

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна»

На правах рукописи

Пекарец Александр Андреевич

**ТЕХНОЛОГИЯ ДРЕВЕСНЫХ И ДРЕВЕСНО-УГОЛЬНЫХ БРИКЕТОВ
ИЗ ОПИЛОК ДРЕВЕСИНЫ ЛИСТВЕННИЦЫ**

05.21.03 – Технология и оборудование химической переработки биомассы дерева;
химия древесины

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель

Аким Эдуард Львович
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой технологии
целлюлозы и композиционных материалов
Санкт-Петербургского государственного
университета промышленных
технологий и дизайна,

Санкт-Петербург – 2020

Оглавление

| | |
|---|-----|
| ВВЕДЕНИЕ..... | 4 |
| 1 Литературный обзор..... | 8 |
| 1.1 Существующие методы производства твердого биотоплива второго поколения..... | 10 |
| 1.2 Особенности строения опилок древесины лиственницы как природного полимерного композиционного материала и особенности релаксационного состояния полимерных компонентов древесины | 49 |
| 1.3 Заключение по литературному обзору, теоретические предпосылки работы и постановка задач экспериментальной части..... | 59 |
| 2 Методическая часть..... | 61 |
| 2.1 Объекты исследования | 61 |
| 2.2 Методы исследования | 61 |
| 3 Экспериментальная часть | 64 |
| 3.1 Научные основы энергосберегающей технологии получения топливных древесных и древесно-угольных брикетов | 65 |
| 3.2 Микроскопическое исследование опилок древесины лиственницы, древесных и древесно-угольных брикетов | 68 |
| 3.3 Исследование упруго-релаксационных свойств древесины лиственницы и их роли при получении древесных и древесно-угольных брикетов | 72 |
| 3.4 Анализ процессов, происходящих при диспергировании | 79 |
| 3.5 Анализ процессов, происходящих при экструзии..... | 83 |
| 3.6 Анализ процессов, происходящих при карбонизации в изотермических условиях | 95 |
| 3.7 Заключение по экспериментальной части..... | 100 |
| 4 Технологическая часть..... | 101 |
| 4.1 Синтез и анализ технологической схемы по производству топливных остеклованных древесных брикетов и древесно-угольных брикетов..... | 101 |
| 4.2 Создание опытно-промышленной и промышленных линий по производству древесных и древесно-угольных брикетов | 110 |
| 4.3 Исследование эксплуатационных свойств полученных топливных древесных и древесно-угольных брикетов и их сопоставление с аналогичными видами выпускаемой продукции | 113 |
| ВЫВОДЫ..... | 116 |

| | |
|---|-----|
| СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ | 118 |
| СПИСОК РИСУНКОВ | 120 |
| СПИСОК ТАБЛИЦ | 122 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ..... | 123 |
| ПРИЛОЖЕНИЯ..... | 139 |
| Приложение 1. Акт об использовании результатов диссертации Пекарца А.А. на соискание ученой степени кандидата технических наук | 139 |
| Приложение 2. Копия благодарственного письма Лесного комитета ЕЭК ООН/ФАО ООН..... | 141 |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Одна из важнейших проблем лесного сектора России — комплексное использование природных ресурсов. Лесные запасы России состоят на 58% из сосны и лиственницы (сибирской и даурской) [1–5]. В процессе механической переработки лиственницы образуется большое количество опилок, обычно 10–12 % которых, как правило, сжигаются. Более того, около многих лесопильных предприятий накопились многолетние отвалы опилок, в которых находятся сотни тысяч тонн гниющих древесных отходов. В последние двадцать лет в мире опилки широко применяют для производства твердого биотоплива второго поколения — пеллет и брикетов; их использование в мире превысило в 2018 году 35 млн. т. В России также создано и успешно развивается производство пеллет и брикетов, которое превысило 2 млн. т в год, причем 90–95 % пеллет идет на экспорт. При этом, однако, используются, как правило, зарубежные технологии и оборудование, имеющие не только высокую стоимость, но и значительную энергоемкость.

В связи с этим одна из актуальных задач для российской ЦБП — создание и реализация инновационной комплексной технологии глубокой переработки опилок, прежде всего, древесины лиственницы, как основной лесообразующей породы Сибири и Дальнего Востока. Данная диссертационная работа проводилась в продолжение реализации проекта «Разработка инновационной технологии комплексной переработки древесины лиственницы» [6] (далее проект «Лиственница») по постановлению Правительства РФ №218. В 2014 году проект был успешно завершен.

Цель и задачи исследования. Целью настоящей работы явилось создание энергосберегающей технологии получения топливных и угольных брикетов из опилок древесины лиственницы.

Постановка задачи. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи.

1. Проанализировать существующие рынки и методы производства твердого биотоплива второго поколения.

2. Проанализировать особенности строения опилок древесины лиственницы как природного полимерного композиционного материала и особенности релаксационного состояния полимерных компонентов древесины.

3. Исследовать компрессионные свойства древесины лиственницы в условиях одноосного сжатия.

4. Разработать научные основы принципиально новой энергосберегающей технологии получения топливных древесных и древесно-угольных брикетов и обеспечить патентную защиту данной технологии.

5. Осуществить синтез и анализ технологической схемы получения топливных древесных и древесно-угольных брикетов.

6. Создать опытно-промышленную установку получения топливных древесных и древесно-угольных брикетов.

7. Исследовать свойства получаемых топливных древесных и древесно-угольных брикетов и проанализировать области их эффективного использования.

В качестве объектов исследования были взяты опилки древесины лиственницы (как свежие, так и находившиеся длительное время в отвалах), модельные образцы древесины лиственницы в виде кубиков, остеклованные брикеты, а также угледревесные (карбонизированные) брикеты на их основе.

Научная новизна. Впервые проанализировано изменение релаксационных состояний полимерных компонентов древесины за счет совместного действия температуры, паров воды и механического воздействия, и показана возможность их направленного изменения в условиях инновационной технологии топливных и угольных брикетов из лиственничных опилок. Научная основа этой технологии связана с взаимодействием полимерных компонентов древесины с парами воды, которые, в сочетании с температурой, оказывают решающее влияние на релаксационное состояние полимерных компонентов древесины при подготовке к экструзии – измельчению, и собственно экструзии. На первой стадии – измельчения – опилки высушиваются до остаточной влажности 1 % и в аэродинамическом потоке измельчаются по хрупкому механизму до порошкообразного состояния. На второй стадии они превращаются в

экструдруемую систему за счет увлажнения водяным паром до средней влажности 3–4 %. В экструдере, за счет совместного воздействия «сжатия – сдвига» и температуры система переходит от максимальной ньютоновской вязкости к минимальной ньютоновской вязкости; в результате достигается плотность брикета до 1300 кг на кубометр. При выходе из сопла экструдера, благодаря резкому охлаждению, происходит остекловывание поверхности брикета. Дальнейшая стадия — низкотемпературный термостабилизированный пиролиз — проводится при 380–450 °С в аэродинамическом циркулирующем потоке в изотермическом карбонизаторе периодического действия, работающем в режиме рекуператора.

Теоретическая и практическая значимость работы. Впервые показана возможность направленного изменения релаксационного состояния полимерных компонентов древесины в виде опилок или микрощепы путем совместного воздействия водяного пара, температуры и сдвиговых напряжений. Предложены инновационные, защищенные 4 патентами РФ [7–10], методы получения топливных древесных и древесно-угольных брикетов из опилок древесины лиственницы; методы реализованы автором в опытно-промышленном масштабе в ООО «Лесная технологическая компания», в поселке Качуг, Иркутская область, в рамках приоритетного регионального проекта Иркутской области по комплексному использованию лесных ресурсов. Успешная эксплуатация данной линии и высокая конкурентоспособность получаемых топливных древесных и древесно-угольных брикетов на российских и мировых рынках позволила перейти к тиражированию аналогичных технологических линий в России (5 линий на конец 2019 года). Кроме того, по патентам автора, при финансовой поддержке Европейского Союза, на Рижском предприятии INOS (Латвия) осуществлена постанова на производство технологических линий по производству топливных и угольных брикетов из опилок древесины.

Разработанная технология позволяет, с одной стороны, получать древесные и угольные брикеты для разных потребителей (восстановитель для кремния и металлургии, топливо для барбекю, топливо для каминов), а с другой стороны —

утилизировать все древесные отходы. В то же время эту технологию можно считать принципиально важным шагом в развитии производства и использования биотоплива нового поколения.

Особенностью данной работы является параллельное проведение теоретического анализа происходящих процессов, экспериментальных исследований, изготовления оборудования, опытно-промышленных испытаний и постановки на производство новых видов продукции с их реализацией потребителям в России и за рубежом. С одной стороны, это определило необходимый и достаточный объем экспериментов на каждом этапе работы, а с другой, учитывая инновационность процесса и необходимость патентной защиты разработок, — наложило ограничения на публикацию научных результатов.

Обоснованность и достоверность. Обоснованность и достоверность полученных данных и выводов основана на использовании совокупности современных экспериментальных методов, а также подтверждается результатами успешной эксплуатации ряда опытно-промышленных и промышленных линий по производству инновационных остеклованных древесных брикетов и древесно-угольных брикетов. Эти данные согласуются с результатами теоретических и экспериментальных исследований древесины лиственницы.

1 Литературный обзор

Разработанная в диссертации инновационная технология получения из опилок древесины лиственницы топливных и угольных брикетов [7–22], реализованная на заводе ООО «Лесная технологическая компания», позволяет получать древесно-угольные брикеты для разных потребителей — каминное топливо и топливо для электростанций, топливо и восстановитель для металлургии.

Технология производства древесно-угольных брикетов, полученных карбонизацией древесного брикета, изготовленного на экструдерных прессах, включает ряд основных стадий, на которых происходит подготовка сырья к прессованию: сушка и увлажнение (пластификация) древесины; придание древесной системе термо- и влагопластичности за счет повышения влажности частиц древесины до 3–4 %; экструзионное прессование древесного сырья — перевод древесины в вынужденно вязкотекучее (пластическое) состояние и формование древесного брикета с получением водостойкого брикета (может находиться несколько дней в воде без разрушения). Производительность одного экструдера — до 1500–2500 кг/час, энергозатраты на процессе экструдирования (прессования) 35–40 кВт·часов/тонну брикета, что в разы ниже пеллетных и гидравлических прессов. Плотность брикета 1,26–1,30 кг/дм³, влажность 1–2 %. Затем проводится карбонизация древесного брикета. Печь карбонизации, работающая в режиме регенератора на тепле экзотермического разложения древесины, обеспечивает термостабилизированный пиролиз, который позволяет получить выход угольного брикета до 40 % от массы древесного брикета, благодаря очень низкому выделению смол и пиролизных газов, которые сжигаются в теплогенераторе сушилки опилок. Полученный брикет остывает, стабилизируется и упаковывается. Полученные древесно-угольные брикеты обладают высокой плотностью, так как получены из брикетов плотностью 1,26 кг/дм³ и могут транспортироваться в 40-футовых контейнерах с загрузкой до 26 тонн. Благодаря структуре, полученной при низкотемпературном

термостабилизированном пиролизе, они обладают высокой реакционной способностью и температурой горения. Линия по производству древесно-угольных брикетов построена в Иркутской области, имеет производительность 4000 т/год. Себестоимость производства древесно-угольных брикетов из отходов лесопиления составляет порядка 100 \$/т. Стоимость кокса составляет 350 \$/т, таким образом, переработка древесных отходов в древесно-угольный брикет может быть востребованной металлургической отраслью как заменитель кокса. Кроме того, такие брикеты могут конкурировать с торрефицированной древесиной.

В обзоре литературы рассмотрены вопросы, связанные с существующими методами производства различных видов твердого биотоплива второго поколения, состояния их рынков в мире и тенденциях их изменений, а также особенности строения опилок древесины лиственницы как природного полимерного композиционного материала и особенности релаксационного состояния полимерных компонентов древесины; в заключении главы приведены теоретические предпосылки работы.

В основу обзора положены материалы ФАО ООН – ЕЭК ООН и обзорные материалы последних лет [2–4].

Прежде всего, производство биотоплива надо рассматривать как неотъемлемую часть глобального лесного комплекса. Поэтому основным вопросом является устойчивость лесообеспечения — источника сырья. Поэтому, например, в США развитие пеллетного производства исторически совпадает с сокращением объема производства целлюлозно-бумажной продукции в последние десятилетия — в США и Канаде за последние 25–40 лет производство бумаги и картона сократилось в полтора раза. И основной причиной этого стал, прежде всего, перенос производства товаров повседневного спроса в Китай и другие страны Юго-Восточной Азии. В последние годы выявился и еще один фактор, который в ближайшие годы приобретет существенную роль в развитии производства и использования биотоплива — это лесные пожары.

1.1 Существующие методы производства твердого биотоплива второго поколения

Анализ данных ООН (Таблицы 1, 2) по изменению глобального производства и глобальной торговли лесной и целлюлозно-бумажной продукцией в 1980–2017 годах (по данным ФАО ООН [24]), показывает, что в настоящее время на долю топливной древесины приходится свыше половины заготавливаемой древесины. Из всей древесины, которая используется как топливо, около 17 % перерабатывается в древесный уголь [25–28].

Таблица 1 – Изменение глобального производства и глобальной торговли лесной продукцией в 1980–2017 годах (по данным ФАО ООН [10])

| Продукт | Ед. изм. | Производство | | | | Экспорт | | | |
|----------------------------|---------------------|--------------|-------------------------------|------|------|---------|-------------------------------|------|------|
| | | 2017 | Изменение (%) по сравнению с: | | | 2017 | Изменение (%) по сравнению с: | | |
| | | | 2016 | 2000 | 1980 | | 2016 | 2000 | 1980 |
| Круглый лес | млн. м ³ | 3797 | 1 | 10 | 21 | 139 | 2 | 17 | 48 |
| Дровяная древесина | млн. м ³ | 1890 | 0 | 6 | 12 | 8 | 11 | 128 | |
| Индустриальный круглый лес | млн. м ³ | 1907 | 1 | 13 | 32 | 130 | 3 | 14 | 40 |
| Пеллеты | млн. т | 33 | 12 | – | – | 20 | 15 | – | – |
| Пиломатериалы | млн. м ³ | 485 | 4 | 26 | 15 | 153 | 5 | 34 | 118 |
| Древесные панели | млн. м ³ | 402 | 0 | 125 | 314 | 91 | 4 | 72 | 509 |
| Фанера | млн. м ³ | 157 | -2 | 168 | 297 | 30 | 2 | 71 | 355 |
| ДСП, ОСБ, ДВП | млн. м ³ | 245 | 1 | 104 | 326 | 60 | 6 | 73 | 632 |

Производство древесного угля за последние десятилетия росло по мере роста спроса у городского населения и предприятий. Так, если в целом в мире в 2015 году объем производства древесного угля превышал 50 млн. тонн, то на Африку приходится свыше 30 млн. тонн.

Таблица 2 – Части типичного заготовленного дерева [11]

| Часть дерева или продукт | Процентная доля (%) |
|---------------------------|---------------------|
| Оставляемые в лесах | |
| Вершина, ветви и листва | 23,0 |
| Пень (исключая корни) | 10,0 |
| Опилки | 5,0 |
| Лесопиление | |
| Горбыль, кромки и обрезки | 17,0 |
| Опилки и мелкая щепа | 7,5 |
| Различные потери | 4,0 |
| Кора | 5,5 |
| Пиломатериалы | 28,0 |
| Всего | 100,0 |

При этом следует отметить, что, по данным ФАО, там, где спрос высок, в основном в странах Африки к югу от Сахары, а также в Юго-Восточной Азии и Южной Америке, нерациональные методы заготовки древесины и производства древесного угля способствуют деградации лесов, обезлесиванию и выбросам парниковых газов (ПГ) на всех этапах производственно-сбытовой цепочки древесного угля, особенно при использовании неэффективных технологий. В то же время древесный уголь, произведенный с использованием рационально управляемых ресурсов и усовершенствованных технологий, является энергоносителем с низким уровнем чистых выбросов ПГ, тем самым способствуя смягчению последствий изменения климата и при этом расширяя доступ к энергии и продовольствию и обеспечивая возможности для получения дохода [17, 18].

Древесина в условиях циркуляционной экономики [27–29] является очень ценным сырьем. Существует несколько вариантов использования отходов и сопутствующей продукции, получаемой при распиловке и обрезке, например, обрезки древесины могут использоваться предприятиями, производящими меньшие по размеру продукцию. Например, для производства натурального паркета могут применяться обрезки производства пиломатериалов. Многие отходы и побочные продукты производства перерабатываются в другие продукты.

Так, сырьем для производства брикетов или топливных древесных гранул могут служить любые опилки, горбыль и даже самые мелкие обрезки. Опилки и стружка могут использоваться для производства энергии — напрямую (для обеспечения энергией самого предприятия) или через товарное биотопливо второго поколения, пеллеты и/или брикеты. Исходя из данных таблицы 1 можно видеть, что опилки, на долю которых приходится около 10 % от объема пиломатериалов в ближайшие годы будут энергетически использованы полностью. Однако, производство топлива, получаемого переработкой древесины, является естественным продолжением жизненного цикла продукции и лесного хозяйства и деревообрабатывающей промышленности [3]. Как видно из данных, представленных в таблице 2, извлечение выгоды из лесосечных отходов, коры может обеспечить достаточные сырьевые резервы для производства пеллет и брикетов [23, 24].

Появление пеллет — древесных топливных гранул, изготавливаемых прессованием измельченных древесных частиц, стало принципиально новым этапом. Пеллеты отличаются высокой эффективностью сжигания, удобством использования и более высокой удельной энергоемкостью по сравнению с традиционными дровами. Появление пеллет внесло изменения в технологию энергетического использования древесины в регионе ЕЭК.

Особенности пеллет и их сжигания. Производство и применение пеллет базируется на ряде научных принципов, обеспечивающих при их совместном использовании очень высокую эффективность (КПД до 95–97 %).

Первой особенностью пеллет является их влажность — в отличие от исходной древесины, имеющей благодаря природной капиллярно-пористой структуре влажность 30–50 %, пеллеты имеют влажность 68 %.

Вторая особенность — сжигание пеллет — осуществляется в две стадии: первая стадия — газификация в условиях контролируемого недостатка кислорода (для контроля используются лямбда-датчики, аналогичные применяемым в автомобилях с электронным впрыском); вторая стадия — вихревое сжигание газообразных продуктов в смеси с вторичным воздухом.

Третья особенность пеллет — благодаря отсутствию в древесине серы (обуславливающей при сжигании большинства других видов топлива возможность образования сернокислотного тумана) открывается возможность вести глубокое охлаждение отходящих газов — ниже точки росы — до 30–50 °С.

В связи с ограниченностью опилок, как сырья для производства пеллет и брикетов, существенный интерес представляет вторичная древесина и реализация принципа последовательного использования древесины. Конструкционная древесина может рассматриваться как «сток углерода» наиболее длительной эксплуатационной долговечности — 40–60 лет. Однако после этого срока использованная древесина вполне может быть повторно утилизирована в качестве биотоплива. Аналогичная картина и с лесной продукцией средней и низкой эксплуатационной долговечности. Использованная древесина, использованные продукты переработки древесины представляют собой весьма существенный компонент муниципальных и промышленных твердых отходов и могут рассматриваться как важнейший ресурс биотоплива и/или сырья для него.

Четвертая особенность пеллет связана с тем, что их появление совпало со временем появления дешевой компьютерной техники, которая, в сочетании с развитием производства пеллет, привела к революции в малой (автономные отопительные системы индивидуальных домов) и средней (муниципальные котельные) энергетике. В результате, сектор энергоносителей на базе древесины идет в ногу со временем. Дешевая компьютерная техника не только управляет собственно процессом сжигания пеллет, дозируя с помощью информации, получаемой от лямбда-датчиков, подачу вторичного воздуха, но и меняет температуру в помещениях дома по заданной программе. Таким образом, с появлением гранул можно говорить о революции в создании «умного дома».

Однако более 70 % пеллет используют промышленные потребители — генерирующие компании, крупные котельные. Для них основным мотивом является производство «зеленой» энергии, субсидированной государствами в рамках выполнения обязательств, взятых на себя по Киотскому протоколу и Парижскому соглашению. Благодаря такому субсидированию поставка «зеленой»

энергии потребителям приносит значительно больше прибыли, чем поставка энергии, полученной с использованием традиционных видов топлива. Именно рост потребления пеллет европейскими энергокомпаниями в последние десятилетия обуславливает рост предложения данного вида топлива на мировом рынке и, в результате, потенциальный спрос на твердое биотопливо превышает предложение. При этом для энергетиков, естественно, существуют ограничения по максимальной цене закупки пеллет. Это значит, что любой новый объем, предложенный на рынок обеспеченным сырьем и капиталом производителем, найдет своего потребителя и в перспективе 1–2 лет не повлияет на рыночную цену.

Еще одним важным аспектом производства топливных древесных гранул и торговли ими является то, что это способствует поддержанию занятости в лесном секторе региона ЕЭК, в частности в сельских районах, где необходимо создавать рабочие места. Кроме того, также появились возможности вовлечения в производства ранее не использовавшихся для реализации на рынке малоценных отходов и остаточных продуктов лесоперерабатывающего производства, например, опилок, вторичной древесины, т. е. бывшей в употреблении древесины и лесосечных отходов, которые зачастую считались продуктом, не имеющим какой-либо ценности, и поэтому оставлялась в лесу или сжигалась на месте.

Важную роль в расширении масштабов применения древесины в целях производства энергии сыграли политические меры, направленные на увеличение доли возобновляемых источников энергии и сокращение выбросов углерода. Кроме того, быстрый рост цен на нефть, отмеченный в начале этого тысячелетия, также способствовал резкому наращиванию использования энергоносителей на базе древесины, в частности в Европе.

По сравнению с другими возобновляемыми источниками энергии древесина обладает явными преимуществами. У древесины нет недостатков, которые присущи другим возобновляемым энергоресурсам, поскольку ее можно хранить и использовать в целях получения энергии даже в условиях отсутствия солнца и ветра или ограничения возможностей производства гидроэлектроэнергии.

Однако использование древесины в энергетических целях должно сочетаться с применением практики устойчивого лесопользования. Именно поэтому при экспорте пеллет и брикетов часто требуются не только сертификаты качества, но и сертификаты происхождения. Тем не менее, древесина может быть весьма чистым и устойчивым топливом, если в целях обеспечения эффективности ее заготовки, переработки и сжигания применяются наилучшие имеющиеся практики (НДТ, или ВАТ).

Наконец, широкому применению пеллет в ряде стран способствовали общественные движения по отказу от атомных электростанций, особенно после аварии на Фукусиме.

Ниже сопоставляются данные ФАО ООН/ЕЭК ООН, прогнозы аналитиков и прогнозы собственно производителей пеллет. По прогнозам Global Markets Insight мировой рынок древесных топливных гранул по итогам 2019 года достигнет 8,5 млрд. долл. США и будет расти на 10 % ежегодно до 2025 года.

Промышленное использование пеллет на электростанциях взамен каменного угля заставляет обратиться к роли каменного угля в современном обществе.

Каменный уголь [30, 31]. Со времени промышленной революции мир в значительной части своего производства первичной энергии полагался на уголь. Считают, что и в обозримом будущем мировая экономика также будет зависеть от энергетических ресурсов угля. Сегодня поставки угля составляют около 30 % мировой первичной энергии, 40 % мировой электроэнергии и почти 70 % мировой металлургической и алюминиевой промышленности. Международное энергетическое агентство (МЭА) прогнозирует постепенное замедление мирового спроса на уголь; однако развивающиеся страны в Азии, в частности Китай и Индия, продолжают стимулировать общий спрос. По данным Всемирной угольной ассоциации мировая добыча угля в 2013 году составила 7,8 млрд. т, а 2019 году может достигнуть 9 млрд. т.

Ожидается, что с сохранением зависимости от добычи угля, добыча угля будет становиться все более затратной. Во многих частях мира мелкие запасы

истощены и глубже, и в них находится все больше газовых пластов. Тем не менее, общество требует и ожидает более безопасных условий труда на рудниках и большей защиты окружающей среды от угля, используемого в энергетике и в промышленности. Применение наилучшей практики для дренажа и использования метана имеет решающее значение для снижения несчастных случаев, связанных с метаном и взрывами, которые слишком часто сопровождают добычу угля, а также способствуют защите окружающей среды посредством сокращения выбросов парниковых газов (ПГ).

Таким образом, в целом по миру древесное топливо, включая древесный уголь, вряд ли сможет в ближайшем будущем вытеснить каменный уголь, как на электростанциях, так и в металлургии. Однако, для ряда стран и регионов, а также отдельных направлений металлургии, например, в производстве кремния, ситуация иная.

Экспортные рынки древесного топлива. В 2019 году страны ЕС потребили около 30 млн. т топливных гранул [3, 4]. Это почти в два раза больше, чем 5–7 лет назад.

Наиболее перспективными рынками в ЕС являются Великобритания, страны Бенилюкс и Скандинавия. Наиболее перспективные потребители в Азии — Япония, Южная Корея, Монголия, Китай.

Для Японии решающее влияние на спрос на пеллеты оказала авария на атомной электростанции в Фукусиме, в результате чего было принято решение о постепенном закрытии всех атомных станций (к тому же Япония имеет уникальный опыт трансокеанского импорта древесной щепы для ЦБП). Южная Корея проявляет большой интерес к биотопливу, в том числе и из России, особенно в последние годы. Сегодня Корея — основной потребитель пеллет, производимых на Дальнем Востоке, в Иркутской области и к востоку от нее (Бурятия, Амурская область, Хабаровский край, Сахалин). Корейцы готовы участвовать в инвестициях в производство пеллет. Однако следует иметь в виду, что число потребителей меньше, чем в ЕС, а главные потребители внутри Кореи — энергокомпании, заинтересованные в максимально долгосрочных отношениях с

поставщиками и минимальной цене продукции. На текущий момент в качестве основных рынков сбыта для твердого биотоплива, которое может быть произведено на мощностях предприятий лесного комплекса России, следует рассматривать либо экспорт в Западную Европу, Японию и Южную Корею, Китай и Монголию, а также использование на самих предприятиях ЦБП, например, для замены каменного угля в известерегенерационных печах (ИРП).

Учитывая специфическое географическое положение создаваемых в рамках диссертации и текущей производственной и экономической деятельности установок, созданных по данной технологии, вопросы, связанные с Японским рынком, целесообразно рассмотреть более подробно [32].

В связи с ядерной катастрофой в Фукусиме в 2011 году Япония полностью пересмотрела свою энергетическую стратегию. Вскоре после событий на Фукусиме Япония увеличила свое использование импорта ископаемого топлива для тепловых электростанций. Это привело к увеличению цен на электроэнергию в стране и к увеличению эмиссии ПГ, что противоречило принципам Киотского протокола, ограничивающего выбросы ПГ. В результате Япония теперь находится в критической ситуации и изменяет курс в своих системах выработки энергии.

Рост японских возобновляемых источников энергии связан и с новыми, международными инвестициями. Начиная с кризиса Фукусимы, у японского правительства была двойная цель изменения структуры энергопотребления, не зависящего от ядерного производства, при одновременном расширении энергетического портфеля, направленного на расширение использования возобновляемых источников энергии — задача огромная по своим масштабам.

До 2011 года энергетика Японии базировалась в значительной степени на ядерной энергии: 54 эксплуатируемых ядерных реактора производили приблизительно одну треть электроэнергии Японии. После события Фукусимы правительство приняло решение о закрытии многих из реакторов и усилении мер безопасности на остающихся станциях.

Чтобы дать импульс объединению возобновляемых технологий, правительство Японии установило цели развития возобновляемых источников

электричества, обещая, что к 2030 году 25–35 % ее электричества будут произведены из возобновляемых источников. Чтобы уменьшить зависимость от ископаемого топлива, Япония также ввела в 2012 году систему субсидирования, способствующую росту возобновляемой энергии. Введенная система по существу вынуждает энергетические компании покупать электричество, произведенное возобновляемыми источниками энергии по ставкам, определяемым сроком на 10–20 лет Министром экономики, торговли и промышленности. Операторы электроэнергетических компаний могут возратить затраты, понесенные покупкой возобновляемого электричества, выставив счет потребителям как дополнительный сбор, в дополнение к сумме, обычно взимаемой за электроснабжение.

Япония имеет замкнутую структуру производства электроэнергии и не импортирует (или экспортирует) электричество; ее энергосистема состоит из ряда относительно самостоятельных энергосистем, которыми управляют местные сервисные монополии. Поэтому, единое решение для всей страны просто не выполнимо. Но такая конфигурация представляет много новых возможностей включить возобновляемые технологии там, где эти системы могут работать стабильно, во взаимодействии друг с другом.

В использовании солнечной энергетики в Японии произошел скачок с 2011 года; если доля производства солнечной электроэнергии в Японии повысилась с 2,7 % в 2015 году к 4,3 % в 2016 году, то во втором квартале 2016 года вклад солнечной энергетики в Японии составлял больше чем 5 % всего производства электроэнергии. У Японии, как считают, в 2017 году было 8 ГВт солнечных установок; это наибольшая мощность солнечных установок, чем в какой-либо стране, кроме Германии и Китая.

В течение 2016 года все возобновляемые источники энергии вместе производили 14,2 % от производства электроэнергии Японии. Самую большую долю возобновляемой энергии представляла гидроэлектроэнергия, а затем солнечная и биомасса, ветровая и геотермическая. В областях отдельных энергоколец, в некоторые дни, доля возобновляемой энергии обеспечивала целых

80 % всей требуемой электроэнергии. Поскольку энергия биомассы менее зависит от погодных условий, чем ветер или солнечная энергия, японское правительство, согласно азиатскому Обзору Nikkei, хочет утроить полную мощность производства электроэнергии биомассы от уровня 2014 года до 7,28 млн. кВт к 2030 году. И японские и международные инвесторы готовы использовать в своих интересах эту возможность. Введение системы стимулирования, начиная с 2011 года, привело к буму в строительстве японских солнечных станций. Но поскольку они стали менее прибыльными с прогрессивными сокращениями тарифа, акцент в промышленности возобновляемой энергии переносится к другим технологиям. Японская финансовая компания Orix, которая в настоящее время управляет примерно 110 солнечными установками, стремится разносторонне развиваться и в развитии геотермического электричества и заводов биомассы. Orix — четвертый по величине независимый поставщик энергии в Японии, имеет одобрения для мощностей 920 МВт солнечной энергии, из которых 510 МВт уже работают. Но Иуики Нисигори, глава управления энергетикой компании, сказал, что расширение солнечной энергетики постепенно замедляется из-за отсутствия подходящих мест для новых проектов. И другие крупнейшие международные инвестиционные компании также выходят на рынок. Japan Renewable Energy (JRE) — японская компания солнечной энергии, основанная Goldman Sachs Group — объявила о планах расширить его действия и инвестировать 40 млрд. иен (\$ 365 млн.) в электростанции биомассы в десяти или больше местоположениях к 2020 году. Полная способность производства электроэнергии этих средств спроектирована, чтобы достигнуть 70 МВт. Goldman Sachs установил JRE в 2012 году как часть инвестиций в возобновляемую энергию, и в настоящее время управляет 27-ю солнечными заводами и двумя ветровыми электростанциями по всей стране. JRE начнет строить свой первый завод биомассы в ближайшее время в городе Камизу. Установка мощностью 24,4 мВт будет стоить примерно 10 млрд. иен (\$ 91 млн.); как ожидают, она произведет 200 млн. часов кВт электричества в год за счет сжигания биомассы в форме щепы.

Из-за ее фрагментарной, разрозненной энергетической сети многие существующие электростанции Японии работают на вторичной биомассе — ненужной древесине от строительства. Однако импортированное топливо, как в конечном счете ожидают, станет доминирующим в долгосрочной перспективе. Как показывает азиатский Обзор Nikkei, другие японские компании также вкладывают капитал в биомассу и для производства электроэнергии, и для производственных процессов. Sumitomo Corporation в настоящее время импортирует примерно 200 тыс. тонн в год пеллет и другого древесного топлива из Канады и Вьетнама, и планирует увеличить это количество до 1 млн. тонн к 2019 году. Корпорация Сумитомо в течение многих десятилетий импортировала высококачественную щепу для производства целлюлозы и бумаги; она надеется использовать эти связи, чтобы обеспечить за границей закупку пеллет более низкого качества для продажи электростанциям в Японии. Международная торговая фирма Itochu планирует существенное увеличение импорта древесного топлива до 1,2 млн. тонн ежегодно в финансовом 2019 году. Бумажная торговая компания Kokusai Pulp & Paper объявила, что, в связи со снижением спроса на бумагу, уменьшающуюся в Японии, она планирует продавать древесное сырье — щепу на топливо, которое вольется в расширяющийся рынок электроэнергетической биомассы. Японский поставщик электричества Erex в настоящее время планирует утроить сумму покупок биомассы до 300 тыс. тонн. При этом японские покупатели поддерживают строгие критерии качества и устойчивости для топливных гранул. Беспокоясь о надежности поставки японские фирмы готовы подписывать долгосрочные контракты с производителями, которые в состоянии гарантировать качество поставки и стабильность. В опубликованном отчете USDA (United States Department of Agriculture), указывается, что Япония недавно приняла закон о древесине, который разработан, чтобы гарантировать, что и внутренняя и импортированная древесина заготовлена легально. Закон влияет на большую часть деревянного сырья, включая пиломатериалы, мебель и топливные гранулы.

В связи с инцидентом Фукусиме у Японии есть ясное понимание того, что под угрозой безопасность страны, когда дело доходит до национальной выработки энергии. В то время как страна продолжает уходить далеко и от ядерных источников и от источников энергии ископаемых ресурсов, и делает ставку на большее количество ВИЭ (возобновляемых источников энергии), японское правительство делает усилия, чтобы стимулировать рост в этом секторе, гарантируя юридическую, стабильную поставку. С долгосрочным спросом на биомассу и административную структуру, энергетическая система Японии продолжит создавать новые возможности и для национальных и для иностранных инвестиций.

В 2019 году в Японии вводились новые биотопливные энергоустановки. Так, в ноябре 2019 года в Японии введена новая пеллетная электростанция (50 МВт) в г. Тояма, которая приходит на смену угольной ТЭЦ. Поставщики и производители пеллет, скорее всего из Северной Америки, получают гарантированный сбыт своей продукции на 20 лет. Договоры поставки на долгосрочной основе будут заключены под гарантии японского правительства. Цены и объемы будут зафиксированы заранее. Биоэлектростанция будет поставлять электричество энергетической компании Nokuriku (NEPCO) в рамках льготного тарифа для «зеленой энергии». Заранее на 20 лет фиксируется цена энергии: 0,21 долларов США за кВт. Это даст возможность сократить выбросы парниковых газов на 47 785 т в год.

