Mohammed, K. Nabil // *Food and Bioproducts Processing*. – 2008. – V. 86. – P. 176–184.
148. Mohamed, L.A. Single layer solar drying behaviour of *Citrus aurantium* leaves under forced convection / L.A. Mohamed, M. Kouhila, A. Jamali, S. Lahsasni, N. Kechaou, M. Mahrouz // *Energy Conversion and Management*. – 2005. – V. 46. – P. 1473–1483.



149. Boudhrioua, N.M. Experimental and mathematical investigations of convective solar drying of four varieties of olive leaves / N.M. Boudhrioua, M. Kouhila, N. Kechaou // *Food and Bioproducts Processing*. – 2008. – V. 86. – P. 176–184.

150. Ahmed, J. Drying characteristics and product quality of coriander leaves / J. Ahmed, U.S. Shivhare, G. Singh // *Food and Bioproducts Processing*. – 2001. – V. 79. – P. 103–106.

151. Kaya, A. An experimental study on drying kinetics of some herbal leaves / A. Kaya, O. Aydın // *Energy Conversion and Management*. – 2009. – V. 50. – P. 118–124.

152. Ali, M.A. Drying kinetics and colour analysis of moringaoleifera leaves / M.A. Ali, Y.A. Yusof, N.L. Chin, M.N. Ibrahim, S.M.A. Basra // *Agriculture and Agricultural Science Procedia*. – 2014. – V. 2. – P. 394–400.

153. Defraeye, T. Insights in convective drying of fruit by coupled modeling of fruit drying, deformation, quality evolution and convective exchange with the airflow / T. Defraeye, A. Radu // *Applied Thermal Engineering*. – 2018. – V. 129. – P. 1026–1038.

154. Baranovskii, N.V. Ignition of Forest Combustible Materials by a Group of Crystallizing Metal Particles / N.V. Baranovskii // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2020. – V. 93. – P. 635–640.

155. Kim, D. Numerical analysis of convective drying of a moving moist object / D. Kim, G. Son, S. Kim // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2016. – V. 99. – P. 86–94.

156. Manríquez, M.J. Influence of the temperature on the compression strength parallel to grain of paricá / M.J. Manríquez, P.D. Moraes // *Construction and Building Materials*. – 2010. – V. 24. – P. 99–104.

157. Shao, H. Factor analysis of the influence of environmental conditions on VOC emissions from medium density fibreboard and the correlation of the factors with fitting parameters / H. Shao, Y. Ren, Y. Zhang, Ch. Wu, W. Lia, J. Liu // *RSC Advances*. – 2021. – V. 11. – P. 26151–26159.

158. Zou, S. Experimental research on an innovative sawdust biomass-based insulation material for buildings / S. Zou, H. Li, Sh. Wang, R. Jiang, J. Zou, X. Zhang, L. Liu, G. Zhang // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – V. 260. – P. 121029.

159. Chen, X. Numerical analysis on the transient measurement of gas temperature in porous material using thermocouples at high temperatures / X. Chen, X.L. Xia, Ch. Sun, Y. Li // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2015. – V. 91. – P. 1060–1068.
160. Tang, Y. Experimental investigations and analysis of wet porous sand layer air-drying process / Y. Tang, Y. Zhang, J. Min // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2019. – V. 143. – P. 118535.
161. Redko, T. Measurement of the times for pyrolysis and the thermal diffusivity of a pyrolysing particle of wood and also of the resulting char / T. Redko, A. Volford, E.J. Marek, S.A. Scott, A.N. Hayhurst // *Combustion and Flame*. – 2020. – V. 212. – P. 510–518.
162. Myllyma, T. Techno-economic evaluation of biomass drying in moving beds: The effect of drying kinetics on drying costs / T. Myllyma, H. Holmberg, P. Ahtila // *Drying Technology*. – 2019. – V. 37. – P. 1201–1214.
163. Bengtsson, P. Experimental Analysis of Low-Temperature Bed Drying of Wooden Biomass Particles / P. Bengtsson // *Drying Technology*. – 2008. – V. 26. – P. 602–610.
164. Lerman, P. Experimental method for designing a biomass bed dryer / P. Lerman, O. Wennberg // *Biomass and Bioenergy*. – 2011. – V. 35. – P. S31–S39.
165. Красников В.В. Механизм сушки целлюлозы на нагретой поверхности / В.В. Красников, В.А. Данилов // *Инженерно-физический журнал*. – 1966. – Т. 11. – №4. – С. 36–40.
166. Лыков, А.В. Тепло- и массообмен в процессах сушки / А.В. Лыков. – М.: Госэнергоиздат, 1956. – 464 с.
167. Schenck, H. Theories of engineering experimentation / H. Schenck. – London: McGraw-Hill, 1968. – 118 p.
168. Student. The probable error of a mean / Student // *Biometrika*. – 1908. – V. 6. – P. 1–25.

