

Научная статья

УДК 674.817

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-2-139-151

Применение биодegradированной древесины для получения плит без связующих

В.Н. Ермолин, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [X-9597-2019](https://orcid.org/0000-0002-2113-4142),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2113-4142>

М.А. Баяндин[✉], канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [S-1990-2019](https://orcid.org/0000-0002-6228-2715),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6228-2715>

Н.В. Смертин, аспирант; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-1566-669X>

Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнёва, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», д. 31, г. Красноярск, Россия, 660037; vnermolin@yandex.ru, mihailbayandin@yandex.ru[✉], kolya.smertin@mail.ru

Поступила в редакцию 03.06.25 / Одобрена после рецензирования 29.08.25 / Принята к печати 30.08.25

Аннотация. В настоящее время изменение климата приводит к увеличению количества случаев гибели древостоев. Отпавшие деревья подвергаются воздействию дереворазрушающих грибов. Отсутствие способов промышленного использования такого вида сырья обусловлено низкими физико-механическими свойствами биодegradированной древесины, особенно на последних стадиях биодеструкции. В работе установлено, что через 15 лет с момента гибели при поражении белой волокнистой гнилью плотность древесины пихты сибирской составляет 305 кг/м³, предел прочности при статическом изгибе – 27 МПа, ударная вязкость – 3,48 Дж/м², а у древесины, пораженной грибами бурой трещиноватой гнили, – 13 МПа и 1,08 Дж/м² соответственно. Термический анализ показал, что содержание углеводной части у древесины, пораженной белой волокнистой гнилью, сопоставимо со здоровой древесиной. При этом у древесины с бурой трещиноватой гнилью доля гемицеллюлоз и ароматической части целлюлозы составляет 46,83 %. Направлением переработки такой древесины принято получение плит без связующих веществ с применением гидродинамической активации сырья. Изготовленные горячим прессованием плиты при плотности 800 кг/м³ имеют следующие свойства: предел прочности при статическом изгибе – 27 МПа, предел прочности при разрыве перпендикулярно к пласти плиты – 0,92 МПа для плит из древесины, пораженной бурой трещиноватой гнилью, и 35 и 0,86 МПа соответственно для плит из древесины с белой волокнистой гнилью. Также установлено, что водостойкость плит из биодegradированной древесины существенно превышает требования, предъявляемые к существующим аналогам. При этом плиты из древесины пихты сибирской, пораженной бурой трещиноватой гнилью, сохраняют до 90 % прочности после кипячения в течение 2 ч и последующей сушки. Плиты из древесины, пораженной белой гнилью и находящейся на последних стадиях биодеструкции, сохраняют 60 % прочности. Сфера применения полученных плит – это производство мебели и строительство, как в сухих, так и во влажных условиях.

Ключевые слова: пихта сибирская, *Abies sibirica*, древесина пихты сибирской, гниль, бурая трещиноватая гниль, белая гниль, дереворазрушающие грибы, кавитация, плитный материал, плиты без связующих, плиты из биодegradированной древесины, свойства древесины, применение пораженной гнилью древесины

© Ермолин В.Н., Баяндин М.А., Смертин Н.В., 2026



Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

Благодарности: Работа проведена в рамках госзадания Минобрнауки РФ на выполнение коллективом научной лаборатории «Биорефайнинг лесных ресурсов» проекта «Исследование закономерностей процессов биодеструкции древесины погибших древостоев для разработки научно-обоснованных подходов получения новых функциональных материалов» (номер темы: FEFE-2024-0032).

