



ISSN 1029-5151
ISSN 1029-5143 (online)

ХИМИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

1 • 2021

УДК 676.15:606:66.022.3:577.15

ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ *LARIX SIBIRICA* LEDEB (*PINACEAE*) В ВОЛОКНИСТЫЕ ПОЛУФАБРИКАТЫ ВЫСОКОГО ВЫХОДА

© Д.С. Казымов, Л.Г. Махотина*, А.Б. Никандров, А.Г. Кузнецов, Э.Л. Аким

Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, ул. Ивана Черных, 4, Санкт-Петербург, 198095 (Россия),
e-mail: lusi_makhotina@mail.ru

В Российской Федерации около 40% лесных площадей заняты лиственницей, произрастающей в южных районах Восточной Сибири и Дальнего Востока, где расположены действующие и реконструируемые деревообрабатывающие предприятия. В связи с этим использование древесины лиственницы в производстве волокнистых полуфабрикатов является для российского лесного комплекса актуальной задачей. Как известно, в составе лиственничной древесины находится большое количество экстрактивных веществ, которые оказывают значительное влияние на процесс ее глубокой химической переработки. Поэтому можно предположить, что получение из древесины лиственницы древесной (механической) массы, в частности химико-термомеханической массы (ХТММ), окажется весьма эффективным, но имеющим свои специфические особенности. В данной работе предложено модифицировать технологию за счет применения ферментов – белковых катализаторов различных реакций. Цель данного исследования – определить потенциал применения ферментативной обработки древесины лиственницы в технологии ХТММ, оценить влияние ферментов на физико-механические показатели волокна и удельный расход энергии при размоле. Для получения ХТММ использовали промышленные образцы щепы древесины *Larix sibirica* Ledeb (*Pinaceae*). Для обработки щепы применяли пять коммерчески доступных на рынке ферментных препаратов. ХТММ получали на лабораторном оборудовании, моделирующем промышленные этапы производства. Ферментативная обработка древесины лиственницы показала улучшение технологических параметров производства ХТММ, а именно снижение удельного расхода энергии на размол и повышение качества готовой продукции.

Ключевые слова: древесина лиственницы, лиственница сибирская, *Larix sibirica* Ledeb, химико-термомеханическая масса, ферментативная обработка, удельный расход энергии, физико-механические свойства, целлюлаза, липаза.

Введение

Одним из перспективных для российского лесного комплекса видов древесины является *Larix sibirica* Ledeb и *Larix gmelinii* (*Pinaceae*) Lindl, а также отходы ее переработки, поскольку они являются основными лесообразующими породами Сибири и Дальнего Востока [1].

Казымов Дмитрий Сергеевич – кандидат технических наук, e-mail: Dmitriy.kazymov@gmail.com

Махотина Людмила Герцевна – доктор технических наук, профессор кафедры ТЦКМ, e-mail: Lusi_makhotina@mail.ru

Никандров Андрей Борисович – кандидат химических наук, доцент кафедры ТЦКМ, e-mail: Andrej.nikandrov@gmail.com

Кузнецов Антон Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры ТЦКМ, e-mail: Anton.kuznetsov@hotmail.com

Аким Эдуард Львович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой ТЦКМ, e-mail: akim-ed@mail.ru

Несмотря на широкие возможности использования древесины лиственницы, ее доля в общем объеме лесозаготовок мала, так как особенности физико-химических свойств ограничивали ее использование в целлюлозно-бумажной промышленности. Древесина лиственницы имеет высокую плотность (480–520 кг/м³), повышенную смолистость, относительно небольшое количество целлюлозы и значительное содержание водорастворимых веществ [2–4].

* Автор, с которым следует вести переписку.

Фундаментальные исследования древесины лиственницы были проведены чл.-корр. АН СССР Н.И. Никитиным и его научной школой [2]. Было показано, что основную часть водорастворимых веществ в лиственнице, содержание которых колеблется от 5 до 33.3% (в среднем около 10–12% от веса а.с. древесины, а в некоторых образцах – до 30%), составляет гидрофильный полисахарид – арабиногалактан.

Проведенные В.А. Бабкиным многолетние исследования экстрактивных веществ лиственницы позволили создать промышленное производство дигидрокверцетина и фармацевтических препаратов на его основе [5].

Однако несмотря на многочисленные научные исследования [2, 3, 5], до реализации проекта «Лиственница» промышленная технология целлюлозы из лиственницы в России отсутствовала. Проект «Лиственница» [4, 6] осуществлялся в рамках частно-государственного партнерства при поддержке Министерства науки и образования в рамках Постановления Правительства РФ №218, по инициативе ОАО «Группа «Илим». Цель проекта – создание технологии комплексной переработки древесины лиственницы в продукцию с высокой добавленной стоимостью. В ходе выполнения проекта на базе приведенных фундаментальных исследований были предложены инновационные принципы биорефайнинга древесины лиственницы, позволяющие получать из нее новые виды высококачественной товарной целлюлозы с заданным комплексом свойств, а также извлекать из древесины ценный компонент – арабиногалактан.