169. Han, Sh. Preparation of hydrophobic, porous, and flame-resistant lignocellulosic carbon material by pyrolyzing delignified wood / Sh. Han, J. Wang, L. // *Vacuum*. – 2022. – V. 197. – P. 110867.

170. Романовский, В.И. Применения математической статистики в опытном деле / В.И. Романовский. – М.: Гостехиздат, 1947. – 248 с.

171. Арнольд, В.И. Топологические методы в гидродинамике / В.И. Арнольд, Б.А. Хесин. – М.: МЦНМО, 2007. – 392 с.

172. Муромкин, Ю.Н. Подготовка топлива в системе топливно-транспортного хозяйства ТЭС / Ю.Н. Муромкин, С.Г. Ушаков, Б.Л. Шельгин // ГОУ ВПО Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина. – 2004. – С. 116.

173. Awadalla, H.S.F. Mathematical modelling and experimental verification of wood drying process / H.S.F. Awadalla, A.F. El-Dib, M.A. Mohamad, M. Reuss, H.M.S. Hussein // *Energy Conversion and Management*. – 2004. – V. 45. – P. 197–207.

174. Knudsen, M. Die maximale Verdampfungsgeschwindigkeit des Quecksilbers  
Martin Knudsen / M. Knudsen // *Annalen der Physik und Chemie*. – 1911. – V. 35. – P. 389.

175. Langmuir, I. *Chem. Soc.* – 1913. – V. 35. – P. 105.

176. Hertz, H. Ueber die Verdunstung der Flüssigkeiten, insbesondere des Quecksilbers, im luftleeren Raume / H. Herz // *Annalen der Physik und Chemie*. – 1882. – V. 17. – P. 177.

177. Maxwell, J.C. *Collected Scientific Papers*. (Cambridge). – 1890. – V. 2. – P. 625.

178. Кришер, О. Научные основы техники сушки / О. Кришер. – М.: Иностранная литература, 1961. – 232 с.

179. Ребиндер, П.А. О формах связи влаги с материалами в процессе сушки / П.А. Ребиндер. – М.: Всесоюзное научно-техническое совещание по сушке, 1958. – 20–33 с.

180. Исаченко, В. П. К вопросу о тепло- и массообмене при испарении воды из пористой стенки / В.П. Исаченко, В.В. Взоров // Инженерно-физический журнал. – 1964. – Т. 7. – №2. – С. 117.

181. Лотов, А.В. Конспект лекций по теории и методам многокритериальной оптимизации / А.В. Лотов, И.И. Пospelова. – М.: Учебное пособие, 2005. –127 с.

182. Rivkin, S.L. Thermophysical properties of water and water vapor, Thermal properties of water and steam / S.L. Rivkin, A.A. Aleksandrov. – М.: 1980. –13 с.

183. Козлов, В.Н. Технология пирогазетической переработки древесины / В.Н. Козлов, А.А. Нимвицкий. – М.: Гослесбумиздат, Ленинград. 1954. – 65 с.

184. Syrodoy, S.V. The influence of the structure heterogeneity on the characteristics and conditions of the coal–water fuel particles ignition in high temperature environment / S.V. Syrodoy, G.V. Kuznetsov, A.V. Zhakharevich, N.Y. Gutareva, V.V. Salomatov // Combustion and Flame. – 2017. – V. 180. – P. 196 – 206.

185. Zhdanova, A.O. Thermophysical and thermokinetic characteristics of forest combustible materials / A.O. Zhdanova, S.S. Kralinova, G.V., Kuznetsov, P.A. Strizhak // Journal of engineering physics and thermophysics. – 2019. – V. 92. – P. 1355–1363.

186. Reid, R.C. The properties of gases and liquids / R.C. Reid, J.M. Prausnitz, B.E. Poling. – New York: McGraw-Hill, 1977. – 688 p.

187. Peralta, P.N. Wood: Diffusion and Permeability / P.N. Peralta, Sh. Sivarajan // Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. – 2018.