Для цитирования: Ермолин В.Н., Баяндин М.А., Смертин Н.В. Применение биodeградируемой древесины для получения плит без связующих // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 2. С. 139–151. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-2-139-151>

Original article

Using Biodegraded Wood to Produce Boards Without Binders

Vladimir N. Ermolin, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [X-9597-2019](https://orcid.org/0000-0002-2113-4142),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2113-4142>

Mikhail A. Bayandin[✉], Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [S-1990-2019](https://orcid.org/0000-0002-6228-2715),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6228-2715>

Nikolay V. Smertin, Postgraduate Student; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-1566-669X>
Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarskiy Rabo-ochiy Prospect, 31, Krasnoyarsk, Russian Federation, 660037; vnermolin@yandex.ru, mihailbayandin@yandex.ru[✉], kolya.smertin@mail.ru

Received on June 3, 2025 / Approved after reviewing on August 29, 2025 / Accepted on August 30, 2025

Abstract. Currently, climate change leads to an increase in forest stand mortality. Dead trees are exposed to wood-destroying fungi. The lack of industrial methods for utilizing such raw materials is due to the low physical and mechanical properties of biodegraded wood, especially at advanced stages of decomposition. The study found that 15 years after tree death, Siberian fir wood affected by white rot has a density of 305 kg/m³, a static bending strength of 27 MPa, and an impact strength of 3.48 J/m². For wood affected by brown rot, these values are 13 MPa and 1.08 J/m², respectively. Thermal analysis showed that the carbohydrate content in white-rot wood is comparable to that of healthy wood. In brown-rot wood, the proportion of hemicelluloses and the aromatic part of cellulose is 46.83 %. The proposed processing method involves the production of binderless boards using hydrodynamic activation of the raw material. Hot-pressed boards with a density of 800 kg/m³ exhibit the following properties: for brown-rot wood, the static bending strength is 27 MPa and the internal bond strength is 0.92 MPa; for white-rot wood, these values are 35 and 0.86 MPa, respectively. It was also established that the water resistance of boards made from biodegraded wood significantly exceeds that of existing analogues. Boards made from brown-rot Siberian fir wood retain up to 90 % of their strength after boiling for two hours followed by drying. Boards from white-rot wood at advanced stages of decay retain 60 % of their strength. These boards are suitable for furniture production and construction in both dry and humid conditions.

Keywords: Siberian fir, *Abies sibirica*, Siberian fir wood, rot, brown crack rot, white rot, wood-decaying fungi, cavitation, panel material, binderless boards, boards from biodegraded wood, wood properties, application of rot-affected wood

Acknowledgements: The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (State Assignment for the "Biorefining of Forest Resources")

Research Laboratory, project "Study of regularities of wood biodegradation processes in dead stands to develop science-based approaches for obtaining new functional materials", project No. FEFE-2024-0032).

For citation: Ermolin V.N., Bayandin M.A., Smertin N.V. Using Biodegraded Wood to Produce Boards Without Binders. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 2, pp. 139–151. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-2-139-151>

Введение

В связи с изменением и разбалансировкой климата в современных условиях увеличивается интенсивность массовой гибели древостоев [22]. После массовой гибели древостоев, как правило, вырубка погибших насаждений осуществляется в первые 2–3 года [2]. С увеличением давности гибели деревьев (более 3 лет) [1] под действием физических и биологических факторов происходят значительные изменения свойств древесины, что исключает возможность использования для нее традиционных технологий переработки. Основную роль в деструкции древесины играют дереворазрушающие грибы [4]. Преобладающими видами в погибших древостоях являются грибы, образующие бурые трещиноватые и белые волокнистые гнили.

Бурая трещиноватая гниль образуется при воздействии грибами базидиомицентами. В процессе разрушения грибы в первую очередь разлагают полисахариды в клеточных стенках, оставляя лигнин практически в неизменном состоянии. Разрушение клеточной стенки имеет диффузный характер, ее строение становится пористым. Грибы преимущественно поражают слой S2, ввиду того, что слой S3 более устойчив к ферментам. Такое воздействие обуславливает резкое снижение механических свойств древесины и увеличение ее хрупкости. На поздних стадиях деструкции грибы также модифицируют лигнин через деметилирование и окислительные реакции или демистификации, т. е. удаление метаксильных групп из структуры лигнина, что приводит к его обеднению этими функциональными группами и повышению содержания карбонильных и карбоксильных групп [6].

Грибы, вызывающие белую волокнистую гниль, разрушают значительное количество лигнина, целлюлозы и гемицеллюлозы в клеточных стенках древесины. Белая волокнистая гниль разлагает все компоненты древесины, в т. ч. лигнин [8].