В основу фундаментальных исследований была положена концепция об определяющей роли релаксационного состояния целлюлозы и других полимерных компонентов древесины при их поведении в химических реакциях, физико-химических и механохимических процессах, которая была разработана Э.Л. Акимом в конце 60-х годов и обобщена в 1971 г. [7]. В рамках последующих исследований была изучена роль релаксационного состояния полимерных компонентов древесины при получении волокнистых полуфабрикатов, бумаги и картона, композиционных материалов, в частности, упаковочного назначения (гофрокартона) [8, 9].

Применительно к древесине лиственницы особое место занимает вопрос о релаксационном состоянии арабиногалактана (АГ) – основного вида гемицеллюлоз данного сорта древесины. В ходе выполнения проекта «Лиственница» было впервые установлено, что АГ содержится в древесине лиственницы не как изолированное вещество, а как природный комплекс «арабиногалактан-вода», находящийся в виде жидкости внутри капиллярно-пористой структуры (КПС) древесины. Проведенные Э.Л. Акимом, С.З. Роговиной и А.А. Берлиным исследования [10] фазовых переходов методом дифференциальной сканирующей калориметрии показали, что в древесине лиственницы при охлаждении наблюдаются два пика температурных переходов, растянутых во времени: первый пик начинается при температуре минус 3.0 °С и заканчивается при температуре минус 15.2 °С; второй пик начинается при минус 34.7 °С и заканчивается при минус 79.2 °С. Кроме того, было впервые установлено, что природный комплекс «арабиногалактан-вода» представляет собой эвтектический пластификатор, остающийся в древесине в жидком состоянии даже в условиях жестких сибирских морозов [10].

Направленное изменение релаксационного состояния полимерных компонентов древесины лежит в основе и инновационного метода получения из опилок древесины лиственницы новых перспективных видов биотоплива второго поколения – древесных и древесно-угольных брикетов. В работе Э.Л. Акима, А.А. Пекарца, С.З. Роговиной и А.А. Берлина [11] были рассмотрены изменения релаксационного состояния полимерных компонентов древесины на основных стадиях производства целлюлозных композитов энергетического назначения – древесных пеллет и брикетов. Была показана возможность перехода к энергосберегающей технологии за счет осуществления диспергирования в условиях направленного хрупкого разрушения опилок при их превращении в порошковый материал и обеспечения экструдированности порошка при последующем паровом увлажнении. Была обнаружена аномалия кажущейся вязкости древесной системы в экструдере из-за совместного воздействия паров воды, газообразных продуктов пиролиза, температуры и сдвиговых напряжений. На этой теоретической базе была создана инновационная технология биотоплива нового поколения – остеклованных брикетов и пеллет, а также карбонизованных брикетов и пеллет на их основе [12–17].

Реализованная на заводе ООО «Лесная технологическая компания» А.А. Пекарцом инновационная технология получения из опилок древесины лиственницы топливных и угольных брикетов [13–16] может рассматриваться как принципиально важный шаг в развитии производства и использования новых поколений биотоплива [14–16]. Эта технология позволяет, с одной стороны, получать древесные и древесно-уголь-

ные брикеты для разных потребителей (био-чар для сельского хозяйства, топливо и восстановитель для производства кремния и для металлургии, топливо для барбекю, каминное топливо), а с другой – утилизировать все древесные отходы, начиная от лесосечных отходов и включая вторичную древесину.

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 релаксационное состояние полимерных компонентов древесины при ее низкотемпературном пиролизе.

В результате проекта «Лиственница» были значительно расширены возможности комплексного использования древесины лиственницы Сибири и Дальнего Востока. До выполнения проекта эта порода использовалась в ЦБП очень ограничено – в варочном котле содержание щепы лиственницы ограничивалось 10%. Отсутствие сбыта лиственничного баланса ограничивало заготовку и, соответственно, деревообработку лиственницы. Теперь, во многом благодаря проекту «Лиственница», эти ограничения сняты – в Братске и Усть-Илимске можно варить целлюлозу из любых по составу смесей лиственницы с другими породами. Это открывает самые широкие возможности для деревообработки, а с учетом инновационной технологии получения из опилок древесины лиственницы топливных и угольных брикетов – и для комплексного использования лесных ресурсов Сибири и Дальнего Востока.

Проект «Лиственница» на основании фундаментальных исследований структуры древесины лиственницы позволил предложить инновационные методы как получения волокнистых полуфабрикатов, так и извлечения из щепы арабиногалактана. В ходе проекта были разработаны технологии переработки 100% лиственницы, а также ее смесей с другими видами древесного сырья (в том числе с мало востребованными породами лиственной древесины). С ноября 2014 года Братский филиал АО «Группа «Илим» перешел на инновационные методы производства целлюлозы, переработал несколько миллионов кубометров лиственницы, выпустил по инновационной технологии свыше 2 млн тонн сульфатной беленой целлюлозы. На 01.01.18 реализовано продукции, выпущенной по инновационной технологии, на сумму свыше 60 миллиардов рублей. Доля экспорта составила 86%.

Кроме того, в рамках данного проекта был подготовлен ряд диссертаций [17, 18].