188. Salomatov, V. Effect of high-temperature gas flow on ignition of the water-coal fuel particles / V. Salomatov, G. Kuznetsov, S. Syrodoy, N. Gutareva // Combustion and Flame. – 2019. – V. 203. – P. 375–385.

189. Просветов, В.В. К вопросу о давлении пара на жидкость при испарении и конденсации / В.В. Просветов, Л.М. Пророк. – М.: Физико-энергетический институт, 1976. – 20 с.

190. Maxwell, J.C. On Physical Lines of Force / J.C. Maxwell // Philosophical Magazine: Ser. 4. – 1862. – V. 11. – P. 161–175.

191. Фукс, Н.А. Испарение и рост капель в газообразной среде / Н.А. Фукс. – М.: Издательство Академии наук СССР. – 1958. – 89 с.

192. Kuznetsov, G.V. 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.Yu. Gutareva, D.Yu. Malyshev // Energy. – 2021. – P. 122362.

193. Анохина, Е.В. Исследование процессов испарения и кипения жидкостей / Е.В. Анохина // Журнал технической физики. – 2010. – Т. 80. – №8. – С. 32–37.

194. Михайлов, Н.М. Вопросы сушки топлива на электростанциях / Н.М. Михайлов. – М.: Госэнергоиздат. – 1957. – 152 с.

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

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

197. Сажин, Б.С. Основы техники сушки / Б.С. Сажин. – М.: Химия. – 1984. – 320 с.

198. Филоненко, Г.К. Кинетика сушильных процессов / Г.К. Филоненко. – М.: Оборониздат. – 1939. – 138 с.

199. ГОСТ Р 54220–2010 (ЕН 14961-1:2010). Биотопливо твердое. Технические характеристики и классы топлива. – М.: Стандартинформ. 2012.

200. Kuznetsov, G.V. 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. – V. 169. – P. 498–511.

201. Шершневу, А.А. Теплоэнергетика. Некролог / А.А. Шершневу. – М.: Энергомашиностроение. – 1959. – 48 с.

202. Kuznetsov, G.V. Ignition of the wood biomass particles under conditions of near-surface fragmentation of the fuel layer / G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, N.Y. Gutareva, A.A. Kostoreva, Zh.A. Kostoreva // Fuel. – 2019. – V. 252. – P. 19–36.

203. Kuznetsov, G.V. The effect of the distance between wood and coal particles on the characteristics of their joint ignition under conditions of high-temperature radiation-convective heating / G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, Zh.A. Kostoreva, D.V. Malyshev, N. Yu Gutareva // Journal of the Energy Institute. – 2021. – V. 97. – P. 13-26.

204. Kuznetsov, G.V. Theoretical justification of utilization of forest waste by incineration in a composition of bio-water-coal suspensions. Ignition stage / G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, D.Yu. Malyshev, N.Yu. Gutareva, N.A. Nigay // Applied Thermal Engineering. – 2020. – V. 170. – P. 115034.

205. Fagera, L. Drying of biomass for second generation synfuel production / L. Fagera, J. Brammer, C. Wile'n, M. Lauer, F. Verhoeff // Biomass and bioenergy. – 2010. – V. 34. – P. 1267–1277.

206. Syahrul, S. Thermodynamic modeling of fluidized bed drying of moist particles / S. Syahrul, I. Dincer, F. Hamdullahpur // International Journal of Thermal Sciences. – 2003. – V. 42. – P. 691–701.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А. Акт об использовании результатов диссертационного  
исследования**

УТВЕРЖДАЮ  
Директор ООО «Нанокерамика»  
Л.А. Жилина  
2021 г.



**АКТ**

**о внедрении результатов диссертационной работы  
Нигай Натальи Андреевны**

Настоящий акт свидетельствует, что результаты научно-исследовательской работы Нигай Натальи Андреевны используются при анализе режимов сушки пористых материалов в условиях их высокотемпературного нагрева. Полученные зависимости и установленные закономерности процессов тепло- и массопереноса, протекающих при удалении влаги из водонасыщенных сред, позволяют проводить прогностическое моделирование режимов сушки высокопористых влажных материалов.

Результаты проведенных экспериментальных исследований (в виде графиков, таблиц и формул) могут быть применены при проектировании новых сушильных установок. Результаты переданы совместно с соответствующими комментариями.