По темпам развития ВИЭ в 2019 году в мире лидирующие позиции занимает Китай, однако и в Европе ВИЭ развиваются очень быстро [31–33]. Так, в 2019 году, три европейские страны побили рекорды по ВИЭ. В декабре 2019 года в Мадриде прошла конференция ООН по изменению климата COP25, но при этом ряд крайне важных вопросов остался без существенного прогресса. События 2019 года также показали, что хотя изменение климата угрожает всем без исключения странам, одни страны принимают вызов, в то время как другие предпочитают отрицать риски. К первой категории относятся Дания, Великобритания и

Германия. Эти три страны в прошлом году показали значительный рост в использовании возобновляемых источников энергии.

За прошедший год Дания установила новый рекорд по производству электроэнергии из возобновляемых источников. По данным национальной энергетической компании Energinet, в 2019 году страна произвела 50 % своей электроэнергии из возобновляемых источников: 47 % от ветровых установок, и 3 % — от солнечных. Предыдущий рекорд датчан по ветрогенераторам составлял 43 % в 2017 году. Прошлогодний скачок был достигнут в том числе благодаря крупной морской ветровой электростанции Horns Rev 3, которая была запущена в эксплуатацию в начале 2019 года. Объект, расположенный в 24 км от датского побережья, имеет мощность 406,7 МВт — этого достаточно, чтобы обеспечить электроэнергией 425 тыс. домов, или 20 % населения Дании, составляющего 5,6 млн. человек. Генеральный директор организации Wind Denmark сообщил, что в дополнение к запуску Horns Rev 3 в 2019 году наблюдался более устойчивый ветер, чем в 2018 году, и за счет этого ветровые электростанции генерировали большую долю энергии.

Другое европейское государство — Великобритания, с населением 66 млн. человек, установило свои рекорды. В 2019 году британцы впервые получили больше энергии от безуглеродных источников, чем от ископаемого топлива: 48,5 % было получено от ветровых и атомных электростанций, а также солнечных установок, 43 % — уголь, газ, нефть и дизельное топливо, 8,5 % — из биомассы. И хотя 8,5 % (цифра, казалось бы, не такая большая), но именно Великобритания занимает сегодня лидирующее место по потреблению пеллет — около 7 млн. т в год на электростанции Дракс [34]. По данным британской энергетической компании National Grid, в 2019 году 26,5 % электроэнергии было произведено из ветровых, солнечных источников и ГЭС. Атомные электростанции произвели 16,8 %. Большая часть ископаемого топлива страны была получена из газа — 38,4 %. На уголь и другие ископаемые виды топлива пришлось до 2,1 % электроэнергии. Как заявляют власти страны, продолжая развивать использование

пеллет для замены угля на электростанциях к 2021 году в Великобритании должна остаться только одна угольная электростанция.

В Германии в 2019 году доля возобновляемых источников энергии в общем объеме энергопотребления составила 46 %. Это может звучать не так впечатляюще, как достижения Великобритании, но, в отличие от британцев, немцы не включали в эту цифру ядерную энергетику. Их показатель отражает процент полностью возобновляемых источников, из которых 25 % приходится на ветровые электростанции, а доля ядерной энергетики за прошлый год в стране составила всего 12 %. Германия намерена полностью отказаться от атомных электростанций к 2022 году. Правительство заявило, что к 2030 году возобновляемые источники энергии должны производить 65 % электроэнергии страны, а к 2038 планируется полностью отказаться от каменного угля в энергетике [35].

Франция, Португалия, Испания и скандинавские страны также вкладывают значительные средства в развитие возобновляемых источников энергии. И хотя этих усилий будет недостаточно, чтобы предотвратить дальнейшие климатические угрозы в 2020 году, энергетический переход Европы несет в себе четкий сигнал другим странам: если вы не участвуете в решении проблемы, вы являетесь ее частью [32, 33].

По данным ФАО ООН/ЕЭК ООН [3, 4] в 2018 году показатель потребления энергоносителей на базе древесины в регионе ЕЭК ООН изменился незначительно. Однако новых высот достиг объем трансатлантической торговли топливными древесными гранулами, и она продолжала иметь наибольший удельный вес в международной торговле древесным топливом. К росту цен на топливные древесные гранулы промышленного назначения привело повышение спроса в сочетании с более медленными, чем ожидалось, темпами расширения производственных мощностей. Новые возможности для расширения рынка в странах ЕЭК ООН может открыть рассмотренное выше появление азиатских рынков топливных древесных гранул коммунально-бытового назначения. Директива Европейского союза 2018/2001 установила новые целевые показатели в

отношении использования ВИЭ в интересах выполнения обязательств, взятых в рамках Парижского соглашения об изменении климата, но одновременно и изложила условия для обеспечения устойчивости закупок лесной биомассы.

Расширению масштабов использования биотоплива на базе древесины в Канаде может способствовать новый Стандарт Канады на чистые виды топлива, принятый в 2018 году. Федеральные агентства США проводят работу с целью принятия согласованной федеральной политики в области поощрения использования лесной биомассы в качестве нейтрального с точки зрения выбросов углерода биоэнергонапителя.

В 2017 году производство топливных древесных гранул в СНГ увеличилось на 21,5 %, а в Российской Федерации — на 20 %. Экспорт топливных древесных гранул СНГ возрос в 2017 году на 31,9 % (до 1,8 млн. т). Некоторые аналитики предполагают, что к 2025 году спрос на топливные древесные гранулы в секторе производства электроэнергии достигнет 45 млн. т, а в секторе отопления жилых и промышленных зданий — 24 млн. т [36]. Это будет означать, что объем потребления топливных древесных гранул для производства электроэнергии превысит показатель 2017 года на 15 млн. т, а для отопления зданий — на 14 млн. т.

Потребление и производство. В 2016 году объем производства первичной энергии на базе «твердых видов биотоплива (исключая древесный уголь)» в ЕС–28 увеличился по сравнению с 2015 годом на 2,5 % до 3 941 ПДж (Eurostat, 2018b). За период 2006–2016 годов общий объем производства первичной энергии с использованием твердых видов биотоплива в ЕС–28 возрос на 36 %. Доля импорта в общем объеме производства первичной энергии на базе твердых видов биотоплива составила в 2016 году 8,5 %. По состоянию на 2016 год европейские мощности по производству топливных древесных гранул оценивались приблизительно в 24,5 млн. т в год [37]. Удельный вес попутных и побочных продуктов первичной деревообработки (например, опилок и стружек) в исходном сырье, используемом для производства топливных древесных гранул в Европе, составляет приблизительно 85 %. Более 80 % волокна, используемого для

производства топливных древесных гранул, приходится на хвойные породы [37]. В 2018 году спрос на топливные древесные гранулы в Европе достиг 24,2 млн. т, из которых 13,4 млн. т будет использовано, согласно оценкам, для целей отопления). Ведущими потребителями топливных древесных гранул для целей отопления являются Италия, Германия, Дания и Швеция. В 2016 году спрос на топливные древесные гранулы промышленного назначения в Европе находился на высоком уровне и составил 10,7 млн. т, при этом ожидается, что к 2021 году он превысит 16 млн. т в год [37–39].

Прогнозируется, что к 2020 году мощности по выработке электроэнергии на базе топливных древесных гранул в Европе возрастут по сравнению с нынешним уровнем вдвое и составят приблизительно 8 тыс. МВт. Росту будет способствовать расширение мощностей в Нидерландах и Соединенном Королевстве. Решение об установлении для четырех национальных проектов льготных тарифов на поставку электроэнергии в сеть, которое было принято в 2016 году голландской «системой стимулирования устойчивого производства энергии», может привести к тому, что спрос на топливные древесные гранулы промышленного назначения в этой стране превысит 3,2 млн. т в год [39, 40]. В Соединенном Королевстве источником спроса на топливные древесные гранулы промышленного назначения является, главным образом, компания «Дракс», которая использует биомассу для производства биоэнергии: в 2017 году ее спрос на топливные древесные гранулы составил 6,8 млн. т [34].

Субрегион СНГ. Потребление и производство. В 2017 году производство топливных древесных гранул в субрегионе СНГ увеличилось на 21,5 %. Показатель производства топливных древесных гранул в Российской Федерации возрос на 20 % до 1,3 млн. т. Это произошло благодаря улучшению материально-технического обеспечения и новой инфраструктуре. Несмотря на недавние случаи снижения выпуска продукции, большая часть этой продукции была произведена в Северо-Западном и Сибирском округах. Сырьем для топливных древесных гранул служат лесосечные отходы, попутные продукты деревообработки (например, опилки, обрезки и кора) и не деловая древесина. Число предприятий,

выпускающих топливные древесные гранулы в Российской Федерации, продолжает расти. В 2008 году в стране насчитывалось 150 таких предприятий, однако к 2017 году их число превысило 250. Общий объем производственных мощностей составляет, по различным оценкам, 3,5 млн. т в год, а коэффициент их использования — в среднем примерно 50 % [41, 42]. Мощности 13 предприятий составляют как минимум по 50 тыс. т в год, при этом вместе они производят более половины всех топливных древесных гранул в стране. Для других производителей (мощности которых составляют менее 50 тыс. т в год) выпуск топливных древесных гранул дополняет их основную деятельность (например, лесопиление или строгание). Сбор данных среди мелких предприятий по-прежнему сопряжен с большими трудностями, в связи с чем национальные оценки производства топливных древесных гранул являются, вероятно, заниженными. Аналогичная ситуация сложилась и с производством топливных древесных брикетов. Брикетные в Российской Федерации производят более 100 предприятий, общий объем мощностей которых составляет 663 тыс. т в год, т. е. приблизительно одну пятую от объема мощностей по выпуску топливных древесных гранул. Тем не менее, брикеты становятся все более и более популярным видом топлива бытового и промышленного назначения.

Торговля. В 2017 году физический объем экспорта топливных древесных гранул Российской Федерации составил 1,4 млн. тонн (+34 % по сравнению с предыдущим годом), а стоимостной — 142,6 млн. долл. США (+32 % по сравнению с предыдущим годом) [41, 42]. Согласно оценкам, на условиях FCA (Free Carrier) из Российской Федерации было поставлено 685 300 т топливных древесных гранул, что на 155 400 т больше, чем в 2016 году [43]. В 2017 году Российская Федерация поставила топливные древесные гранулы в 42 страны. В стоимостных показателях ведущей страной назначения являлась Дания (615 100 т на сумму 62,4 млн. долл. США, почти на 45 % больше, чем в 2016 году), за которой следовали Италия (105 800 т, 11,9 млн. долл. США), Бельгия (123 400 т, 11,5 млн. долл. США), Республика Корея (127 500 т, 11,0 млн. долл. США) и Швеция (120 100 т, 10,6 млн. долл.).

Северная Америка. Потребление и производство. В 2017 году доля энергоносителей на базе древесины в общем объеме производства первичной энергии в Канаде составила 4,5 %, т. е. в целом осталась такой же, как и в 2016 году [43, 44]. Основным источником энергии на базе древесины в Канаде является отработанный черный щелок, удельный вес которого в общем объеме потребления энергоносителей на базе древесины составляет 57 %. 37 % этого показателя приходится на твердые древесные отходы, которые сжигаются в рамках промышленных процессов и для снабжения теплом населения, а 4,4 % и 1,5 % — соответственно на топливную древесину и топливные древесные гранулы, которые служат энергосырьем для домохозяйств и небольших промышленных установок. Энергоносители на базе древесины используются в Канаде для производства, как электроэнергии, так и тепла. На долю электростанций, работающих на биомассе, приходится в Канаде 3 % общего объема электроэнергетических мощностей, использующих возобновляемые источники энергии — по этому показателю они находятся на третьем месте после гидроэлектростанций и электростанций, использующих энергию ветра. В 2016 году совокупный объем электроэнергетических мощностей составлял 2702 МВт, а провинциями, располагавшими самыми крупными мощностями, являлись Британская Колумбия (907 МВт) и Онтарио (762 МВт) (NEB, 2017). Министерство природных ресурсов Канады следит за функционированием 364 работающих на биотопливе теплоцентралей [3, 4], которые обслуживают промышленные объекты и учреждения. Приблизительно треть этих предприятий использует в качестве источника энергии топливные древесные гранулы, а остальные — твердые древесные отходы. В наибольшей степени масштабы применения отопительного биотоплива расширились в Квебеке, Нью-Брансуике и Северо-Западных территориях, где оно используется в основном в больницах и школах, а также во все большей степени коммерческими, сельскохозяйственными, промышленными предприятиями и районными отопительными системами [3, 4]. В 2017 году объем производства топливных древесных гранул несколько снизился по причине непростой экономической

ситуации в секторе энергоносителей на базе древесины. В год Канада производит приблизительно 1,7 млн. т топливной древесины [45]. Масштабы производства древесного топлива для небольших установок (в частности, бытовых) и электроэнергетических предприятий продолжают расширяться. После 2000 года объем производства, как топливной древесины, так и топливных древесных гранул существенно возрос — соответственно на 54 % и 65 %. В 2017 году объем потребления энергии на базе древесины в США составил 2 262 ПДж, при этом до конца 2019 года каких-либо существенных изменений в этом показателе, согласно прогнозам, не произойдет [46, 47]. В 2017 году потребление древесного топлива возросло по сравнению с 2016 годом весьма незначительно (примерно 0,6 %), при этом расширение его использования в целях производства электроэнергии было сведено на нет сокращением его потребления в жилищно-коммунальном секторе. Промышленный сектор продолжает иметь наибольший вес в показателе использования энергоносителей на базе древесины, при том, что их потребление на душу населения снижается. В 2017 году объем производства топливных древесных гранул в Северной Америке составил 9,6 млн. т, т. е. увеличился по сравнению с 2016 годом более чем на 3 %. Объем мощностей по выпуску топливных древесных гранул находился в 2017 году, согласно оценкам, на уровне 12,3 млн. т в США и 3,6 млн. т в Канаде [38]. В Канаде в настоящее время насчитывается 42 предприятия по выпуску топливных древесных гранул, а еще большее число заводов находится в стадии строительства [48]. В США действует 86 предприятий, которые производят топливо из прессованной биомассы, и штат работников которых составляет приблизительно 2 тыс. человек. В январе 2018 года для производства топливных древесных гранул использовалось следующее сырье: круглый лес/ балансовая древесина (18,3 %), отходы лесопиления (14,1 %), отходы производства изделий из древесины (13,3 %) и прочие древесные отходы (54,3 %) [46].

Торговля. В 2017 году экспорт топливных древесных гранул Канады составил, как было сообщено, 2,2 млн. тонн, т. е. сократился по сравнению с 2016 годом приблизительно на 8,5 % [49].

В стоимостном выражении он находился на уровне почти в 397 млн. канадских долларов, что приблизительно на 3 % ниже, чем в 2016 году. Основной страной назначения экспорта топливных древесных гранул вновь было Соединенное Королевство (69 %), за которым следовали Япония (11 %) и США (10 %). Экспорт в Соединенное Королевство и Японию в 2017 году практически не изменился, однако поставки в США возросли по сравнению с предыдущим.

Отсутствие роста экспорта в страны других континентов можно отчасти объяснить банкротством компании «Рентек», заключившей долгосрочное соглашение о закупке ее продукции с компанией «Дракс» в Соединенном Королевстве, которое должно было бы привести к увеличению экспорта через Атлантику.

Значение Японии как важного рынка сбыта канадских топливных древесных гранул растет. В 2017 году страна импортировала более 500 тыс. тонн топливных древесных гранул промышленного назначения, при этом доля Канады в этом показателе составила 71 % [50]. Мощности по производству электроэнергии на базе биомассы в Японии возрастут, согласно прогнозам, с 2 340 МВт в настоящее время до 3 100 МВт к 2028 году. Экспорт топливных древесных гранул США достиг в 2017 году нового рекордного уровня в 5,2 млн. т, при этом поставки осуществлялись, главным образом, в Соединенное Королевство.

В первом квартале 2018 года США экспортировали 1,23 млн. т топливных древесных гранул, что несколько ниже показателя в 1,26 млн. т, достигнутого в первом квартале 2017 года. Производство топливных древесных гранул расширилось, хотя некоторые предприятия, которые должны были начать работу в 2017 году, не открылись, причем введение некоторых из них в эксплуатацию уже не планируется. Что касается стран за пределами региона ЕЭК ООН, то ожидаемый рост спроса на топливные древесные гранулы в Японии и Республике Корея открывает широкие возможности для расширения производства. Один из производителей топливных древесных гранул в США сообщил, что заключил контракт на поставку топливных древесных гранул в Японию. Тем не менее,

азиатские рынки по-прежнему находятся в стадии формирования, а транспортные расходы представляют собой проблему для поставщиков из Юго-Восточных штатов США. В 2017 году самые крупные поставки топливных древесных гранул на экспорт, 1,44 млн. т, были осуществлены в США из порта Норфолк, штат Виргиния, за которым следовали порты Саванна, штат Джорджия (1,33 млн. т), Новый Орлеан, штат Луизиана (0,83 млн. т), Тампа, штат Флорида (0,69 млн. т) и Шарлотт, штат Северная Каролина (0,55 млн. т). Доля юга США в общем физическом объеме экспорта топливных древесных гранул США составила 99,5 % [51].

Российский экспортный центр при поддержке правительства Российской Федерации помогал экспортерам вернуть 80 % затрат на транспортировку и сертификацию топливных древесных гранул [52]. Это позволило увеличить число российских производителей топливных древесных гранул, получивших сертификаты качества в соответствии со стандартом EN plus (для розничных продаж) и сертификаты устойчивости в соответствии со стандартами Партнерства в области устойчивого использования биомассы (для оптовых продаж), и таким образом расширить экспорт в Европу. Российская Федерация рассчитывает, что это будет способствовать развитию экспорта топливных древесных гранул в 2018 году и в последующий период.

Государственная политика Канады направлена на поддержку развития низкоуглеродной экономики с помощью Стандарта на экологически чистые виды топлива и стратегии установления цен на углерод. Предлагаемые нормативные положения, регулирующие применение Стандарта на экологически чистые виды топлива, уже опубликованы, при этом планируется, что они будут представлены на утверждение в 2018 году и опубликованы в окончательном виде в середине 2019 года. Этот Стандарт будет действовать в отношении твердого, жидкого и газообразного топлива и, вероятно, послужит стимулом для увеличения числа проектов в области производства энергии на базе древесины к 2020 году. Будет проведена оценка выбросов ПГ на протяжении всего жизненного цикла различных вариантов производства энергии на базе древесины и с

использованием других возобновляемых энергоресурсов, а анализ их вклада в снижение интенсивности выбросов ПГ будет публиковаться в серии документов о мерах, принимаемых в целях обеспечения соблюдения Стандарта на экологически чистые виды топлива. В соответствии со стратегией федерального правительства цены на углерод в 2018 году составят 10 канадских долларов за тонну выбросов, после чего ежегодно до 2022 года они будут повышаться еще на 10 канадских долларов. Эта система установления цен будет применена в отношении всех провинций и территорий, где плата за углерод в настоящее время не взимается. В Британской Колумбии налог на углерод составляет 35 канадских долларов за тонну, и до 2021 года он будет ежегодно повышаться на 5 канадских долларов. В Альберте налог на углерод составляет 30 канадских долларов за тонну, однако ожидается, что он будет повышен, с тем, чтобы соответствовать требованиям федерального правительства. В начале 2018 года в провинциях Онтарио и Квебек в партнерстве со штатом Калифорния осуществлялась совместная программа торговли выбросами с ограничением их предельного уровня; медианная цена на углерод на совместном аукционе в мае 2018 года составила 18,97 канадских долларов за тонну. Однако Онтарио объявила о своем намерении выйти из этой программы торговли выбросами с ограничением их предельного уровня. Как и в случае со Стандартом на экологически чистые виды топлива, проекты в области производства энергии на базе древесины будут рассматриваться в рамках программы налогов на углерод в качестве средства сокращения выбросов ПГ; за их реализацию будут начисляться зачетные единицы сокращения выбросов ПГ, которые могут использоваться для снижения налогового бремени или реализовываться в рамках системы торговли выбросами с ограничением их предельного уровня. Интересные события, происходящие в Канаде, могут придать импульс реализации проектов в области производства энергии на базе древесины в ближайшие годы. В 2018 году Канада обратилась с первым призывом о внесении предложений в рамках Программы «Чистая энергия для сельских и отдаленных общин», которая предусматривает демонстрацию и установку отопительного оборудования, работающего на биотопливе. Предложения были

представлены в середине мая 2018 года, а проекты должны были быть отобраны летом 2018 года. За пять лет по линии этой программы должно быть выделено в общей сложности 220 млн. канадских долларов, при этом ожидается, что приток новых предложений будет непрерывным. Изменения, которые были внесены в государственные законы, политику и нормативные положения США в 2017–2018 годах, могут иметь последствия для перспектив развития производства энергии на базе древесины в этой стране. Закон 2018 года об общих ассигнованиях предусматривает, что три органа исполнительной власти США должны «...проводить четкую и простую политику в отношении использования лесной биомассы для целей производства энергии, в том числе политику, которая бы отражала нейтральность лесной биоэнергетики с точки зрения выбросов углерода и признавала биомассу в качестве возобновляемого энергоресурса, если ее использование для производства энергии не приводит к преобразованию лесов в другие категории земель». В ответ АОС США 23 апреля 2018 года в одностороннем порядке опубликовало программное заявление, содержащее утверждение о нейтральности производства энергии на базе древесины с точки зрения выбросов углерода [54]. Можно предположить, что министерства сельского хозяйства и энергетики США в настоящее время подготавливают свои собственные объявления или программные заявления. Тем не менее, по-прежнему не ясно, как политика в отношении нейтральности производства энергии на базе древесины, о которой говорится в этом Законе, повлияет на использование древесины в целях производства энергии в США. Палата представителей и сенат США приняли соответственно 21 и 28 июня 2018 года свои варианты закона 2018 года о сельском хозяйстве, «Закон 2018 года об улучшении положения в сельском хозяйстве». Закон 2018 года о сельском хозяйстве предусматривает обязательное финансирование энергетических программ, включая различные программы в интересах развития биоэнергетики и производства биотоплива. Оба варианта этого законопроекта теперь будут переданы в согласительный комитет с целью устранения существующих расхождений. Администрация США приняла решение выйти 7 ноября 2020 года из Парижского соглашения об изменении климата и

начала процесс пересмотра положений Плана «Чистая электроэнергия», которые были составлены таким образом, чтобы позволить штатам пользоваться альтернативными методами для достижения целей в области сокращения выбросов и, соответственно, могли привести к расширению использования древесины для производства энергии. Без Плана «Чистая электроэнергия» и Парижского соглашения и в условиях оказания администрацией дополнительной поддержки добыче ископаемых видов топлива стимулов для расширения использования древесины в целях производства энергии очень мало. Прогнозы Министерства энергетики США в отношении потребления энергоносителей на базе древесины в 2018 и 2019 годах отражают эти новые стратегии и поэтому практически не изменились.

Целесообразно остановиться еще на нескольких аспектах использования биомассы для получения электричества. Так, электричество из биомассы может создать дополнительные рабочие места. Согласно международному исследованию, замена электростанций, работающих на угле, таких как закрытая теперь электростанция в Навахо, установками для сжигания биомассы, может не только сохранить рабочие места в угольной промышленности, но и создать на 50 % больше рабочих мест в лесной промышленности.

Территории Навахо и Апачи. Согласно международному исследованию, опубликованному в научном журнале *Joule*, переход от угольных электростанций к сжиганию биомассы может не только замедлить изменение климата, но и повысить занятость местного населения. Масштабный переход от сжигания угля к использованию биомассы, получаемой в результате лесозаготовительных работ и проектов восстановления лесов, не только сохранит 40 тыс. рабочих мест в электроэнергетике, но и создаст дополнительные 22 тыс. рабочих мест в лесной и транспортной промышленности. Исследование имеет особое значение для Северной Аризоны, где коммунальные предприятия уже закрывают электростанции, работающие на угле. Это обусловлено тем, что они требуют больше денег для эксплуатации, чем солнечные, ветряные или газовые электростанции. Сжигание биомассы стоит немного меньше, чем уголь, но

больше, чем природный газ, ветряные или солнечные станции. Происходящие изменения сильно ударил по округам Навахо и Апач, где угольные заводы и их дочерние предприятия составляют 4–10 % рабочих мест. В графствах Навахо и Апачи недавно были утверждены ветряные и солнечные электростанции, но эти возобновляемые источники энергии обеспечивают лишь небольшую часть рабочих мест, потерянных после закрытия угольных шахт и электростанций. Еще более важным является то, что высокая стоимость переработки миллионов тонн малоценной биомассы на каждом акре покрытых лесом земель затормозила усилия по восстановлению здоровья лесов и снижению риска лесных пожаров с помощью проектов по прореживанию лесов. За последнее десятилетие Инициатива по восстановлению 4-х лесов мало продвинулась из-за отсутствия рынка биомассы. «Это исследование показывает, как инвестирование в смягчение последствий изменения климата может на самом деле облегчить переход для работников угольной отрасли, которые в противном случае столкнулись бы с резкой потерей работы из-за выхода на пенсию угольного парка к 2050 году», - сказал соавтор Kasparas Spokas из Принстонского университета. Комиссия по Аризонской корпорации отказалась от требования о том, чтобы коммунальные предприятия покупали электроэнергию у биомассы, что привело к гибели планов по переводу 60-мегаваттного блока на электростанции Чолла из угля в биомассу. Отсутствие мандата на использование биомассы может также в конечном итоге привести к остановке единственной электростанции, работающей на сжигании биомассы, в регионе, мощностью 28 МВт, эксплуатируемой NovoPower возле Snowflake, которая близится к концу долгосрочного контракта на продажу.

Энергия для APS и Salt River Project. Международное исследование выработки электроэнергии на основе биомассы предполагает, что переход на биомассу может не только восстановить леса и уменьшить количество лесных пожаров, но и укрепить экономику сельских районов за счет сохранения рабочих мест на электростанциях и создания рабочих мест в лесном хозяйстве. «Наш анализ показывает, что действовать сейчас и инвестировать в эту стратегию снижения выбросов может быть выгодно для занятости в угольном секторе

США», — сказал ведущий автор Пьера Патрицио в соответствии с резюме исследования, опубликованного на сайте Science Daily. Современные электростанции, работающие на биомассе, могут улавливать и хранить 99 % углерода, получаемого при сжигании биомассы. Если биомасса не попадет на электростанцию, улавливающую загрязнение, она в конечном итоге сгорит или разложится — выброс углерода прямо в атмосферу. Авторы исследования пришли к выводу, что электростанции, работающие на биомассе, будут удерживать углерод в атмосфере не менее 1000 лет. Преимущества, вероятно, будут еще больше в Аризоне, где биомасса не выращивается на древесных фермах, а собирается в проектах по прореживанию. Эти прореживающие проекты значительно снизят вероятность лесных пожаров, а также защитят водосборы и водохранилища, от которых зависит Феникс. В исследование не были включены другие виды побочных выгод, поскольку оно было сосредоточено на местных рабочих местах и выбросах изменяющих климат загрязнителей. «Мы приняли во внимание тот факт, что биомасса должна выращиваться и собираться устойчивым образом, чтобы считаться углеродно-нейтральной и, следовательно, получать отрицательные выбросы», — сказала соавтор Сабина Фусс. Сжигаемый каменный уголь высвобождает углерод, хранящийся в земле миллионы лет. Сжигание биомассы считается углеродно-нейтральным, так как углерод, хранящийся на деревьях, все равно постоянно перерабатывается. Сжигание биомассы на электростанциях с контролем загрязнения действительно может удалить углерод в долгосрочной перспективе. Исследователи использовали несколько различных моделей экономического прогнозирования, чтобы оценить количество рабочих мест, которые будет сжигать биомассу, как в энергетическом секторе, так и в лесном хозяйстве и на транспорте. Массивная генерирующая станция Навахо около Пейджа и угольная шахта, которая поставляла ей уголь в прошлом году, закрылись, что привело к сокращению поступлений от налога на имущество и налогов с продаж округа Навахо на несколько миллионов. Закрытия также ликвидировали около 1000 рабочих мест. Угольные электростанции в Чолле и в Коронадо также должны быть закрыты в следующем десятилетии.

Регион ЕЭК ООН в 2018 году. Трансатлантическая торговля древесными гранулами достигла новых высот, и продолжает доминировать в международной торговле древесным топливом. Сочетание увеличения спроса и более медленного, чем ожидалось, роста производственных мощностей привели к росту цен на промышленную древесину и пеллеты. Появление азиатских пеллетных рынков может предложить новые возможности для расширения рынка стран ЕЭК ООН.

Производство пеллет в странах – импортерах невыгодно в связи с нехваткой и высокой стоимостью древесного сырья. Так, по состоянию на 31 марта 2019 г. площадь лесов Великобритании составляла всего 13 % от общей площади страны, или 31,9 тыс. км² и, в результате, все 7,8 млн. т древесных топливных гранул, потребленных Великобританией в 2018 г., были импортированы. Благодаря транспортабельности пеллет и низкой стоимости морских перевозок, доставка оптом, несмотря на транспортные расходы, позволяет сохранять цены на низком уровне – покупателям в Великобритании дешевле приобретать пеллеты в США, чем закупать сырье в соседних регионах.

Производство пеллет в США обеспечивается неликвидным сырьем от лесозаготовительных компаний в тех регионах, где бумажное производство пришло в упадок, а также за счет отходов лесопильных заводов — опилок и щепы. Благодаря тому, что на юго-востоке США есть много землевладельцев и лесопильных предприятий, обладающих значительными объемами избыточной древесины, не востребованной в других отраслях, существует потенциал и для дальнейшего расширения производства пеллет. Таким образом, производство пеллет является неотъемлемой частью лесовосстановительных процессов: только там, где существует спрос на древесное сырье, землевладельцы будут мотивированы к выращиванию и сохранению лесов на своих территориях. Эта история перекликается с описанной далее в диссертации историей создания в Иркутской области, в поселке Качуг, технологии получения из опилок древесины лиственницы древесных и древесно-угольных брикетов.

По словам соучредителя и исполнительного вице-президента по продажам и маркетингу компании «Enviva», Томаса Мета, к 2028 г. мировое производство

промышленных пеллет вырастет до 57 млн. т. Этому будет способствовать растущий спрос на азиатских рынках — только в Японии спрос на гранулы к 2028 г. превысит 7,7 млн. т в год. [53].

Основные рынки сбыта компании «Enviva»: Великобритания, Бельгия, Италия, Франция, Дания и Нидерланды. Покупателями являются в основном европейские производители электро- и теплоэнергии, которые стремятся уменьшить свою зависимость от традиционных видов ископаемого топлива, таких как уголь, и сократить выбросы углекислого газа в атмосферу, и, к тому же, субсидируются Евросоюзом как производители «зеленой энергии».

Хотя большая часть продукции компании «Enviva» в настоящее время поставляется в Европу, азиатский рынок очень быстро растет, поэтому уже в 2019 году компания «Enviva» запланировала поставки для клиентов в Японии. Спрос на японском рынке промышленных пеллет начал расти всего три года назад практически с нулевых показателей, и, согласно прогнозам, к 2028 г. он достигнет более 7,7 млн. тонн в год. Сейчас там строятся десятки электростанций, которые будут работать на древесных топливных гранулах. Планируется, что они все будут введены в эксплуатацию к 2023 г. Эта тенденция отражена в структуре долгосрочных контрактов компании «Enviva», так как компания «Enviva» предполагает, что к 2025 г. спрос на японском пеллетном рынке достигнет 3 млн. тонн в год. Еще одним азиатским рынком с высокими показателями экономического роста компания «Enviva» рассматривает Южную Корею; ожидается, что к 2022 г. спрос на индустриальные пеллеты в этой стране превысит 5,8 млн. тонн в год.

Компания «Enviva» оценивает перспективы развития пеллетного рынка Южной Кореи и Японии как очень перспективные, так как обе экономики являются значительными растущими рынками. Долгосрочные проекты по выработке электроэнергии в Японии, утвержденные в рамках ее схемы льготных тарифов (FiT), все еще требуют поставок топлива. В стране спрос на импортные пеллеты продолжает расти, поскольку правительство Японии планирует увеличить мощность использования топлива из биомассы на 6–7,5 ГВт, что

к 2030 г. будет ежегодно требовать 15–20 млн. т биомассы в год. Со стороны генерирующих компаний Южной Кореи, или GENCO, спрос составляет около 2 млн. т в год. Новые электростанции, так называемые независимые производители электроэнергии, закупают пеллеты по долгосрочным контрактам для того, чтобы удовлетворить хотя бы часть спроса. Исторически южнокорейский рынок характеризовался локальными закупками, которые осуществлялись посредством краткосрочных тендеров. Однако из-за ожидаемого чрезмерного спроса, вероятнее всего, произойдет переход от краткосрочных тендеров к долгосрочным контрактам.

Компания «Enviva» оценивает спрос на пеллеты в Европе как весьма перспективный, так как Европейские страны и ЕС в целом приняли довольно жесткие обязательные целевые показатели в области возобновляемых источников энергии, в частности — Директиву об использовании возобновляемых источников энергии II (RED II), охватывающую период 2020–2030 гг. Несколько стран приняли дополнительные нормативные акты, предназначенные для полного отказа от многих угольных электростанций. Поскольку существующие угольные электростанции после модернизации могут работать на древесной биомассе, «Enviva» обеспечивает надежное, экономически эффективное и экологически выгодное средство для достижения этих целей.

Таким странам как Германия, где для бытовых и промышленных нужд производится значительное количество теплоэнергии за счет угля, вероятно, будет проще приспособиться к применению пеллет в промышленных масштабах. Германия, в связи с недавно согласованной политикой поэтапного отказа от угля, в настоящее время сфокусирована на поиске альтернатив, способных заменить уголь. Польша, еще одна экономически зависимая от угля страна, также, вероятно, станет будущим рынком для различных видов биотоплива и пеллет, так как потребность в распределении тепловой энергии ускорит вытеснение угля в пользу топлива, произведенного из биомассы.

Компания «Enviva» не рассматривает Brexit как фактор, который может повлиять на ее бизнес и бизнес европейских импортеров ее пеллет. Она ожидает,

что Brexit не окажет какого-либо существенного влияния на прочные долгосрочные контракты, и что его влияние на индустрию производства электричества из биотоплива в Великобритании, скорее всего, будет минимальным.

На вопрос о возможности появления в сфере производства биотоплива в ближайшее время каких-либо инновации и новых технологий Томас Мета назвал лишь секвестирование углекислого газа в подземных хранилищах.