Однако реализованная на предприятиях «Группы «Илим» технология касается производства беленой целлюлозы. В то же время интерес представляют и полуфабрикаты высокого выхода, прежде всего химико-термомеханическая масса (ХТММ), производство которой в мире динамично развивается. Исходя из этого, можно предположить, что востребованным окажется получение из древесины лиственницы механической массы, в частности ХТММ.

По традиционной технологии ХТММ из ели получают путем пропитки раствором сульфита натрия Na_2SO_3 древесной щепы с последующим размолом. В данной работе предложено модифицировать технологию за счет применения ферментов – белковых катализаторов различных реакций. Ферменты обеспечивают мягкие условия протекания процессов, реакциями с их участием легко управлять, а также применение ферментов уменьшает негативное воздействие производства на окружающую среду за счет снижения объемов потребления электроэнергии и химических реактивов [19–24].

Цель данного исследования – определить потенциал применения ферментативной обработки древесины лиственницы в технологии ХТММ и оценить влияние ферментов на физико-механические показатели волокна и удельный расход энергии при размоле.

Для модификации щепы лиственничной древесины с целью повышения качества конечного продукта были выбраны целлюлазные и липазные препараты, которые ранее хорошо зарекомендовали себя в процессах получения полуфабрикатов высокого выхода из древесины ели [25, 26].

Экспериментальная часть

Для получения ХТММ использовали промышленные образцы щепы древесины *Larix sibirica* Ledeb, используемой на Братском филиале АО «Группа «Илим».

Для обработки щепы было выбрано пять коммерчески доступных на рынке ферментных препаратов: – целлюлазные ферментные препараты Banzyme L90 и L90R, полученные с использованием генетически модифицированных штаммов грибов белой гнили *Trichoderma reesei* (*Hypocreaceae*) De Not. с разницей в минимальной активности 90000 СМУ/г и 84000 СМУ/г соответственно;

– липазные препараты Resinase A2X и Resinase HT с заявленной активностью 50 KLU/г;

– конгломерат целлюлазных ферментных препаратов, с преобладанием эндоглюканазы Fibercare D.

ХТММ получали на лабораторном оборудовании, моделирующем промышленные этапы производства. На первом этапе щепу подвергали обработке паром в автоклаве 15 мин при нормальном атмосферном давлении и температуре 90–100 °С и отжимали на прессе, моделируя процесс сжатия в шнековом импрегнаторе. Далее щепу, пропитанную раствором ферментного препарата с дозировкой 5 кг на тонну а.с.в., помещали во вращающийся автоклав, где в течение 120 мин при 45 °С проходил процесс обработки. После окончания ферментативной обработки аналогичным способом проводили отжим, пропитку щепы раствором Na_2SO_3 с расходом 50 кг/т, и химико-гидролитическую обработку в автоклаве в течение 5 мин при 135 °С.

Процесс размола щепы моделировали на дисковой мельнице Baueг лабораторного типа, оборудованной шнековой подачей в зону рафинирования. Древесное сырье размалывали при концентрации 3.5% до 30 ± 2 °ШР. Фиксировали удельный расход энергии (УРЭ), затрачиваемой на размол (при этом, однако, необходимо отметить, что использованное в данной работе опытное оборудование не может сопоставляться с промышленными технологиями производства ТММ и ХТММ по расходам энергии).

Из полученной ХТММ на листоотливном аппарате типа Репид-Кетен в соответствии с ГОСТ 16296-79 были изготовлены отливки. Физико-механические свойства изучали на горизонтальной разрывной машине фирмы Frank PTI в соответствии с ГОСТ 13525.1-79, оптические свойства оценивались по ГОСТ 30113-94 с помощью спектрофотометра фирмы Frank PTI.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты исследования представлены в таблице.

Анализ полученных данных показал, что выход волокнистого полуфабриката, полученного из древесины *Larix sibirica* Ledeb в лабораторных условиях, значительно ниже, чем при производстве ХТММ из древесины ели в промышленных условиях, который составляет 85–90%. Связано это с большим содержанием экстрактивных водорастворимых веществ, удаляемых при аналогичной обработке. Однако ферментативная обработка листовенничной щепы оказывает значительное влияние на выход волокнистого полуфабриката, который при использовании липазного препарата Resinase НТ составляет 61% при показателе выхода контрольного образца без предварительной обработки на уровне 51%.

Целлюлазные ферментные препараты не оказали влияния на выход, что, возможно, связано с достаточно большими размерами их макромолекул, в результате чего они оказывают воздействие только на внешнюю поверхность волокон [19].

Представленные данные по расходу энергии отличаются от традиционных значений промышленных производств ХТММ, это связано с несовершенством лабораторного размалывающего оборудования и достаточно низкой эффективностью его работы, но полученные значения позволяют определить общую картину влияния предварительной ферментативной обработки щепы листовенницы на количество энергии, потраченной для ее размола до 30 °ШР.