Таким образом, биоповрежденная древесина существенно отличается по составу и свойствам от здоровой древесины, что требует разработки специальных подходов к ее переработке. Возможным решением здесь является получение твердого [9], жидкого или газообразного топлива [10, 11]. Однако применение гнилой древесины в качестве топлива, особенно древесины на последних стадиях деструкции, связано с рядом сложностей [14]. Зольность данной древесины по сравнению с непораженной значительно выше. Кроме того, по сведениям [10], сжигание гнилой древесины приводит к увеличению выброса в атмосферу окислов азота. Низкая стоимость твердого биотоплива в совокупности с отмеченными выше проблемами предопределяют то, что использование биоповрежденной древесины экономически малоэффективно. Но это не исключает поиска путей получения продукции из данного вида сырья с более высокой добавленной стоимостью.

Одним из направлений переработки биодegradированной древесины является производство плит [15, 26]. Применение данной древесины в качестве добавки в составе древесностружечных плит в объеме более 10 % приводит к снижению механических свойств готовой продукции [15]. В ходе работы [16] установлено, что при добавлении частиц древесины, пораженной бурой трещиноватой гнилью, в объеме более 10 % разбухание и водопоглощение готовых плит существенно понижаются в сравнении с плитами из здоровой древесины. Аналогичные зависимости установил С.С. Тютиков при использовании березовой или сосновой древесин, пораженных гнилями. Получаемые из такой древесины лигно-углеводные пластики имеют более высокую прочность и существенно меньшее разбухание в сравнении с материалами из здоровой древесины [7]. Следует отметить, что целенаправленная биологическая подготовка до средней стадии биодеструкции путем обработки щепы грибом бурой трещиноватой гнили *Coniophora puteana* позволяет снизить на 40 % затраты энергии на размол при производстве древесноволокнистых плит [17]. При этом механические свойства плит выше, а разбухание на 60 % ниже в сравнении с плитами, получаемыми из здоровой древесины. Длительность процесса ферментативной обработки и большие дополнительные затраты указывают на то, что биологическая модификация в настоящее время мало перспективна для промышленных целей. Помимо того, данная подготовка не позволяет перерабатывать древесину на крайних стадиях биодеструкции, запасы которой постоянно увеличиваются.

На конечных стадиях биодеструкции плотность и прочность древесины значительно снижаются [19], поэтому получение плит средней плотности из такой древесины за счет склеивания невозможно. Решением проблемы может быть перевод этой древесины в полидисперсную систему, что позволяет увеличить площадь межфазных поверхностей [3, 18]. Так создаются предпосылки для формирования плит из рассматриваемого вида древесины без использования связующих веществ.

Объекты и методы исследования

В качестве основного материала исследования взяли древесину пихты сибирской (*Abies sibirica*). Отбор образцов древесины осуществлялся в погибших от воздействия энтомовредителей лесных насаждениях центральных районов Красноярского края. По данным дендрохронологической экспертизы, давность гибели модельных деревьев варьировала от 15 до 19 лет. При этом в стволах присутствовали очаги поражения бурой трещиноватой и белой волокнистой гнилями.

Древесина, пораженная грибами бурой трещиноватой гнили, имела светло-коричневый цвет, у древесины с белой волокнистой гнилью практически не наблюдалось визуальных отличий от здоровой древесины этого же региона. Для определения степени биодеструкции исследуемой древесины по стандартизованным методикам ГОСТ 16483.1–84, ГОСТ 16483.10–73, ГОСТ 16483.4–73 были установлены плотность, прочность при сжатии вдоль волокон и ударная вязкость (табл. 1).

