

*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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург  
2020

Работа выполнена на кафедре Технологии целлюлозы и композиционных материалов ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна»

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

Официальные оппоненты **Алашкевич Юрий Давыдович**  
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой машин и аппаратов промышленной технологии Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева

**Пономарев Дмитрий Андреевич**  
доктор химических наук, профессор, профессор кафедры химии Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета им. С. М. Кирова

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова»

Защита состоится «27» ноября 2020 года в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.236.08 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», по адресу: 198095, г. Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных д. 4, зал заседаний Ученого совета (А-231).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» по адресу: 198095, г. Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных д. 4., <http://sutd.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 198095, г. Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных д. 4.

Автореферат разослан: «    » октября 2020 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Махотина Людмила Герцевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В процессе механической переработки лиственницы образуется большое количество опилок, обычно 10–12 %, которые, как правило, сжигаются или складываются в отвалах. В последние двадцать лет в мире опилки широко применяют для производства твердого биотоплива второго поколения – пеллет и брикетов; их производство в мире превысило в 2019 году 35 млн. тонн; в России их производство превысило 2 млн. тонн в год. При этом, однако, используются, как правило, дорогостоящее зарубежное оборудование и технологии с высокой энергоемкостью. В связи с этим одна из актуальных задач для российской ЛПК – 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» (далее проект «Лиственница»), выполненного в СПбГУПТД по постановлению Правительства РФ №218.

**Цель и задачи исследования.** Целью настоящей работы явилось создание энергосберегающей технологии получения топливных древесных и древесно-угольных брикетов из опилок древесины лиственницы. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Проанализировать существующие методы производства твердого биотоплива второго поколения.
2. Проанализировать особенности строения опилок древесины лиственницы как природного полимерного композиционного материала. 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 и создать опытно-промышленную установку.
4. Исследовать свойства получаемых топливных древесных и древесно-угольных брикетов и определить области их эффективного использования.

**Научная новизна.** Разработана инновационная технология топливных и угольных брикетов из лиственничных опилок, базирующаяся на направленном изменении релаксационных состояний полимерных компонентов древесины за счет совместного действия температуры и паров воды 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 экструдированную систему за счет увлажнения водяным

паром до средней влажности 3–4 %. Установлен факт снижения вязкости в экструдере, за счет совместного воздействия температуры, паров воды и «сжатия – сдвига», с переходом системы к минимальной ньютоновской вязкости и достижением плотности брикета до 1300 кг на кубометр. При выходе из сопла экструдера, благодаря резкому охлаждению, происходит остекловывание поверхности брикета. Впервые установлена возможность осуществления низкотемпературного термостабилизированного пиролиза древесины при 380–450°C в изотермическом карбонизаторе периодического действия, работающем в режиме рекуператора в аэродинамическом циркулирующем потоке.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Впервые показана возможность направленного изменения релаксационного состояния полимерных компонентов древесины (в виде опилок) путем совместного воздействия водяного пара, температуры и физико-механического воздействия. Предложены инновационные, защищенные 4 патентами РФ, 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 Иркутской области. 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, на предприятии INOS (Латвия) по патентам автора начато производство технологических линий по выпуску топливных и угольных брикетов из опилок древесины, позволяющих полностью утилизировать древесные отходы и получать древесные и угольные брикеты для разных потребителей (восстановитель для кремния и металлургии, топливо для барбекю, топливо для каминов). Эту технологию можно считать принципиально новым шагом в развитии производства и использования биотоплива нового поколения.

**Методы исследования.** Все параметры технологии древесных и древесно-угольных брикетов из опилок древесины лиственницы исследовались и отрабатывались на созданной автором опытно-промышленной установке; термостабилизированный пиролиз древесных брикетов осуществляли при температуре 380–450°C. Микроскопические исследования структуры опилок, брикетов, а также воздействия на нее растворителей целлюлозы проводились на Кафедре ТЦКМ на оптическом микроскопе, переведённом на цифровой режим. Там же, для изучения релаксационных состояний полимерных компонентов древесины лиственницы, на установке Instron 1121, оценивались упруго-релаксационные свойства модельных образцов. 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.