Развивают производство пеллет в Северной Америке и другие компании. Так, в декабре 2019 года появилась информация [55] о том, что компания Pinnacle построит новый завод по производству пеллет в Алабаме. 19 декабря 2019 г. компания Pinnacle Renewable Energy объявила о планах строительства нового завода по производству пеллет мощностью 360 тыс. тонн в год рядом с существующим лесопильным заводом в Демополисе, штат Алабама. Ожидается, что установка начнет вводиться в эксплуатацию во втором квартале 2021 года. Завод Demopolis будет работать в рамках одного партнерства с Pinnacle, The Westervelt Co. и Two Rivers Lumber Co. LLC, каждый из которых владеет 70, 20 и 10 % долей в объекте. По словам Pinnacle, TWC продаст 10 %-ную долю принадлежащей ей в настоящее время 30 %-ной доли в близлежащем заводе по производству гранул Pinnacle в Алисевилле, штат Алабама, TRL. В соответствии с условиями партнерства, Pinnacle будет управлять объектом Demopolis и управлять всеми аспектами отношений с клиентами, маркетинговых продаж и логистики. В заявлении, опубликованном Pinnacle, указывается, что предлагаемый завод Demopolis и существующий завод Aliceville расположены в одной речной системе. Расположение предприятия Demopolis обеспечит возможность погрузки готовых пеллет в порту в Мобиле, штат Алабама, который является тем же портом, который используется для экспорта пеллет, произведенных на предприятии в Алисевилле. По словам Pinnacle, завод Demopolis находится в окончательном состоянии проектирования и планирования строительства. Pinnacle также отметил, что долгосрочные соглашения о поставках сырья были заключены с большинством поставщиков. «Опираясь на наш ранний успех на

заводе в Алисевилле, который в настоящее время производит древесные пеллеты в преддверии ввода в эксплуатацию, мы рады расширению нашего присутствия на юго-востоке США и использованию существующих связей и инфраструктуры, которые мы установили в этом районе», сказал Роб Маккарди, генеральный директор Pinnacle, в заявлении. «Расширение США на юго-восток еще больше сближает Компанию с нашими партнерами и поставщиками сырья и позволяет гибко оптимизировать поток сырья между объектами, а также диверсифицировать наш бизнес в регионе, где после завершения ввода в эксплуатацию будет произведено около 660 млрд. т пеллет в год». [55, 56].

Приведенные выше материалы показывают современные тенденции в производстве пеллет — слияния и поглощения, характерные не только для фирм в США. В настоящее время для производства, торговли и использования пеллет характерна глобализация, обусловленная как общемировыми причинами, так и в ряде стран их специфическими особенностями.

Что касается стран за пределами региона ЕЭК ООН, то целевые показатели в отношении использования возобновляемых источников энергии в Японии могут привести к тому, что спрос на топливные древесные гранулы промышленного назначения может превысить к 2025 году 12 млн. тонн в год [50]. Благодаря ожидаемому спросу на сертифицированные (на предмет устойчивости их производства) топливные древесные гранулы Канада и США имеют все возможности стать ведущими поставщиками этой продукции в Японию.

Как уже упоминалось выше, ЕЭК ООН/ФАО опубликовало в мае 2018 года новое исследование «Древесина как источник энергии в регионе ЕЭК ООН» [23], подготовленное Секцией лесного хозяйства и лесоматериалов ЕЭК ООН/ФАО при поддержке правительства Финляндии и Группы специалистов ЕЭК ООН/ФАО по энергоносителям на базе древесины. В этой публикации описываются ситуация в области производства энергии на базе древесины, виды используемого древесного топлива, его основные источники и потребители, инструменты государственной политики, которые содействуют (и препятствуют) его использованию, а также способы заготовки древесины на устойчивой основе.

В ней рассматривается также вопрос о том, какое влияние могут оказать текущие социальные, экономические и политические тенденции и изменения на использование древесины в энергетических целях и ее устойчивое производство в будущем.

По сделанным несколько лет назад оценкам «Рёугу Consulting» [3, 4] к 2020 году производство торрефицированной древесины, которую в этих прогнозах не совсем корректно называют «биоуглем» достигнет 7,5 млн. тонн в год. Как указывается в этом обзоре, торрефицированное биотопливо — новое, зарождающееся направление, т. к. торрефицированное биотопливо обеспечивает наименьшую стоимость транспортировки зеленой энергии на большие расстояния. Наиболее перспективный сегмент — крупные промышленные потребители. Согласно прогнозам «Рёугу» до 2020 года объем инвестиций в производство «биоугля» превысит 1 млрд. евро. По мнению «Рёугу Consulting» в России ежегодно остается не освоенным лесосечный фонд в несколько сотен миллионов кубометров, что достаточно для обеспечения сырьем 1000 биоугольных заводов (в Финляндии — примерно 20 млн. м³, 80 заводов). Однако, несмотря на многочисленные заявления о пуске промышленных предприятий по производству торрефицированного биотоплива, на мировых рынках этого продукта практически нет из-за проблем с масштабированием. И только появление в 2015 году разработанной в данной диссертации инновационной технологии производства топливных древесных и древесно-угольных брикетов принципиально меняет эту картину.

Следует в заключение отметить, что торрефицированная древесина не является таким уж новым продуктом. В конце XIX, начале XX века этот продукт был широко распространен в Российской Империи, как для получения некоторых видов порохов, так и в качестве элитного топлива для печей и каминов [57]. Поэтому, в строгом смысле, внедрение торрефиката в современную энергетику - не 100 %-ная инновация, а отчасти возвращение к применявшимся в прошлом технологиям в видоизмененном виде (Таблица 3).

Таблица 3 – Влияние температуры обжига на выход угля и его состав

| Температура, °С | Вес остатка | Состав остатка в 100 частях | | | |
|--------------------|----------------|-----------------------------|---------|--------------------|------|
| | | Углерод | Водород | Кислород и азот | Зола |
| 150 | 100,00 | 47,51 | 6,12 | 46,29 | 0,08 |
| 200 | 77,10 | 51,82 | 4,99 | 43,98 | 0,23 |
| 250 | 49,57 | 65,59 | 4,81 | 28,9 | 0,63 |
| 300 | 33,61 | 73,24 | 4,25 | 21,96 | 0,57 |
| 350 | 29,66 | 76,64 | 4,14 | 18,44 | 0,61 |
| 432 | 18,87 | 81,64 | 1,96 | 15,24 | 1,16 |
| 1020 | 18,75 | 81,97 | 2,30 | 14,15 | 1,60 |
| 1500 | 17,31 | 94,57 | 0,74 | 3,84 | 1,66 |
| Выше 1500 | 15,00 | 96,52 | 0,62 | 0,94 | 1,94 |

В приведенной выше таблице из статьи «Уголь» [57] в 18 томе «Большой Энциклопедии», под редакцией С.Н. Южакова, Издательство «Просвещение», 1905 год, далее отмечается: *«Выход угля тем меньше, чем выше температура при обжиге и в то же время уголь получается более богатый углеродом и золой и более бедный водородом и кислородом. Так, уголь, получаемый при 270–300 °С, буро-черного цвета (красный уголь), легко загорается при 300 °С и при почти двойном выходе имеет почти ту же цену, что и черный уголь, получаемый при 340 °С, идет поэтому для металлургических целей и часто для приготовления пороха, благодаря некоторым своим особенностям».* Таким образом, красный уголь, т. е. продукт торрефикации — термообработки при 285 °С (± 5 °С) был известен и использовался в Российской Империи еще в XIX веке.

Древесный уголь. Исторически древесный уголь являлся одним из наиболее востребованных продуктов переработки древесины – и как топливо, и как восстановитель в металлургии, и как компонент черного пороха. В современном мире во многих развивающихся странах мира древесный уголь является одним из основных видов топлива для приготовления пищи, а также одним из основных источников экологических проблем этих стран. В развитых странах в регионе ЕЭК ООН он используется главным образом для приготовления

пищи во время отдыха на открытом воздухе (барбекю, шашлыки и т. д.) и в ряде промышленных процессов. Данные об объемах производства древесного угля зачастую являются неудовлетворительными. По этой причине древесный уголь, как правило, не рассматривается в рамках анализа в обзорах ЕЭК ООН/ФАО ООН. Однако в обзорах последних лет была включена некоторая информация, а также была выпущена специальная монография [25] по древесному углю в связи с его особой значимостью для Африки. В этой монографии указывается, что мировое производство древесного угля составляет около 50 млн. тонн в год, из которых 30 млн. тонн в год приходится на страны Африки.

В 2017 году общий объем производства древесного угля в Европе составил 448 000 т, что на 2,5 % больше, чем в 2016 году [3, 4]. Крупнейшим его производителем являлась Польша, удельный вес которой в общем показателе производства по Европе составил 33 %. Показатель потребления древесного угля в Европе в 2017 году не претерпел каких-либо существенных изменений. Общий объем потребления составил 113 800 т, что на 0,7 % больше, чем в 2016 году. Крупнейшими потребителями являлись Германия, Франция и Турция, удельный вес которых в общем показателе потребления по региону составил соответственно 20, 9 и 8 %. Общий объем производства древесного угля в регионе СНГ составил в 2017 году 185 000 тонн. Объем его производства в Украине составил, согласно оценкам, 100 000 т или 54 % от общего показателя по субрегиону СНГ. Более 80 % производимого в Украине древесного угля идет на экспорт. Потребление древесного угля увеличилось в почти всех государствах — членах СНГ. Крупнейшим его потребителем в субрегионе СНГ при показателе в 40 000 т (56 %) являлась Российская Федерация. Из стран Северной Америки информацию об объеме производства и потребления древесного угля представили лишь США. Канада производит древесный уголь, но не представляет соответствующих данных. В 2017 году объем производства древесного угля в США составил, согласно оценкам, 852 000 т, а объем потребления — 946 000 тонн [3, 4].

Древесный уголь в РФ. В таблице 4 приведены обработанные автором данные РАО Бумпрома [58] в объемах экспорта в РФ и импорта из РФ древесного угля и различия в ценах при экспорте и импорте.

Таблица 4 – Экспорт в РФ и импорт из РФ древесного угля в 2018–2019 гг.

| Направление торговли | 2018 год | | | 6 мес. 2019 года | | |
|--------------------------------------|---------------|-----------------------|------------|------------------|-----------------------|------------|
| | Объем, тыс. т | Стоимость, тыс. \$ US | Цена, \$/т | Объем, тыс. т | Стоимость, тыс. \$ US | Цена, \$/т |
| Экспорт | 48151 | 13588 | 282 | 27703 | 8832 | 318 |
| Импорт | 11880 | 8861 | 746 | 6916 | 45146 | 657 |
| Объем импорта в % от объема экспорта | 24,6 | — | — | 25,0 | — | — |
| Экспортная цена, в % от цены импорта | — | — | 38 | — | — | 48,4 |

Как видно из представленных в таблице данных, объем импорта древесного угля в Россию составляет лишь четверть от объема экспорта, однако и такой объем представляется не обоснованным, особенно учитывая, что цена экспортируемого угля в 2–3 раза ниже цены импортируемого угля. Это еще раз свидетельствует об актуальности темы данной диссертации.

В связи с рассмотрением в диссертации вопросов получения древесного угля целесообразно обратиться и к химизму происходящих при этом процессов.

В монографии Н.И. Никитина [59] указывается, что древесный уголь представляет собой нелетучие углеродистые продукты пиролиза, в которых всегда содержатся летучие вещества, удерживаемые силами адсорбции и т. п. Он обычно не является чистым углеродом. Состав древесного угля в основном зависит от конечной температуры обугливания. С повышением конечной температуры обугливания, содержание С увеличивается, а Н и О уменьшается; выходы же угля падают. Эти изменения в основном происходят в интервале температур от 200 до 600 °С; выше 600 °С они незначительны. Элементарный состав угля отчасти зависит от продолжительности перегонки: чем медленнее она ведется, тем выше содержание углерода. На состав угля, кроме того, влияет способ его охлаждения, а порода древесины на состав угля почти не оказывает влияния. Так как

элементарный состав угля зависит от конечной температуры обугливания, то, зная его состав, можно определить конечную температуру обугливания и, наоборот, по этой температуре определить элементарный состав угля. Такие определения являются достаточно точными, если угли выжжены в условиях, близких по продолжительности процесса.

Как описывается в монографии Н.И. Никитина [59] при прокаливании древесный уголь выделяет летучие вещества, выделение которых начинается при температуре более низкой, чем температура выжига, а количество тем больше, чем ниже температуры, при которых уголь был выжжен. Углерод, содержащийся в летучих веществах, получил название летучего углерода в отличие от нелетучего углерода, остающегося в угле после его прокаливания. Определение нелетучего углерода обычно производится путем прокаливания угля в тигле при температуре до 900 °С [59].

Состав зольной части древесного угля зависит от породы древесины. Для доменного угля важное значение имеет содержание в нем фосфора. В углях хвойных пород содержание фосфора в среднем составляет 0,016–0,019 %, в лиственных 0,037–0,042 % [59]. В связи с повышенным содержанием фосфора в коре угля, выжженные из окоренной древесины, содержат его значительно меньше (хвойный — около 0,008 %).

Теплотворная способность угля зависит от конечной температуры обугливания и для вполне выжженного угля составляет около 7,500 ккал/кг. Отклонения теплотворной способности угля в зависимости от породы незначительны. Теплотворная способность угля (Q) может быть вычислена, исходя из элементарного состава, по эмпирическим формулам, например, по формуле Н.И. Никитина [59] $Q=80,51C+273,4H$, где C и H – содержание углерода и водорода в процентах от абсолютно сухого беззольного вещества угля. Формула Н. И. Никитина дает ошибки не более $\pm 0,6$ % (Таблица 5).

Найденный объемный вес угля колеблется в пределах от 0,26–0,42; главным образом в зависимости от породы древесины и конечной температуры обугливания — [59], при конечных температурах 600–700 °С быстро возрастает

удельный вес угля и изменяется его структура; он графитируется и становится твердым.

Таблица 5 – Элементарный состав и теплотворная способность древесных углей [59]

| Род угля и порода древесины | С, % | Н, % | Зола, % | О+N, % | Q найденное, кал | Q вычисленное, кал | Погрешность вычисления, % |
|-----------------------------|-------|------|---------|--------|------------------|--------------------|---------------------------|
| Кучной: | | | | | | | |
| бук белый | 92.11 | 0.78 | 1.94 | 5.17 | 7637 | 7629 | -0.10 |
| клен полевой | 90.72 | 1.18 | 2.75 | 5.35 | 7655 | 7626 | -0.38 |
| береза | 90.53 | 1.89 | 2.55 | 5.03 | 7842 | 7805 | -0.47 |
| бук красный | 89.95 | 1.46 | 3.21 | 5.38 | 7613 | 7641 | +0.37 |
| Печной: | | | | | | | |
| осина | 85.92 | 3.43 | 2.09 | 8.56 | 7853 | 7855 | +0.03 |
| ель | 80.85 | 3.85 | 1.03 | 14.27 | 7556 | 7562 | +0.07 |
| сосна | 80.35 | 3.91 | 1.11 | 14.63 | 7519 | 7538 | +0.25 |
| береза | 76.79 | 3.92 | 2.09 | 17.20 | 7278 | 7454 | -0.33 |
| кедр | 76.46 | 4.44 | 0.53 | 18.57 | 7344 | 7370 | +0.35 |

Истинный удельный вес угля достигает 1.8. Древесный уголь сохраняет анатомическое строение исходной древесины (Рисунок 1). По микроструктуре угля можно определить породу древесины, из которой он был выжжен. Почти полное исчезновение микроструктуры и образование плотного угля с роговидным изломом, происходит при осторожном механическом сжатии древесины во время термолиза [59]. Это указывает на то, что при нагревании имеется стадия, когда древесное вещество становится довольно пластичным; более подробно эти вопросы будут рассмотрены ниже, на основе концепции Э. Л. Акима [60, 61] об определяющей роли релаксационных состояний полимерных компонентов древесины в процессах ее переработки.

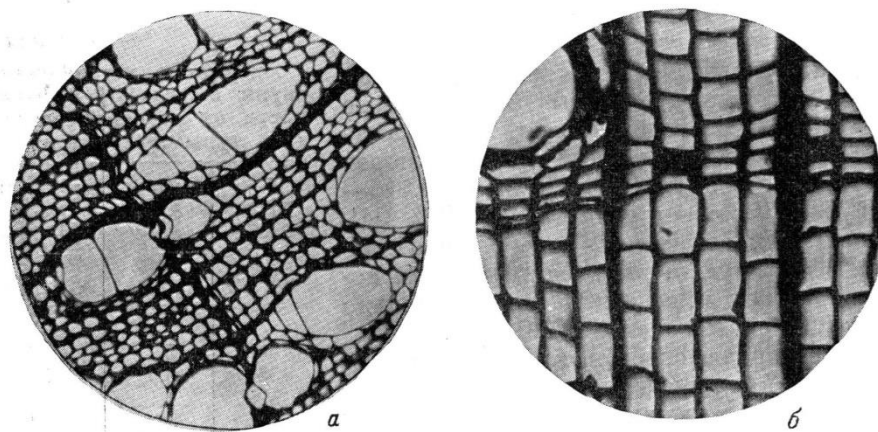


Рисунок 1 – Микроскопическое строение древесного угля:

а — березовый уголь; б — сосновый уголь

Даже обычный древесный уголь является хорошим адсорбентом. Для повышения его сорбционных свойств производится активирование обработкой водяным паром или углекислым газом при температуре 800–900 °С. При такой обработке из пор угля удаляются летучие продукты и разрыхляется его поверхность. Удельная поверхность после активации сильно возрастает, достигая 1000 м²/г вместо 160–400 м²/г у обычного угля. Для активации угля применяют также пропитку угля-сырца активирующими добавками, например, ZnCl₂; затем уголь прокаливают при 700° и промывают водой.

После краткого отступления о химизме процессов, происходящих при получении древесного угля, вернемся к вопросам его современного использования в мире, в контексте перехода к биотопливу как средству сокращения выбросов парниковых газов.

Проблемам экологизации производственно-сбытовой цепочки древесного угля в целях смягчения последствий изменения климата и расширения источников средств к существованию местного населения посвящена, как уже указывалось выше, выпущенная ФАО ООН монография [26] «Древесный уголь: переход к эффективному производству». В ней справедливо указывается, что из всей древесины, которая используется как топливо, около 17 % перерабатывается

в древесный уголь, и что глобальное производство древесного угля в ближайшие десятилетия продолжит расти. Сектор производства древесного угля, который в значительной является неформальным сектором экономики, приносит доход более чем 40 млн. человек, но отсутствие регулирования означает, что такое производство поощряет неэффективность, а правительства теряют миллиарды долларов доходов. Из 50 млн. тонн древесного угля, потребляемого в настоящее время в мире, 30 млн. тонн приходится на Африку. По имеющимся оценкам, 1–2,4 Гт CO₂-экв парниковых газов ежегодно выбрасывается в атмосферу при производстве и использовании древесного топлива и древесного угля, что составляет 2–7 % глобальных антропогенных выбросов. Эти выбросы в значительной степени обусловлены нерациональным управлением лесными ресурсами и неэффективностью производства древесного угля и сжигания топливной древесины.

В монографии [26] указывается, что в развивающихся странах топливная древесина и древесный уголь являются основными источниками энергии для домашних хозяйств и мелких предприятий. Около трети населения Земли — более 2,4 млрд. человек — по-прежнему зависят от традиционного использования древесного топлива для приготовления пищи, и многие мелкие предприятия используют древесное топливо и древесный уголь в качестве основных энергоносителей для таких целей, как хлебопечение, переработка чайного листа и изготовление кирпичей. По имеющимся оценкам, 50 % заготовленной в лесах древесины в мире используется в качестве древесного топлива и древесного угля.

Производство древесного угля за последние десятилетия росло по мере роста спроса у городского населения и предприятий. Там, где спрос высок, в основном в странах Африки к югу от Сахары, но также и в Юго-Восточной Азии и Южной Америке, нерациональные методы заготовки древесины и производства древесного угля способствуют деградации лесов и обезлесиванию и выбросам парниковых газов (ПГ) на всех этапах производственно-сбытовой цепочки производства древесного угля, особенно при использовании неэффективных технологий.

Выбросы от традиционного производства и использования энергии из древесины (топливная древесина и древесный уголь) оцениваются в 1–2,4 Гт эквивалента диоксида углерода (CO₂-экв.) в год, что составляет 2–7 % от общих антропогенных выбросов ПГ; на страны Африки к югу от Сахары приходится одна треть выбросов ПГ от производства и потребления древесного топлива. При производстве древесного угля можно добиться значительного снижения выбросов ПГ простыми мерами. Основываясь на имеющихся в литературе и полученных в данной диссертации данных, можно сказать, что переход от традиционных промышленных печей к высокоэффективным современным установкам может снизить выбросы ПГ на этапе карбонизации на 80 %; усовершенствованная технология производства в сочетании с когенерацией, или одновременным производством древесного угля и электроэнергии (в случае промышленного производства), может снизить выбросы на 50 % или более.

В то же время древесный уголь, произведенный с использованием рационально управляемых ресурсов и усовершенствованных технологий, является энергоносителем с низким уровнем чистых выбросов ПГ, тем самым способствуя смягчению последствий изменения климата и при этом расширяя доступ к энергии и продовольствию и обеспечивая возможности для получения дохода. Именно поэтому автор и его научный руководитель вынесли на конференцию в Женеве [11] доклад об инновационной технологии производства древесно-угольных брикетов.

1.2 Особенности строения опилок древесины лиственницы как природного полимерного композиционного материала и особенности релаксационного состояния полимерных компонентов древесины

Подробно рассмотренные выше состояние и динамика развития производства и потребления древесных пеллет и брикетов показывает, что они не просто стали объектом международной торговли, но и, как правило, являются объектом трансокеанских перевозок. В то же время развитию этого направления способствовали преференции, созданные в ряде стран, например, в Евросоюзе, в

связи с Киотским протоколом и Парижским соглашением. Однако эти преференции не вечны, и поэтому конкурентоспособность древесных пеллет и брикетов в стратегическом плане будет определяться возможностью устранения их недостатков, а также расширением их ассортимента, вовлечением новых источников сырья и повышением транспортабельности биотоплива.

Одним из недостатков обычных древесных пеллет является их низкая водостойкость, связанная с гидрофильностью древесины. Это накладывает определенные ограничения на условия транспортировки и хранения пеллет. Частично этот недостаток устраняется при переходе к производству остеклованных брикетов и пеллет, а также при переходе к торрефицированной древесине. Однако метод торрефикации, сущность которого заключается в термообработке древесины при температуре $(225\pm 10)^\circ\text{C}$, пока не получил широкого распространения из-за проблем при масштабировании оборудования. Получение торрефицированной древесины возможно также и из отходов лесозаготовительной деятельности (в том числе при переходе к интенсивному лесопользованию).

Физико-химическая сущность процессов, происходящих при производстве остеклованных брикетов и пеллет, рассматривается ниже, где с позиций структурной физикохимии древесины анализируется механизм процессов, происходящих при осуществлении инновационной технологии получения из опилок древесины топливных древесных и древесно-угольных брикетов [16–18] (Рисунок 2).

До выполнения данной работы в мире и в России биотопливо второго поколения выпускалось в виде пеллет и двух-трех основных видов древесных брикетов. Брикет RUF имеет форму кирпичей; они производятся методом холодного прессования при высоком давлении. Брикет Pini&Kau имеет форму восьмигранника с отверстием и производится шнековым (экструзионным) методом.



Рисунок 2 – Древесные и древесно-угольные брикеты,
разработанные автором

В данной диссертации сырьем для производства брикетов, по форме аналогичных Pini&Kay, являются или опилки древесины лиственницы, получаемые при производстве пиломатериалов (влажность 30–50 %), или микрощепа – щепа, нарубленная поперек волокон до размеров 2 мм. Первая стадия процесса заключается в измельчении опилок до порошкообразного состояния в кольцевом аэродинамическом аппарате, названном автором диссертации «коллайдером» (от английского слова collide — «сталкиваться»). На второй стадии порошковый материал проходит через экструдер, превращаясь в брикет, аналогичный по форме брикетам Pini&Kay.

И хотя производство биотоплива второго поколения в мире и в России, как было показано выше, стремительно развивается, а в последние годы в России появился и ряд диссертаций и исследований на эту тему [62–71], существует ряд аспектов, представляющих на наш взгляд большой интерес для развития и усовершенствования данных технологий. Важнейшим из них является, по-видимому, вопрос о структурных изменениях полимерных компонентов древесины при получении биотоплива второго поколения в виде пеллет и древесных брикетов.

Для этого, прежде всего, необходим анализ изменения релаксационного состояния полимерных компонентов древесины на каждой из стадий технологического процесса получения древесных брикетов и пеллет. Теоретической основой диссертации явилась концепция проф. Акима Э. Л. [60, 61] об определяющей роли релаксационного состояния целлюлозы и других

полимерных компонентов древесины при осуществлении химических реакций и физико-химических процессов с их участием. Эта концепция и ее развитие в последующие годы стала теоретическим фундаментом многих работ в области биорефайнинга лиственницы и другого растительного сырья.

Одним из новых направлений исследований в этой области является высокотемпературный биорефайнинг древесины — термостабилизированный пиролиз, которому и посвящена данная диссертация. Под «высокотемпературным термостабилизированным биорефайнингом древесины» в данной диссертации понимаются процессы, проходящие при температуре выше температуры термодеструкции древесины, которые могут рассматриваться как низкотемпературный пиролиз — 380–450 °С.

Как известно, морфологическая структура природного капиллярно-пористого композита — древесины — построена из трех основных полимерных компонентов.

- Целлюлоза — аморфно-кристаллический линейный полимер, имеющий аморфные и кристаллические области.
- Гемицеллюлозы — аморфные линейные полимеры.
- Лигнин — макросетчатый полимер, построенный из фенилпропановых единиц.

В живом дереве капиллярно-пористая структура древесины практически полностью заполнена водными системами. Поэтому релаксационное состояние основных полимерных компонентов древесины в живом дереве рассматривается в условиях максимально пластифицированного водой, а для водорастворимых гемицеллюлоз — как их водный раствор. Наличие в древесине смол и других экстрактивных гидрофобных компонентов приводит к тому, что в древесине практически имеются также дисперсные системы. Учитывая, что в большей или меньшей степени в древесине, после ее заготовки, происходит удаление пластификатора — воды, релаксационное состояние полимерных компонентов древесины меняется. В связи с тем, что биосинтез целлюлозы и других полимерных компонентов древесины в природе происходит при обязательном

участии воды (т. е. все эти природные полимеры рождаются в воде), для целлюлозы, гемицеллюлоз и лигнина мокрое состояние первично, а сухое состояние вторично. Выделение технической целлюлозы из древесины и другого растительного сырья осуществляется в водных средах. Таким образом, как в природных, так и уже в обычных, комнатных условиях мокрая целлюлоза находится в высокоэластическом состоянии. При этом для целлюлозных материалов в воде значения модуля упругости соответствуют характерным для полимеров, находящихся в высокоэластическом состоянии. Переход из мокрого состояния в сухое для целлюлозы и материалов на ее основе имеет особое значение. Мокрая целлюлоза находится в высокоэластическом состоянии, а сухая застеклована. При сушке целлюлозы происходит, таким образом, изменение релаксационного (физического) состояния. При обычных методах сушки целлюлозы совмещаются процессы обезвоживания (удаления воды) и сушки (удаления жидкости, смачивающей целлюлозу). Происходящее при удалении пластификатора (воды) стеклование целлюлозы сопровождается значительными усадочными напряжениями.

Проведенные в конце 60-х годов проф. Акимом Э. Л. [60, 61] исследования влияния жидких сред на температуру перехода ряда полимеров из стеклообразного состояния в высокоэластическое показали, что температура стеклования целлюлозы, составляющая для сухой целлюлозы на воздухе 220 °С, под влиянием ряда жидких сред (воды, глицерина, уксусной кислоты) снижается весьма значительно, в частности, в воде — ниже комнатной температуры. Выполненные исследования позволили проанализировать роль высокоэластического состояния полимеров в механохимических, физико-химических и химических процессах, сформулировать особенности протекания процессов при высокоэластическом состоянии полимеров. Было показано, в частности, что с направленным изменением физического состояния полимерных компонентов древесины связано возникновение прочности бумажного листа, а одним из обязательных условий крашения текстильных материалов является перевод волокнообразующего полимера из стеклообразного состояния в

высокоэластическое. Обязательным условием осуществления химических реакций с полимером, находящимся в конденсированном состоянии, также является его расстекловывание. Экспериментально было доказано, например, что сущность такой технологической операции, как активация путем обработки уксусной кислотой целлюлозы перед ее ацелированием, заключается в переводе целлюлозы из стеклообразного состояния в высокоэластическое благодаря пластифицирующему действию уксусной кислоты.

Роль релаксационного состояния полимерных компонентов древесины при получении композиционных материалов упаковочного назначения (гофрокартона) была рассмотрена в работе Э. Л. Акима и А. С. Смолина [72]. В этой работе показано, что ход процессов обработки и переработки бумаги, в частности получения гофрокартона, зависит от релаксационного состояния лигнина и других полимеров, участвующих в этом процессе. Рассмотрение каждой из стадий и изменение релаксационного состояния полимерных компонентов древесины на каждой из стадий показало, что при получении гофрокартона, когда используется сочетание флютинга, крафт-лайнера и тест-лайнера, именно состояние лигнина в картоне из первичных и/или вторичных волокон для гладких слоев гофрокартона (крафт-лайнер и тест-лайнер) и бумаги для гофрирования (флютинге) определяет прочность получаемого материала. Из общепринятой технологии гофроматериалов хорошо известно, что для лайнера и, в большей степени, для флютинга, используют лигнофицированные волокнистые полуфабрикаты. Они имеют высокое и сверхвысокое содержание лигнина 9–15 %, что соответствует числам Каппа от 60 до 100 ед. Применение таких полуфабрикатов гарантируют высокие показатели жесткости волокон, лайнера и флютинга и соответственно высокую жесткость при изгибе боковых стенок гофроящика, обеспечивающего его каркасность и штабелируемость.

Как известно, природный лигнин в древесине имеет структуру трехмерной сетки. При получении волокнистых полуфабрикатов в результате механодеструкции, хемодеструкции или их сочетания происходит разрушение трехмерной сетки нативного лигнина, и в результате в волокнистых

полуфабрикатах, особенно на их поверхности, находятся аморфные линейные продукты деструкции природного трехмерного лигнина.

Хотя в древесине имеются три полимерных компонента (целлюлоза, гемицеллюлозы, лигнин), ее термомеханические исследования показали, что у древесины отсутствуют температурные переходы, характерные для выделенных компонентов. Поэтому матрицу необработанной древесины нельзя относить к многофазным системам. Однако в связи с тем, что лигнин и не целлюлозные углеводы (гемицеллюлозы) не являются полностью совместимыми полимерами, при увеличении сегментальной подвижности их макромолекул происходит микрорасплавление этих полимеров. Так, если для не пропаренной древесины тополя наблюдается лишь один температурный переход, то для влажной массы из пропаренной древесины — уже два перехода. С этих позиций можно объяснить данные, относящиеся к пластификации лигнина при получении волокнистых полуфабрикатов.

В разных слоях клеточной стенки состав лигноуглеводной матрицы неодинаков, что выражается главным образом в изменении доли отдельных компонентов. Влияние сетки, образуемой за счет структуры лигнина, на механические свойства матрицы в хвойной древесине более существенно, чем в лиственной. В целом сетка, образуемая благодаря структуре лигнина, определяет в основном жесткость матрицы, а сетка, образуемая валентными связями между лигнином и не целлюлозными углеводами, — эластичность матрицы. Поэтому, если термомеханические свойства природного лигнина в древесине должны описываться термомеханической кривой, характерной для макросетчатых полимеров, то для лигнина, находящегося в волокнистых полуфабрикатах, или для выделенных препаратов лигнина должна быть характерна термомеханическая кривая аморфного линейного полимера.

Детальные термомеханические исследования древесины и ее основных компонентов были выполнены Горингом с сотрудниками [73]. Была определена температура стеклования различных препаратов лигнина в сухом и мокром

состояниях (Таблица 6) и показано пластифицирующее действие воды, значительно снижающей температуру стеклования всех препаратов лигнина.

Таблица 6 – Взаимосвязь между температурой стеклования T_c и адгезионными свойствами, характеризуемыми температурой сцепления T_b различных препаратов лигнина в сухом и мокром состоянии

| Образец | Сухой образец | | Поглощение воды, г/100 г | Влажный образец | |
|--------------------------|---------------|------------|--------------------------|-----------------|-------------|
| | T_c , °С | T_b , °С | | T_c , °С | T_b , °С* |
| Еловый периодатлигнин | 193 | 190 | 12.8 | 116 | 70 |
| Березовый периодатлигнин | 179 | 180 | 12.2 | 128 | 70 |
| Еловый диоксанлигнин I | 127 | 110 | 7.7 | 72 | 50 |
| Еловый диоксанлигнин III | 146 | 150 | 7.8 | 92 | 90 |
| Осиновый диоксанлигнин | 134 | 120 | 7.2 | 78 | – |

* T_b измеряли на образцах, приготовленных в присутствии избытка воды, а затем высушенных

Различия в температурах стеклования лигнинов обуславливаются, в частности, различиями в молекулярной массе образцов. Так, у диоксанлигнинов температура стеклования снижается со 176 °С при ММ 85 000 до 127 °С при ММ 4300. Учитывая, что лигнин, находящийся в древесине, обладает большей полидисперсностью, чем изучавшиеся Горингом выделенные препараты лигнина, можно считать, что температура размягчения лигнина в волокнистых полуфабрикатах лежит в пределах, определенных Горингом, т. е. составляет для сухого состояния 130–190 °С, а для влажных образцов — 70–120 °С. Экспериментально была показана линейная зависимость снижения температуры стеклования различных препаратов лигнина от количества сорбированной ими влаги. Интересные данные были получены при сопоставлении температуры стеклования лигнина в сухом и мокром состояниях с его адгезионными свойствами, которые характеризовались температурой сцепления. Для определения этой температуры порошок лигнина запрессовывали между двумя бумажными дисками, а затем определяли силу, необходимую для разъединения

полученного сцепления. Как видно из данных таблицы, значения температур стеклования и сцепления очень близки. Изменение природы препарата, его увлажнение приводят к симбатному изменению этих температур. Аналогичные данные были получены для ксилана березы и глюкоманнана сосны. Все эти данные свидетельствуют о тесной взаимосвязи адгезионных свойств лигнина и гемицеллюлоз с изменением их физического состояния, а также об определяющей роли воды как пластификатора, снижающего температуру стеклования этих полимерных компонентов растительной ткани.

Интересно отметить, что на направленном изменении релаксационного состояния полимерных компонентов древесины основывается и инновационное производство древесно-угольных брикетов [8, 9].

Всем описанным процессам дополнительно способствует происходящая при размоле механодеструкция полимерных компонентов древесины. Для рассмотрения этого вопроса целесообразно обратиться к одной из существующих в настоящее время концепций о структуре и молекулярной массе протолигнина, называемой концепцией трехмерной сетки, которая проанализирована, например, в монографиях К. Г. Боголицына и В. В. Лунина [74].