Таблица 1

Физико-механические показатели испытываемой древесины
Physical and mechanical properties of the tested wood

Показатель	Здоровая	Пораженная гнилью	
		бурой трещиноватой	белой волокнистой
Плотность, кг/м ²	360	245	305
Предел прочности при сжатии вдоль волокон, МПа	38	13	27
Ударная вязкость при изгибе, Дж/м ²	5,31	1,08	3,48

Образцы древесины, пораженные дереворазрушающими грибами, независимо от вида гнили имели низкие физико-механические показатели в сравнении с контрольной здоровой древесиной. Плотность образцов с белой волокнистой гнилью оказалась более чем на 15 % ниже, чем у здоровой древесины. Механические свойства характеризовались более существенными различиями: предел прочности при сжатии вдоль волокон ниже на 28 % у пораженной белой волокнистой гнилью древесины, ударная вязкость при изгибе ниже на 34 %. Образцы древесины с бурой трещиноватой гнилью имели самые низкие показатели физико-механических свойств из всех образцов. Такие результаты во многом согласуются с мнением авторов [20], что при воздействии грибами бурой трещиноватой гнили ударная вязкость при изгибе для древесины на крайней стадии биодеструкции ниже на 95 %, при этом плотность снижается только на 10 %. Следует отметить, что полученные результаты указывают на крайние стадии биодеструкции древесины.

Первичное измельчение древесины (рис. 1) осуществлялось на лабораторной рубительной машине, оснащенной режущим диском и молотковым механизмом с диаметром сит 8 мм.



Рис. 1. Гнилая древесина: *a* – бурая трещиноватая гниль; *б* – белая волокнистая гниль

Fig. 1. Rotten wood: *a* – brown cracked rot; *b* – white fibrous rot

Фракционный состав древесных частиц после предварительного механического измельчения определялся методом сухого фракционирования (рис. 2).

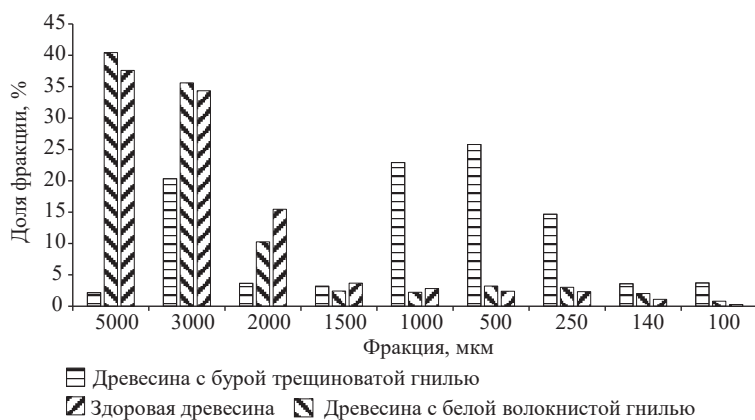


Рис. 2. Фракционный состав древесных частиц

Fig. 2. Fractional composition of wood particles

В результате фракционирования партий древесных частиц после механического измельчения было выявлено, что наименьшее количество крупной фракции имеет древесина, пораженная грибами бурой трещиноватой гнили. Это связано со степенью деструкции, а также с механизмом разрушения древесины под воздействием данного вида грибов, в результате которого уничтожается такое количество целлюлозы и гемицеллюлозы, что ощутимо сокращается количество крупных частиц при размоле ввиду частичного или полного разрушения клеток.

При воздействии дереворазрушающих грибов в древесине происходят изменения, которые значительно влияют на процессы ее термической деструкции [21, 23], это предопределяет возможность изучения физико-химического состояния древесины методом термического анализа. Данный метод широко применяется для исследования основных полимерных компонентов древесины, в т. ч. гнилой, и определения соотношения ароматической и углеводной частей [22, 24]. В качестве проб использовались древесные частицы здоровой и пораженной гнилью древесины *Abies sibirica*.

Исследования осуществлялись с использованием прибора TG 209 F1 (Netzsch, Германия) при следующих условиях. Скорость нагрева образцов от 25 до 700 °С в окислительной атмосфере (сжатый воздух) – 10 °С·мин⁻¹, скорость потока защитного и продувочного газов – 20 мл·мин⁻¹; масса образцов здоровой древесины и древесины последней стадии гнили – 3,94 и 4,27 мг соответственно, тигель – Al₂O₃, цилиндрической формы. Калибровка прибора проведена по методике и с реперными веществами производителя Netzsch. Обработка данных термического анализа осуществлялась с помощью пакета программ Netzsch. Proteus Thermal Analysis. 4.8.4.