**Обоснованность и достоверность** полученных данных и выводов основана на использовании совокупности современных экспериментальных методов. Результаты работы ряда опытно-промышленных и промышленных линий по производству инновационных остеклованных древесных брикетов и древесно-угольных брикетов согласуются с результатами теоретических и экспериментальных исследований древесины лиственницы.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих Российских и Международных конференциях: Конференции «Леса России: политика, промышленность, наука, образование – 2018; 2019». СПбГЛТУ им. С. М. Кирова; Международной научной конференции «Современные тенденции развития химии и технологии полимерных материалов – 2018», СПбГУПТД; Международной научно-практической конференции «Pap-For 2018», г. Санкт-Петербург; Международной научной конференции и выставке – «27-ая Европейская Конференция и выставка по биомассе», 27–30 мая 2019, Лиссабон, Португалия; Восьмой международной конференции: «Физикохимия растительных полимеров». – Архангельск, июль 2019; Пятой международной научно-технической конференции «Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов». – Архангельск, сентябрь, 2019; Международной конференции «Рынки лесных товаров в ЕЭК ООН – копирование глобальных изменений» в рамках Совместной сессии Комитета по лесам и лесной отрасли, Европейской комиссии по лесному хозяйству Организации Объединенных Наций, 4–7 ноября 2019, Дворец Наций, Женева, Швейцария.

Работа выполнена в рамках продолжения комплексного проекта «Лиственница» 2010–2014 гг. (Договор от «07» сентября 2010 г. № 13.G25.31.0014 с Минобрнауки России), как продолжение части научно-исследовательского раздела Проекта.

**Личный вклад автора** заключался в непосредственном участии во всех этапах работы от постановки конкретных задач, планирования и выполнения экспериментов, анализа полученных экспериментальных данных, их интерпретации и обобщении, подготовке докладов и публикаций, до создания опытно-промышленной и промышленных линий, их пуске, наладке и освоении. Он также подтверждается 4 патентами РФ, в которых диссертант является единственным автором.

**Публикации.** По результатам исследований опубликовано 14 печатных работ, в том числе 2 статьи в журналах входящих в перечень утвержденный ВАК, 4 патента РФ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, выводов, списка сокращений и условных обозначений, списка рисунков, списка таблиц, списка используемой литературы (115 наименований). Работа изложена на 117 страницах основного текста, содержит 13 таблиц и 33 рисунка.

**Положения, выносимые на защиту:** Научные основы инновационных методов получения топливных древесных и древесно-угольных брикетов, базирующиеся на направленном изменении релаксационных состояний полимерных компонентов опилок древесины лиственницы; реализация этих основ путем создания технологических линий, защищенных 4 патентами РФ; синтез и анализ технологических схем этих линий; вывод на российские и мировые рынки новых видов твердого биотоплива второго поколения.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулирована цель и задачи исследования, показаны научная новизна и практическая значимость работы. 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.

**В главе 1** приведён обзор литературы: рассмотрены вопросы, связанные с существующими методами производства твердого биотоплива второго поколения. Показано, что производство твердого биотоплива второго поколения бурно развивается, однако базируется на энергоёмких технологиях и отстает от потребностей рынка и скорости формирования древесных отходов. Также проанализированы особенности строения опилок древесины лиственницы как природного полимерного композиционного материала и релаксационного состояния полимерных компонентов древесины. Показано, что физико-химические аспекты высокотемпературного биорефайнинга тесно связаны с направленным изменением релаксационного состояния полимерных компонентов древесины на заключительных стадиях жизненного цикла древесины – переработке опилок в конечную продукцию, брикеты и их использовании.