Директор  
ООО «Нанокерамика»



Л.А. Жилина

Ведущий инженер  
ООО «Нанокерамика»



М.В. Григорьев

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Список публикаций по теме диссертации**

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, V.I. Maksimov, N.Yu. Gutareva // **Renewable Energy**. – 2021. – Vol. 169. – P. 498-511. (ИФ=8,001, Q1)
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, S.V. Syrodoy, N.Y. Gutareva, D.Yu. Malyshev // **Energy**. – 2021. – P. 122362. (ИФ=7,147, Q1)
3. **Nigay N.A.** Influence of biomass type on its characteristics of convective heating and dehydration / G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, N.Y. Gutareva // **Energy Reports**. – 2021. – Vol. 7. – P. 7118-7133. (ИФ=6,87, Q1)
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 / 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. (ИФ=3,447, Q2)
5. **Нига́й Н.А.** Влияние плотности засыпки древесной биомассы на характеристики её сушки в условиях высокотемпературного нагрева / С.В. Сыродой // **Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов**. – 2021. – Т. 332. № 6. 90–97.
6. **Ivanova (Nigay) N.A.** Experimental investigation of the processes of dehumidification of coniferous biomass / E.E. Bulba // **Matec Web of Conferences**. – 2017 – Vol. 141, Article number 01014. – P. 1–5.
7. **Ivanova (Nigay) N.A.** Experimental study of liquid evaporation rate from coniferous biomass / E.E. Bulba // **Matec Web of Conferences**. – 2017 – Vol. 110. Article number 01020. – P. 1–5
8. **Ivanova (Nigay) N.A.** Mathematical modeling of processes of heat and mass transfer during drying of wood biomass / E.E. Bulba // **Matec Web of Conferences**. – 2018 – Vol. 194, Article number 01012. – P. 1–6.



9. **Нигай Н.А.** Тепловой режим слоя биомассы в процессе её дегидратации / Н.А. Нигай Н.А., С.В. Сыродой // Труды XVI Минского международного форума по тепломассообмену. Минск: Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, 2022 - С. 607-610.

10. **Иванова (Нигай) Н.А.** Влияние плотности засыпки влажной древесной биомассы на характеристики её дегидратации в условиях радиационно-конвективного нагрева / Н.А. Иванова (Нигай) Н.А., С.В. Сыродой // Тезисы докладов VI Всероссийской конференции с элементами школы молодых ученых «Теплофизика и физическая гидродинамика». Севастополь: Севастопольский государственный университет, 2021 - С. 131

11. **Нигай Н.А.** Механизм влагоудаления из слоя биомассы при интенсивном радиационно-конвективном нагреве / Н.А. Иванова (Нигай) Н.А., С.В. Сыродой // XXXVI Сибирский теплофизический семинар: тезисы докладов Всероссийской конференции с элементами научной школы для молодых ученых, посвящённой 70-летию академика Алексеенко Сергея Владимировича. Новосибирск: Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 2020 - С. 139

12. **Нигай Н.А.** Отличия интегральных характеристик процессов сушки лесных горючих материалов на основе веток хвойных и лиственных пород древесины / Н.А. Иванова (Нигай) Н.А., С.В. Сыродой // Современные проблемы теплофизики и энергетики: материалы III Международной конференции. Москва: МЭИ, 2020 - С. 210-211

13. **Нигай Н.А.** Тепло- и массоперенос при влагоудалении из слоя лесного горючего материала / Н.А. Иванова (Нигай) Н.А., С.В. Сыродой // XXXV Сибирский теплофизический семинар: тезисы докладов Всероссийской конференции с элементами научной школы для молодых ученых. Новосибирск: Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 2019 - С. 175

14. **Иванова (Нигай) Н.А.** Физическое и математическое моделирование процесса сушки влажной биомассы // XXXIV Сибирский теплофизический семинар: тезисы докладов всероссийской конференции с элементами научной

школы для молодых ученых. Новосибирск: Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 2018 - С. 98

15. **Иванова (Нигай) Н.А.** Сравнительный анализ процессов влагоудаления из древесной биомассы и испарения жидкости со свободной поверхности / Н.А. Иванова (Нигай) Н.А., Е.Е. Бульба // Труды Седьмой Российской национальной конференции по теплообмену: в 3 томах. Москва: МЭИ, 2018 - Т. 1 - С. 341-344

16. **Нигай Н.А.** Сравнительный анализ эффективности сушки биомасс на основе лесных горючих материалов и отходов лесопиления / Н.А. Иванова (Нигай) Н.А., С.В. Сыродой // Семинар вузов по теплофизике и энергетике: материалы Всероссийской научной конференции с международным участием. СПб: Политех-Пресс, 2019 - С. 286-287

17. **Иванова (Нигай) Н.А.** Экспериментальное исследование влияния теплофизических свойств хвойной биомассы на процесс сушки // Интеллектуальные энергосистемы: материалы V Международного молодёжного форума. Томск: ТПУ, 2017 - Т. 1 - С. 21-25.