Фундаментальную концепцию трехмерной сетки разработал Горинг [73]. Она базируется на представлении о лигнине как сетчатом полимере, который в растительной ткани находится в виде золь-гель-фракций. Первая сравнительно низкомолекулярна и растворима в органических растворителях, доля которого в лигнине древесины около 10 %. Основную массу лигнина составляет гель-фракция, которая образует бесконечную трехмерную сетку, пронизывающую всю растительную ткань. Отсюда следует, что молекулярная масса (ММ) выделенных лигнинов, изменяющаяся от нескольких сотен до сотен тысяч и даже миллионов, характеризует молекулярную массу только фрагментов трехмерной бесконечной сетки.

Подтверждением концепции трехмерной сетки служит ряд фактов.

1. Основную массу лигнина невозможно извлечь из древесины органическими растворителями.

2. Молекулярная масса изолированных препаратов полидисперсна, колеблется в широких пределах, характерных для сетчатых полимеров типа амилопектина, гликогена - от нескольких сотен до сотен тысяч и даже миллионов;

3. Фрагменты макромолекулы лигнинов в растворе содержат внутримолекулярные поперечные связи и имеют форму, подобную сфере Эйнштейна;

4. По мере углубления процесса при делигнификации в раствор переходят фрагменты макромолекулы с непрерывно возрастающей молекулярной массой.

Интересно отметить, что использованные в работах Горинга [73], препараты лигнина механического размола (ЛМР), получены в условиях, исключающих конденсацию лигнина. Они обладают низкой средней молекулярной массой, не превышающей 10 000, и не полидисперсны (Таблица 7).

Таблица 7 – Средняя молекулярная масса и степень полидисперсности препаратов лигнина механического размола (ЛМР) [71, 72]

| Препарат ЛМР | M_w | M_n | M_w/M_n |
|--------------|-------|-------|-----------|
| Ели | 7 050 | 4 120 | 1,40 |
| Лиственницы | 6 650 | 3 760 | 1,78 |
| Тополя | 5 140 | 3 440 | 1,53 |
| Тростника | 5 350 | 3 300 | 1,62 |

Концепция Горинга опирается на экспериментальные факты; по ней лигнин встроен в структуру клеточной стенки и связан с полисахаридами водородными и ковалентными связями. Именно поэтому его основную массу нельзя выделить экстракцией органическими растворителями. Как известно, сравнительно низкомолекулярные гемицеллюлозы сами по себе растворимы в воде, но их нельзя извлечь из древесины водной экстракцией.

Следует также отметить, что большую роль в формировании реакционной способности лигнина играют свободные радикалы, возникающие в макромолекуле лигнина после разрыва лигнин-углеводных связей. Они являются активаторами реакций полимеризации, приводящих к образованию сетчатой структуры, типичной, например, для гидролизного лигнина. Появление радикалов

было зафиксировано не только при воздействии на лигнин химических агентов (кислот, щелочей, ферментов), но и при механической деструкции древесины. Механизм образования радикалов изучался многими исследователями [73–76]. Многочисленные опыты по исследованию парамагнетизма лигнина и его препаратов показывают наличие радикалов во всех изученных образцах лигнина как в нативном виде, так и обработанных в различных условиях делигнификации. Все эти данные могут быть применены к анализу процессов, происходящих при разрабатываемых в диссертации инновационных методах получения древесных и древесно-угольных брикетов.

1.3 Заключение по литературному обзору, теоретические предпосылки работы и постановка задач экспериментальной части

Таким образом, анализ существующих рынков и методов производства твердого биотоплива второго поколения показал перспективность развития этих производств, прежде всего, в местах образования древесных отходов, в частности, опилок. При этом конкурентоспособность новых видов биотоплива определяется, в значительной степени их транспортабельностью. Особую перспективность имеют древесный уголь и древесноугольные брикеты, прежде всего, как восстановитель в металлургии.

Анализ особенностей строения опилок древесины лиственницы как природного полимерного композиционного материала показал необходимость учета особенностей релаксационного состояния полимерных компонентов древесины. Поэтому, физико-химические аспекты высокотемпературного биорефайнинга тесно связаны с релаксационным (физическим) состоянием полимерных компонентов древесины, их направленным изменением в период заключительных стадий жизненного цикла древесины – от живого дерева до переработки опилок к конечной продукции – брикетам и их использовании.

Как известно, сложность создания материалов на основе древесины, полисахаридов связана с их неспособностью переходить при нагревании в вязкотекучее состояние, в котором обычно перерабатываются синтетические

полимеры. Поэтому, как было показано в докторской диссертации С. З. Роговиной [77], эффективным способом получения смесей на их основе является разработанный в Институте химической физики им. Н. Н. Семенова РАН метод твердофазного смешения полимеров в условиях высокотемпературных сдвиговых деформаций, позволяющий получать композиции с более высокой степенью однородности распределения компонентов, чем при традиционных способах смешения [77, 78]. В этих условиях в смесителе Брабендера, в котором реализуется вышеуказанный метод воздействия на материал, экологически чистым методом в отсутствие растворителей были получены смеси полилактида с микрокристаллической целлюлозой, крахмалом и хитозаном.

В связи с изложенным, в задачи экспериментальной части диссертации входило:

1. исследовать компрессионные свойства древесины лиственницы в условиях одноосного сжатия;
2. разработать научные основы принципиально новой энергосберегающей технологии получения топливных древесных и древесно-угольных брикетов и обеспечить патентную защиту данной технологии;
3. осуществить синтез и анализ технологической схемы получения топливных древесных и древесно-угольных брикетов;
4. создать опытно-промышленную установку получения топливных древесных и древесно-угольных брикетов;
5. исследовать свойства получаемых топливных древесных и древесно-угольных брикетов и проанализировать области их эффективного использования.

2 Методическая часть

Во второй главе приводятся описания объектов исследования, методов сжатия образцов древесины лиственницы, методов микроскопических и электронно-микроскопических исследований анатомического строения древесины лиственницы, исследования древесных и древесно-угольных брикетов.

2.1 Объекты исследования

В качестве объектов исследования были использованы опилки древесины лиственницы, как свежие, так и пролежавшие в отвалах несколько лет, модельные кубики древесины лиственницы, древесные и древесно-угольные брикеты из опилок древесины лиственницы.

2.2 Методы исследования

Для изучения компрессионных свойств древесины лиственницы использовались методы оценки упруго-релаксационных свойств на установке Instron 1121, на кафедре ТЦКМ.

Там же, на оптическом микроскопе, переведенном на цифровой режим, проводились и микроскопические исследования структуры брикета, а также воздействия на нее растворителей целлюлозы. Исследование морфологических особенностей, как исходной древесины лиственницы, так и остеклованных древесных брикетов и древесно-угольных брикетов, проводилось в Институте высокомолекулярных соединений Российской Академии Наук (ИВС РАН) на сканирующем электронном микроскопе SUPRA 55VP-32-49 фирмы «CarlZeiss».

2.2.1 Методика сжатия образцов древесины лиственницы и полученных брикетов

Проведение испытаний в условиях одноосного сжатия образцов древесины. Испытание образцов осуществляли в условиях одноосного сжатия на испытательной установке Instron 1121 (Рисунок 3). Предназначенная для определения деформационных и прочностных характеристик образцов материалов установка имеет следующие основные характеристики:

- скорость перемещения пуансона (в режиме сжатия) — от 1 до 500 мм/мин;
- диапазон измерения нагрузки 0 – 5000 Н;
- пределы допускаемой погрешности машины при измерении нагрузки — $\pm 1\%$ от измеряемой нагрузки;
- цена деления при измерении удлинения — 1 мкм;
- комплект зажимов обеспечивает испытания образцов с шириной до 50 мм.

Для обработки результатов использовалась программа ZetLab, с помощью которой рассчитывали модуль упругости, работу разрушения, разрушающее напряжение и деформацию при разрушении.

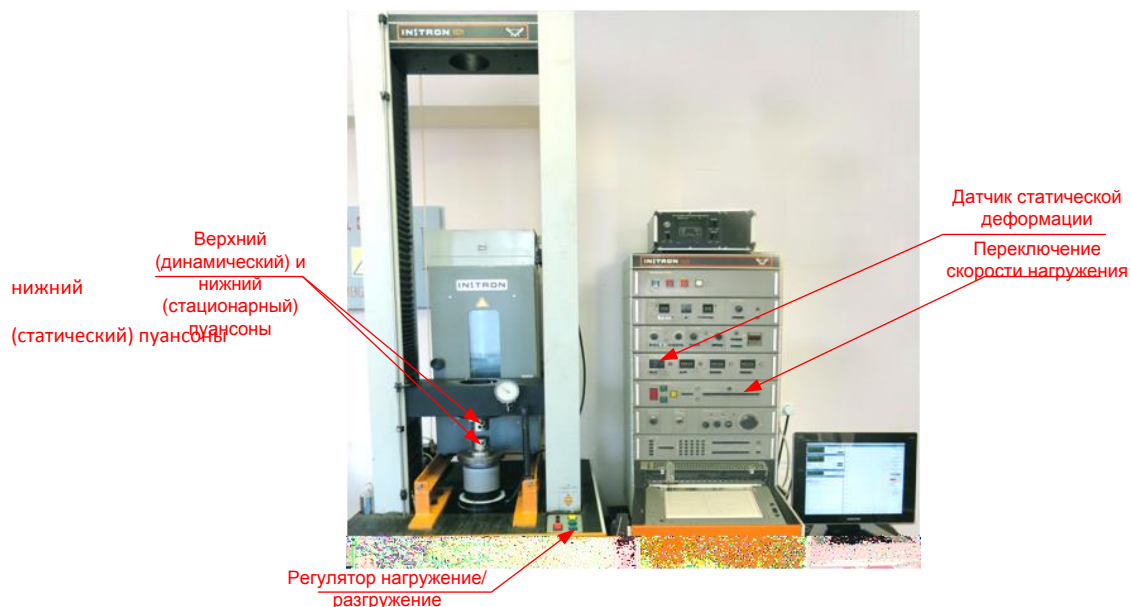


Рисунок 3 – Instron 1121

Процессы сжатия древесины лиственницы в условиях получения древесных брикетов были смоделированы путем длительного нагружения модельных кубиков размером 20x20x20 мм в режиме одноосного сжатия в диапазоне нагрузок до $P=4500$ Н на универсальной испытательной установке Instron 1121 при постоянной скорости деформирования $V=100$ мм/мин. Релаксационные свойства образцов древесины лиственницы исследовали в режиме одноосного сжатия с последующим эластическим восстановлением формы образца в диапазоне нагрузок $P=1500$ Н, 2500Н, 3500Н, 4500Н и продолжительности

действия нагрузки $t=1$ мин, 10 мин, 100 мин, 1000 мин. Остаточную деформацию измеряли в режиме восстановления формы образца. Продолжительность восстановления образца подбиралась экспериментально от 10 до 1000 минут.

Ранее этот метод применялся на кафедре ТЦКМ в диссертациях Я. В. Бучельниковой [80] и Н. В. Виноградова [62].

2.2.2 Методика микроскопического исследования на модернизированном микроскопе МБИ-6 (Рисунок 4)

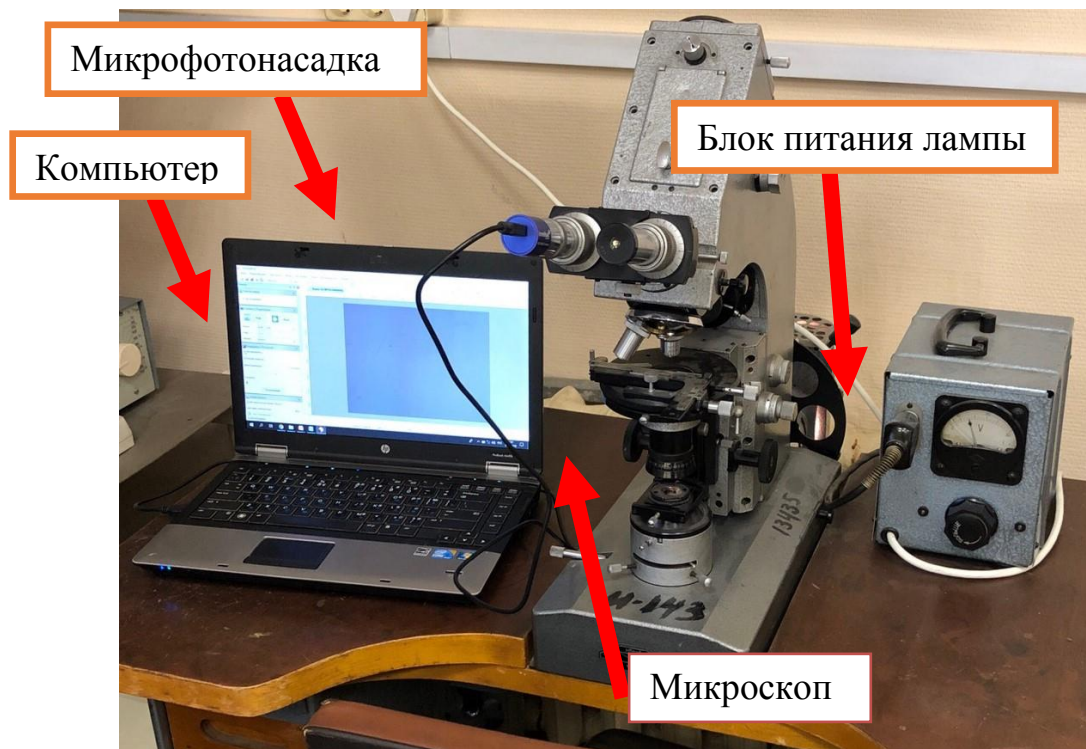


Рисунок 4 – Микроскоп МБИ-6 после модернизации

Для изучения микроскопической картины исходных свежих опилок, опилок из отвалов, диспергированной древесины, брикетов и их растворения была проведена реконструкция микроскопа МБИ-6, которая заключалась в том, что к оптическим микроскопам была подобрана цифровая микрофотонасадка, позволяющая делать фотографии и производить видеосъемку исследуемого образца. Для получения фото и видеоизображений на микроскопе, оснащенном данной микрофотонасадкой, в компьютере использовалось приложение LevenhukLite. Для большей наглядности использовались красители, обычно применяемые для контрастирования и анализа в химии древесины.

3 Экспериментальная часть

В третьей главе приведены разработанные научные основы принципиально новой энергосберегающей технологии получения топливных древесных и древесно-угольных брикетов, позволившие обеспечить патентную защиту новой технологии [7–11]. В свежеприготовленной древесной микрощепе и в опилках полимерные компоненты древесины находятся в разном релаксационном состоянии. Целлюлоза, линейный аморфно-кристаллический полимер, основной полимерный компонент древесины, находится в высокоэластическом состоянии, благодаря содержанию большого количества воды. Макросетчатый трехмерный полимер лигнин находится в стеклообразном состоянии, однако при определенных условиях может быть переведен в вынужденное высокоэластическое и даже в вынужденное вязкотекучее состояние. И, наконец, гемицеллюлозные компоненты древесины, находятся в высокоэластическом, а в случае древесины лиственницы - и в жидком состоянии (как комплекс «арабиногалактан – вода», или аквакомплекс арабиногалактана).

На первой стадии – диспергировании - при направленном изменении влажности опилок от 35–55 % до 1–2 % в кольцевой аэродинамической сушилке происходит не только застекловывание всех полимерных компонентов древесины, но и их перевод в хрупкое состояние за счет удаления воды. В результате их разрушение происходит по хрупкому механизму, при существенно меньших энергетических затратах. Последующее паровое увлажнение до средней влажности 3–4 % (и при наличии градиента влажности от периферии частицы к ее центру), приводит к тому, что система приобретает способность к экструдированию. При этом происходит расстекловывание полимеров, находящихся в поверхностных слоях материала, – восстановление капиллярно-пористой криптогетерогенной структуры материала. Кроме того, арабиногалактан в поверхностных слоях переходит в жидкое состояние как комплекс «арабиногалактан – вода» и частицы оказываются микрокапсулированными, а жидкий поверхностный слой служит своеобразной «жидкой смазкой» при экструзии, приводя к снижению расхода энергии. Особенно интересно изменение

в этих условиях релаксационного состояния лигнина. Под действием высокой температуры, пластифицирующего действия воды (и ее паров), а также сдвиговых напряжений в экструдере, лигнин переходит в вынужденное вязкотекучее состояние. Более того, за счет больших сдвиговых напряжений и высоких температур в формующей головке экструдера резко падает вязкость системы, которая переходит от максимальной ньютоновской к минимальной ньютоновской вязкости.

При выходе из экструдера, вследствие охлаждения и удаления пластификатора – воды, все полимерные компоненты застекловываются, на поверхности образуется четко видимая корка, образуя структуру остеклованного брикета, обладающего, в частности, и значительной водостойкостью.

3.1 Научные основы энергосберегающей технологии получения топливных древесных и древесно-угольных брикетов

Как уже указывалось выше, инновационная технология получения топливных древесных и древесно-угольных брикетов из опилок древесины (в том числе лиственницы) базируется на направленном изменении релаксационного состояния полимерных компонентов древесины (лигнина, целлюлозы и гемицеллюлоз) за счет совместного воздействия деформаций сжатия-сдвига, температуры и пластифицирующего воздействия воды – как в жидком, так и в парообразном виде [2, 16, 19, 20]. Она позволяет превратить древесные отходы в древесноугольный брикет без использования связующих веществ при минимальном расходе энергии и приемлемых капитальных затратах.

Технология производства древесноугольного брикета (Рисунок 5) включает ряд основных стадий, на которых осуществляется направленное изменение релаксационного состояния полимерных компонентов древесины: механическая подготовка древесины; подготовка сырья к прессованию — экструдированию; экструдирование брикета; охлаждение брикетов (их «остекловывание»); нанизывание брикетов на стержни многостержневых станин тележек; загрузка тележек в камеру карбонизации; карбонизация брикетов; выгрузка тележек;

охлаждение тележек с угольными брикетами в «гасильных» камерах; упаковка карбонизированных брикетов в потребительскую и/или транспортную тару.

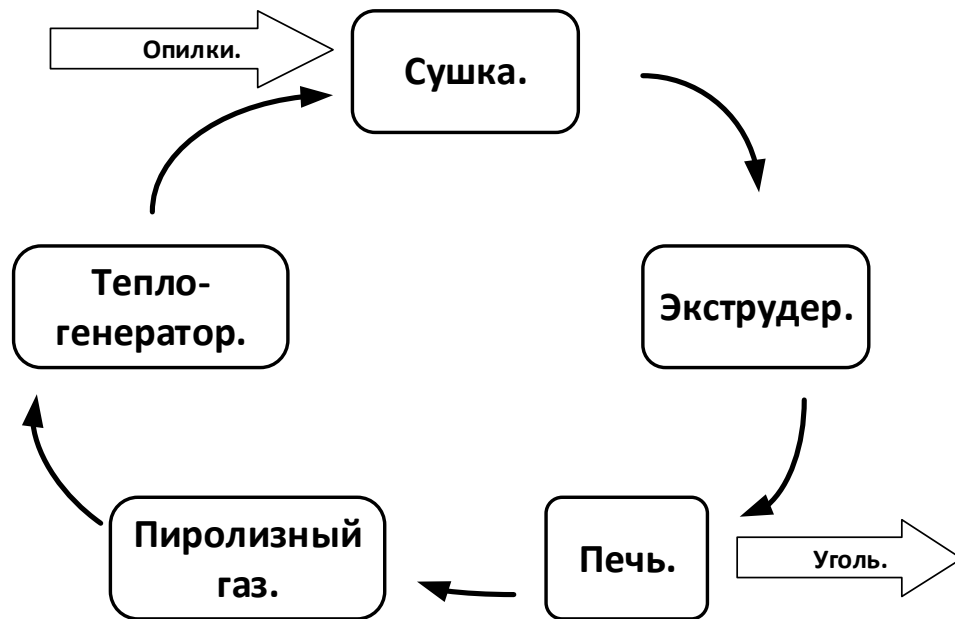


Рисунок 5 – Упрощенная схема производства древесно-угольных брикетов

Карбонизация древесных брикетов с получением древесно-угольных брикетов происходит в печи в регулируемой по составу и температуре паровоздушной среде. Печь карбонизации работает за счет тепла экзотермической реакции термораспада древесины — пиролиза. Образующиеся в процессе пиролиза газы сжигаются и полученная от их сжигания тепловая энергия используется для сушки опилок. В печи за счет мощной принудительной циркуляции пиролизных газов, включающих пары воды, образующиеся при сушке и пиролизе, осуществляется термостабилизированный пиролиз брикетов в условиях контролируемого состава парогазовой среды. Тем самым обеспечивается повышенный выход угля, низкое содержание смолы в пиролизных газах, высокая интенсивность работы.

Технология производства древесно-угольных брикетов, полученный карбонизацией древесного брикета, изготовленного на экструдерных прессах, включает ряд основных стадий:

- их сортирование (для опилок);

- измельчение древесины до микрощепы 2–4 мм - резка поперек волокон (для древесных отходов).

Подготовка сырья к прессованию включает сушку, измельчение и увлажнение (пластификацию) древесины.

На стадии подготовки сырья происходят следующие процессы:

- сушка опилок до влажности 0–2 %;
- истирание опилок при влажности 0–2 % в турбулентном потоке;
- паровая обработка измельченных опилок во взвешенном слое;
- термообработка опилок при высокой температуре в течение короткого времени;
- кондиционирование опилок до влажности 3–4 %.

Такая подготовка сырья позволяет придать древесной системе экструдирруемость, то есть возможность перевода системы в экструдере в вынужденное вязкотекучее состояние.

Описанная выше подготовка сырья обеспечивает стабильность работы экструдера, энергосбережение, длительность работы шнеков и фильер.

Экструзионное прессование древесного сырья – перевод древесины в вынужденно вязкотекучее (пластическое) состояние и формование древесного брикета с получением остеклованного водостойкого брикета (может находиться несколько дней в воде без разрушения).

Собственно производство брикета – экструзионное прессование – осуществляется на 2 экструдерах производительность каждого 1,5 т/час, энергозатраты на стадии экструзионного прессования 35–40 кВт*часов/т брикета, что в разы ниже пеллетных и гидравлических прессов. При экструдировании на специально модернизированном оборудовании устраняются такие затруднения шнекового прессования, как быстрый износ шнеков и фильер, нестабильная работа пресса. Плотность получаемого брикета 1,26–1,30 кг/дм³, влажность 1–2 %.

Следующим этапом технологического процесса является карбонизация брикета. Печь карбонизации, работающая в режиме регенератора на тепле экзотермического разложения древесины, обеспечивает термостабилизированный

пиролиз, который позволяет получить выход угольного брикета до 40 % от массы древесного брикета.

Брикеты после остывания стабилизируются и упаковываются. Полученные древесноугольные брикеты обладают высокой плотностью, так как получены из древесных брикетов плотностью 1,26 кг/дм³ и могут транспортироваться в 40-футовых контейнерах с загрузкой до 26 т. Благодаря структуре, полученной при низкотемпературном термостабилизированном пиролизе в регулируемой парогазовой среде они обладают высокой реакционной способностью и температурой горения и, по своим свойствам, практически отвечают требованиям к активированным углям.

3.2 Микроскопическое исследование опилок древесины лиственницы, древесных и древесно-угольных брикетов

В данной части работы было проведено микроскопическое исследование опилок древесины лиственницы с использованием различных красителей на микроскопе МБИ-6, а также на сканирующем электронном микроскопе модели IVS Supra 55VP-3249 фирмы Zeiss. Исследованию подверглись свежие и старые (из отвалов) опилки древесины лиственницы.

Для контрастирования и анализа применялись красители, обычно используемые в химии древесины [82] — метиленовый голубой, конго красный, малахитовый зеленый.

На рисунках 6–11 представлены фотографии свежих (А) и старых (Б) опилок, окрашенных разными красителями. Исследования показали, что свежие опилки окрашиваются лучше, чем старые. На свежих опилках древесины лиственницы, в отличие от старых, четко наблюдаются ее диагностические признаки. На старых опилках (Рисунки 6, Б и 7, Б) наблюдается «пушистость».

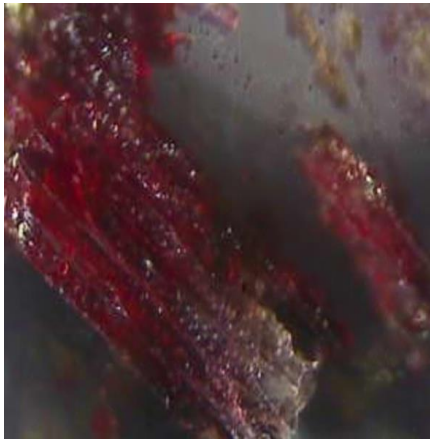


А

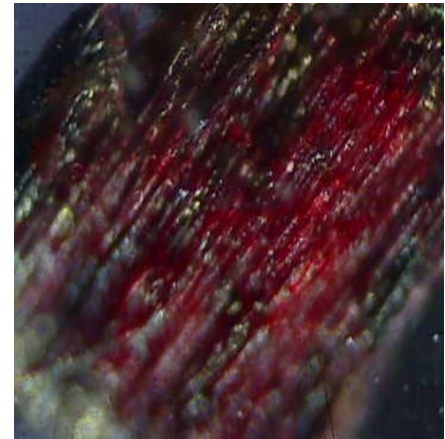


Б

Рисунок 6 – Свежие (А) и старые (Б) опилки лиственницы, окрашенные голубым красителем (x90)



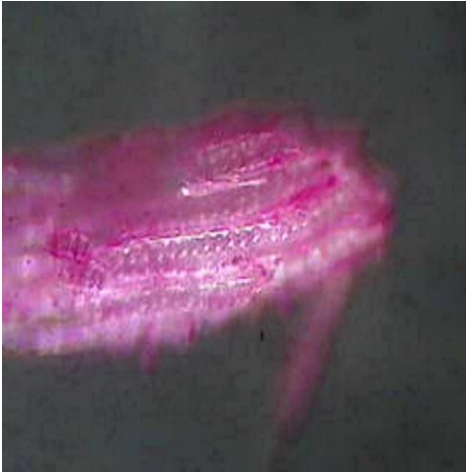
А



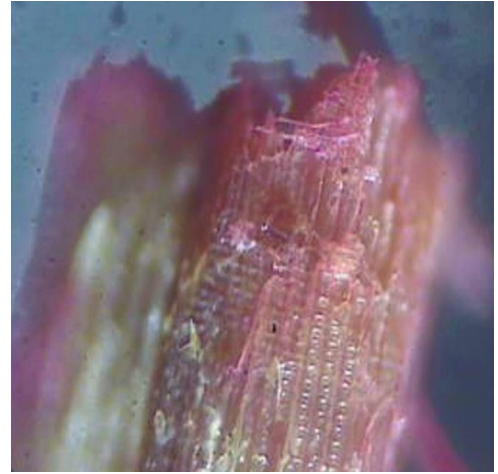
Б

Рисунок 7 – Свежие (А) и старые (Б) опилки лиственницы, окрашенные конго красным (x90)

На старых опилках видны полые фрагменты структуры и неокрашенные части древесины (Рисунок 8, Б). Данную картину можно связать с разрушением и выделением определенных компонентов древесины лиственницы при длительном воздействии окружающей среды на залежи опилок (снег, дождь, перепад температур и т. д.).

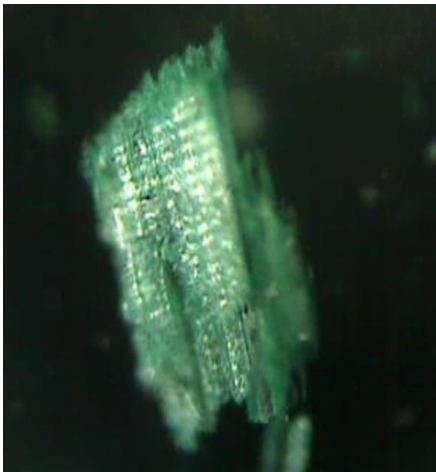


А

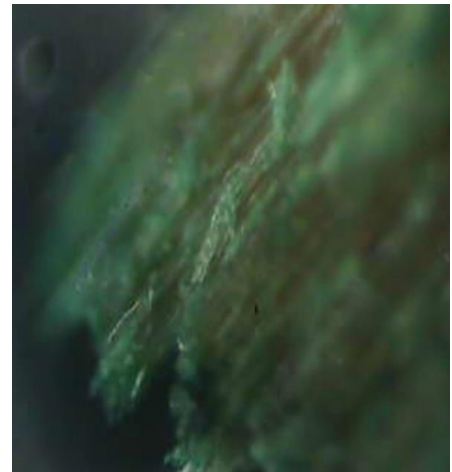


Б

Рисунок 8 – Свежие (А) и старые (Б) опилки лиственницы, окрашенные красным красителем (x90)

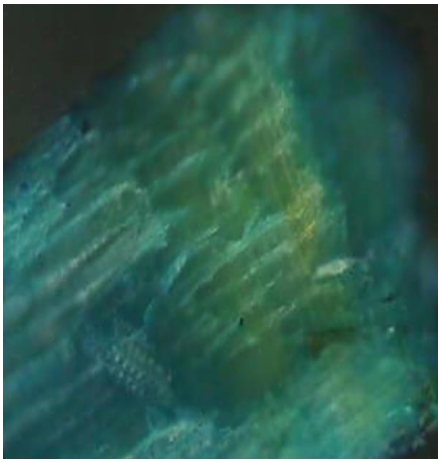


А

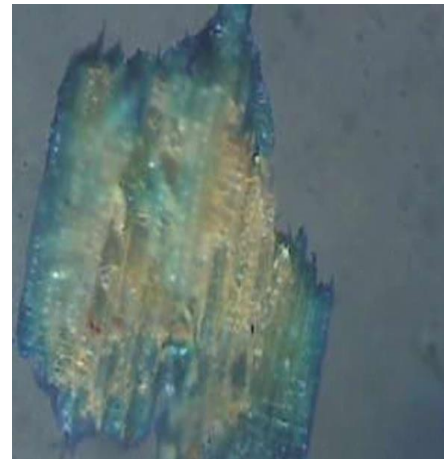


Б

Рисунок 9 – Свежие (А) и старые (Б) опилки лиственницы, окрашенные малахитовым зеленым (x90)

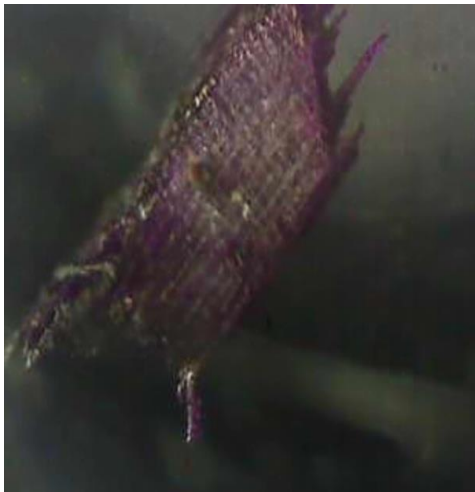


А

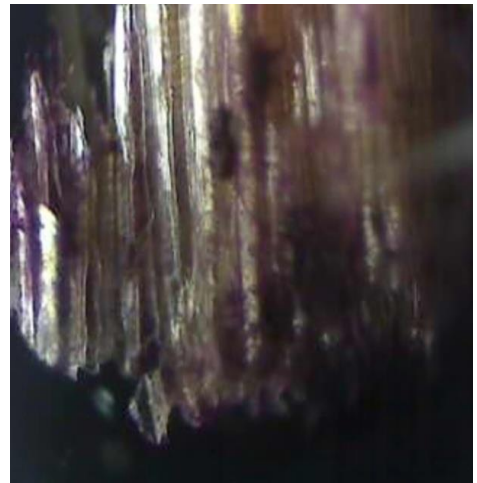


Б

Рисунок 10 – Свежие (А) и старые (Б) опилки лиственницы, окрашенные метиленовым голубым (x90)



А



Б

Рисунок 11 – Свежие (А) и старые (Б) опилки лиственницы, окрашенные фуксином (x90)

Однако, как на свежих, так и на старых опилках четко наблюдаются их неровные края, которые, по-видимому, и могут быть дефектными местами при разрушении опилок для их превращения в диспергированный материал, способный к экструдированности. Такой процесс иногда называют флюидизацией. Флюидизация - превращение твердого вещества в порошок для обработки его, как

жидкого. Однако, флюидизация требует разрушения древесины. Для анализа возможных механизмов разрушения были проведены исследования упруго-релаксационных свойств древесины лиственницы.

3.3 Исследование упруго-релаксационных свойств древесины лиственницы и их роли при получении древесных и древесно-угольных брикетов

Как известно, для полимерных объектов их разрушение может идти по различным механизмам. В качестве рабочей гипотезы было принято, что для измельчения древесных опилок до порошкообразного состояния при минимальном расходе энергии целесообразно обеспечить перевод полимерных компонентов древесины ниже температуры хрупкости, т. е. осуществить сушку древесины до минимально возможной остаточной влажности.

Цель данного раздела диссертации — исследовать упруго-релаксационные свойства древесины лиственницы с использованием метода одноосного сжатия как модели процессов, происходящих при получении древесных и древесно-угольных брикетов. Как указывалось выше, в качестве объекта исследования использовали модельные кубики из древесины лиственницы. При этом процессы сжатия были смоделированы путем длительного нагружения модельных кубиков размером $20 \times 20 \times 20$ мм в режиме одноосного сжатия с последующим эластическим восстановлением их формы при нагрузках $P = 1500; 2500; 3500; 4500$ Н и продолжительности действия нагрузок $t = 1; 10; 100; 1000$ мин на универсальной испытательной установке «Instron 1121» при постоянной скорости деформирования $V = 100$ мм/мин [81]. Остаточную деформацию измеряли после снятия нагрузки и эластического восстановления формы образца. Продолжительность эластического восстановления, подобранная в ходе эксперимента, изменялась от 10 до 1000 мин.

Механизм процессов, происходящих при получении из древесных опилок топливных древесных и угольных брикетов, с позиции структурной физикохимии древесины рассмотрен ниже и в статьях [16–18]. Нами было показано, что

формирование структуры древесных брикетов, плотностью до 1300 кг/м^3 , на различных стадиях технологического процесса сопровождается направленным изменением релаксационных состояний полимерных компонентов древесины и рядом релаксационных процессов. В данной части работы рассмотрено поведение составляющих древесины на первых стадиях технологического процесса получения брикета.

На рисунке 12 представлена типичная кривая сжатия–разгрузки в радиальном направлении образца древесины лиственницы.