**В главе 2** приводятся описания объектов и методов исследования. В качестве объектов исследования были взяты опилки древесины лиственницы, как свежие, так и пролежавшие в отвалах длительное время, модельные образцы древесины лиственницы в виде кубиков, остеклованные брикеты, а также угле-древесные (карбонизированные) брикеты на их основе. Все параметры технологии древесных и древесно-угольных брикетов из опилок древесины лиственницы исследовались и отрабатывались на созданной автором опытно-промышленной установке; термостабилизированный пиролиз древесных брикетов осуществляли при температуре 380–450°C, т. е. выше температуры термодеструкции древесины.

Изучение релаксационных состояний полимерных компонентов древесины лиственницы осуществлялось на установке Instron 1121, на которой оценивались упруго-релаксационные свойства модельных образцов. Микроскопическое исследование свежих и старых (из отвалов) опилок древесины лиственницы, анатомического строения древесины лиственницы, исследование древесных и древесно-угольных брикетов проводилось с использованием различных красителей на микроскопе МБИ-6 с цифровой фиксацией и обработкой результатов. Исследование морфологических особенностей, как исходной древесины лиственницы, так и остеклованных древесных брикетов, и древесно-угольных брикетов, проводилось в ИВС РАН на сканирующем электронном микроскопе.

**В главе 3** приводятся научные основы энергосберегающей технологии получения топливных древесных и древесно-угольных брикетов.

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 температуры и пластифицирующего воздействия воды – как в жидком, так и в парообразном виде, а также деформаций «сжатия – сдвига». Она позволяет превратить древесные отходы в древесный и древесно-угольный брикет без использования связующих веществ при минимальном расходе энергии и приемлемых капитальных затратах.

Анализ изменения релаксационного состояния полимерных компонентов древесины на каждой из стадий технологического процесса базируется на концепции об определяющей роли релаксационного состояния полимерных компонентов древесины при осуществлении химических реакций и физико-химических процессов с их участием.

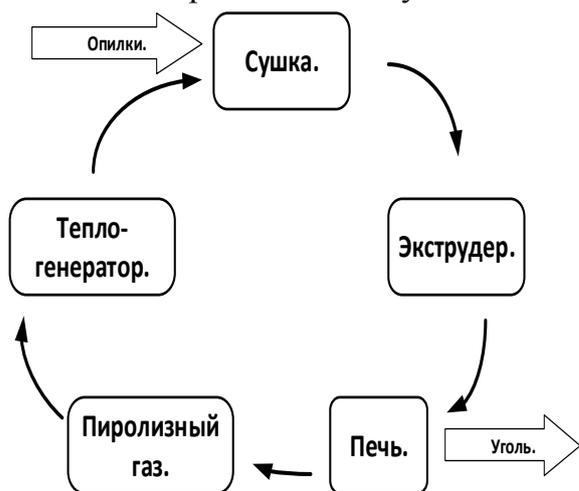


Рисунок 1 – Упрощенная схема производства древесно-угольных брикетов

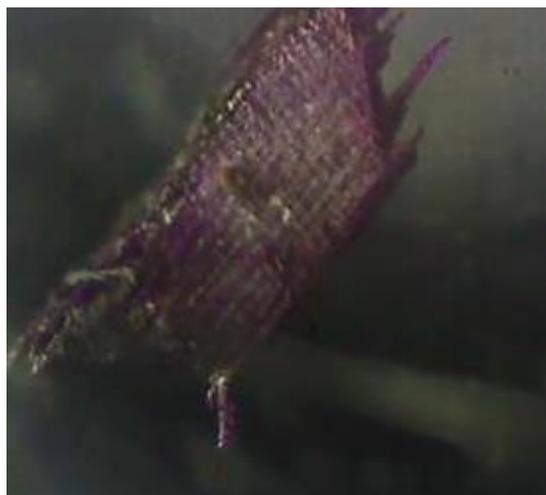


Рисунок 2 – Свежие опилки лиственницы, окрашенные фуксином (x90)

Сырьем для производства брикетов являются опилки древесины, получаемые при производстве пиломатериалов (влажность 30–50 %), а также старые опилки, несколько лет находившиеся в отвалах. Под микроскопом как на свежих (рисунок 2), 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 способный к экструзируемости диспергированный материал. Однако, флюидизация, т. е. превращение твердого вещества в порошок для обработки его как жидкого, требует разрушения древесины до порошкообразного состояния.