Наименьшие значения УРЭ, а значит, и наименьшие энергозатраты при размоле были достигнуты при ферментативной обработке липазными препаратами Resinase A2X и Resinase НТ. Ферменты данного типа расщепляют сложноэфирную связь в липидах – высокомолекулярных жирных кислотах [21], которые содержатся в древесине листовенницы [2, 3, 5]. Кроме того, ранее было установлено, что обработка липазами увеличивает гидрофильность волокон механической массы [21]. Эти факторы, вероятнее всего, способствуют более глубокому проникновению водного раствора Na_2SO_3 в структуру древесины листовенницы, эффективность пропитки повышается и древесина легче разделяется на волокна в процессе размола. Образуется меньше мелкого рубленого волокна, что способствует повышению выхода волокнистого полуфабриката.

Исследование физико-механических свойств (рис. 1 и 2) показало, что наилучшими прочностными свойствами обладает образец ХТММ, обработанный целлюлазным ферментным препаратом Banzyme L90R. Полученные значения разрывной длины практически вдвое превышают значения контрольного образца необработанной массы.

Вероятнее всего, это связано с тем, что при воздействии данного типа ферментных препаратов происходит частичная деструкция (ферментативный гидролиз полисахаридов) целлюлозного волокна, которую следует рассматривать как стадию подготовки волокон к грубому механическому воздействию, при этом с сохранением прочности индивидуальных волокон с минимальной потерей углеводной части. После обработки этими ферментами волокна в большей степени подвержены фибрилляции в процессе размола, что сказывается на формировании более прочной и сомкнутой структуры бумажного листа [27–29].

Влияние вида ферментного препарата (дозировка 5 кг/т а.с.в.) на выход и удельный расход энергии, затраченной на размол, при получении ХТММ в лабораторных условиях из щепы древесины *Larix sibirica Ledeb*

Ферментный препарат	Выход, %	Удельный расход энергии, затраченной на размол. кВт·ч/т а.с.в.
Без обработки	51	5000
Resinase HT	61	2600
Resinase A2X	58	3682
Banzyme L90R	55	4565
Banzyme L90	51	4600
Fibercare D	50	4500

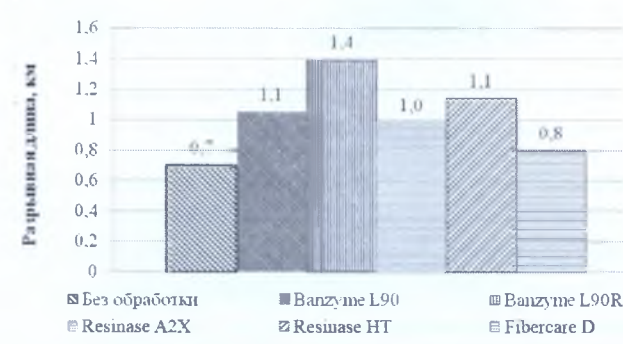


Рис. 1. Влияние ферментативной обработки на разрывную длину отливок из волокон ХТММ из древесины *Larix sibirica Ledeb* (Pinaceae)

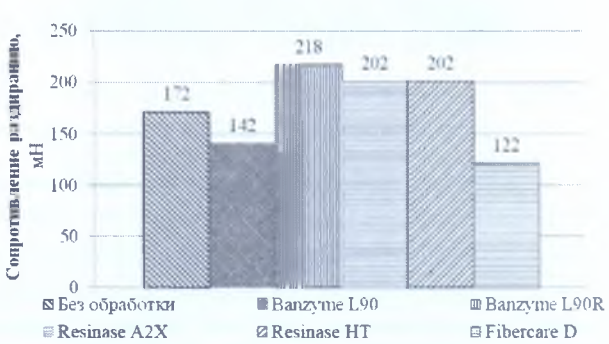


Рис. 2. Влияние ферментативной обработки на сопротивление раздиранию отливок из волокон ХТММ из древесины *Larix sibirica Ledeb* (Pinaceae)

Таким образом, предварительная обработка щепы ферментами положительно влияет на разрывную длину и сопротивление раздиранию ХТММ из древесины *Larix sibirica Ledeb*, в среднем увеличивая разрывную длину на 30–45%, а сопротивление раздиранию – на 20–30%.

На рисунке 3 представлены значения белизны образцов ХТММ из древесины *Larix sibirica Ledeb*, обработанной ферментными препаратами. Можно сделать вывод, что ни один из представленных препаратов не оказывает влияния на белизну – не происходит ни снижения, ни увеличения данного показателя.

С целью получения дополнительной информации о характере воздействия ферментных препаратов в ходе экспериментов было проанализировано морфологическое строение волокон ХТММ, полученных из древесины *Larix sibirica Ledeb* (рис. 4).

Как видно на микрофотографии, механическая масса, полученная в результате обработки лиственничной щепы без применения ферментных препаратов, состоит из смеси отделенных друг от друга гладких волокон ранних и поздних трахеид, пучков связанных волокон не наблюдается, т.е. в процессе размола вся древесина была распущена на отдельные волокна. Основная масса ранних и поздних трахеид сохранила свою форму целых волокон. Часть ранних трахеид разрублена на отдельные фрагменты, значительно в меньшей степени затронуты данным процессом поздние трахеиды.