Рисунок 12 – Диаграмма сжатия – разгрузки образца древесины лиственницы (при $P=4500 \text{ Н}$)

Как видно из рисунка 12 кривая сжатия имеет 3 характерные области: I – упругая; II – эластическая; III – вынужденно-эластическая. Области I соответствует деформация до 4 %. При дальнейшем сжатии образца происходит переход материала из упругого в высокоэластическое состояние, о чем свидетельствует первый пик на кривой, отображающий релевантную (значимую) нагрузку, необходимую для его деформирования. Экспериментально установлено, что этот пик связан с началом выделения жидкого экстракта из древесины лиственницы. При дальнейшем сжатии образца с увеличением деформации

происходит незначительное изменение нагрузки (область II). Это характерно для образцов древесины лиственницы (заболони с высокой влажностью ($W=40\%$) при сжатии в радиальном направлении и связано, вероятно, со сложением слоев и выделением жидкого компонента – комплекса «арабиногалактан – вода» [17, 61]. В области III наблюдается значительный подъем напряжения с увеличением деформации, что характерно при значительном накоплении необратимых деформаций. Полученные нами результаты подтверждают данные более ранних работ [59] для древесины различных пород, однако указывают на специфические особенности древесины лиственницы.

Физико-механические характеристики исследуемых образцов древесины лиственницы:

| | |
|--|------------------------|
| Плотность при исходной влажности..... | 0,88 г/см ³ |
| Деформация при $P = 4500$ Н..... | 56,7 % |
| Максимальная нагрузка..... | 4500 Н |
| Модуль упругости..... | 60–70 МПа |
| Работа при сжатии до $P = 4500$ Н..... | 40 Дж·м/м ³ |
| Влажность..... | 36–42 % |

На рисунке 13 представлены кривые релаксации напряжений во времени образцов древесины лиственницы при различной нагрузке.

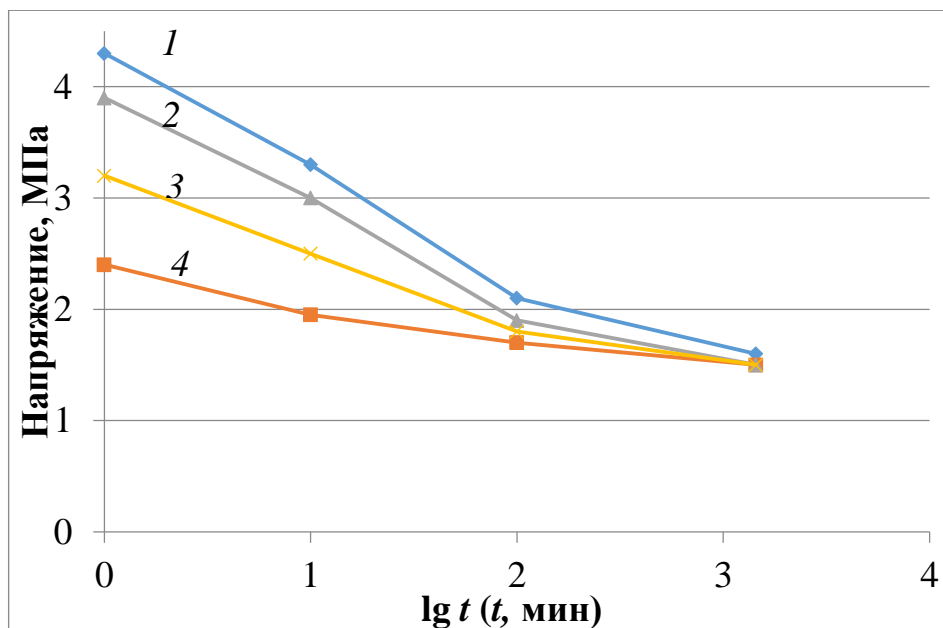


Рисунок 13 – Релаксация напряжения во времени образцов древесины лиственницы при различных значениях нагрузки P , Н:
 1 – 4500; 2 – 3500; 3 – 2500; 4 – 1500

На рисунке 14 показано накопление остаточной деформации во времени у образцов древесины лиственницы при различных нагрузках.

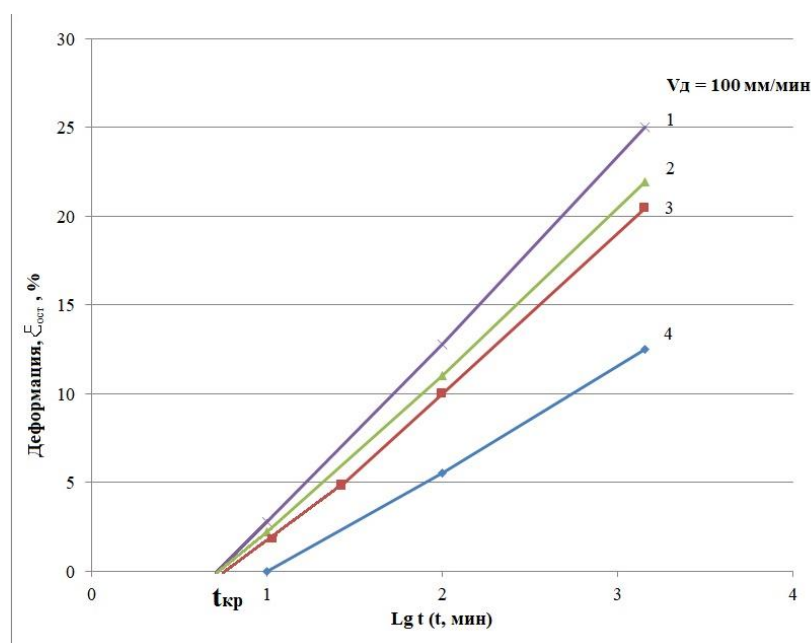


Рисунок 14 – Накопление остаточной деформации во времени у образцов древесины лиственницы при различных нагрузках P , Н (скорость деформирования образца $V_d = 100$ мм/мин):
 1 – 4500; 2 – 3500; 3 – 2500; 4 – 1500

Из рисунков 13 и 14 видно, что с увеличением задаваемой деформации возрастают напряжение, скорость релаксационного процесса и значения остаточной компоненты деформации. Это связано с тем, что под действием нагрузки и времени ее действия наблюдается ряд процессов, влияющих на изменение структуры: послоевое сжатие волокон древесины лиственницы с выделением жидкой фракции; накопление вынужденно-эластической (остаточной) компоненты деформации.

В результате экстраполяции на ось времени (см. рис. 14) получим точку $t_{кр}$ – критическое время, при котором в образце древесины лиственницы начинают накапливаться необратимые компоненты деформации.

Измерения показали, что после действия на образец древесины лиственницы задаваемой деформации в течение времени до $t_{кр}$ происходит полное восстановление формы образца. В процессе длительных нагрузок при $t > t_{кр}$ развиваются вынужденно-эластические деформации, которые при температуре $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ на воздухе не восстанавливаются. Экспериментально установлено, что в исследуемом диапазоне нагрузок и времени их действия, в образце развиваются деформации, которые практически полностью восстанавливаются при погружении его в воду на 1 сут.

В таблице 8 приведены составляющие компоненты деформации при $P=4500\text{ Н}$.

Таблица 8 – Зависимость составляющих компонент заданной деформации у образцов древесины лиственницы от продолжительности действия нагрузки

| Время t, мин | Деформация, % | | | |
|--------------|---------------|---------|--------------|------------|
| | заданная | упругая | эластическая | остаточная |
| 10 | 56,7 | 3,6 | 50,1 | 3,0 |
| 100 | 56,7 | 3,6 | 40,1 | 13,0 |
| 1000 | 56,7 | 3,6 | 28,1 | 25,0 |

Из данных таблицы видно, что с увеличением продолжительности действия нагрузки величина эластической компоненты деформации уменьшается за счет внутренних изменений структуры и накопления остаточной компоненты

деформации. В то же время из этих данных следует, что основными видами деформации при малом времени нагружения являются упругая и эластическая. В этих условиях работа разрушения будет достаточно большой.

Следует отметить, что у древесины существуют свои особенности разрушения. Как отмечалось в работах [83, 84], устойчивость в широком температурном диапазоне к ветровым нагрузкам индивидуального дерева и леса, как интегрированного биоценоза, связана не только с релаксационными свойствами компонентов древесины, но и со структурой всего дерева как природного композита. Как известно, эксплуатационные свойства полимерных материалов, их поведение в процессах механической, физико-химической и химической переработки неразрывно связаны с температурными границами их релаксационных (физических) состояний и надмолекулярной структурой на всех уровнях ее организации [83–85].

Разрушение древесины под действием ветровой нагрузки можно рассматривать как разрушение композиционного материала при циклическом нагружении, которое может быть охарактеризовано его усталостной прочностью. Не только ствол, но и ветви деревьев испытывают многократную циклическую нагрузку и обладают очень высокой усталостной прочностью. В этом принципиальное отличие ветвей деревьев от, например, алюминиевой проволоки, которая при многократном изгибе быстро ломается. Это обусловлено тем, что во всех твердых телах при большой пластической деформации накапливаются дефекты. В кристаллах это дислокация, в стеклообразных телах — появление пор и т. д., что в конце концов приводит к развитию трещин и разрушению [83, 84].

Проведенные Э. Л. Акимом, С. З. Роговиной и А. А. Берлиным [84] исследования позволили заключить, что капиллярно-пористая структура древесины обеспечивает в живом дереве не только проводящие функции по транспортировке участвующих в биосинтезе жидкостей, но и обеспечивает, благодаря жидкостному заполнению, усталостную прочность древесины, причем заполняющая эту структуру система «арабиногалактан – вода» может рассматриваться как природный *глубокий эвтектический растворитель*.

При измельчении древесных опилок высокая усталостная прочность приведет к излишним расходам энергии; отсюда вытекает необходимость изменения механизма разрушения.

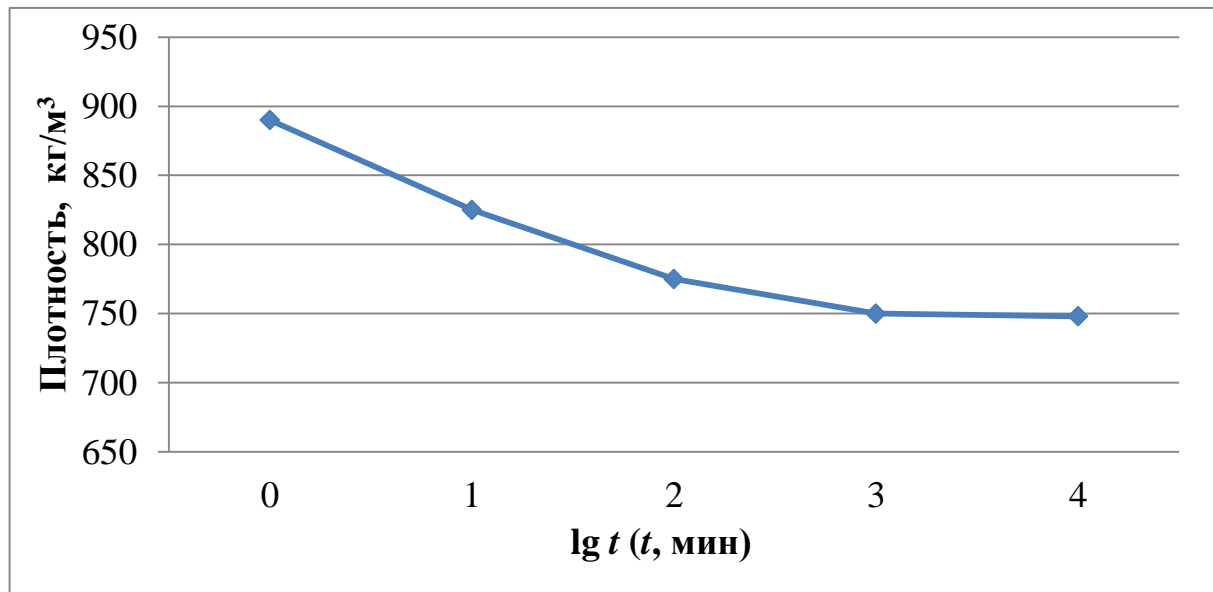


Рисунок 15 – Изменение плотности образца древесины лиственницы после снятия нагрузки $P=4500\text{Н}$

На рисунке 15 представлена кривая изменения плотности во времени после снятия нагрузки $P=4500\text{ Н}$. Такое изменение плотности характерно для материалов с высокими упругими и эластическими свойствами.

Таким образом, для древесины лиственницы в условиях одностороннего сжатия установлена взаимосвязь между нагрузкой, продолжительностью ее действия и величиной остаточной деформации; определены условия, при которых происходит полное восстановление формы образца. Установлено, что снятие вынужденно-эластических деформаций возможно после воздействия воды.

Исследования показали, что образцы древесины лиственницы в радиальном направлении обладают высокими упругими и эластическими свойствами. Эти данные относятся к древесине при исходной влажности 36–42 %; исходная влажность опилок еще выше. Из полученных данных следует, что древесные опилки при той влажности, которая для них характерна (50–60 %), не будут

разрушаться по хрупкому механизму.

Представленные на рисунке 16 данные показывают, что при циклическом нагружении происходят релаксационные процессы и поэтому энергозатраты на разрушение опилок будут чрезвычайно велики.

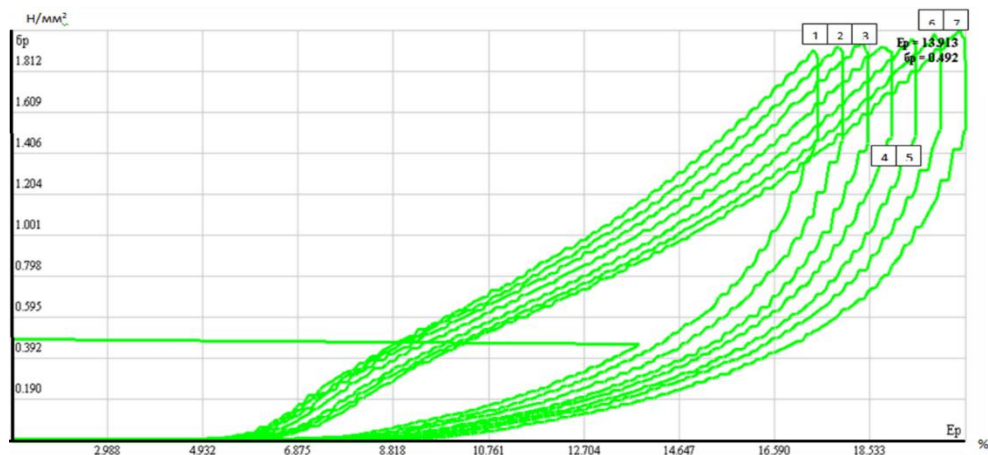


Рисунок 16 – Диаграмма сжатия-разгрузки модельных кубиков древесины

лиственницы: 1 — 0,1 мм; 2 — 0,2 мм; 3 — 0,3 мм; 4 — 0,4 мм;

5 — 0,5 мм; 6 — 0,6 мм; 7 — 0,7 мм

3.4 Анализ процессов, происходящих при диспергировании

Для сокращения расхода энергии целесообразно рассмотреть возможности изменения механизма разрушения. Обратимся для этого к анализу путей изменения механизма разрушения, реализуемые в других отраслях промышленности. Так, например, в порошковой металлургии [86] для сокращения расхода энергии при переработке металлической стружки в порошки возможно использование процесса охрупчивания. Под охрупчиванием (embrittlement) понимается переход материала от вязкого состояния к хрупкому под влиянием внутренних изменений фазового состава, перераспределения дефектов кристаллического строения, примесных атомов и др., в т. ч. хладноломкости. (Можно здесь вспомнить и классический пример хрупкого разрушения резинового мячика после его погружения в жидкий азот).

Применительно к древесным опилкам принцип охрупчивания может быть,

по-видимому, реализован путем максимально полного удаления пластификатора – воды [87, 88]. Именно этот путь и реализуется в данной диссертации и в инновационной технологии получения древесных брикетов.

При выполнении проекта «Лиственница», при электронно-микроскопических исследованиях было показано, что вся капиллярно-пористая структура лиственницы заполнена комплексом «арабиногалактан – вода», который при высыхании дает хрупкую пленку [5]. Соответственно, для измельчения древесных опилок до порошкообразного состояния, целесообразно осуществить сушку древесины до минимально возможной остаточной влажности, т. е. обеспечить перевод полимерных компонентов древесины не просто в стеклообразное состояние, а ниже температуры хрупкости. Именно такая операция предлагается в патентах [10–12, 16], что позволяет осуществить процесс хрупкого измельчения при минимальном расходе энергии. Использование запатентованного оборудования, сочетающего в коллайдере принципы струйных мельниц [89, 90] и направленного изменения релаксационного состояния полимерных компонентов древесины, обеспечивает минимизацию расхода энергии при измельчении по хрупкому механизму. Однако специфика инновационной аэродинамической технологии заключается в том, что частицы древесины, измельченной в стеклообразном состоянии при остаточной влажности около 1 % до дисперсности древесной муки, затем увлажняются паром до влажности 3–4 %. Эта операция необходима для придания материалу экструдированности.

На рисунках 17 и 18 приведены диаграммы релаксационных состояний бинарной системы полимер — растворитель в области ограниченного смешения для разных случаев температур переходов полимера.

Рассмотрим изменение релаксационного состояния полимерных компонентов древесины на этих стадиях процесса. На рисунке 17 приведена диаграмма релаксационных состояний бинарной системы полимер — растворитель в области ограниченного смешения для случаев температур

переходов полимера: а — лежащих в интервале между температурами кипения и замерзания растворителя; б — вне этого интервала [60, 61].

Как известно, пластифицирующим влиянием обладают не только жидкие, но и газообразные среды. Это связано со способностью полимеров абсорбировать низкомолекулярные вещества из газовой фазы. Для древесины и целлюлозных материалов, которые реально всегда эксплуатируются в воздушной среде, имеющей тот или иной уровень относительной влажности воздуха, это пластифицирующее действие паров воды фактически определяет их свойства. Фрагмент фазовой диаграммы для системы «полимер — пары растворителя» схематически изображен на рисунке 18 (изобарический режим) для аморфного или аморфно-кристаллического полимера, в котором газ абсорбируется только аморфной фазой.

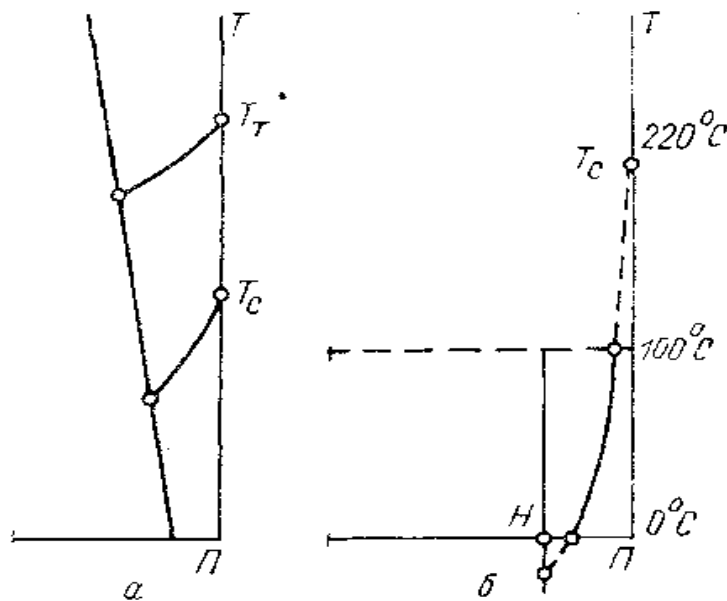


Рисунок 17 – Диаграмма релаксационных состояний бинарной системы полимер — растворитель в области ограниченного смешения для случаев температур переходов полимера: а — лежащих в интервале между температурами кипения и замерзания растворителя; б — вне этого интервала

Анализ фазовой диаграммы для системы «полимер — пары растворителя» описан в монографиях [60, 61]. Так как фактическое содержание

пластифицирующего вещества в полимере в данном случае определяется и парциальным давлением газа и температурой, то с изменением давления смещаются границы физических состояний. В связи с тем, что с увеличением температуры растворимость легко конденсируемых газов в полимере уменьшается, типичная фазовая диаграмма системы полимер — газ должна относиться к типу диаграмм с нижней критической температурой смешения. Фрагмент семейства таких фазовых диаграмм (изобарический режим) для аморфного или аморфно-кристаллического полимера, в котором газ абсорбируется только аморфной фазой, схематически изображен на рисунке 18.

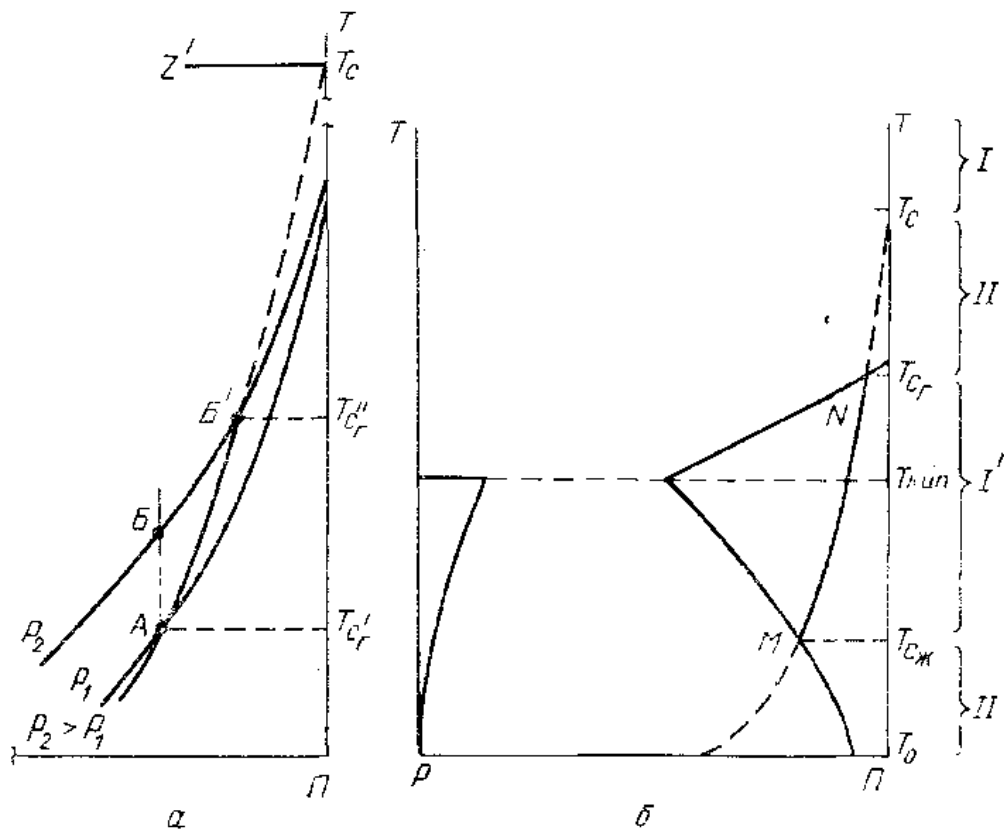


Рисунок 18 — Диаграмма релаксационных состояний бинарной системы: а — полимер — пластифицирующая газообразная среда; б — полимер — пластифицирующая среда; I — область высокоэластического состояния не пластифицированного полимера; II — область стеклообразного состояния не пластифицированного полимера; I' — область высокоэластического состояния пластифицированного полимера; II' — область стеклообразного состояния пластифицированного полимера; T_c — температура стеклования не пластифицированного полимера; T_{cg} — температура стеклования полимера, пластифицированного газообразной средой; $T_{cж}$ — температура стеклования полимера, пластифицированного жидкой средой

В этих процессах значительную роль играет и градиент влажности по толщине частиц древесины. При сушке до остаточной влажности 1 % и менее на поверхности частиц опилок находятся практически абсолютно сухие слои древесного вещества, которые и отделяются от «тела» частиц опилок при их соударениях в аэродинамическом потоке. В процессе последующего увлажнения водяным паром до 3–4 % имеется противоположная картина – на поверхности частиц находятся максимально увлажненные слои, например, в виде гемицеллюлозного геля [2, 16, 19, 20], которые и придают системе экструдированность. В случае опилок древесины лиственницы эти поверхностные слои вообще могут представлять собой аквакомплекс «арабиногалактан – вода», находящийся в вязко-текучем состоянии в широчайшем температурном диапазоне.

Исследования позволяют экстраполировать изученные упруго-релаксационные свойства на модели исходной древесины в условиях одноосного сжатия на процессы, реально протекающие при измельчении опилок и в экструдере. Рассмотрим изменение релаксационного состояния полимерных компонентов древесины на стадии экструзии.

3.5 Анализ процессов, происходящих при экструзии

Для анализа целесообразно обратиться к вопросам реологических свойств полимерных систем. В связи с нетривиальностью реологических свойств рассматриваемой системы, ее многокомпонентностью, в сочетании с несколькими воздействующими факторами – сдвиговыми напряжениями, температурой и пластифицирующей тепловой обработкой – обратимся к основам реологии полимерных систем и попробуем распространить их на экструзию древесной муки, пластифицированной водяным паром до средней влажности 3–4 %. Используем при этом соответствующие разделы монографии по физико-химии полимеров А. А. Тагер [85] и книг Э. Л. Акима [87, 88].

Как известно [87], закономерности возникновения и развития необратимых деформаций вязкого течения в полимерных системах изучаются в специальной

области механики — реологии. Течение полимеров — это развитие в полимерной системе деформации сдвига, возникающего под действием приложенного напряжения сдвига. Течение - это необратимое перемещение молекул вещества относительно друг друга под действием приложенного извне усилия, (или, в нашем случае – древесных частиц относительно друг друга). В результате в веществе возникает сила внутреннего трения, противодействующая перемещению молекул. При течении жидкостей сила внутреннего трения обуславливается необходимостью преодоления сил межмолекулярного взаимодействия [85, 87].

На рисунке 19 приведена схема возникновения в жидкости деформации сдвига

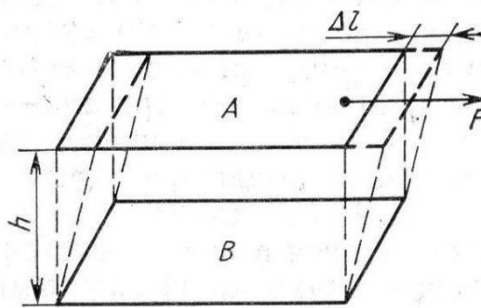


Рисунок 19 – Схема деформации сдвига жидкости между плоскопараллельными пластинами

Между двумя параллельными плоскостями А и В находится капля вязкой жидкости; примером может являться капля глицерина между двумя стеклянными пластинками. К верхней пластинке приложена сила F , смещающая плоскость А относительно плоскости В (без изменения расстояния между ними) на величину Δl . Происходящий процесс может быть охарактеризован величинами напряжения сдвига и скорости сдвига (градиента скорости сдвига). Так, при площади верхней пластинки $A \text{ м}^2$ на каждый квадратный метр пластинки действует напряжение сдвига $\tau \text{ Н/м}^2$ (иногда его обозначают σ), выражаемое в ньютонах на квадратный метр или паскалях ($1 \text{ Н/м}^2 = 1 \text{ Па} = 10 \text{ дин/см}^2$). Под действием напряжения сдвига τ за 1 с происходит смещение пластинки А на величину Δl . Величина этого смещения может быть охарактеризована тангенсом угла поворота прямой, соединявшей до начала деформирования противоположные точки, или, что то же

самое, отношением величины сдвига Δl к расстоянию между плоскостями h . Относительная деформация сдвига γ составит $\gamma = \Delta l/h$, а скорость деформации, которую обозначают $\dot{\gamma}$ (или иногда v), равняется $\dot{\gamma} = d\gamma/dt$ (или $v = d\gamma/dt$). Таким образом, скорость деформации, имеющая размерность s^{-1} , характеризует угловую скорость сдвига или градиент линейной скорости сдвига. С изменением величины напряжения сдвига меняется скорость сдвига; характер взаимосвязи этих двух величин может быть различен. Определение взаимосвязи между напряжением сдвига и скоростью сдвига в широком диапазоне величин напряжения (или скорости) сдвига и является обычно основной задачей реологических исследований. В результате этих исследований получают кривые течения (Рисунок 20). На практике часто ограничиваются определением взаимосвязи между напряжением и скоростью сдвига при фиксированном значении одного из этих параметров, т. е. определяют координаты лишь одной из точек кривых течения. В простейшем случае связь между скоростью сдвига и напряжением сдвига выражается законом Ньютона

$$\tau = \eta_0 \dot{\gamma},$$

где η_0 — коэффициент пропорциональности, называемый вязкостью, имеющий размерность Па·с (также пуаз, сантипуаз; 1 Па·с = 10 пз = 1000 спз); τ — напряжение сдвига, Па; $\dot{\gamma}$ — скорость сдвига (градиент скорости сдвига), s^{-1} .

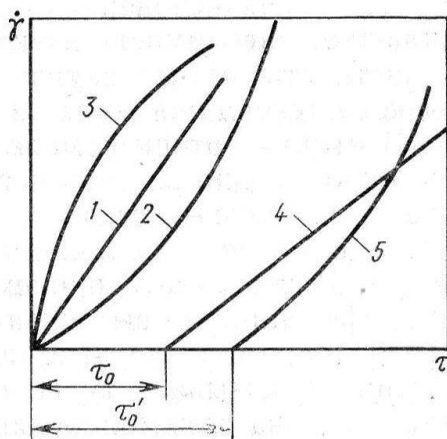


Рисунок 20 — Зависимость градиента скорости сдвига от напряжения сдвига для систем с кривыми течения различного типа: 1 — для идеальной ньютоновской жидкости; 2 — для псевдопластичной жидкости; 3 — для дилатантной системы; 4 — для идеально пластичного тела; 5 — для неидеально пластичного тела

Системы, в которых вязкость (при постоянной температуре и давлении) не зависит от напряжения сдвига или скорости сдвига, т. е. подчиняющиеся закону Ньютона, называются ньютоновскими (см. рис. 20, кривая 1). Однако для большинства полимерных систем (расплавов, растворов, дисперсий), также как и для нашей системы, закон Ньютона оказывается неприменим. Для этих систем, называемых неньютоновскими, вязкость зависит от напряжения или скорости сдвига, и такую вязкость называют эффективной.

Как правило, с увеличением напряжения сдвига скорость сдвига возрастает в большей степени, чем это следует из закона Ньютона. Системы, течение которых описывается кривой такого типа, называются *псевдопластичными* жидкостями (см. рис. 20, кривая 2). Анализ кривой течения такого типа показывает, что в *псевдопластичных* жидкостях с увеличением скорости сдвига вязкость уменьшается. Это явление называется *аномалией вязкости*. Для каждого значения скорости сдвига характерно свое отношение напряжения и скорости сдвига $\eta = \tau/\dot{\gamma}$, свое значение *эффективной вязкости*.

Явление аномалии вязкости полимерных систем обуславливается рядом структурных изменений, происходящих при деформировании: частичным или полным механическим разрушением структурной пространственной сетки, ориентацией и деформацией макромолекул и их ассоциатов, которые приводят к появлению анизотропии механических свойств расплава или раствора и т. д.

Аномалия вязкости может иметь и противоположный характер. В некоторых полимерных системах, особенно содержащих большое количество твердых наполнителей, в определенном диапазоне повышения скорости сдвига наблюдается возрастание эффективной вязкости. Это явление называется *дилатансией* (см. рис. 20, кривая 3).

Следующий тип полимерных систем — это системы, обладающие пластичностью. В отличие от вязкого течения, при котором необратимые деформации развиваются при любом напряжении, пластичность заключается в способности системы к развитию необратимых деформаций лишь под действием нагрузки, превышающей определенный предел — предел текучести. Простейшей

моделью пластично-вязкой среды является так называемое тело Бингама — идеально пластичное тело (см. рис. 20, кривая 4), для которого соотношение между напряжением сдвига τ и скоростью сдвига $\dot{\gamma}$ имеет вид

$$\tau = \tau_0 + \eta_0 \dot{\gamma},$$

где τ_0 — предел текучести, η_0 — постоянная, называемая иногда пластической или бингамовской вязкостью.

Среди реальных полимерных систем к телу Бингама по своим механическим свойствам наиболее близки некоторые наполненные полимеры и студни; т.к. наша система может рассматриваться как наполненная, она также может относиться к телам Бингама.

В случае неидеально пластичного тела (см. рис. 20, кривая 5) при увеличении напряжения сдвига выше предела текучести отсутствует прямолинейная зависимость скорости сдвига $\dot{\gamma}$ от разности между напряжением сдвига и пределом текучести ($\tau - \tau_0$). Таким образом, характер кривых течения различных полимерных систем далеко не одинаков. Изменение скорости сдвига (или напряжения сдвига) может приводить к уменьшению вязкости (псевдопластичная жидкость), к увеличению вязкости (дилатансия) или может не сказываться на вязкости (идеальная ньютоновская жидкость). Можно предполагать, что в нашем случае мы имеем дело с псевдопластичными системами.

Для псевдопластичных систем эффективная вязкость с увеличением скорости сдвига или напряжения сдвига вначале почти не меняется (Рисунок 21, область I). Эта вязкость η_0 называется наибольшей ньютоновской вязкостью (или начальной). При дальнейшем повышении скорости сдвига (или напряжения сдвига) происходит значительное уменьшение эффективной вязкости (см. рис. 21, область II); после достижения некоторого значения скорости сдвига дальнейшее ее увеличение (см. рис. 21, область III) уже не изменяет эффективную вязкость — достигается наименьшая ньютоновская вязкость — η_∞ (или $\eta_{\text{мин}}$). Таким образом, в областях I и III наблюдается ньютоновское течение, т. е. вязкость в пределах области постоянна. В области структурной вязкости II эффективная вязкость η

зависит от напряжения сдвига. Изменение вязкости системы от η_0 до η_∞ связано с разрушением структуры раствора, расплава полимера или, в нашем случае, вынужденно-пластической системы. Соответственно, чем выше структурированность системы, тем значительнее различия между наибольшей и наименьшей ньютоновской вязкостью. Приведенные на рис. 21 кривые построены в логарифмических координатах. Разность логарифмов наибольшей и наименьшей ньютоновской вязкости и может быть использована в качестве условной меры степени структурированности системы [85, 87]. Эта разность может достигать 3 и более (для десятичных логарифмов), т. е. вязкость системы после разрушения структуры уменьшается более, чем в тысячу раз. Процесс разрушения структуры при течении обратим. При прекращении течения или уменьшении скорости эффективная вязкость вновь повышается, достигая значения η_0 . Явление падения вязкости при течении и последующего восстановления вязкости после прекращения течения называется *тиксотропией*.