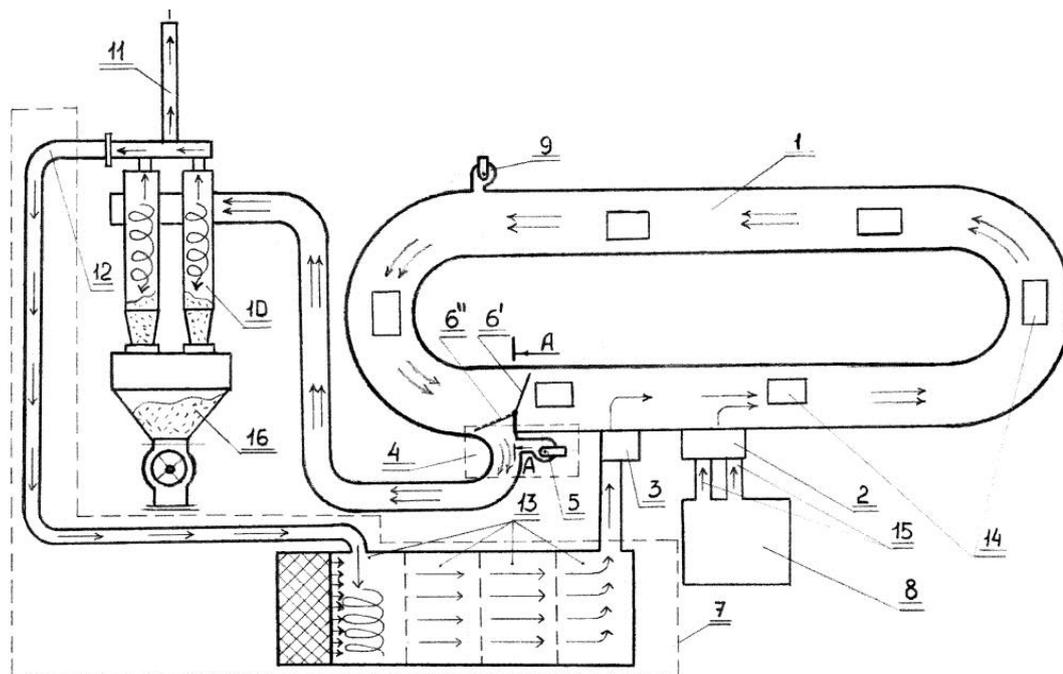


Рисунок 3 – Принципиальная схема установки аэродинамической сушилки – измельчителя – «Коллайдера»: 1 – закольцованный трубный канал камеры пневмо-транспортировки смешанного потока газообразного теплоносителя и твердых мелких частиц; 2 – узел ввода твердых мелких частиц; 3 – узел подачи газообразного 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

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. Первая стадия процесса заключается в измельчении опилок, высушенных до остаточной влажности 1–2 %, до

порошкообразного состояния в кольцевом (50 м в длину, 6 м в ширину) аэродинамическом аппарате (рисунок 3), названном автором диссертации «коллайдером» (от английского слова collide «сталкиваться»). Многократные соударения опилок в турбулентном потоке приводят к хрупкому измельчению опилок, аналогично процессам, происходящим в струйных мельницах. Последующее паровое увлажнение до средней влажности 3–4 % придает древесной системе экструдруемость, то есть возможность перевода системы в экструдере в вынужденное вязкотекучее состояние.