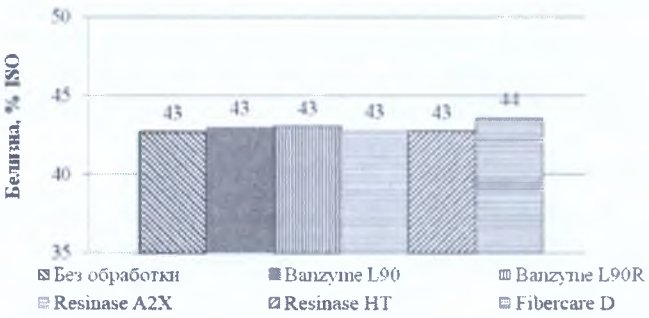


Рис. 3. Влияние ферментативной обработки на белизну волокон ХТММ из древесины *Larix sibirica Ledeb* (Pinaceae)

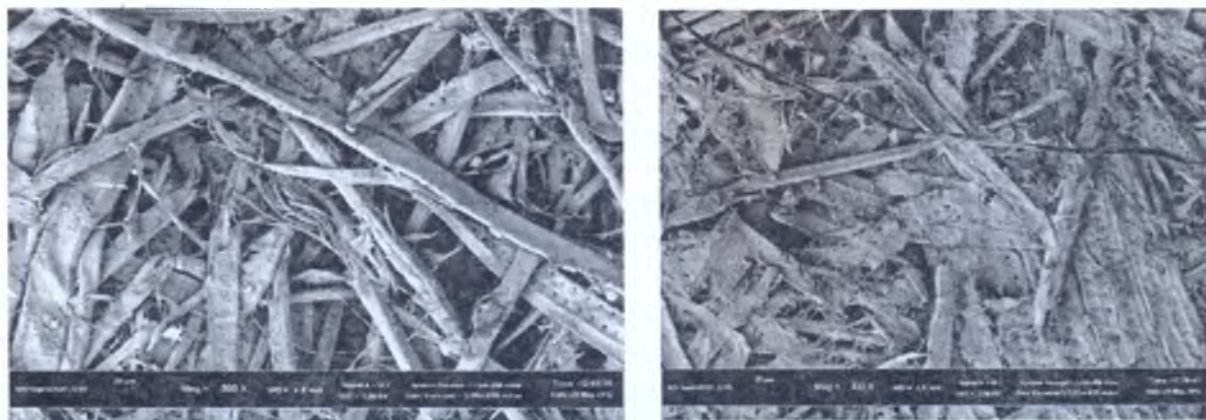


Рис. 4. Микрофотографии волокон ХТММ из древесины *Larix sibirica* Ledeb (*Pinaceae*) до (слева) и после ферментативной обработки целлюлазным препаратом (справа), увеличение в 300 раз

Для массы, полученной из щепы, обработанной ферментами, микроскопическая картина существенно меняется. Поверхность волокон приобретает «хлопчатость», состоит по большей части из смеси значительно измельченных (рубленых), в основном ранних и в меньшей степени – поздних трахеид, а также из пучков отдельных волокон ранних и поздних трахеид. Ранние волокна фибриллированы по-разному – часть диспергирована до пучков макрофибрилл, другая часть фибрилляцией не затронута.

Микрофотографии волокон ХТММ, полученных из обработанной и необработанной щепы древесины *Larix sibirica* Ledeb, подтверждают гипотезы о поверхностном проникновении ферментов в структуру древесины [25, 26].

Анализ полученных данных показывает, что ферментативная обработка щепы древесины *Larix sibirica* Ledeb (после предварительной пропарки щепы и перед проведением пропитки раствором сульфата натрия) липазными и целлюлазными препаратами оказывает положительный эффект при получении ХТММ, заключающийся в снижении удельного расхода энергии при размоле (до 20%) и улучшении физико-механических показателей получаемой химико-термомеханической массы. Из полученных данных также следует, что лучшие результаты получаются с расходом 5 кг/т а.с.в., в течение 120 мин при температуре 40–50 °С. Помимо прочего, было отмечено увеличение выхода ХТММ до 20% в сравнении с контрольным образцом. Можно предположить, что улучшение физико-механических свойств массы и снижение удельного расхода энергии при использовании смесей ферментных препаратов целлюлазного и липазного типов для предварительной обработки лиственничной щепы обусловлено как их способностью комплексно воздействовать на структуру древесины лиственницы, так и спецификой химического состава *Larix sibirica* Ledeb и релаксационных состояний ее полимерных компонентов. Как уже отмечалось выше, специфика древесины лиственницы заключается в содержании в ней большого количества водорастворимого АГ, величина которого колеблется от 5 до 30%. Именно наличие этих факторов обуславливает существенно сниженный выход полученных волокнистых полуфабрикатов. С другой стороны, находящийся в виде жидкости внутри капиллярно-пористой структуры древесины природный комплекс «арабиногалактан-вода» в ходе физико-механического воздействия выступает как своеобразная «смазка», дополнительно снижающая расход энергии на размол. Иными словами, природный комплекс «арабиногалактан-вода», представляющий собой эвтектический пластификатор, выполняет функции «пластификатора-смазки» и в ходе механохимических процессов.