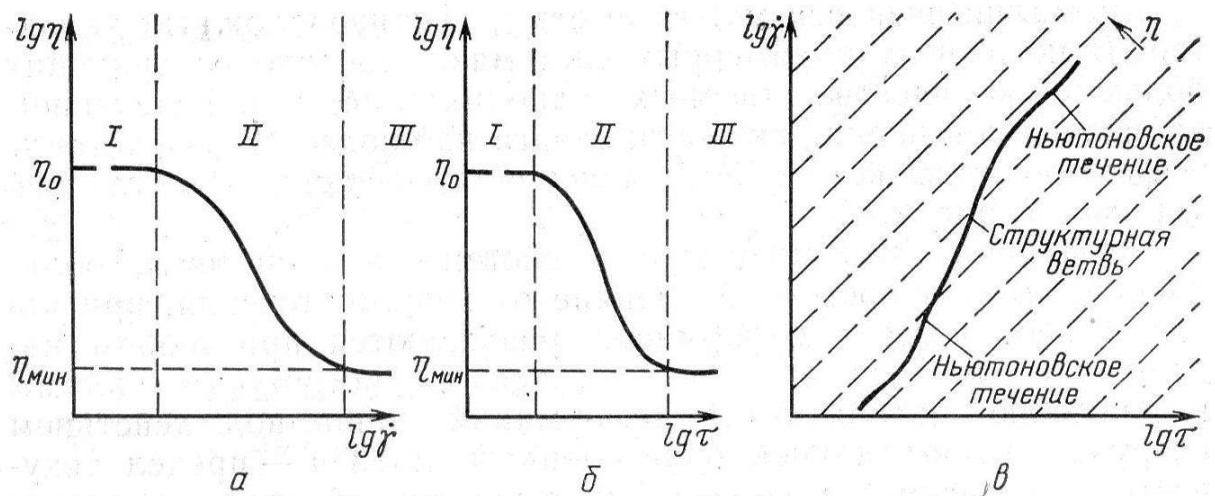


Рисунок 21 – Различные способы графического изображения вязкостных свойств неньютоновских жидкостей:

$$a — \lg \eta = f_1(\lg \dot{\gamma}); \quad б — \lg \eta = f_2(\lg \tau); \quad в — \lg \dot{\gamma} = f_3(\lg \tau)$$

Целесообразно отметить, что направленный перевод системы к минимальной ньютоновской вязкости лежит в основе не только большинства современных методов получения химических волокон [91–99] и полимерных пленок [100], но и современных технологий в ЦБП, например, при отбелке

целлюлозы при так называемых «средних концентрациях» массы [101, 102].

Вернемся к рассмотрению поведения древесной системы при подготовке к экструдированию и собственно при экструзии. Как описывалось выше, в процессе увлажнения водяным паром до 3...4 % наблюдается картина, противоположная сушке – на поверхности частиц находятся максимально увлажненные слои, например, в виде гемицеллюлозного геля [2, 16, 19, 20], которые и придают системе экструдруемость. В случае измельченных опилок древесины лиственницы эти поверхностные слои вообще могут представлять собой аквакомплекс «арабиногалактан – вода», находящийся в вязко-текучем состоянии в широчайшем температурном диапазоне.

При направленном изменении влажности опилок — на первой стадии с 50 % влажности до 1–2 % — в кольцевой аэродинамической сушилке происходит не только застекловывание всех полимерных компонентов древесины, но и их перевод, за счет удаления воды, в хрупкое состояние; в результате их разрушение происходит по хрупкому механизму, при существенно меньших энергетических затратах. Последующее паровое увлажнение до средней влажности 3–4 % (и при наличии градиента влажности от периферии частицы к ее центру), приводит к тому, что система приобретает способность к экструдированию. При этом происходит расстекловывание полимеров, находящихся в поверхностных слоях материала; происходит восстановление капиллярно-пористой криптогетерогенной структуры материала. Кроме того, арабиногалактан в поверхностных слоях переходит в жидкое состояние как комплекс «арабиногалактан-вода» и частицы оказываются микрокапсулированными, а жидкий поверхностный слой служит своеобразной «жидкой смазкой» при экструзии, приводя к снижению расхода энергии. Особенно интересно изменение в этих условиях релаксационного состояния лигнина. Следует отметить, что в измельченной древесине находится уже не исходный лигнин, а продукты его механодеструкции, имеющие, по данным работ Горинга [73] значительно меньшую молекулярную массу. Под действием высокой температуры, пластифицирующего действия воды (и ее паров), а также сдвиговых напряжений в экструдере лигнин переходит в

вынужденное вязкотекучее состояние. Более того, за счет больших сдвиговых напряжений и высоких температур в формующей головке экструдера резко падает вязкость системы, которая переходит от максимальной ньютоновской вязкости к минимальной ньютоновской вязкости.

При выходе из экструдера вследствие охлаждения и удаления пластификатора – воды все полимерные компоненты застекловываются, на поверхности образуется четко видимая корка, образуя структуру остеклованного брикета, обладающего, в частности, и значительной водостойкостью. Плотность полученного брикета $1,26\text{--}1,30\text{ кг/дм}^3$, влажность 1–2 %.



Рисунок 22 – Шнеки и фильеры, используемые при получении древесных брикетов

При классической экструзии [100] схема процесса экструзии может быть разделена на три зоны: I — зона сыпучего состояния; II — зона пластического состояния; III — зона вязко-текучего состояния.

Принципиально в экструдере для получения древесных брикетов происходят те же процессы, что и при экструзии синтетических полимеров.

Обычно гранулы полимеров имеют сферическую, кубическую или цилиндрическую форму размером от 2,5 до 5,4 мм. Можно предположить, что в

начале первой зоны, непосредственно под загрузочным бункером, шнек работает только как транспортер (Рисунок 23). Однако при продвижении в цилиндр экструдера механизм перемещения системы меняется. Частицы уплотняются

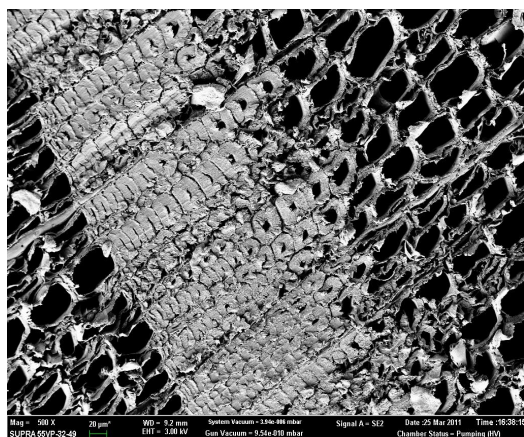
Экструдер



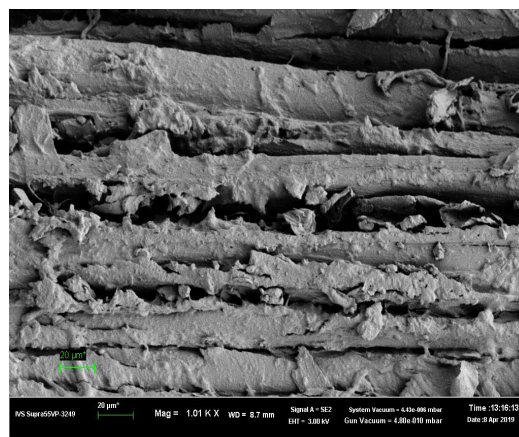
Рисунок 23 – Экструдер для получения древесных брикетов

и в дальнейшем перемещаются как монолитная масса (пробка). Такая пробка должна перемещаться в винтовом канале экструдера в направлении, перпендикулярном нарезке [100], но в то же время шнек захватывает полимер, заставляя его совершать вращательное движение. В последующем система испытывает в экструдере очень большие усилия «сжатия – сдвига», приводящие не только к переводу системы в вынужденно-пластическое состояние, но и к переходу системы от максимальной к минимальной ньютоновской вязкости. Как было показано в диссертации С.З. Роговиной [77] и в ряде других работ, при этом происходит и разрыв макромолекул с образованием свободных радикалов [74–78, 104]. Свободные радикалы, возникающие в макромолекуле лигнина после разрыва лигнин-углеводных связей, играют большую роль в определении реакционной способности лигнина. Они являются активаторами реакций полимеризации, приводящих к образованию сетчатой структуры, типичной для лигнина. Появление радикалов зафиксировано не только при воздействии на лигнин химических агентов (кислот, щелочей, ферментов), но и при механической деструкции древесины. Механизм образования радикалов изучался многими исследователями [3–6].

Именно благодаря этим факторам удается получить древесный брикет плотностью до 1300 кг/м^3 , при том, что плотность кристаллической решетки целлюлозы $1,5 \text{ г/см}^3$ [101]. По имеющимся у нас данным, никакой другой метод пока не позволяет в промышленных условиях достигать таких значений плотности. На рисунке 24 представлены фотографии сканирующей электронной микроскопии образцов древесины лиственницы до (А) и после сжатия (Б). На рис. 24 (А) видна слоевая структура лиственницы, которая не подвергнута механическому воздействию (одноосному сжатию в радиальном направлении). После сжатия структура деформируется, слои уплотняются, и, вероятно, пропитываются переведенными в вынужденно-пластическое состояние полимерными компонентами древесных опилок.



А



Б

Рисунок 24 – Структура лиственницы сибирской до (А) (x500) и после радиального сжатия (Б) (x1000). Масштаб — 20 мкм

Структура древесного брикета из опилок лиственницы напоминает структуру образца древесины лиственницы после радиального сжатия. На рис. 24, А четко видно сходство между структурой топливного брикета и структурой древесины лиственницы после сжатия в радиальном направлении. Можно предположить, что опилки, вероятно, пропитаны древесной жидкостью, как и волокна древесины лиственницы (см. рис. 24, Б). В случае измельченных опилок древесины лиственницы эта жидкость представляет собой аквакомплекс «арабиногалактан–вода», находящийся в вязко-текучем состоянии в широчайшем температурном диапазоне. (Можно отметить, что разработанная в ходе проекта

«Лиственница» инновационная технология переработки в целлюлозу древесины лиственницы базируется [5, 103–106] на предварительной экстракции этого комплекса). Можно предположить, что древесная жидкость, которая выделяется при механическом воздействии на измельченные и пропаренные опилки, является, наряду с полимерными компонентами древесины, связующим при производстве древесных и древесно-угольных брикетов.

Для ответа на вопрос, является ли древесный брикет, при его плотности 1300 кг/м^3 , монолитным материалом, или же сохраняет свою композиционную структуру, было проведено микроскопическое исследование опилок и процесса избирательного растворения компонентов топливного брикета. Если брикет представляет собой не монолитный, а композиционный материал, то представляло интерес посмотреть под микроскопом, как будет себя вести этот материал при использовании метода дробного растворения. Этот метод аналогичен методу травления, применяемому во многих отраслях при изучении сложных объектов. В качестве растворителя для целлюлозы была использована 83%-ная фосфорная кислота [82].

На рисунке 25 представлено, как идет дезинтеграция частиц брикета, когда из них «вымываются» целлюлозные компоненты. Здесь наблюдаются разные стадии набухания и растворения. Наблюдаемая картина позволяет говорить о том, что в брикете, несмотря на огромную плотность, сохраняется структура из индивидуальных древесных волокон.

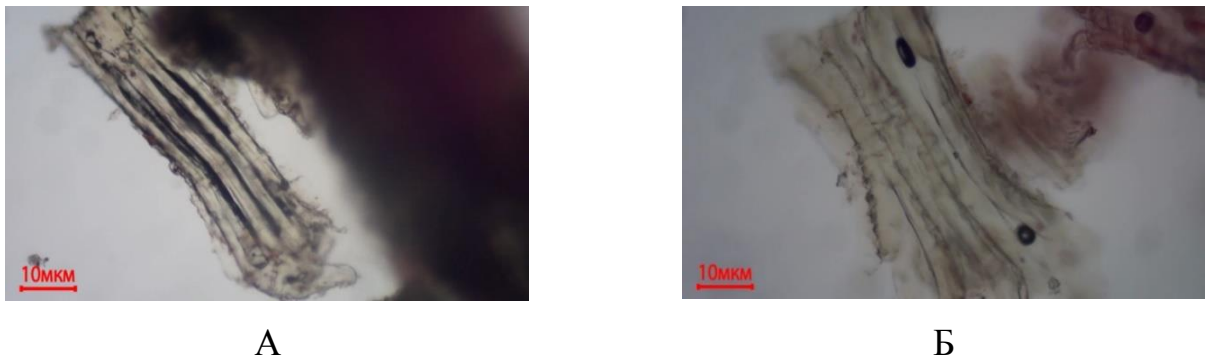


Рисунок 25 – Древесный брикет до растворения (А)
и после растворения (Б). Масштаб 10 мкм

Эти микроскопические исследования подтверждают наши предположения, что при получении древесного брикета на стадии прессования (экструдирования) из опилок древесины лиственницы, во-первых, выделяется древесная жидкость, которая пропитывает и связывает волокна между собой, а, во-вторых, происходит перевод полимерных компонентов древесины в вынужденно-пластическое состояние. В результате образуется новая структура — структура топливного брикета.

Процесс формирования древесного брикета на микроскопическом уровне можно разделить на следующие стадии.

1. Деформация структуры опилок древесины лиственницы.
2. Выделение древесной жидкости из пор.
3. Перевод полимерных компонентов древесины в вынужденно-пластическое состояние.
4. Пропитка и соединение древесной жидкостью опилок между собой (формирование новой структуры).

Из-за экспериментальных трудностей нами в лабораторных условиях не изучались реологические свойства системы при ее переводе к минимальной ньютоновской вязкости, однако эти исследования были проведены в опытно-промышленных условиях. Так, было установлено, что при увеличении скорости сдвига происходит значительное уменьшение нагрузки на двигатель экструдера. Это свидетельствует о снижении эффективной вязкости (см. рис. 21, область II);

после достижения некоторого значения скорости сдвига дальнейшее ее увеличение (рис. 21, область III,) уже не изменяет эффективную вязкость — достигается наименьшая ньютоновская вязкость — η_{∞} (или $\eta_{\text{мин}}$).

При выходе из экструдера вследствие охлаждения и удаления пластификатора — воды, все полимерные компоненты застекловываются, на поверхности образуется четко видимая корка, образуя структуру остеклованного брикета, обладающего, в частности, и значительной водостойкостью. Плотность полученного брикета 1,26–1,30 кг/дм³, влажность 1–2 %.

Таким образом, проведенные исследования показали, что если для древесины лиственницы естественной влажности характерны упруго-релаксационные свойства, типичные для полимерных объектов, находящихся в высокоэластическом состоянии, то их сушка до минимальной влажности позволяет осуществить их хрупкое измельчение. Последующее паровое увлажнение до влажности 3–4 % позволяет получить систему, экструдирруемую в условиях сочетания нагрева и напряжений «сжатия – сдвига» при режимах минимальной ньютоновской вязкости.

3.6 Анализ процессов, происходящих при карбонизации в изотермических условиях

В монографии Н. И. Никитина [59], отмечается, что разложение древесины при нагревании без доступа воздуха, обычно называемое сухой перегонкой, является наиболее старым промышленным способом химической переработки древесины. Термическое разложение древесины начинается при температурах, немного превышающих 100 °С, но идет очень медленно, причем первые стадии процесса эндотермичны. Нагревание выше 150 °С приводит уже к заметному распаду древесины, а при более высоких температурах процесс становится экзотермическим. Как известно [59], при экзотермическом распаде древесины выделяется значительное количество тепла. Этой теплоты достаточно для практического проведения процесса до конца без подогрева извне, т. е. в изотермических условиях, при условии исключения потерь тепла в окружающую

среду. В конечном периоде пиролиза — при температурах 380–400 °С — происходит лишь незначительное образование жидких продуктов, главным образом тяжелой смолы. Выделяющиеся в это время газы состоят из CO_2 , CO и углеводородов. В остатке получается древесный уголь.

Большая плотность полученных брикетов обеспечивает их высокую теплопроводность; с учетом их геометрии и расположения на продуваемых тележках (Рисунок 26) это определяет при карбонизации существенное уменьшение градиента температур по толщине брикетов и возможность выдерживания заданной температуры во всем объеме камеры карбонизации. Тем самым решается и задача получения торрефицированных брикетов.



Рисунок 26 – Карбонизированные брикеты на тележке

Следует особо отметить, что для всех целлюлозных материалов пластифицирующее действие паров воды, сорбируемых из воздуха, определяет их упруго-релаксационные свойства. Однако при получении карбонизованного брикета (Рисунок 27) содержащиеся в парогазовой смеси пары воды не только пластифицируют полимерные компоненты древесины в процессе пиролиза, но и

осуществляют активацию поверхности получаемого угля. Описанный выше комплекс обладает широкими возможностями для проведения и других процессов биорефайнинга. При выполнении проекта «Лиственница» было показано [5], что получение арабиногалактана (АГ) принципиально возможно несколькими способами [103–106] — при производстве сульфатной целлюлозы АГ можно получить при экстрагировании щепы лиственницы непосредственно перед варкой с последующим выпариванием и очисткой экстракта. Однако в связи с различиями масштаба производства волокнистых полуфабрикатов из древесины лиственницы и реальной потребности в АГ создание опытно-промышленного производства целесообразно не увязывать с производством волокнистых полуфабрикатов. Предпочтительнее создать его на базе производства меньшего объема, но использующего в качестве сырья древесину лиственницы. Желательно также извлекать АГ не методом экстракции, которая в связи со сложностью процесса возможна только для получения АГ в небольших количествах, для медицинских целей, а методом механического отжима.



Рисунок 27 – Фотография поперечного среза карбонизированного брикета

Таковыми предприятиями являются, в частности, лесопильные предприятия. На них образуется большое количество отходов, прежде всего опилок. Такого количества опилок вполне достаточно для создания довольно крупного опытно-промышленного производства АГ. Испытания описанного выше комплекса в опытно-промышленных условиях доказали возможность адаптации комплекса к

любому сырью с достижением любой целевой влажности материала без изменений конструкции в целом, а также возможность его модернизации с созданием гибкого производства с целью извлечения АГ из опилок лиственницы. Для создания на этом комплексе дополнительно производства АГ планируется его реконструкция.

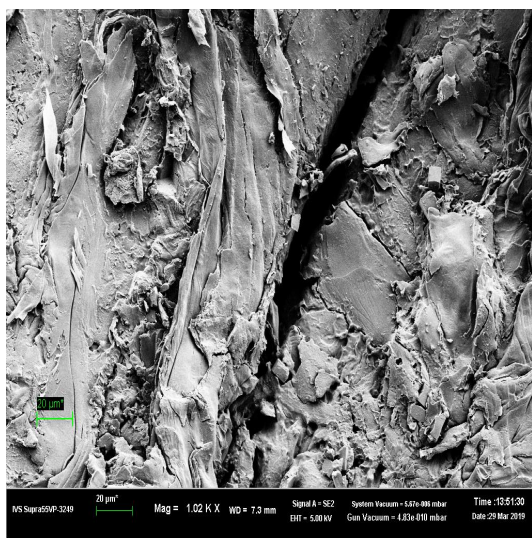
Таким образом, анализ изменения релаксационного состояния полимерных компонентов древесины при проведении ее высокотемпературного биорефайнинга¹ — экструзионного брикетирования и последующей термообработки при температуре 380–450 °С, т. е. выше температуры термодеструкции древесины, — показал, что путем изменения влажности древесины и температуры обработки система может быть переведена в хрупкое состояние, а при последующем увлажнении, нагреве и приложении нагрузки сжатия – сдвига — в вынужденно-пластическое состояние. Последующий низкотемпературный пиролиз в условиях регулируемой парогазовой среды позволяет совместить карбонизацию и активацию угольного брикета.

При карбонизации, осуществляемой в изотермическом регенерационном реакторе (ИРР) в регулируемой парогазовой среде, в брикетах под влиянием температуры и пластифицирующего воздействия паров воды «размораживаются» замороженные деформации, реализуется криптогетерогенность, благодаря чему сам процесс карбонизации протекает в условиях раскрытой капиллярно-пористой структуры, которая фиксируется и в карбонизованном материале. За счет регулируемой парогазовой среды одновременно происходит активация угля, в результате полученные брикеты обладают свойствами активированного угля. В печи карбонизации осуществляется пиролиз древесины, образующиеся пиролизные газы сжигаются, а полученная тепловая энергия используется для сушки опилок. Печь карбонизации работает за счет тепла экзотермической реакции термораспада древесины. В печи осуществляется мощная

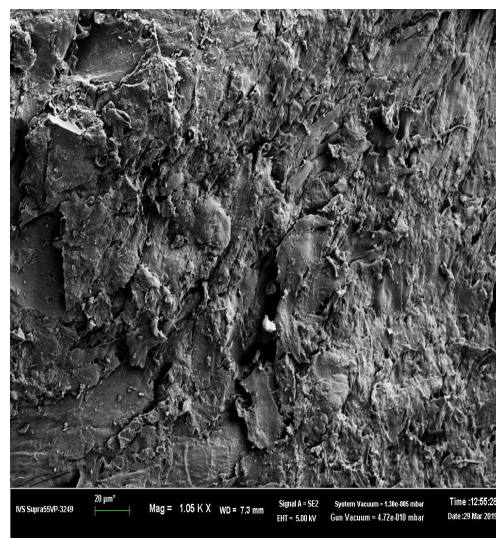
¹ *Примечание.* В данной диссертации, также как и в статье [18], под «высокотемпературным биорефайнингом древесины» понимаются процессы, которые могут рассматриваться как низкотемпературный пиролиз и проводящиеся при температуре 380–450 °С, т. е. выше температуры термодеструкции древесины.

принудительная циркуляция пиролизных газов, обеспечивающая пиролиз брикетов при четко заданной температуре, повышенный выход угля, низкое содержание смолы в пиролизных газах, высокую интенсивность работы. Печь работает в циклическом режиме и осуществляет карбонизацию 5 т брикета за 4 ч. Комплекс брикетирования и карбонизации (термообработки) прошел опытно-промышленные испытания как в режиме сушки, так и в режиме торрефикации и карбонизации и успешно работает уже несколько лет. В режиме сушки была достигнута производительность около 3 т/ч. Производительность по карбонизированным брикетам и/или торрефикату — более 1 т/ч.

На рисунке 28 представлены фотографии электронной микроскопии древесного (А) и древесно-угольного (Б) брикетов из опилок лиственницы.



А



Б

Рисунок 28 – Структура древесного (А) и древесно-угольного (Б) брикетов ($\times 1000$). Масштаб — 20 мкм

На древесно-угольном брикете (см. рис. 28, Б) из опилок лиственницы наблюдается разрушенная структура опилок, так как при пиролизе улетучивается не только часть аквакомплекса «АГ — вода» древесины лиственницы, но и происходит газификация части компонентов древесной ткани.

В таблице 9 приведены результаты спектрального анализа древесного и древесно-угольного брикетов из опилок древесины лиственницы, в ходе которого было установлено содержание углерода и кислорода в данных образцах. Из

приведенных данных видно, что в ходе процесса пиролиза меняется отношение углерода к кислороду. В древесном брикете такое отношение составляет 58:37, а в древесно-угольном брикете — 85:14. Содержание углерода в процессе пиролиза увеличивается с 58 % до 85 %. Из-за увеличения доли углерода и уменьшения доли кислорода увеличивается калорийность топлива. Древесно-угольный брикет из опилок древесины лиственницы, полученный по разработанной в диссертации релаксационно-аэродинамической технологии, обладает, как будет показано ниже, более высокой теплотворной способностью на кг и на м³ топлива, чем другие виды древесного угля и топливных брикетов.

Таблица 9 – Содержание углерода и кислорода в древесном и древесно-угольном брикете (по данным спектрального анализа при электронно-микроскопических исследованиях)

| Вид брикета | С | О |
|--------------------------|---------------------|---------------------|
| Древесный брикет | 57,74 ± 0,84 | 35,68 ± 0,69 |
| Древесно-угольный брикет | 84,71 ± 0,65 | 14,23 ± 0,25 |

За счет того, что процесс пиролиза проходит в турбулентном режиме и формы древесного брикета, внутри него формируется такая структура, в которой содержатся поры преимущественно больших размеров. Такая структура способствует долгому и равномерному горению топливного брикета, что отличает его от других видов углей и дров.

3.7 Заключение по экспериментальной части

Как уже указывалось выше, в настоящее время наиболее перспективным инновационным методом утилизации отходов древесины лиственницы представляется изготовление древесно-угольных брикетов на основе опилок [7–22]. Инновационная технология получения топливных древесных и древесно-угольных брикетов из опилок древесины (в том числе лиственницы) базируется на направленном изменении релаксационного состояния полимерных компонентов древесины (лигнина, целлюлозы и гемицеллюлоз) [7–221]. Она позволяет превратить древесные отходы в древесно-угольный брикет без использования связующих веществ при минимальном расходе энергии и приемлемых капитальных затратах.

4 Технологическая часть

Реализованная на заводе ООО «Лесная технологическая компания» автором данной диссертации инновационная технология получения из опилок древесины лиственницы топливных и угольных брикетов [7–11] может рассматриваться как принципиально важный новый шаг в развитии производства и использования новых поколений биотоплива [12, 16, 17] (полное описание патентов автора приведено в Приложении 1, а изложение их сути в данной главе диссертации). Эта технология позволяет, с одной стороны, получать древесные и древесно-угольные брикеты для разных потребителей (топливо и восстановитель для производства кремния и для металлургии, топливо для ВВQ, каминное топливо), а, с другой, — утилизировать все древесные отходы. В то же время научные основы этой технологии связаны с взаимодействием полимерных компонентов древесины с водой, причем как с жидкой водой, так и с ее парами, оказывающими определяющее влияние на изменение релаксационного состояния полимерных компонентов древесины при осуществлении ее низкотемпературного пиролиза.

4.1 Синтез и анализ технологической схемы по производству топливных остеклованных древесных брикетов и древесно-угольных брикетов

В данной главе приводится синтез и анализ технологической схемы получения топливных древесных и древесно-угольных брикетов.

Инновационная технология получения топливных древесных и угольных брикетов из опилок древесины (в том числе лиственницы) базируется на направленном изменении релаксационного состояния полимерных компонентов древесины — лигнина, целлюлозы и гемицеллюлоз за счет совместного воздействия температуры и пластифицирующего воздействия воды в парообразном виде, а также ударных деформаций и деформаций сжатия — сдвига. Инновация технологической линии для производства древесных и древесно-угольных брикетов заключается в том, что благодаря направленному изменению релаксационного состояния полимерных компонентов древесины обеспечивается

энергосбережение на всех этапах производства и на всем протяжении жизненного цикла древесных и древесно-угольных брикетов, благодаря чему сокращаются выбросы парниковых газов.

Используемая комбинированная технологическая линия представляет собой каскад реакторов, различающихся по гидравлическим (аэродинамическим) режимам, тепловым режимам и по цикличности работы.

Процесс включает непрерывные быстрые стадии — экструзию, периодические медленные стадии — стадии пиролиза, релаксации, и циркуляционные стадии — аэродинамическое (вихревое) хрупкое разрушение в регулируемой паровоздушной среде, пиролиз и активацию в циркулирующей парогазовой среде. Линия включает в себя реакторы, работающие в режиме «идеального смещения» — аэродинамическая сушка/измельчение, «идеального вытеснения» — экструзию, камеру карбонизации, работающую в периодическом циклическом режиме с высокоинтенсивной циркуляцией газовой фазы регулируемого состава.

Технология производства древесно-угольных брикетов, полученных карбонизацией древесных брикетов, изготовленных на экструдерных прессах, включает следующие основные стадии: для опилок — их сортирование; для древесных отходов — измельчение древесины до микрощепы размером 2–4 мм — резка поперек волокон. Подготовка сырья к прессованию включает сушку, измельчение и увлажнение (пластификацию) древесины.

На стадии подготовки сырья происходят следующие процессы:

- сушка опилок до влажности 0–2 %;
- хрупкое измельчение — истирание опилок за счет ударных воздействий при влажности 0–2 % в турбулентном потоке (аналогично измельчению на струйных мельницах) [89];
- паровая обработка измельченных опилок во взвешенном слое;
- термообработка опилок при высокой температуре в течение короткого времени;
- кондиционирование опилок до влажности 3–4 %.

Такая подготовка сырья позволяет придать древесной системе экструдированность, т. е. возможность перевода системы в экструдере в вынужденное вязкотекучее состояние.

Описанные выше стадии подготовки сырья обеспечивают стабильность работы экструдера, энергосбережение, длительность работы шнеков и фильер. Экструзионным прессованием древесного сырья осуществляется перевод древесины в вынужденное вязкотекучее (пластическое) состояние и формование древесного брикета. Более того, за счет высоких напряжений сжатия – сдвига система переходит от максимальной ньютоновской вязкости к минимальной ньютоновской вязкости, что подтверждается снижением нагрузки на электродвигатель и увеличением скорости экструзии. Получаемый водостойкий брикет может находиться несколько дней в воде без разрушения. Собственно, производство брикета — экструзионное прессование — осуществляется на двух экструдерах производительностью каждого 1,5 т/ч.

Рассмотрим технологическую линию по производству из опилок древесины лиственницы древесных и угледревесных брикетов работающую в опытно-промышленных масштабах - до 150 т угольных брикетов в месяц [7–11].

В Иркутской области по патентам автора [7–11] в 2015 году было создано предприятие по переработке отходов древесины лиственницы в древесный уголь. Опытно-промышленная линия по этой технологии в Иркутской области работает с 2015 г.; к настоящему времени в России уже имеется 5 таких линий. В ближайшее время в Риге начинается серийное производство оборудования для производства брикетов по этой технологии. Полный текст патентов приведен в приложении, а в данной главе излагаются лишь основные идеи этих патентов и описывается синтез и анализ технологической схемы получения топливных древесных и древесно-угольных брикетов.

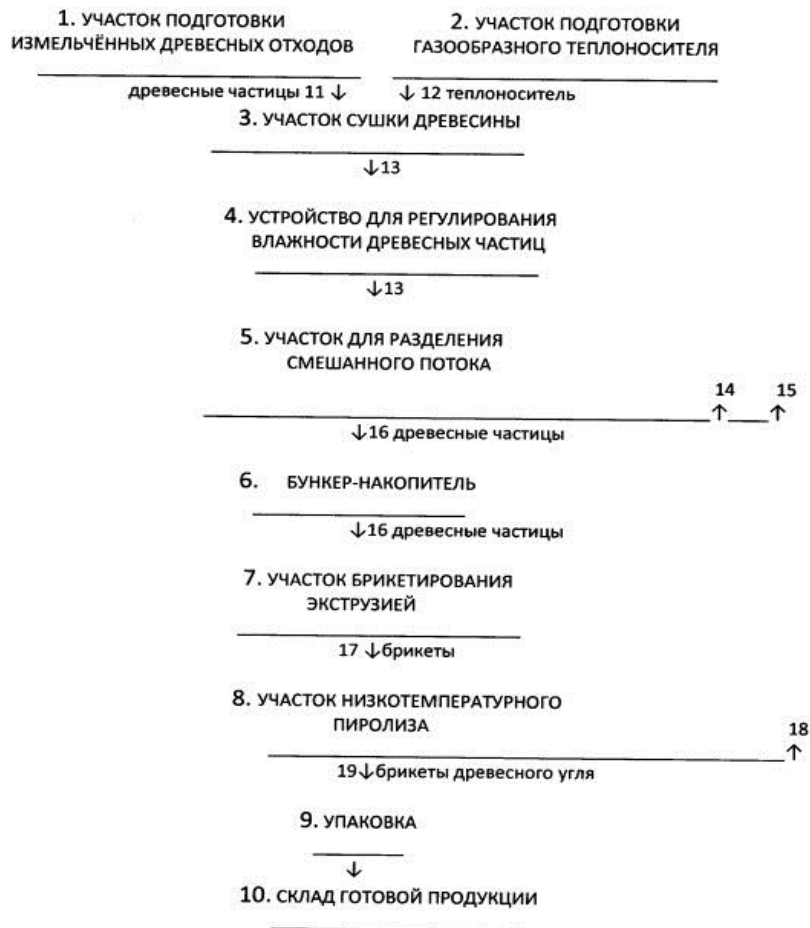
Технологический поток производства древесно-угольных брикетов состоит из следующих участков (Рисунок 29):

1. участок подготовки теплоносителя;
2. участок подготовки измельченных древесных отходов;

3. участок сушки древесины, оснащенный устройством для сушки;
4. участок брикетирования экструзией;
5. участок низкотемпературного пиролиза, характеризующийся тем, что имеет тепловой регенератор, заполненный большим объемом инертного кирпича, подготовки газообразного теплоносителя; выполнен в виде комплексного теплогенератора, снабженного топочной камерой для получения топочных газов, узлом сжигания утилизированных пиролизных газов, а также узлом ввода в регенератор теплоносителя, по крайней мере, части парогазовой смеси с низким содержанием кислорода и повышенным содержанием пара, возвращенной с участка сушки;
6. участок упаковки древесного угля;
7. склад готовой продукции.

Весьма актуален с экологической точки зрения тот факт, что реализованный производственный Комплекс работает в режиме безотходной технологии. Причем, безотходность реализуется как для твердой части исходного сырья, так и для образующихся в процессе производства технологических газов участка сушки и участка низкотемпературного пиролиза.

**ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА
ПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ДРЕВЕСНОГО УГЛЯ**



ФИГ.1

Рисунок 29 – Принципиальная схема производства
древесно-угольного брикета

Первый из патентов автора (№2 596 683. «Комплекс для непрерывной термообработки твердых мелких частиц, преимущественно дисперсных древесных материалов, и способы термообработки, реализуемые с помощью данного комплекса») относится к процессам сушки, измельчения и увлажнения.

Комплекс включает устройство для непрерывной термообработки мелких частиц обрабатываемого материала, выполненное в виде камеры (1), обеспечивающей пневмотранспортировку смешанного потока газообразного теплоносителя и мелких частиц (2). Камера термообработки выполнена в виде закольцованного канала, предпочтительно с круглым поперечным сечением, одинаковым по всей длине канала, и снабжена вентилятором (5). Узел возврата материала для повторной термообработки (6) установлен внутри канала и выполнен с возможностью регулирования объема повторно циркулирующего в канале потока. Узел вывода смешанного потока теплоносителя и мелких частиц (4) обрабатываемого материала снабжен одним циклоном и выполнен с возможностью разделения отходящих газов на два потока. С помощью указанного Комплекса реализуется способ сушки. Температуру теплоносителя на входе в канал термообработки поддерживают в пределах 400–700 °С, а содержание кислорода в теплоносителе, например дымовых газах, поддерживают ниже 10 мас. %, при этом подачу материала на сушку поддерживают в количестве, обеспечивающем температуру потока на выходе из канала не выше 150 °С. Способ торрефикации также реализуется с помощью комплекса, при этом температуру теплоносителя на входе в канал термообработки поддерживают в пределах 500–600 °С, а содержание кислорода в теплоносителе, например дымовых газах, поддерживают ниже 8 мас. %, при этом подачу материала на сушку поддерживают в количестве, обеспечивающем температуру потока на выходе из канала не ниже 200 °С, а время нахождения частиц материала в канале термообработки поддерживают в пределах 6–40 секунд. Комплекс является универсальным, позволяет оперативно подстраиваться в режиме непрерывной работы под любой тип исходного сырья и обеспечивает повышение качества сушки.