Для анализа возможных механизмов разрушения были проведены исследования упруго-релаксационных свойств древесины лиственницы. С использованием метода одноосного сжатия на модельных кубиках исследовались упруго-релаксационные свойства образцов древесины лиственницы как модели процессов, происходящих при получении из опилок древесных и древесно-угольных брикетов. Анализ типичных кривых «сжатия – разгрузки» в радиальном направлении образцов из древесины лиственницы, изменения плотности во времени после снятия нагрузки, кривых «сжатия – разгрузки» при многократных нагрузках и различных деформациях показало, что их поведение характерно для материалов с высокими упругими и эластическими свойствами. Из представленных на рисунке 4 графиков видно, что образцы древесины лиственницы в радиальном направлении обладают высокими упругими и эластическими свойствами, о чем свидетельствует незначительное увеличение нагрузки с увеличением деформации. Таким образом, проведенные исследования показали, что для древесины лиственницы естественной влажности характерны упруго-релаксационные свойства, типичные для полимерных объектов, находящихся в высокоэластическом состоянии.

В свежеприготовленных древесных опилках полимерные компоненты древесины находятся в разном релаксационном состоянии. Целлюлоза, линейный аморфно-кристаллический полимер, основной полимерный компонент древесины, находится, благодаря содержанию большого количества воды, в высокоэластическом состоянии. 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» – аквакомплекс арабиногалактана).

Соответственно, для измельчения древесных опилок до порошкообразного состояния целесообразен их перевод в хрупкое состояние, т.е. ниже температуры хрупкости, что может быть осуществлено сушкой древесины до минимально-возможной остаточной влажности. Именно такая операция осуществляется в аэродинамической сушилке – измельчителе (рисунок 3) и позволяет осуществить

процесс хрупкого измельчения при минимальном расходе энергии. При направленном изменении влажности опилок на первой стадии от 50 % 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; на второй стадии порошковый материал проходит через экструдер, превращаясь в брикет. 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 микро капсулированными, а жидкий поверхностный слой служит своеобразной «жидкой смазкой» при экструзии, приводя к снижению расхода энергии.

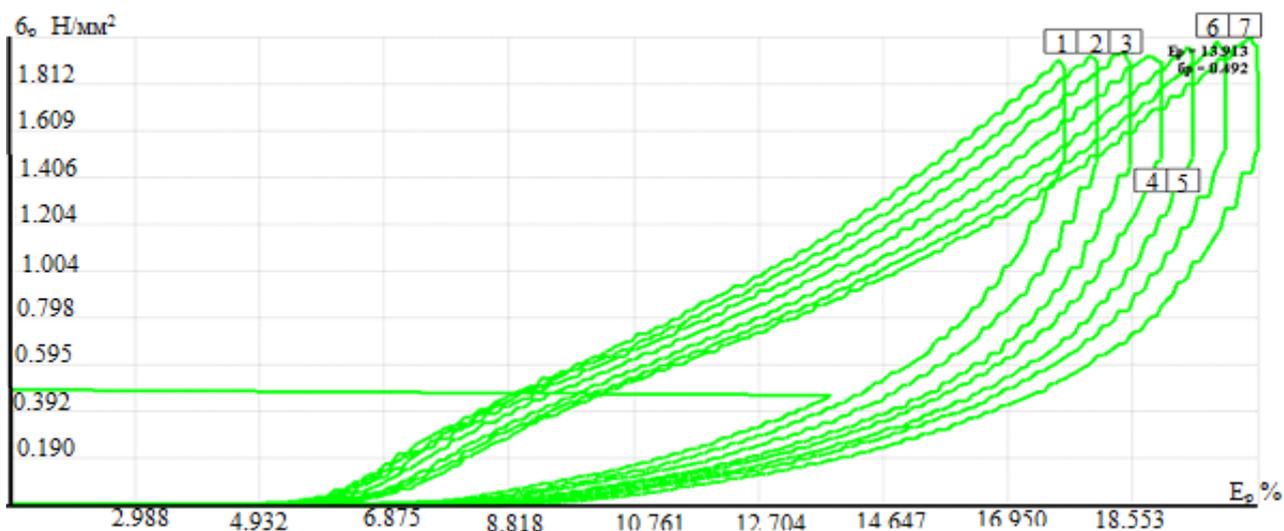


Рисунок 4 – Диаграмма сжатия–разгрузки модельных кубиков древесины лиственницы (1 – 0,1 мм; 2 – 0,2 мм; 3 – 0,3 мм; 4 – 0,4 мм; 5 – 0,5 мм; 6 – 0,6 мм; 7 – 0,7 мм)