Выводы

Показана целесообразность использования ферментной предварительной обработки щепы древесины *Larix sibirica* Ledeb (*Pinaceae*) при ее переработке в ХТММ. Показано, что из ряда исследованных ферментов наиболее эффективными являются липазные и целлюлазные препараты.

Список литературы

1. The Russian Federation Forest Sector Outlook. Study To 2030. Rome: FAO UN. 2012. 87 p.
2. Никитин Н.И. Химия древесины и целлюлозы. М.-Л., 1962. 711 с.
3. Левин Э.Д., Денисов О.Б., Пен Р.З. Комплексная переработка лиственницы. М., 1978. 224 с.
4. Аким Э.Л. Биорефайнинг древесины // Химические волокна. 2016. №3. С. 14–18.
5. Бабкин В.А. Продукты глубокой химической переработки биомассы лиственницы // Российский химический журнал. 2004. Т. 48. №3. С. 62–69.

6. Херберт И., Аким Э.Л. Тенденции глобальных рынков ЦБП и проект «Лиственница» // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2011. №6. С. 3–8.
7. Аким Э.Л. Исследование процесса синтеза волокнообразующих ацетатов целлюлозы: дис. ... д.т.н. Л., 1971.
8. Захаров А.Г., Новоселов Н.П., Сашина Е.С., Парфенюк Е.В., Давыдова О.И., Терехова И.В., Куликов О.В., Агафонов А.В., Прусов А.Н., Куличихин В.Г., Голова Л.К., Аким Э.Л., Липатова И.М., Морыганов А.П., Кокшаров С.А., Алеева С.В. Научные основы химической технологии углеводов. М.: ИХР РАН, 2008. 528 с.
9. Аким Э.Л., Смолин А.С. Роль релаксационного состояния полимерных компонентов древесины при получении композиционных материалов упаковочного назначения (гофрокартона) // Химические волокна. 2018. №4. С. 81–88.
10. Аким Э.Л., Роговина С.З., Берлин А.А. Усталостная прочность древесины и релаксационное состояние ее полимерных компонентов // Доклады Российской академии наук. Химия, науки о материалах. 2020. Т. 491. №1. С. 73–76.
11. Аким Э.Л., Пекарец А.А., Роговина С.З., Берлин А.А. Релаксационное состояние древесины и получение целлюлозных композитов энергетического назначения – древесных брикетов и пеллет // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2020. №9. С. 3–8.
12. Пекарец А.А., Ерохина О.А., Новожилов В.В., Мандре Ю.Г., Аким Э.Л. Роль упруго-релаксационных свойств при получении древесных и древесно-угольных брикетов // ИВУЗ. Лесной журнал. 2020. №1. С. 200–209. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2020.1.
13. Аким Э.Л., Мандре Ю.Г., Пекарец А.А. Изменение релаксационного состояния полимерных компонентов древесины при проведении ее высокотемпературного биорефайнинга // Химические волокна. 2019. №3. С. 14–18. DOI: 10.1007/s10692-019-10067-8.
14. Патент № 2596683 (РФ). Комплекс для непрерывной термообработки твердых мелких частиц, преимущественно дисперсных древесных материалов, и способы термообработки, реализуемые с помощью данного комплекса / А.А. Пекарец. – 2016.
15. Pekaretz A., Mandre Y., Vinogradov N., Akim E. Biorefining of Larch Sawdust Producing Wood and Wood-Charcoal Briquettes: Scientific and Technological Aspects // Proceedings 27th European Biomass Conference and Exhibition, 27-30 May. Lisbon, 2019. Pp. 1887–1889.
16. Vinogradov N., Pekaretz A., Fedorova A., Mandre Y., Akim E. Development of Industrial Implementation and Scientific Basis of Innovative Technology for Producing Fuel Wood and Wood-coal Briquet from Sawdust // Proceedings 28th European Biomass Conference and Exhibition, 06-09 July. Marseille, 2020.
17. Кузнецов А.Г. Разработка путей крупнотоннажного использования арабиногалактана – продукта глубокой переработки древесины лиственницы: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2015. 16 с.
18. Виноградов Н.В. Компрессионные свойства древесины лиственницы как основа отжимной технологии извлечения арабиногалактана: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2019. 16 с.
19. Новожилов Е.В. Применение ферментных технологий в целлюлозно-бумажной промышленности. Архангельск: ИПЦ САФУ, 2013. 383 с.
20. Mohlin U.B., Pettersson B. Improved papermaking by cellulase treatment before refining // Biotechnology in the Pulp and Paper industry. 2002. Vol. 21. Pp. 291–300.
21. Mustranta A., Buchert J., Spetz P., Holmbom B. Treatment of mechanical pulp and process waters with lipase // Nordic Pulp Paper Res. J. 2001. Vol. 16. N2. Pp. 125–129.
22. Gorski D. ATMP process: improved energy efficiency in TMP refining utilizing selective wood disintegration and targeted application of chemicals: thesis for the degree of Doctor of technology. Sundsvall, 2011. 119 p.
23. Aehle W. Enzymes in Industry, Production and Application. Wiley-VCH, 2004. 484 p.
24. Pursula T. Bringing Life to Paper, Biotechnology in the Forest Industry. KCL Research Project 1136-201, 2005.
25. Аким Э.Л., Молотков Л.К., Сапрыкина Н.Н., Коваленко М.В., Мандре Ю.Г., Махотина Л.Г., Сергеев А.Д., Виноградов Н.В. «Проект Лиственница». Электронно-микроскопические исследования анатомического строения древесины лиственницы // Целлюлоза, бумага, картон. 2011. №7. С. 26–31.
26. Коваленко М.В., Казымов Д.С. Возможность производства полуфабрикатов высокого выхода из древесины лиственницы // Материалы VIII международной научно-практической конференции «Научное пространство Европы – 2012», 07-15 апреля. Перемышль, 2012. №35. С. 54–58.
27. Viikari L. Forest Products: Biotechnology in Pulp and Paper Processing // Encyclopedia of Microbiology. Elsevier, 2009. Pp. 85–99.
28. Pere J., Ellmen J., Honkasalo J., Taipalus P. Enhancement of TMP Reject Refining by Enzymatic Modification of Pulp Carbohydrates – A mill study // Biotechnology in the Pulp and Paper Industry. 2002. Vol. 21. Pp. 281–290.
29. Kallioinen A. Biotechnical methods for improvement of energy economy in mechanical pulping. VTT. 2002. 98 p.