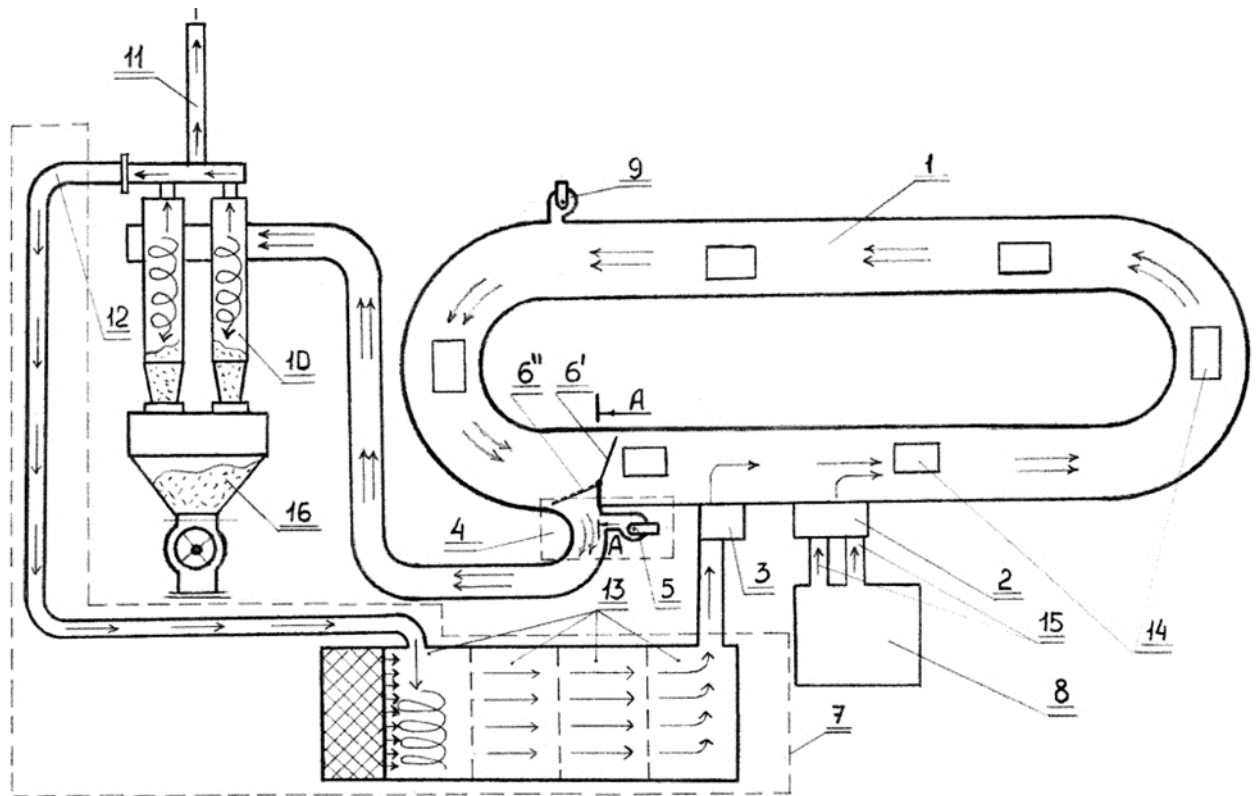


Рисунок 30 – Принципиальная схема установки аэродинамической сушилки – измельчителя – «коллайдера»: 1 — закольцованный трубный канал камеры пневмо-транспортировки смешанного потока газообразного теплоносителя и твердых мелких частиц; 2 — узел ввода твердых мелких частиц; 3 — узел подачи газообразного теплоносителя; 4 — узел вывода смешанного рабочего потока «газ – твердое»; 5 — вентилятор; 6 — узел возврата материала в камеру устройства для повторной термообработки; 7 — система подготовки газообразного теплоносителя; 8 — система предварительной подготовки обрабатываемого материала; 9 — вентиляционный узел; 10 — циклон; 11 — труба для выброса части отработанной парогазовой смеси в атмосферу; 12 — трубный канал для возвратной части парогазовой смеси в процесс термообработки; 13 — камеры искрогасителя; 14 — предохранительные клапаны (выполненные в верхней части трубного канала 1); 15 — два параллельных канала ввода (в узел ввода материала 2); 16 — накопительный бункер

Благодаря наличию узла возврата материала (Рисунок 31) предотвращается «отравление» циркуляционной схемы — коллайдера [109].

При экструдерном прессовании реализуются сдвиговые деформации, изменяющие в сочетании с температурой и увлажнением релаксационные состояния полимерных компонентов древесины. Процесс образования межмолекулярных связей с формированием жесткого, достаточно водостойкого поверхностного слоя («остекловывание» брикета) в отформованном материале

происходит не только в момент выхода брикета из экструдерной головки и его охлаждения воздухом, но и продолжается при его «отлежке» — созревании брикета.

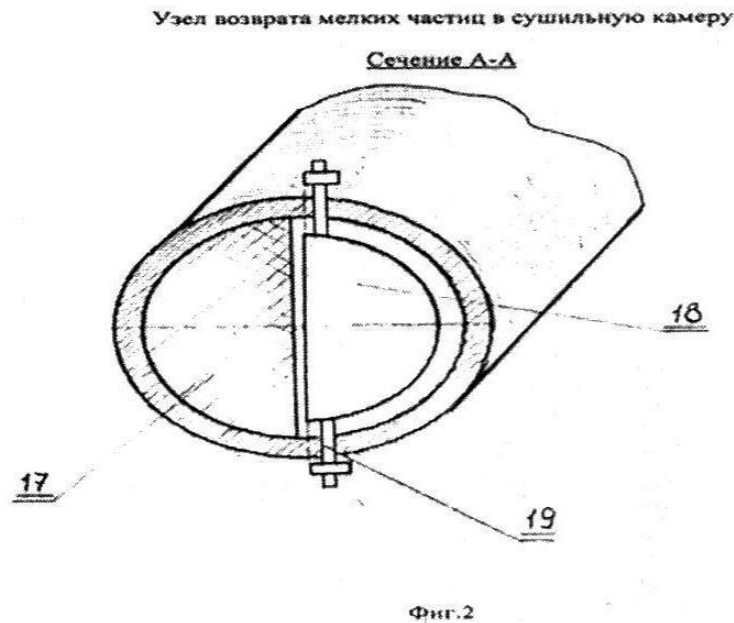


Рисунок 31 – Узел возврата материала — разделения потоков

Выходящие из экструдера древесные брикеты одеваются на стержни многоярусной станины, установленной на тележке (Рисунок 32). Тележка закатывается на промежуточный склад — в зону релаксации, а через определенное время — в камеру карбонизации.

Следующий патент автора защищает узел пиролиза. Изобретение относится к области получения угля из древесины и ее отходов методом пиролиза и может быть использовано для переугливания древесных топливных брикетов, в том числе из всех видов отходов лесозаготовки и промышленной переработки древесины. Устройство для получения древесного угля включает корпус печи, снабженный термоизоляцией, выносную топку, сообщающуюся с камерой пиролиза, содержащей выемные устройства для загрузки древесины, систему газоходов и систему вывода отработанных газов. Рабочее пространство печи выполнено в виде закольцованного канала, снабженного жаростойким

вентилятором, поворотным шибером и газопроницаемым рекуператором, установленными внутри закольцованного канала, при этом газопроницаемый рекуператор выполнен из термостойкого кирпича. Масса термостойкого кирпича для выполнения газопроницаемого рекуператора не менее чем в десять раз превышает массу загружаемой для пиролиза древесины. Корпус печи снабжен дверью для горизонтальной загрузки – выгрузки выемных устройств (тележек) – (Рисунок 32), перед которой установлен поворотный шибер, а каждое выемное устройство выполнено в виде вертикальной стойки, равномерно снабженной по всей высоте фиксирующими стержнями, направленными вверх и закрепленными под углом к вертикальной стойке.

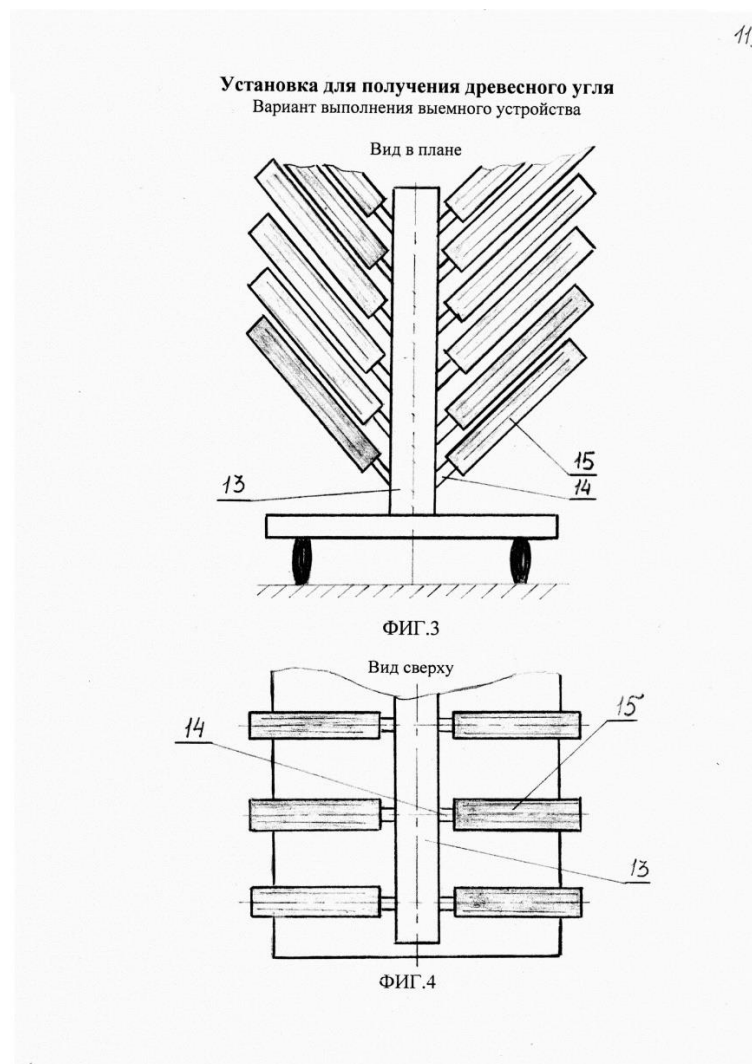


Рисунок 32 – Тележка (выемное устройство)
для перемещения древесных брикетов в камеру карбонизации

Вентилятор предпочтительно установлен за зоной пиролиза по ходу газового потока. Технический результат заключается в получении древесного угля высокого качества, как по теплотворности, так и по однородности и механической прочности при значительном сокращении времени пиролиза, повышении производительности и энергетической эффективности, при этом устройство характеризуется конструктивной простотой и низкими капитальными затратами.

За счет регулируемой парогазовой среды может осуществляться и активация получаемого древесного угля.

После завершения цикла карбонизации тележки выкатываются из камеры, накрываются гасильными колпаками, а после остывания готовые углебрикеты упаковываются и направляются на склад для отправки потребителям.

При этом отсев от углебрикетов, брак от производства древесных брикетов и углебрикетов возвращаются на переработку в начало процесса. Этот принцип также защищен патентом автора.

4.2 Создание опытно-промышленной и промышленных линий по производству древесных и древесно-угольных брикетов

В этом разделе приведено описание созданной опытно-промышленной, а затем и промышленных линий по производству древесных и древесно-угольных брикетов, их пуска, наладки и освоения.

Рассмотрим технологическую линию по производству древесных и древесно-угольных брикетов из опилок древесины лиственницы в опытно-промышленных масштабах — до 150 т угольных брикетов в месяц. Технология производства древесно-угольных брикетов (Рисунок 33) включает ряд основных стадий, на которых осуществляется направленное изменение релаксационного состояния полимерных компонентов древесины: механическая подготовка древесины; подготовка сырья к прессованию — экструдированию; экструдирование брикетов; охлаждение брикетов (их «остекловывание»); нанизывание брикетов на стержни многостержневых станин тележек; загрузка

тележек в камеру карбонизации; карбонизация брикетов; выгрузка тележек; охлаждение тележек с угольными брикетами в «гасильных» камерах; упаковка карбонизованных брикетов в потребительскую и/или транспортную тару.

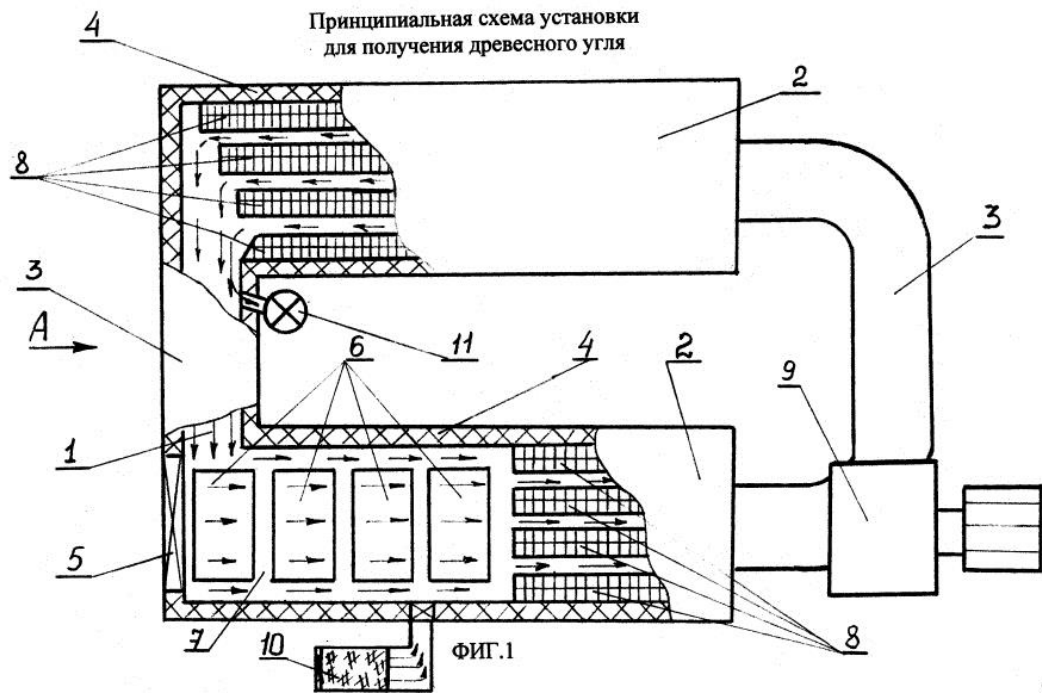


Рисунок 33 – Принципиальная схема установки для получения древесного угля

1 — закольцованный канал, позволяющий циркулировать газовому потоку теплоносителя в режиме повтора полного цикла; 2 — пространственно-термоизолированный корпус, разделенный на две камеры; 3 — соединенная система газоходов; 4 — внутренняя термоизоляция; 5 — дверь для горизонтальной загрузки – выгрузки выемных устройств; 6 — выемные устройства; 7 — зона пиролиза; 8 — вторая камера корпуса печи, выполненная из термостойкого кирпича и работающая в режиме газопроницаемого рекуператора; 8 — рекуператор, изображенный схематично в виде совокупности газовых каналов и выполненная из жаростойкого кирпича; 9 — мощный жаростойкий вентилятор; 10 — сообщающаяся с камерой пиролиза 7 выносная топка для запуска печи с выходом на рабочий режим; 11 — система вывода отработанных газов; 12 — поворотный шибер

Карбонизация древесных брикетов с получением древесно-угольных брикетов происходит в печи в регулируемой по составу и температуре паровоздушной среде. Печь карбонизации работает за счет тепла экзотермической реакции термораспада древесины — пиролиза. Образующиеся в процессе

пиролиза газы сжигаются, и полученная от их сжигания тепловая энергия используется для сушки опилок. В печи благодаря мощной принудительной циркуляции пиролизных газов, включающих пары воды, образующихся при сушке и пиролизе, осуществляется термостабилизированный пиролиз брикетов в условиях контролируемого состава парогазовой среды. Тем самым обеспечивается повышенный выход угля, низкое содержание смолы в пиролизных газах, высокая интенсивность работы.

Следующим этапом технологического процесса является карбонизация брикета. Термостабилизированный пиролиз при температуре 380–450 °С ведется в печи карбонизации, работающей в режиме регенератора на тепле экзотермического разложения древесины. Он позволяет получить выход угольного брикета до 40 % от массы древесного брикета.

После остывания брикеты стабилизируются и упаковываются. Полученные древесно-угольные брикеты обладают высокой плотностью, так как получены из древесных брикетов плотностью 1,30 кг/дм³, и могут транспортироваться в 40-футовых контейнерах с загрузкой до 26 т. Благодаря структуре, полученной при низкотемпературном термостабилизированном пиролизе в регулируемой парогазовой среде, они обладают высокой реакционной способностью и температурой горения и по свойствам практически отвечают требованиям к активированным углям.

Линия по производству древесно-угольных брикетов, построенная в Иркутской области, имеет производительность 4 тыс. т/год и успешно эксплуатируется с 2015 года. Успешная эксплуатация этой линии и большой спрос на ее продукцию на российских и мировых рынках позволил осуществить ее тиражирование (с 2017 г. — п. Лесозаводск, Приморский край; с 2019 г. — г. Братск, две линии; с 2019 г. — Владимирская область; с 2020 г. (февраль) — Латвия, Рига) и перейти к серийному производству данных линий на специализированном заводе в Латвии. Производительность линий, в зависимости от комплектации, составляет от 5 до 20 тыс. т древесного и древесно-угольного брикета в год.

Принципиально линия способна перерабатывать любые древесные отходы – как первичные, так и вторичные, т. е. использованную древесину. Последнее направление очень перспективно [110–112] не только для реализации циркулярной экономики в Лесном секторе [11, 27, 113].

4.3 Исследование эксплуатационных свойств полученных топливных древесных и древесно-угольных брикетов и их сопоставление с аналогичными видами выпускаемой продукции

Эксплуатационные (потребительские) свойства готовой продукции и их сравнение с другими видами топлива приведены в таблицах 10–13 (данные для других образцов взяты из литературы) [114, 115].

Таблица 10 – Эксплуатационные (потребительские) свойства готовой продукции и их сравнение с другими видами топлива

| Показатели | Древесный брикет | Древесно-угольный брикет |
|---|------------------|--------------------------|
| Теплотворная способность топлива, МДж/кг (ккал/кг) | 21,46 (5137) | 34,25 (8199) |
| Зольность, % | 3,24 | 1,78 |
| Массовая доля серы, % | 0,017 | 0,05 |
| Выход горючих веществ на сухое беззольное вещество, % | 78,15 | нет данных |
| Влажность, % | 1,78 | 1,8 |
| Удельная объемная теплотворная способность, Мкал/м ³ | 6678 | 6542 |

Таблица 11 – Теплофизические характеристики топливных брикетов

| Топливо | Теплотворная способность топлива, МДж/кг (ккал/кг) | Зольность, % | Плотность, кг/м ³ | Влажность, % | Объемная теплотворная способность топлива, ГДж/м ³ (Мкал/м ³) |
|---------------------------------|--|--------------|------------------------------|--------------|--|
| Древесный брикет | 21,5 (5137) | 3,24 | 1300 | 4 | 28 (6678) |
| Древесно-угольный брикет | 34,3 (8199) | 1,78 | 798 | 1,8 | 27,4 (6542) |
| Pini&Kay | 17,6 (4206) | 2,69 | 1220 | 1,9 | 21,5 (5131) |
| RUF | 19,22 (4600) | 0,5 | 1000 | 8-10 | 19,2 (4600) |
| Пеллеты | 18 (4300) | до 1,5 | 1000 | 8-12 | 18 (4300) |
| Брикеты из каменного угля | 27,18 (5828) | 20 | нет данных | 1,9 | нет данных |
| Брикеты из бурого угля | 18 (4302) | 30 | нет данных | 10-15 | нет данных |
| Нефть | 40-46 (9560-11000) | 2 | 900 | 1,5 | 38,7 (9249) |
| Дрова (береза) | 15 (3585) | 5 | 650 | 12 | 9,8 (2330) |
| Каменный уголь | 20-44 (4780-10516) | 21 | 1300 | 15 | 52 (12428) |

Из представленных данных видно, что производимые древесный и древесно-угольный брикеты обладают наивысшей теплотворной способностью и удельной объемной теплотворностью по сравнению с другими видами биотоплива. Это связано со структурой брикета и с его химическим составом.

Таблица 12 – Сводная таблица показателей базисной плотности образцов

| Название образцов | Базисная плотность, кг/м ³ |
|---------------------------------|---------------------------------------|
| Древесно-угольный брикет | 797 |
| Уголь из дальневосточного дуба | 352 |
| Уголь из дальневосточной березы | 395 |
| Уголь из дальневосточной сосны | 247 |

Таблица 13 – Показатели прочности образцов древесного угля

| Образец | Прочность, Н | Предполагаемый механизм разрушения |
|---------------------------------|--------------|------------------------------------|
| Уголь из дальневосточной сосны | 27 | Сжатие с хрупким разрушением |
| Уголь из дальневосточной березы | 300 | Сжатие с хрупким разрушением |
| Уголь из дуба дальневосточного | 406 | Сжатие с хрупким разрушением |
| Древесно-угольный брикет | 2785 | Сжатие с хрупким разрушением |
| Древесный брикет | 1400 | Хрупкое разрушение |

В Приложении 1 представлен акт об использовании результатов диссертации. В приложении 2 приведена копия благодарственного письма Лесного комитета ЕЭК ООН/ФАО ООН.

ВЫВОДЫ

1. Предложены новые принципы получения топливных и угольных брикетов из опилок древесины лиственницы, базирующиеся на направленном изменении релаксационных состояний полимерных компонентов древесины. Они включают диспергирование (измельчение) высушенных опилок до порошкообразного состояния, увлажнение паром, экструзию системы, охлаждение полученных брикетов и их карбонизацию.

2. На модельных образцах древесины лиственницы, в условиях их одностороннего сжатия, изучены ее деформационные и релаксационные свойства и определена их роль в технологическом процессе, осуществляемом при создании биотоплива нового поколения с заданным комплексом эксплуатационных свойств.

3. Проанализированы специфические особенности релаксационных переходов полимерных компонентов древесины на стадиях получения древесных и древесно-угольных брикетов. На стадии измельчения высушенных (до 1 % остаточной влаги) опилок в аэродинамическом потоке происходит их хрупкое измельчение; последующее увлажнение паром до влажности 3–4 % переводит систему в экструдированное вынужденное пластическое состояние, охлаждение брикета, сформированного в режиме минимальной ньютоновской вязкости, приводит к его остекловыванию.

4. Созданы новые виды биотоплива второго поколения – остеклованные древесные брикеты, а также древесно-угольные (карбонизированные) брикеты на их основе. Изучены их свойства, микроскопическая и субмикроскопическая структура, их теплотворная способность и потенциальные области применения.

5. Разработаны оригинальные, защищенные 4 патентами РФ, технология и оборудование по производству из опилок древесины лиственницы остеклованных древесных брикетов, а также угледревесных (карбонизированных) брикетов на их основе.

6. В опытно-промышленных масштабах в 2015 году реализована опытно-промышленная технологическая линия, представляющая собой каскад реакторов,

отличающихся по цикличности работы, тепловым и аэродинамическим режимам; успешная эксплуатация этой линии и большой спрос на ее продукцию на российских и мировых рынках позволил осуществить ее тиражирование и перейти к серийному производству данных линий на специализированном заводе в Латвии.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

1. АГ — Арабиногалактан
2. АООС США — Агентство по охране окружающей среды США
3. ВИЭ — Возобновляемые источники энергии
4. ГЭС — Гидроэлектростанция
5. ЕЭК ООН — Европейская экономическая комиссия Организации объединенных наций
6. ПГ — Парниковые газы
7. ИВС РАН — Институт высокомолекулярных соединений Российской Академии Наук
8. ИРП — Известерегенерационная печь
9. ИРР — Изотермический регенерационный реактор
10. ЛМР — Лигнин механического размола
11. НДТ (или ВАТ) — Наилучшие доступные технологии (или Best Available Techniques)
12. СНГ — Содружество независимых государств
13. ФАО ООН (Food and Agriculture Organization) — Продовольственная и сельскохозяйственная организация Организации объединенных наций
14. APS (Arizona public service) — Крупнейшая электроэнергетическая компания в Аризоне, США, и основная дочерняя компания публично торгуемой компании S&P500, входящей в Pinnacle West Capital Corporation
15. Salt River Project (SRP) — Проект «Солт-Ривер» — это общее название для двух отдельных организаций: «Проект улучшения сельского хозяйства в Солт-Ривер» и «Пауэр-Дистрикт», агентства штата Аризона, которое служит электрической сетью для столичной области Феникс, и долины Солт-Ривер
16. ВВQ — Барбекю
17. COP25 — 25-я Всемирная конференция ООН по проблемам изменения климата
18. ЕС–28 — Европейский союз (сегодня в состав Европейского союза входит 28 стран)
19. EN plus — Новый (с 2011 г.) европейский стандарт качества на топливные гранулы
20. ФАО (Food and Agriculture Organization) — Продовольственная и сельскохозяйственная организация
21. FCA (Free Carrier) — Франко-перевозчик — торговый термин, означающий, что продавец выполняет свое обязательство по поставке
22. FiT (feed-in tariff) — Входной тариф, тариф для подачи – расширенный тариф на возобновляемую энергию, или платежи за возобновляемую энергию – это политический механизм, предназначенный для ускорения инвестиций в технологии возобновляемой энергии
23. НЕРСО (Hokuriku Electric Power Company) — Хокурику

Электроэнергетическая Компания

24. JRE (Japan Renewable Energy) — Японская компания солнечной энергии
25. NEB (National Energy Board) — Национальный энергетический совет
26. RED II (The Renewable Energy Directive) — Директива об использовании возобновляемых источников энергии II
27. USDA (United States Department of Agriculture) — Министерство сельского хозяйства США

СПИСОК РИСУНКОВ

| № рисунка | Название | Стр. |
|--------------|---|------|
| 1 | Микроскопическое строение древесного угля | 47 |
| 2 | Древесные и древесно-угольные брикеты, разработанные автором | 51 |
| 3 | Instron 1121 | 62 |
| 4 | Микроскоп МБИ-6 после модернизации | 63 |
| 5 | Упрощенная схема производства древесно-угольных брикетов | 66 |
| 6 | Свежие (А) и старые (Б) опилки лиственницы, окрашенные голубым красителем (x90) | 69 |
| 7 | Свежие (А) и старые (Б) опилки лиственницы, окрашенные конго красным (x90) | 69 |
| 8 | Свежие (А) и старые (Б) опилки лиственницы, окрашенные красным красителем (x90) | 70 |
| 9 | Свежие (А) и старые (Б) опилки лиственницы, окрашенные малахит зеленым (x90) | – |
| 10 | Свежие (А) и старые (Б) опилки лиственницы, окрашенные метиленовым голубым (x90) | 71 |
| 11 | Свежие (А) и старые (Б) опилки лиственницы, окрашенные фуксином (x90) | 71 |
| 12 | Диаграмма сжатия – разгрузки до 4500 Н образца из древесины | 73 |
| 13 | Релаксация напряжения во времени у образцов древесины лиственницы при различных значениях P , H | 75 |
| 14 | Накопление остаточной деформации во времени у образцов древесины лиственницы при различных P , H (скорость деформирования образца $V_d = 100$ мм/мин) | – |
| 15 | Изменение плотности образца древесины лиственницы после снятия нагрузки $P=4500$ Н | 78 |
| 16 | Изменение плотности образца древесины лиственницы после снятия нагрузки | 79 |
| 17 | Диаграмма сжатия – разгрузки модельных кубиков древесины лиственницы | 81 |

Окончание табл.

| | | |
|----|---|-----|
| 18 | Диаграмма релаксационных состояний бинарной системы полимер – растворитель в области ограниченного смешения для случаев температур переходов полимера: а — лежащих в интервале между температурами кипения и замерзания растворителя; б — вне этого интервала | 82 |
| 19 | Диаграмма релаксационных состояний бинарной системы | 84 |
| 20 | Структура лиственницы сибирской до (А) (х500) и после радиального сжатия (Б) (х1000) | 85 |
| 21 | Древесный брикет до растворения (А) и после растворения (Б) | 88 |
| 22 | Шнеки и фильеры, используемые при получении древесных брикетов | 90 |
| 23 | Экструдер для получения древесных брикетов | 91 |
| 24 | Структура лиственницы сибирской до (А) (х500) и после радиального сжатия (Б) (х1000). Масштаб 20 мкм | 92 |
| 25 | Древесный брикет до растворения (А) и после растворения (Б). Масштаб 10 мкм | 94 |
| 26 | Карбонизированные брикеты на тележке | 96 |
| 27 | Фотография поперечного среза карбонизированного брикета | 97 |
| 28 | Структура древесного (А) и древесно-угольного (Б) брикетов (×1000). Масштаб — 20 мкм | 99 |
| 29 | Принципиальная схема производства древесно-угольного брикета | 105 |
| 30 | Принципиальная схема установки аэродинамической сушилки – измельчителя – «коллайдера» | 107 |
| 31 | Узел возврата материала — разделения потоков | 108 |
| 32 | Тележка (выемное устройство) для перемещения древесных брикетов в камеру карбонизации | 109 |
| 33 | Принципиальная схема установки для получения древесного угля | 111 |

СПИСОК ТАБЛИЦ

| № таблицы | Название | Стр. |
|--------------|--|------|
| 1 | Изменение глобального производства и глобальной торговли лесной продукцией в 1980–2017 годах (по данным ФАО ООН [10]) | 10 |
| 2 | Части типичного заготовленного дерева | 11 |
| 3 | Влияние температуры обжига на выход угля и его состав | 42 |
| 4 | Экспорт в РФ и импорт из РФ древесного угля в 2018–2019 гг. | 44 |
| 5 | Элементарный состав и теплотворная способность древесных углей | 46 |
| 6 | Взаимосвязь между температурой стеклования T_c и адгезионными свойствами, характеризуемыми температурой сцепления T_b , различных препаратов лигнина, в сухом и мокром состоянии | 56 |
| 7 | Средняя молекулярная масса и степень полидисперсности препаратов лигнина механического размола (ЛМР) | 58 |
| 8 | Зависимость составляющих компонент заданной деформации у образцов древесины лиственницы от продолжительности действия нагрузки | 76 |
| 9 | Содержание углерода и кислорода в древесном и древесно-угольном брикете (по данным спектрального анализа при электронно-микроскопических исследованиях) | 100 |
| 10 | Эксплуатационные (потребительские) свойства готовой продукции и их сравнение с другими видами топлива | 113 |
| 11 | Теплофизические характеристики топливных брикетов | 114 |
| 12 | Сводная таблица показателей базисной плотности образцов | – |
| 13 | Показатели прочности образцов древесного угля | 115 |

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прогноз развития лесного сектора Российской Федерации до 2030 года [электронный ресурс] // Продовольственная и сельскохозяйственная организация объединенных наций. Рим, 2012. – 96 с. Режим доступа: <http://www.fao.org/3/i3020r/i3020r00.pdf>. (Дата обращения 04.02.2020).
2. Hansen, E. The Global Forest Sector: Changes, Practices and Prospects [Text] // E. Hansen, R. Panwar, R. Vlosky. – NY: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017. – 462 p.
3. Forest Products Annual Market Review 2018–2019 [электронный ресурс] / Forestry and Timber – UNECE, 2019. – 151 p. Режим доступа: <https://www.unece.org/forests/areas-of-work/forestsfpamr/forestsfpamr2019.html>. (Дата обращения 04.02.2020).
4. Ежегодный обзор рынка лесных товаров, 2017-2018 годы [электронный ресурс] // FAO/ЕЭК ООН, 2019. – 177 p. Режим доступа: <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/timber/publications/SP46Rsmall.pdf>. (Дата обращения 04.02.2020).
5. Аким, Э. Л. Биорефайнинг древесины / Э. Л. Аким // Химические волокна, 2016. – № 3. – С. 14–18.
6. Инновационные технологии в российском лесном секторе – путь к «зеленой» экономике. Innovative Technology in the Russian Forest Sector – The Way to the Green Economy [электронный ресурс] // Европейская экономическая комиссия, Организация Объединенных Наций. – Нью-Йорк и Женева, 2012. Режим доступа: https://www.un-ilibrary.org/environment-and-climate-change/innovative-technology-in-the-russian-forest-sector-the-way-to-the-green-economy_670777d8-en-ru. (Дата обращения 04.02.2020).
7. Пат. 2596683 Российская Федерация, МПК F 26 В 20/00, F 26 В 17/10, F 26 В 3/10. Комплекс для непрерывной термообработки твердых мелких частиц, преимущественно дисперсных древесных материалов, и способы термообработки, реализуемые с помощью данного комплекса / Пекарец А. А.; патентообладатель

Общество с ограниченной ответственностью «Прометей» (ООО «Прометей» (RU). – № 2015117200/06; заявл. 05.05.2015; опубл. 10.09.2016, Бюл. № 25.

8. Пат. 2628602 Российская Федерация, МПК С 10 В 53/02. Устройство для получения древесного угля / Пекарец А. А.; патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Прометей» (RU). – № 2016131150. заявл. 27.07.2016; опубл. 21.08.2017, Бюл. № 24.

9. Пат. 2653513 Российская Федерация, МПК С 10 L 5/44, С 10 L 5/40. Высококалорийные топливные брикеты из композиционного материала на основе древесных отходов (варианты) / Пекарец А. А.; патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Прометей» (RU). – № 2017124819. заявл. 11.07.2017; опубл. 10.05.2018, Бюл. № 13.

10. Пат. 2678089 Российская Федерация, МПК С 10 L 5/44, С 10 В 47/28, С 10 В 49/02, В 09 В 3/00. Промышленный комплекс для производства древесного угля безотходным способом низкотемпературного пиролиза из брикетированных древесных отходов / Пекарец А. А.; патентообладатель: Общество с ограниченной ответственностью «Прометей» (RU). – № 2018104615. заявл. 06.02.2018; опубл. 23.01.2019, Бюл. № 3.

11. Pekaretz A.A. Innovative technology for the production of charcoal briquettes in the Russian Federation [электронный ресурс] / Forêt2019 - Joint 77th Session of the ECE Committee on Forests and Forestry (COFFI) and 40th Session of the FAO European Forestry Commission (EFC). Switzerland, Geneva, Palais des Nations, November 4–7. Режим доступа: <http://www.unece.org/fileadmin/DAM/timber/meetings/2019/20191104/3-f-market-discussions-akim-pekaretz.pdf>. (Дата обращения 05.02.2020).