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. За счет больших сдвиговых напряжений и высоких температур (до 300 °С) в формирующей головке экструдера (фильере) резко падает вязкость системы, которая переходит от максимальной ньютоновской к минимальной ньютоновской вязкости. Кроме того, за счет образования пиролизных газов и паров воды в формирующей головке экструдера формируется «газовая подушка», резко снижающая коэффициент трения в фильере; производительность экструдера – до 2,5 т/час. 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. Большая плотность полученных брикетов ( $1,3 \text{ т/м}^3$ ) обеспечивает их высокую теплопроводность. С учетом их геометрии и расположения на продуваемых тележках это определяет при карбонизации (рисунок 5) существенное уменьшение градиента температур по толщине брикетов и возможность выдерживания заданной температуры во всем объеме камеры карбонизации.

При карбонизации, осуществляемой в изотермическом регенерационном реакторе 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.

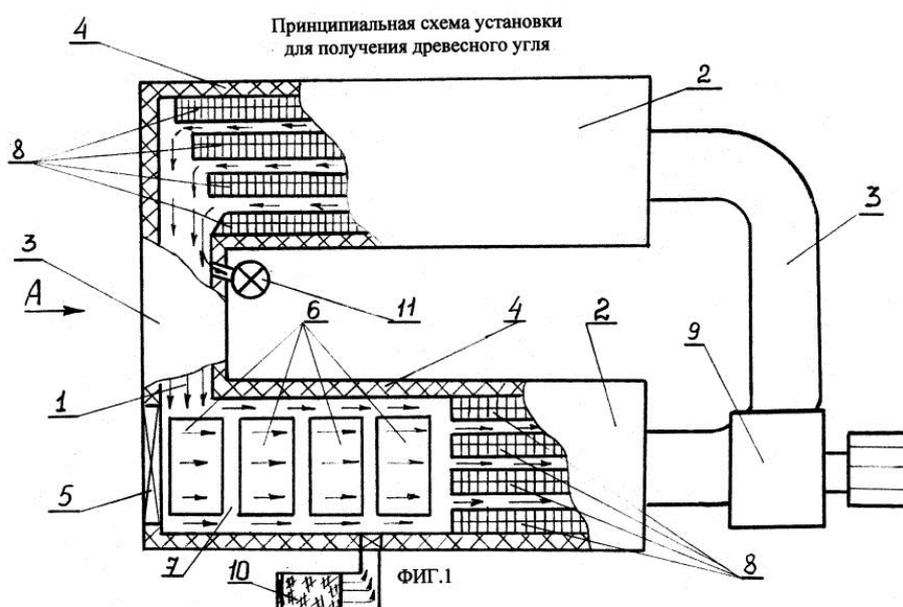


Рисунок 5 – Принципиальная схема установки для получения древесного угля 1 – закольцованный канал, позволяющий циркулировать газовому потоку теплоносителя в режиме повтора полного цикла; 2 – пространственно-термоизолированный корпус, разделенный на две камеры; 3 – соединенная система газоходов; 4 – внутренняя теплоизоляция; 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 выполненный 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

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 принудительная циркуляция пиролизных газов, обеспечивающая пиролиз брикетов при четко заданной температуре, повышенный выход угля, низкое содержание смолы в пиролизных газах, высокая интенсивность работы. Печь работает в циклическом режиме и осуществляет карбонизацию 5 т брикета за 4 ч. 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 содержащиеся в парогазовой смеси пары воды не только пластифицируют полимерные компоненты древесины в процессе пиролиза, но и осуществляют активацию поверхности получаемого угля.

Таким образом, анализ изменения релаксационного состояния полимерных компонентов древесины при проведении ее высоко-температурного биорефайнинга – экструзионного брикетирования и последующей термообработки при температуре 380–450°C, 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.