Поступила в редакцию 21 сентября 2020 г.

После переработки 14 октября 2020 г.

Принята к публикации 7 декабря 2020 г.

Для цитирования: Казымов Д.С., Махотина Л.Г., Никандров А.Б., Кузнецов А.Г., Аким Э.Л. Особенности переработки древесины *Larix sibirica* Ledeb (*Pinaceae*) в волокнистые полуфабрикаты высокого выхода // Химия растительного сырья. 2021. №1. С. 317–325. DOI: 10.14258/jcrpm.2021018472.

Kazymov D.S., Makhotina L.G.*, Nikandrov A.B., Kuznetsov A.G., Akim E.L. FEATURES OF *LARIX SIBIRICA* LEDEB WOOD PROCESSING INTO HIGH YIELD FIBROUS SEMI-FINISHED PRODUCTS

Higher School of Technology and Energy of Saint-Petersburg State University of Industrial Technologies and Design.
ul. Ivana Chernykh, 4, St. Petersburg, 198095 (Russia), e-mail: Lusi_makhotina@mail.ru

About 40 % of the forest area in the Russian Federation is occupied by larch trees growing in the southern regions of Eastern Siberia and the Far East, where existing and reconstructed woodworking enterprises are located. In this regard, the use of larch wood in the production of fibrous semi-finished products is an urgent task for the Russian forest complex. As is known, larch wood contains a large number of extractive substances that have a significant impact on the process of its deep chemical processing. Therefore, it can be assumed that the production of wood (mechanical) pulp from larch wood, in particular chemical-thermomechanical pulp (CTMP), will be very effective, but with its own specific features. In this paper, it is proposed to modify the technology by using enzymes – protein catalysts of various reactions. The purpose of this study is to determine the potential of using larch wood enzymatic treatment in CTMP-technology, to evaluate the effect of enzymes on the physical and mechanical parameters of the fiber and the specific energy consumption during refining. Industrial samples of *Larix sibirica* Ledeb (Pinaceae) wood chips were used to obtain CTMP. Five commercially available enzymatic agents were used to treat wood chips. CTMP was obtained using laboratory equipment that simulates the industrial stages of production. Enzymatic treatment of larch wood has shown an improvement in the technological parameters of CTMP production, namely, a decrease in the specific energy consumption for refining and an increase in the quality of finished products.

Keywords: larch wood, *Larix sibirica* Ledeb, chemical thermomechanical pulp, enzymatic treatment, specific energy consumption, physical and mechanical properties, cellulase, lipase.