12. Мандре, Ю. Г. Карбонизация и торрефикация древесины / Ю. Г. Мандре, Э. Л. Аким, А. А. Пекарец // Леса России: политика, промышленность, наука, образование; материалы конференции / ГЛТУ им. С.М. Кирова. – Санкт-Петербург, 2018. – Т. 2. – С. 109–111. ISBN 978-5-9239-1037-7.

13. Пекарец, А. А. Создание технологии получения топливных и угольных брикетов из опилок древесины лиственницы / А. А. Пекарец, Э. Л. Аким

// Леса России: политика, промышленность, наука, образование / материалы конференции / ГЛТУ им. С.М. Кирова. – Санкт-Петербург, 2019. – Т. 2. С. 117–119. ISBN 978-5-9239-1037-7.

14. Смородин, С. Н. Теплотехнический анализ биотоплива как основа разработки технологических рекомендаций / С. Н. Смородин, О. С. Смирнова, А. А. Пекарец, Д. Ю. Уварова, Ю. Г. Мандре, Н. Я. Рассказова, Э. Л. Аким // Леса России: политика, промышленность, наука, образование / материалы конференции / ГЛТУ им. С.М. Кирова. – Санкт-Петербург, 2019. – Т. 2. С. 132–133. ISBN 978-5-9239-1037-7.

15. Пекарец, А. А. Опилки древесины лиственницы как сырье для биорефайнинга / А. А. Пекарец, Н. В. Виноградов, В. Н. Дасаев, Ю. Г. Мандре, Э. Л. Аким // Тезисы докладов IV Международной научной конференции «Современные тенденции развития химии и технологии полимерных материалов» / СПбГУПТД. – Санкт-Петербург, 2018. – С. 69–71. ISBN 978-5-7937-1621-5.

16. Pekaretz, A. A. Biorefining of larch sawdust producing wood and wood-charcoal briquettes: scientific and technological aspects. / A. A. Pekaretz, Y. G. Mandre, N. V. Vinogradov // Materialy EUBCE 2019 — Papers of the 27th European Biomass Conference and Exhibition. Lisbon, 2019, May 27–30. – P. 1887–1889.

17. Аким, Э. Л. Изменение релаксационного состояния полимерных компонентов древесины при проведении ее высокотемпературного биорефайнинга / Э. Л. Аким, Ю. Г. Мандре, А. А. Пекарец // Химические волокна. – 2019. – № 3. – С. 14–18. URL: <https://doi.org/10.1007/s10692-019-10067-8>.

18. Пекарец, А. А. Роль упруго-релаксационных свойств при получении древесных и древесно-угольных брикетов / А. А. Пекарец, О. А. Ерохина, В. В. Новожилов, Ю. Г. Мандре, Э. Л. Аким // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – №1. – 2020. – Архангельск: изд-во САФУ им. М.В. Ломоносова. – С. 200–209. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2020.1.

19. Akim, E. L. Change in Relaxation State of Polymer Components of Wood During its High-Temperature Biorefining / E. L. Akim, Y. G. Mandre, A. A. Pekaretz //

Fibre Chemistry. – 2019. Vol. 51. – № 3. – P. 164–169. URL: <https://doi.org/10.1007/s10692-019-10067-8>.

20. Пекарец А. А. Инновационное производство древесно-угольных брикетов — биококса [электронный ресурс] // Биотопливный конгресс. – Санкт-Петербург, 20.03.2018. Режим доступа: https://lesprominform.ru/uploads/jarchive/biotoplivo_pilomateriali/%D0%9F%D0%B5%D0%BA%D0%B0%D1%80%D0%B5%D1%86.pdf (Дата обращения 29.02.2020).

21. Пекарец, А. А. Направленное изменение релаксационного состояния полимерных компонентов древесины при биорефайнинге опилок лиственницы / А. А. Пекарец, Н. В. Виноградов, Ю. Г. Мандре, Э. Л. Аким // Физикохимия растительных полимеров: материалы VIII международной конференции. – Архангельск: САФУ им. М.В. Ломоносова, 2019. – С. 105-109. ISBN 978-5-261-01 394-5.

22. Пекарец, А. А. Изучение упруго-релаксационных свойств древесины лиственницы и их роли при получении древесных брикетов / А. А. Пекарец, О. А. Ерохина, В. В. Новожилов, С. В. Хоробрых, А. А. Таразанов, Ю. Г. Мандре, Э. Л. Аким // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: материалы V международной научно-технической конференции, посвященной памяти профессора В.И. Комарова. – Архангельск: САФУ им. М. В. Ломоносова, 2019. – С. 278–283. ISBN 978-5-60423336-6-5.

23. Древесина как источник энергии в регионе ЕЭК ООН: данные, тенденции и перспективы в Европе, Содружестве Независимых Государств и Северной Америке [электронный ресурс] // FAO/ЕЭК ООН. – Нью-Йорк и Женева, 2018. – 111 р. / Режим доступа: <https://www.unesc.org/fileadmin/DAM/timber/publications/SP-42-R.pdf>. (Дата обращения 06.02.2020).

24. Forest products 2017 [электронный ресурс] / FAO Statistics. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, 2019. – 436 р. ISBN 978-92-5-131717-4. ISSN 1020-458X. Режим доступа: <http://www.fao.org/3/ca5703m/ca5703m.pdf>. (Дата обращения 06.02.2020).

25. Древесный уголь: переход к эффективному производству. Резюме [электронный ресурс] / Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций, 2017. Rome, Italy. – 12 с. Режим доступа: <http://www.fao.org/3/a-i6934r.pdf>. (Дата обращения 06.02.2020).

26. The charcoal transition: greening the charcoal value chain to mitigate climate change and improve local livelihoods, by J. van Dam [электронный ресурс] / Food and agriculture organization of the united nations. – Rome, 2017. – 184 p. Режим доступа: <http://www.fao.org/3/a-i6935e.pdf>. (Дата обращения 06.02.2020).

27. Справка Секретариата к Европейской Неделе Леса — международной конференции Forêt 2019, ООН, 4–7 ноября 2019, Женева, UN.

28. Wertz, J.-L. Hemicelluloses and Lignin in Biorefineries [электронный ресурс] / J.-L. Wertz, M. Deleu, S. Coppée, A. Richel // CRC Press. Taylor & Francis Group, 2018. – 308 p. Режим доступа: <https://www.crcpress.com/Hemicelluloses-and-Lignin-in-Biorefineries/Wertz-Deleu-Coppée-Richel/p/book/9781138720985#googlePreviewContainer>. (Дата обращения 06.02.2020).

29. Strategic Research and Innovation. Agenda 2030 of the European Forest-based Sector [электронный ресурс] / The Forest-based Sector Technology Platform (FTP). – 52 p. Режим доступа: http://new-www.forestplatform.org/system/attachments/files/000/000/692/original/SIRA_2030.pdf?1574846949 (Дата обращения 24.02.2020).

30. Руководство по наилучшей практике эффективной дегазации источников метановыделения и утилизации метана на угольных шахтах [электронный ресурс] // Серия публикаций ЕЭК по энергетике, № 47. – ЕЭК ООН. – Второе издание, декабрь 2016. – 134 с. Режим доступа: https://www.unece.org/fileadmin/DAM/energy/images/CMM/CMM_CE/Russian_Version_full_-_Final.pdf. (Дата обращения 8.02.2020).

31. BP Statistical Review of World Energy [электронный ресурс] / 2017, June. – 66th edition. – 52 p. Режим доступа: <https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/pdf-actualites/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf> (Дата обращения 24.02.2020).

32. Sasatani, D. Biofuels Annual. Country: Japan. Post: Tokyo [электронный ресурс] / D. Sasatani, M. Rakhovskaya. United States Department of Agriculture (USDA). Foreign Agricultural Service. – 2019, Nov, 6 – 23 p. Режим доступа: https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Biofuels%20Annual_Tokyo_Japan_10-28-2019 (Дата обращения 24.02.2020).

33. Три европейские страны в 2019 году побили рекорды по ВИЭ [электронный ресурс] / Режим доступа: https://www.c-o-k.ru/market_news/tri-evropeyskie-strany-v-2019-godu-pobili-rekordy-po-vie. (Дата обращения 24.02.2020).

34. Enabling a zero carbon lower cost energy future [электронный ресурс] / Drax Group plc. Annual report and accounts 2018. – 196 p. // Режим доступа: <https://www.drax.com/wp-content/uploads/2019/03/Drax-Annual-report-accounts-2018.pdf>. (Дата обращения 24.02.2020).

35. Германия отказывается от угля [электронный ресурс] / Режим доступа: https://www.c-o-k.ru/market_news/germaniya-otkazyvaetsya-ot-uglya. (Дата обращения 24.02.2020).

36. Strauss, W. and Walker, S. Global pellet market outlook in 2018 [электронный ресурс] / Canadian Biomass. Режим доступа: <https://www.canadianbiomassmagazine.ca/increasing-demand-6705/>. (Дата обращения 09.02.2020).

37. Full Report [электронный ресурс] // АЕБИОМ Statistical Report 2017. European Bioenergy Outlook / European Biomass Association (АЕБИОМ), 2017. – 264 p. Режим доступа: <http://www.aebiom.org/wp-content/uploads/2017/10/FINAL-AEBIOM-2017-STATISTICAL-REPORT.pdf>. (Дата обращения 09.02.2020).

38. Forest Energy Monitor [электронный ресурс] // Hawkins Wright. Режим доступа: <https://www.hawkinswright.com/bioenergy/forest-energy-monitor>. (Дата обращения 09.02.2020).

39. Tovey-Fall, L. Exploring the changing global supply and demand dynamics of industrial pellets [электронный ресурс] / Argus Biomass, London, 2018. - 45 pp. Режим доступа: http://www.biokuras.lt/content_images

/failai%20naujienoms/Argus,%20Laura%20Tovey-Fall%20-%20Argus%20Biomass%202018.pdf. (Дата обращения 10.02.2020).

40. Glavonjić, B.D., Krajnc, N., Hubert, P. Development of Wood Pellets Market in South East Europe [электронный ресурс] // Thermal Science: Year 2015, Vol. 19, №3, pp. 781–792 / Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/276126230_Development_of_wood_pellets_market_in_South_East_Europe; 5th International Bioenergy Conference in Western Balkans. Development of Wood Biomass. 25th April 2018, Belgrade. Режим доступа: <http://renexpo-belgrade.com/en/conference/conference-program/bioenergy-conference/>. (Дата обращения 10.02.2020).

41. Eurostat, 2018 [электронный ресурс] / International trade, EU trade since 1988 by HS6. Product 440131. Режим доступа: <http://ec.europa.eu/eurostat/web/international-trade-in-goods/data/database> Eurostat. (Дата обращения 10.02.2020).

42. Росстат, 2018 [электронный ресурс] / Показатели торговли Российской Федерации. Федеральная служба государственной статистики (Росстат). Режим доступа: www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/en/main. (Дата обращения 11.02.2020).

43. IEA Statistics, 2018 [электронный ресурс] / International Energy Agency: Statistics. Режим доступа: <http://www.iea.org/statistics/>. (Дата обращения 11.02.2020).

44. Statistics Canada [электронный ресурс] / Режим доступа: <https://www.statcan.gc.ca/eng/start>. (Дата обращения 24.02.2020).

45. Forest Products Market [электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.unece.org/forests/fpm/%20onlinedata>. Продовольственная и сельскохозяйственная организация объединенных наций (FAO of the UN) [электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.fao.org/news/archive/news-by-date/2018/ru/>. (Дата обращения 24.02.2020). Ежегодный обзор рынка лесных товаров, 2016–2017 годы [электронный ресурс] /FAO, ЕЭК ООН,

2017. – 188 с. / Режим доступа: <https://www.unecse.org/fileadmin/DAM/timber/publications/FPAMR2017RUS.pdf>. (Дата обращения 24.02.2020).

46. US Department of Energy, 2018 [электронный ресурс] / Monthly energy review tables 10a, 10b, 10c. Renewable energy consumption by sector. Режим доступа: <https://www.eia.gov/totalenergy/data/monthly/>. (Дата обращения 24.02.2020).

47. US Department of Energy, 2018 [электронный ресурс] / Densified biomass report. EIA 63С. Режим доступа: <https://www.eia.gov/biofuels/biomass/>. (Дата обращения 22.02.2020).

48. Canadian Biomass Magazine, 2018 [электронный ресурс] / Режим доступа: <https://www.canadianbiomassmagazine.ca/top-10-canadian-biomass-articles-from-2018-7171/>. (Дата обращения 22.02.2020).

49. Statistics Canada 2018. Consumption of solid wood waste and spent pulping liquor for energy production. CANSIM Table 128-0018 [электронный ресурс] / Режим доступа: <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tb11/en/tv.action?pid=2510003101>. (Дата обращения 22.02.2020).

50. Strauss, W. and Walker, S. 2018. Global pellet market outlook in 2018. Режим доступа: <https://www.canadianbiomassmagazine.ca/increasing-demand-6705/>(Дата обращения 22.02.2020).

51. US International Trade Commission, 2018 [электронный ресурс] / US exports to all OECD countries. HS code 440131 / Режим доступа: <https://www.usitc.gov/> (Дата обращения 22.02.2020) / Режим доступа: <https://www.flexport.com/data/hs-code/440131-wood-pellets>. (Дата обращения 22.02.2020).

52. Exportcenter, 2018 [электронный ресурс] / Режим доступа: https://www.exportcenter.ru/services/subsidirovanie/kompensatsiya_chasti_zatrat_na_transportirovku_produktsii_/kompensatsiya_chasti_zatrat_na_transportirovku_produktsii/ (Дата обращения 22.02.2020).

53. Ильяс Юсипов. Интервью соучредителя Enviva Томаса Мета [текст] / Лесная индустрия. – 2019. – № 10 (138). – С. 38-41. www.lesindustry.ru

54. US Environmental Protection Agency, 2018, Apr. 26

[электронный ресурс] / Режим доступа: <https://ajph.aphapublications.org/doi/10.2105/AJPH.2018.304360> (Дата обращения 22.02.2020).

55. Электронный ресурс / Режим доступа: http://biomassmagazine.com/uploads/posts/web/2019/12/resize/PinnacleDemopolis_15768769748132-300x300-поур.jpg. (Дата обращения 22.02.2020).

56. Biocoal partnership to build global operation [электронный ресурс] / Bioenergy Insight, 2018, Apr. 19. Режим доступа: <https://www.bioenergy-news.com/news/biocoal-partnership-to-build-global-operation/>. (Дата обращения 13.02.2020)

57. Уголь / Большая энциклопедия: Словарь общедоступных сведений по всем отраслям знания в 20 т. // под редакцией С. Н. Южакова. – М.: Просвещение, 1905. – Т. 18. – С. 732-734.

58. РАО «Бумпром» и ООО «Бумпром». Отчет за 2018 год и за 6 мес. 2019 года. Москва. 19 апреля 2018 г. [электронный ресурс] / Бумпром.ру: Режим доступа: http://bumprom.ru/index.php?ids=272&sub_id=27018. (Дата обращения 13.02.2020).

59. Никитин, Н. И. Химия древесины и целлюлозы / Н. И. Никитин. – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1962. – 711 с.

60. Научные основы химической технологии углеводов / монография под ред. А. Г. Захарова // М.: ЛКИ, 2008. – Гл. 7. – С. 265–348. ISBN 978-5-382-00622-2.

61. Akim, E. L. Interaction of Cellulose and other polysaccharides with water systems / E. L. Akim edited by G. E. Zaikov // Chemistry of polysaccharides. – Leiden: VSP – Brill, 2005. – P. 221–293.

62. Виноградов, Н. В. Компрессионные свойства древесины лиственницы как основа отжимной технологии извлечения арабиногалактана: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.03 / Виноградов Никита Викторович. – СПб, 2019. – 16 с.

63. Голубев, В. А. Обоснование и совершенствование способов энергетического использования растительных отходов: автореф. дис. ... канд.

техн. наук: 01.04.14; 05.14.14 / Голубев Вадим Алексеевич. – Барнаул, 2014. – 16 с.

64. Кашин, Е. М. Разработка газогенераторов роторного исполнения для древесного топлива: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.03 / Кашин Евгений Михайлович. – Казань, 2019. – 16 с.

65. Лесная биоэнергетика: учебное пособие для студентов вузов / под общ. ред. Ю.П. Семенова. М.: МГУЛ, 2008. – 348 с.

66. Любов, В. К. Совершенствование топливно-энергетического комплекса путем повышения эффективности сжигания топлив и вовлечения в энергетический баланс отходов переработки биомассы и местного топлива: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.04 / Любов Виктор Константинович. – Архангельск, 2004. – 44 с.

67. Марьяндышев, П. А. Совершенствование технологии энергетического использования древесного биотоплива: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.04 / Марьяндышев Павел Андреевич. – Архангельск, 2015. – 16 с.

68. Марьяндышев, П. А. Теплоэнергетические основы использования древесного биотоплива: дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.04 / Марьяндышев Павел Андреевич. – Архангельск, 2019. – 198 с.

69. Миллер, О. Д. Математическое моделирование процесса формирования древесных гранул / О. Д. Миллер, В. И. Мелехов, В. К. Любов, Т. В. Тюрикова // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2015. – №2. – С. 104–122.

70. Попова, Е. И. Совершенствование технологии торрефикации вторичных древесных ресурсов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.04 / Попова Евгения Игоревна. – Архангельск, 2018. – 24 с.

71. Бенин, А. А. Рациональное использование ресурсов на основе производственных комплексов по переработке твердых горючих отходов добывающих отраслей Северо-Западного региона: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.22 / Бенин Андрей Александрович. – СПб., 2003. – 322 с.

72. Аким, Э. Л. Роль релаксационного состояния полимерных компонентов древесины при получении композиционных материалов упаковочного назначения (гофрокартона) / Э. Л. Аким, А. С. Смолин // Химические волокна. – 2018. – №3. – С. 16–21.

73. Горинг, Д. Полимерные свойства лигнина и его производных / Д. Горинг // В кн.: Лигнины (структура, свойства и реакции) под ред. К. В. Сарканена и К. Х. Людвиг. – М., 1975. – С. 496–554.

74. Боголицын, К. Г. Физическая химия лигнина: монография / К. Г. Боголицын и др.; под ред. К. Г. Боголицына и В. В. Лунина. – Архангельск: Архангельский гос. технический ун-т, 2009. – 489 с.: ил.; табл.; 21 см.; ISBN 978-5-261-00433-2.

75. Физическая химия лигнина : монография / В. В. Лунин и др. – М.: Академкнига, 2010. – 489 с. ISBN 978-594908-633-9.

76. Сазонов, Ю. Н. Лигнин – прекурсор углеродных материалов / Ю. Н. Сазонов // Вестник Тверского гос. ун-та. Серия: Химия. – 2017. – № 2. – С. 96–116. – ISSN 1995-0152.

77. Роговина, С. З. Химическая модификация природных полисахаридов целлюлозы, хитина и хитозана в твердой фазе под действием сдвиговых деформаций: дис. ... д-ра хим. наук: 02.00.06 / Роговина Светлана Захаровна. – М., 2003. – 232 с.

78. Роговина, С. З. Биоразлагаемые полимерные композиции на основе синтетических и природных полимеров различных классов / С. З. Роговина // Высокомолекулярные соединения. Серия С. – Т. 58. – № 1. – 2016. – С. 68–80.

79. Walter V. Reid, Mariam K. Ali, Christopher B. Budushcheye bioenergetiki (The future of bioenergy) [электронный ресурс] / Wile Internet-biblioteka (Wiley Online Library) // zhurnal: Biologiya global'nykh izmeneniy (Global Change Biology). Vol. 26, i. 1. January 2020. – P. 274–286. Режим доступа: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/gcb.14883>. (Дата обращения 14.02.2020).

80. Бучельникова, Я. В. Особенности использования осинового древесины при производстве химико-термомеханической массы: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.03 / Бучельникова Яна Владимировна. – СПб, 2011.– 16 с.

81. Аким, Э. Л. Проект «Лиственница». Программно-аппаратный комплекс для изучения свойств древесины лиственницы / Э. Л. Аким, М. В. Коваленко, Н. Я. Рассказова, В. В. Васильев, О. А. Ерохина, Я. В. Бучельникова, Ю. Г. Мандре // Целлюлоза. Бумага. Картон. – 2011. – № 5. – С. 24–28.

82. Оболенская, А. В. Практические работы по химии древесины и целлюлозы / А. В. Оболенская, В. П. Щеголев, Г. Л. Аким – М.: Лесная промышленность, 1965. – 411 с.

83. Берлин, А. А. Прочность природных и искусственных материалов / А. А. Берлин // Науч.-просветит. журн. НБИКС (нано, био, инфо, когно, социо) – Наука. Технологии. – 2019. – № 3. – С. 26–28.

84. Аким, Э. Л. Усталостная прочность древесины и релаксационное состояние ее полимерных компонентов / Э. Л. Аким, С. З. Роговина, А. А. Берлин. Доклады академии наук. – 2020. Изд-во РАН. (В печати).

85. Тагер, А. А. Физико-химия полимеров / А. А. Тагер; под ред. А. А. Аскадского. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Научный мир, 2007. – 576 с.

86. Кипарисов, С. С. Оборудование предприятий порошковой металлургии : учебник для вузов / С. С. Кипарисов, О. В. Падалко. – М.: Металлургия, 1988. – 488 с.

87. Аким, Э. Л. Обработка бумаги (Основы химии и технологии обработки и переработки бумаги и картона) / Э. Л. Аким. – М.: Лесная промышленность, 1979. – 232 с.: ил.; 22 см.

88. Аким, Э. Л. Синтетические полимеры в бумажной промышленности / Э. Л. Аким. – М.: Лесная промышленность, 1986 г. – 246 с.: ил.; 22 см.

89. Постникова, И. В. Струйные мельницы / И. В. Постникова, В. Н. Блиничев, Я. Кравчик // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение №2 (42). – 2015. – С. 144–151.

90. Акунов, В. И. Струйные мельницы / В. И. Акунов. – М: Машиностроение, 1967. – 263 с.
91. Папков, С. П. Физико-химические основы переработки растворов полимеров / С. П. Папков. – М: Химия, 1971. – 362 с.: ил.
92. Папков, С. П. Физико-химические основы производства искусственных и синтетических волокон / С. П. Папков. – М.: Химия, 1972. – 312 с.
93. Папков, С. П. Студнеобразное состояние полимеров / С. П. Папков. – М.: Химия, 1974. – 374 с.
94. Папков, С. П. Взаимодействие целлюлозы и целлюлозных материалов с водой / С. П. Папков, Э. З. Файнберг // М.: Химия, 1976. – 232 с.
95. Папков, С. П. Жидкокристаллическое состояние полимеров / С. П. Папков, В. Г. Куличихин // М.: Химия, 1977. – 246 с.
96. Ельяшевич, Г. К. Ориентационные явления в растворах и расплавах полимеров / Г. К. Ельяшевич, А. Я. Малкин, С. П. Папков // М.: Химия, 1980. – 303 с.
97. Папков, С. П. Равновесие фаз в системе полимер – растворитель / С. П. Папков. – М.: Химия, 1981. – 272 с.
98. Козлов, П. В. Физико-химические основы пластификации полимеров / П. В. Козлов, С. П. Папков // М.: Химия, 1982. – 224 с.
99. Папков, С. П. Теоретические основы производства химических волокон / С. П. Папков. – М.: Химия, 1990. – 272 с.
100. Брагинский, Г. И. Технология основы кинофотопленок и магнитных лент / Г. И. Брагинский, С. К. Кудрна. – Изд-во: Химия. Ленинградское отделение. 1970. – 376 с., 43 табл., 105 рис.
101. Технология целлюлозно-бумажного производства: справочные материалы в 3-х томах / Всеросс. науч.-исслед. ин-т целлюлоз.-бумаж. пром-сти (ВНИИБ); Редкол.: Осипов П.С. и др. СПб.: С.-Петербург. гос. лесотехн. акад. (СПб ЛТА), 2002 –Ч. 1). – 2002. – 420, [6] с.: ил., табл.
- Т. 1, Ч. 2: Сырье и производство полуфабрикатов. Ч. 2. Производство

- полуфабрикатов. – 2003 (Петрозаводск : ГП Тип. им. П.Ф. Анохина). – 633 с.: ил., табл.; ISBN 5-7325-0708-6
- Т. 1, Ч. 3: Сырье и производство полуфабрикатов. Ч. 3. Производство полуфабрикатов. – 2004 (Петрозаводск : ГП Тип. им. П.Ф. Анохина). – 316 с.: ил., табл.; ISBN 5-7325-0821-X (с)
- Т. 2, ч. 1: Производство бумаги и картона. ч. 1. Технология производства и обработки бумаги и картона / [В.И. Комаров и др.]. – 2005 (Петрозаводск: ГП Тип. им. П.Ф. Анохина). – 423 с.: ил., табл.; ISBN 5-7325-0855-4 (с)
- Т. 2, ч. 2: Производство бумаги и картона. Ч. 2. Основные виды и свойства бумаги, картона, фибры и древесных плит / [М. А. Остреров и др.]. – 2006. – 499 с.: ил., табл.; ISBN 5-7325-0878-3
- Т. 3, ч. 1: Автоматизация, стандартизация, экономика и охрана окружающей среды в ЦБП, ч. 1. Автоматизация, стандартизация и экономика в ЦБП / [В. Г. Харазов и др.]. – 2008. – 621 с.: ил., табл.; ISBN 978-5-7325-0707-2
- Т. 3, Ч. 2: Автоматизация, стандартизация, экономика и охрана окружающей среды в ЦБП, ч. 2.: Охрана окружающей среды и охрана труда в ЦБП. – 2010. – 487 с.: ил., портр., табл.; ISBN 978-5-7325-0951-9
102. Непенин, Ю. Н. Технология целлюлозы : в 3-х т. / Ю. Н. Непенин // Т. 2. Производство сульфатной целлюлозы: учебное пособие для вузов, 2-е изд., перераб. – М.: Лесн. пром-сть, 1990. – 600 с. ISBN 5-7120-0266-3.
103. Роговин, З. А. Химия целлюлозы / З. А. Роговин. – М.: Химия, 1972. – 518 с.
104. Пономарев, Д. А. Термохимия модельных соединений лигнина и их интермедиатов в реакциях гомолитической деструкции: дис. ... д-ра хим. наук: 05.21.03 / Пономарев Дмитрий Андреевич. – СПб, 1997. – 227 с.
105. Пат. 2477346 Российская Федерация, МПК D 21 C 1/06, D 21 C 3/02. Способ получения сульфатной целлюлозы из древесины лиственницы [Текст] / Аким Э. Л., Мандре Ю. Г., Сергеев А. Д., Коваленко М. В.; патентообладатель ОАО «Группа «Илим». – № 2011125617/12; заявл. 23.06.2011; опубл. 10.03.2013, Бюл. № 7.

106. Пат. 2472887 Российская Федерация, МПК D 21 C 1/00, D 21 C 3/02. Способ комплексной переработки древесины лиственницы [Текст] / Аким Э. Л., Мандре Ю. Г., Коваленко М. В., Сергеев А. Д., Мазитов Л. А.; патентообладатель ОАО «Группа «Илим». – № 2011136758/12; заявл. 06.09.2011; опубл. 20.01.2013, Бюл. № 2.

107. Пат. 2472889 Российская Федерация, МПК D 21 C 3/02, D 21 C 1/06. Способ экстракции щепы лиственницы [Текст] / Аким Э. Л., Мандре Ю. Г., Коваленко М. В., Сергеев А. Д., Мазитов Л. А.; патентообладатель ОАО «Группа «Илим». – № 2011136756/12; заявл. 06.09.2011; опубл. 20.01.2013, Бюл. № 2.

108. Пат. 2475576 Российская Федерация, МПК D 21 C 3/02. Способ экстракции щепы лиственницы / Аким Э. Л., Мандре Ю. Г., Коваленко М. В., Сергеев А. Д., Махотина Л. Г., Мазитов Л. А.; патентообладатель ОАО «Группа «Илим». – № 2011136755/12; заявл. 06.09.2011 опубл. 20.02.2013, Бюл. № 5.

109. Мандре, Ю. Г. Предотвращение «отравления» циркуляционных схем в условиях поэтапной реконструкции целлюлозно-бумажных предприятий: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.03 / Ю. Г. Мандре: СПбГТУРП. – Санкт-Петербург, 2007. – 16 с.

110. Аким, Э. Л. Биотопливо и пластиковые отходы — насколько сопоставимы их объемы / Э. Л. Аким, Ю. Г. Мандре, А. А. Пекарец, О. В. Федорова // Сб. материалов XXIII Международного Биос-форума и Молодежной Биос-олимпиады 2019. Книга 1. – Санкт-Петербург, 2019 – Стр. 51–57.

111. Аким, Э. Л. Роль Биорефайнинга древесины при решении проблем «мусорной революции» для мегаполиса Санкт-Петербург и агломерации «Санкт-Петербург – Ленинградская область» / Э. Л. Аким // Сб. материалов XXIII Международного Биос-форума и молодежной Биос-олимпиады 2018. Книга 2. – Санкт-Петербург, 2019. – Стр. 64–67.

112. Partnerstvo po pererabotke plastikovykh otkhodov [Plastic Waste Partnership] [электронный ресурс] / Bazel'skaya konventsiya [Basel Convention],

2019, 29 April. Режим доступа: <http://www.basel.int/Implementation/Plasticwastes/PlasticWastePartnership/tabid/8096/Default.aspx>. (Дата обращения 21.02.2020).

113. Forests and the Circular Economy. Note by the Secretariat. Economic Commission for Europe Food and Agriculture Organization Committee on Forests and the Forest Industry. European Forestry Commission. Seventy-seventh session, Fortieth session, Geneva, 4–7 November 2019.

114. Юрьев, Ю. Л. Древесный уголь: справочник / Ю. Л. Юрьев. – Екатеринбург: Сократ, 2007. – 184 с.

115. Семенов, Ю. П. Лесная биоэнергетика: учебное пособие / под ред. Ю. П. Семенова. – Москва: МГУЛ, 2008. – 348 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Акт об использовании результатов диссертации Пекарца А. А. на соискание ученой степени кандидата технических наук

УТВЕРЖДАЮ:
СПбГУПТД ВШТЭ
Зам. директора по научной работе
В. С. Куров
« 28 » 01 2020 г.

УТВЕРЖДАЮ:
ООО «Лесная
технологическая компания»
Директор
А. Е. Садков
2020 года
Пос. Качуг,
Иркутская обл.

**Акт об использовании результатов диссертации
Пекарца Александра Андреевича
на соискание ученой степени кандидата технических наук**

Настоящий акт подтверждает, что результаты диссертации Пекарца А. А. на соискание ученой степени кандидата технических наук на тему «Технология древесных и древесно-угольных брикетов из опилок древесины лиственницы» по специальности «05.21.03 - технология и оборудование химической переработки биомассы дерева; химия древесины», использованы при создании и эксплуатации технологической линии производства древесных и древесно-угольных брикетов.

Реализованная на заводе ООО «Лесная технологическая компания» технология производства древесных и древесно-угольных брикетов предусматривает производство древесных и древесно-угольных брикетов как топлива, а также как восстановителя при производстве кремния в металлургии.

Технология базируется на четырех патентах РФ, единоличным автором которых является А. А. Пекарец:

1. Пекарец А. А. Пат. RU №2596683. Комплекс для непрерывной термообработки твёрдых мелких частиц, преимущественно дисперсных древесных материалов, и способы термообработки, реализуемые с помощью данного комплекса. Оpubл. 10.09.2016; Бюлл. № 25.
2. Пекарец А. А. Пат. РФ 2628602. Устройство для получения древесного угля. Оpubл. 21.08.2017; Бюлл. № 24.
3. Пекарец А. А. Пат. RU 2653513. Высококалорийные топливные брикеты из композиционного материала на основе древесных отходов (варианты). Оpubл. 10.05.2018; Бюлл. № 13.
4. Пекарец А. А. Пат. RU 2678089. Промышленный комплекс для производства древесного угля безотходным способом низкотемпературного пиролиза из брикетированных древесных отходов. Оpubл. 23.01.2019; Бюлл. № 3.

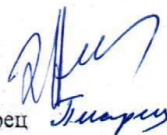
Линия по производству древесно-угольных брикетов, построенная в поселке Качуг Иркутской области, имеет производительность до 2000-3000 т/год и эксплуатируется с 2015 года. Успешная эксплуатация этой линии и большой спрос на ее продукцию на российских и мировых рынках позволили осуществить ее тиражирование (в 2017 г. – п. Лесозаводск, Приморский край; в 2019 г. – г. Братск, две линии; в 2019 г. – Владимирская

область; в 2020 г. (март) – Латвия, Рига) и перейти к серийному производству данных линий на специализированном заводе в Латвии. Производительность линий, в зависимости от комплектации, составляет от 5000 до 20 000 тонн древесного и древесно-угольного брикета в год.

Личный вклад А. А. Пекарца заключался в непосредственном участии во всех этапах работы от рождения идеи, постановки конкретных задач, планирования и выполнения экспериментов, анализа полученных экспериментальных данных, их интерпретации и обобщении, подготовке многочисленных докладов и публикаций, до создания опытно-промышленной и промышленных линий, их пуске, наладке и освоении.

Таким образом, научные результаты, полученные в диссертации, использованы и используются при создании и эксплуатации установки по производству брикетов с целью утилизации отходов производства – древесных опилок, в том числе и старых опилок из многолетних отвалов, и выпуска нового вида продукции - древесных и древесно-угольных брикетов, востребованных на российских и мировых рынках.

От СПбГУПТД
Проф. Э. Л. Аким
Аспирант А. А. Пекарец



От ООО «Лесная технологическая
компания»
Заместитель директора
А. Л. Меренков



Копия благодарственного письма Лесного комитета ЕЭК ООН/ФАО ООН



19 November 2019

“Forêt2019”, the Joint Session of the ECE Committee in Forest and Forest Industries (COFFI) and the FAO European Forestry Commission (EFC)

Dear Mr. Aleksandr Pekaretz,

On behalf of the joint UNECE/FAO Forestry and Timber Section, we would like to express our gratitude to you for the valuable support and contribution to Forêt2019.

Your presentation on “Innovative technology for the production of charcoal briquettes in the Russian Federation” was a great input to the Joint Session. The positive feedback indicates that the information and ideas you presented were well received by the participants. We would be honored if you keep us abreast on the status of your new product, as we are very interested in all aspects of wood energy.

Thank you for your valuable input, time, support and involvement in our work. We look forward to our cooperation in the future.

Yours sincerely,

Paola Deda
Officer-in-Charge
UNECE Forests, Land and Housing
Division

Ekrem Yazici
Deputy Chief
Joint UNECE/FAO Forestry and Timber
Section
UNECE Forests, Land and Housing
Division

Aleksandr Pekaretz
Technical Director
Forest Technology Company (LLC)
Irkutsk
Russian Federation