Реализованная автором на заводе ООО «Лесная технологическая компания» инновационная технология получения из опилок древесины лиственницы топливных и угольных брикетов может рассматриваться как принципиально важный новый шаг в развитии производства и использования новых поколений биотоплива. 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 барбекю, каминное топливо), а с другой, – утилизировать все древесные отходы.

Сравнение исследуемых образцов с другими видами топлива показало, что разработанные брикеты имеют теплотворную способность на 15–20 % выше, чем у существующих видов брикетов и пеллет и составляет для древесных – 19,0 МДж/кг (4500 ккал/кг) и для древесно-угольных брикетов 34,25 МДж/кг (8200 ккал/кг). Удельная объёмная теплотворная способность составляет для древесных брикетов 6100 Мкал/м<sup>3</sup>, а для древесно-угольного брикета – 6540 Мкал/м<sup>3</sup>, причем они не только превосходят по своей калорийности другие виды древесного угля, но и имеют прочность на сжатие в несколько раз выше, чем прочность угля из дальневосточного дуба и дальневосточной березы.

Проведенное микроскопическое исследование избирательного растворения компонентов топливного брикета показало, что в брикете, несмотря на огромную плотность –  $1300 \text{ кг/м}^3$ , сохраняется структура из индивидуальных древесных волокон. Результаты спектрального анализа древесного и древесно-угольного брикетов из опилок древесины лиственницы показали, что в древесном брикете (А) содержание углерода составляет 58%, содержание кислорода – 37 %, содержание примесей – 10 %, а в древесно-угольном брикете (Б) содержание углерода – 85 %, содержание кислорода – 14 %, содержание примесей – 1 %.

**В главе 4** приводится синтез и анализ технологической схемы получения топливных древесных и древесно-угольных брикетов и приведено описание созданной опытно-промышленной, а затем и промышленных линий, их пуска, наладки и освоения. Разработанные научные основы принципиально новой энергосберегающей технологии получения топливных древесных и древесно-угольных брикетов позволили обеспечить патентную защиту новой технологии. 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 (рисунки 1, 3, 5), представляет собой работающий в адиабатическом режиме каскад реакторов, различающихся по гидравлическим (аэродинамическим) режимам, по 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, пиролиз и активацию в циркулирующей парогазовой среде. Линия включает в себя реактора, работающие в режиме «идеального смешения» – аэродинамическая сушка/измельчение (рисунок 3), «идеального вытеснения» – экструзию, и работающую в изотермическом периодическом циклическом режиме с высокоинтенсивной циркуляцией парогазовой фазы регулируемого состава камеру карбонизации (рисунок 5). В случае наличия двух параллельных камер карбонизации при их циклической (периодической) работе обеспечивается непрерывная работа всей технологической линии.

Линия по производству древесно-угольных брикетов, построенная в 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 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., 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.

### **Выводы по диссертационной работе**

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

2. 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 экструдруемое вынужденное пластическое состояние; охлаждение брикета, сформированного в режиме минимальной ньютоновской вязкости, приводит к его остекловыванию. Процесс изотермической карбонизации базируется на тепле экзотермического разложения древесины и сочетании термостабилизированного пиролиза с использованием высоко инерционного регенератора. Благодаря этому обеспечивается работа всей схемы в адиабатическом режиме, автотермичность всего технологического процесса получения древесных и древесно-угольных брикетов.

3. 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.

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 угле-древесных (карбонизированных) брикетов на их основе. Инновационная технологическая линия, представляющая собой каскад реакторов, отличающихся по цикличности работы, тепловым и гидродинамическим режимам, реализована в опытно промышленных масштабах в 2015 году; 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.

## **Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:**

### **Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК**

1. 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 вузов. Лесной журнал. – №1. – 2020. – Архангельск: изд-во САФУ им. М.В. Ломоносова. – С. 200–209. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2020.1.
2. 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>.

### **Патенты Российской Федерации**

3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.

### **Публикации в других научных изданиях и сборниках докладов**

7. 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.

8. 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).

9. 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.

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. 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 978-5-261-01394-5.

14. 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.