18. **Иванова (Нигай) Н.А.** Экспериментальное исследование процесса влагоудаления в древесной биомассе и процесса испарения жидкости со свободной поверхности // Проблемы геологии и освоения недр: труды XXII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 155-летию со дня рождения академика В.А. Обручева, 135-летию со дня рождения академика М.А. Усова, основателей Сибирской горно-геологической школы, и 110-летию первого выпуска горных инженеров в Сибири. Томск: Изд-во НИ ТПУ, 2018 - Т. 2 - С. 450-451.

## ПРИЛОЖЕНИЕ В. Рекомендации по практическому использованию результатов диссертационной работы

Полученные по результатам диссертационного исследования зависимости и теоретические следствия являются основанием для разработки ряда рекомендаций по практическому применению результатов экспериментов при проведении опытно-конструкторских работ по проектированию технологий термической подготовки древесной биомассы перед её сжиганием в топочных устройствах паровых и водогрейных котлов:

1. По результатам проведенных экспериментов установлено, что сушку тонкого слоя (толщиной  $h \approx 1-1,5$  мм) древесной биомассы (ЛГМ на основе свежесрезанных листьев деревьев) эффективнее всего проводить в условиях высокотемпературного нагрева ( $T_g = 393$  К). Соответственно, можно сказать, что при определенных условиях организации процесса сжигания на тепловых электростанциях (например, в низкотемпературном вихре по аналогии с топкой ЛПИ [203]) проведение процедуры предварительной термической подготовки (сушки), скорее всего, нецелесообразно. Наиболее приемлемо прямое сжигание влажной биомассы (на основе свежесрезанных листьев) в топочных устройствах котельных агрегатов. Для этого в камере сгорания необходимо организовывать вихревые зоны рециркуляции факела по аналогии с топками конструкции А.А. Шершнева [201].

2. Экспериментально установлено, что в условиях относительно высокотемпературного нагрева (при температуре внешней среды  $T_g = 373-393$  К) вид древесной биомассы не оказывает существенного влияния на динамику влагоудаления. Соответственно, можно обосновано полагать, что предварительную термическую подготовку разнотипного биотоплива (типичные отходы лесопиления и деревообработки: опилки, щепа, древесная стружка; разного рода лесной горючий материал: лиственной 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.

3. Одним из важнейших результатов, полученных при проведении экспериментальных исследований является вывод о том, что увеличение плотности засыпки древесной биомассы (при идентичности массы навески) оказывает положительное влияние на характеристики и условия процесса дегидратации (например, при  $T_g=393$  К времена сушки уменьшаются на 40 %). Последнее дает существенные основания для вывода о том, что процесс сушки древесной биомассы при её термической подготовке к сжиганию можно эффективно проводить в объемных хранилищах бункерного типа в существенно уплотненном состоянии, а не в аэрированном (по аналогии с барабанными сушилками [205] или в кипящем слое [206]), как считалось ранее. При этом тепло к навеске биомассы подводится кондуктивно, через стенку бункера. В этих условиях существенно упрощается процедура организации процесса сушки (вследствие отсутствия высокотемпературных газоздухопроводов), а также снижаются затраты электроэнергии на собственные нужды ТЭС из-за отсутствия электропривода редукторов, вращающих барабаны сушилок. В связи с этим значительно уменьшаются (за счет уменьшения объема высушиваемой биомассы) массогабаритные характеристики сушильного бункера.

4. Также по результатам проведенных экспериментальных исследований установлены режимы сушки перспективной для целей энергетики древесной биомассы на основе опавших веточек деревьев. Показано, что древесные веточки наиболее эффективно сушить в условиях относительно низких температур внешней среды ( $T_g=333-353$  К). Соответственно, при проведении опытно-конструкторских работ по проектированию объектов теплоэнергетики (теплоэлектроцентрали или локальные котельные, использующие в качестве топлива или одного из компонент топливной смеси ЛГМ на основе веток деревьев) необходимо закладывать в проект оборудование, проводящее сушку биомассы с использованием низкопотенциальных источников теплоты (например, дымовые газы котла после электрофильтров). К таким установкам, отвечающим всему

набору необходимых характеристик (возможность долговременной сушки больших объемов древесной биомассы), можно отнести силосные хранилища.