References

1. The Russian Federation Forest Sector Outlook. Study To 2030. Rome: FAO UN, 2012. 87 p.
2. Nikitin N.I. *Khimiya drevesiny i tsellyulozy* [Wood and Pulp Chemistry]. Moscow-Leningrad, 1962, 711 p. (in Russ.).
3. Levin E.D., Denisov O.B., Pen R.Z. *Kompleksnaya pererabotka listvennitsy* [Complex Processing of Larch Wood]. Moscow, 1978, 224 p. (in Russ.).
4. Akim E.L. *Khimicheskie volokna*, 2016, no. 3, pp. 14–18. (in Russ.).
5. Babkin V.A. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*, 2004, vol. 48, no. 3, pp. 62–69. (in Russ.).
6. Herbert P., Akim E.L. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton*, 2011, no. 6, pp. 3–8. (in Russ.).
7. Akim E.L. *Issledovanie protsessa sinteza voloknoobrazuyushchikh atsetatov tsellyulozy. Diss. dokt. tekhn. nauk* [Study of the Synthesis of Fiber-Forming Acetates of Cellulose: diss. Dr. tech. sci.]. Leningrad, 1971. (in Russ.).
8. Zakharov A.G., Novoselov N.P., Sashina E.S., Parfenyuk E.V., Davydova O.I., Terekhova I.V., Kulikov O.V., Agafonov A.V., Prusov A.N., Kulichikhin V.G., Golova L.K., Akim E.L., Lipatova I.M., Moryganov A.P., Koksharov S.A., Aleeva S.V. *Nauchnye osnovy khimicheskoy tekhnologii uglevodov* [Scientific Basis of Carbohydrates Chemical Technology]. Moscow, 2008, 528 p. (in Russ.).
9. Akim E.L., Smolin A.S. *Khimicheskie volokna*, 2018, no. 4, pp. 81–88. (in Russ.).
10. Akim E.L., Rogovina S.Z., Berlin A.A. *Doklady Rossiyskoy akademii nauk. Khimiya, nauki o materialakh*, 2020, vol. 491, no. 1, pp. 73–76. (in Russ.).
11. Akim E.L., Pekaretz A.A., Rogovina S.Z., Berlin A.A. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik* [All Material. Encyclopedic Reference Book], 2020, no. 9, pp. 3–8. (in Russ.).
12. Pekaretz A.A., Erokhina O.A., Novozhilov V.V., Mandre Yu.G., Akim E.L. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Lesnoy zhurnal*, 2020, no. 1, pp. 200–209. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2020.1. (in Russ.).
13. Akim E.L., Mandre Yu.G., Pekaretz A.A. *Khimicheskie volokna*, 2019, no. 3, pp. 14–18. DOI: 10.1007/s10692-019-10067-8. (in Russ.).
14. Patent 2596683 (RU). 2016. (in Russ.).
15. Pekaretz A., Mandre Y., Vinogradov N., Akim E. *Proceedings of the 27th European Biomass Conference and Exhibition*, Lisbon, 2019. pp. 1887–1889.
16. Vinogradov N., Pekaretz A., Fedorova A., Mandre Y., Akim E. *Proceedings of the 28th European Biomass Conference and Exhibition*, Marseille, 2020.
17. Kuznetsov A.G. *Razrabotka putey krupnotonnazhnogo ispol'zovaniya arabinogalakтана – produkta glubokoy pererabotki drevesiny listvennitsy: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Development of Ways of Large-Capacity Use of Arabinogalactan – the Product of Deep Processing of Larch Wood. Cand. tech. sci. diss. abstr.]. St.-Petersburg, 2015, 16 p. (in Russ.).
18. Vinogradov N.V. *Kompressionnye svoystva drevesiny listvennitsy kak osnova otzhimnoy tekhnologii izvlecheniya arabinogalakтана: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Compression Properties of Larch Wood as the Basis of Pressing Technology for Extracting Arabinogalactan. Cand. tech. sci. diss. abstr.]. St.-Petersburg, 2019. 16 p. (in Russ.).
19. Novozhilov E.V. *Primenenie fermentnykh tekhnologiy v tsellyulozno-bumazhnoy promyshlennosti* [Application of Enzyme Technologies in Pulp and Paper Industry]. Arkhangelsk, 2013, 383 p. (in Russ.).
20. Mohlin U.B., Pettersson B. *Biotechnology in the Pulp and Paper industry*, 2002, vol. 21, pp. 291–300.
21. Muhranta A., Buchert J., Spetz P., Holmbom B. *Nordic Pulp Paper Res. J.*, 2001, vol. 16, no. 2, pp. 125–129.
22. Gorski D. *ATMP Process. Improved Energy Efficiency in TMP Refining Utilizing Selective Wood Disintegration and Targeted Application of Chemicals. Thesis for the degree of Doctor of technology*. Sundsvall, 2011, 119 p.

* Corresponding author.

23. Aehle W. *Enzymes in Industry. Production and Application*. Wiley-VCH, 2004, 484 p.
24. Pursula T. *Bringing Life to Paper. Biotechnology in the Forest Industry*. KCL Research Project 1136-201. 2005.
25. Akim E.L., Molotkov L.K., Saprykina N.N., Kovalenko M.V., Mandre Yu.G., Makhotina L.G., Sergeev A.D., Vinogradov N.V. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton*, 2011, no. 7, pp. 26–31. (in Russ.).
26. Kovalenko M.V., Kazymov D.S. *Materialy VIII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Nauchnoe prostranstvo Evropy – 2012"* [Proceedings of the 8th international scientific and practical conference "Scientific space of Europe – 2012"]. 2012, no. 35, pp. 54–58. (in Russ.).
27. Viikari L. *Encyclopedia of Microbiology*, Elsevier, 2009, pp. 85–99.
28. Pere J., Ellmen J., Honkasalo J., Taipalus P. *Biotechnology in the Pulp and Paper Industry*, 2002, vol. 21, pp. 281–290.
29. Kallioinen A. *Biotechnical Methods for Improvement of Energy Economy in Mechanical Pulping*. VTT, 2002, 98 p.

Received September 21, 2020

Revised October 14, 2020

Accepted December 7, 2020

For citing: Kazymov D.S., Makhotina L.G., Nikandrov A.B., Kuznetsov A.G., Akim E.L. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2021, no. 1, pp. 317–325. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.2021018472.