В качестве основного способа подготовки сырья использовался метод гидродинамической обработки в роторном гидродинамическом диспергаторе роторно-пульсационного типа [1]. При этом измельченная древесина предварительно смешивалась с водой температурой от 8 до 10 °С в емкости до концентрации 6 %. Затем осуществлялась обработка в течение 10 мин. Частота вращения ротора – 2950 об./мин. После обработки древесной массы методом мокрого фракционирования определялся ее фракционный состав (рис. 3).

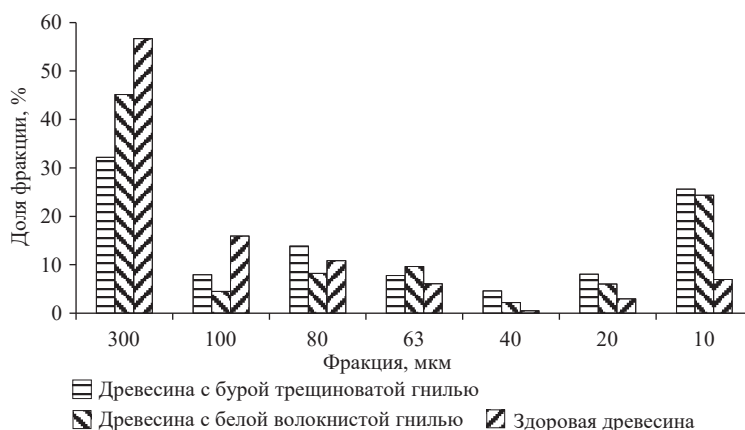


Рис. 3. Изменение фракционного состава в процессе гидродинамической обработки

Fig. 3. Change in fractional composition during hydrodynamic treatment

Анализ полученных данных указывает на то, что доля фракции с размерами менее 20 мкм (дно) возрастает. При этом масса, полученная из древесины, пораженной грибами бурой трещиноватой гнили, имеет более равномерное распределение частиц по разным фракциям, в то время как здоровая древесина и древесина, пораженная грибами белой волокнистой гнили, характеризуются большим количеством крупной фракции (300 мкм). Это, вероятно, обусловлено существенным снижением прочности древесины и увеличением ее хрупкости в связи с меньшим количеством целлюлозы.

Для изготовления плит формирование ковра осуществлялось путем налива полученных древесных масс в специальную металлическую форму с сетчатым дном. Для обезвоживания ковра использовали механический отжим в холодном прессе с давлением 1,0 МПа. После этого плиты помещали в горячий пресс Fontijne presses LabPro 1000 (Дания). Горячее прессование проводилось при температуре 190 °С и удельной продолжительности 2 мин/мм, плотность готовых плит составляла 800 кг/м³, толщина – 8 мм.

После прессования плиты выдерживали в течение 1 недели в помещении лаборатории для кондиционирования. После этого осуществляли раскрой плит на образцы для испытаний. Определение механических свойств плит проводилось на испытательной машине УТС-30 (Россия) по ГОСТ 4598–2018. Влажность полученных плит устанавливалась по методике ГОСТ 10633–2018. Опытные образцы помещали в водяную баню и заливали водой температурой 20±2 °С. Расстояние между образцами и стенками водяной бани – 15 мм. Воду нагревали до точки кипения (100 °С) в течение 90±10 мин. Продолжительность кипячения образцов – 120±5 мин. Затем опытные образцы извлекали из ванны, удаляли влагу с поверхности бумажным полотенцем и помещали в сушильный шкаф при температуре 70±2 °С на 960±15 мин. После извлечения образцов из сушильного шкафа им давали остыть до комнатной температуры.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 4 представлены экспериментальные данные, полученные методом термогравиметрии (кривые ТГ и ДТГ) для образцов здоровой и пораженной гнилью древесины. Установлено 4 температурных диапазона (табл. 2),

характерных для древесины [25, 27], при которых наблюдается потеря массы образца.

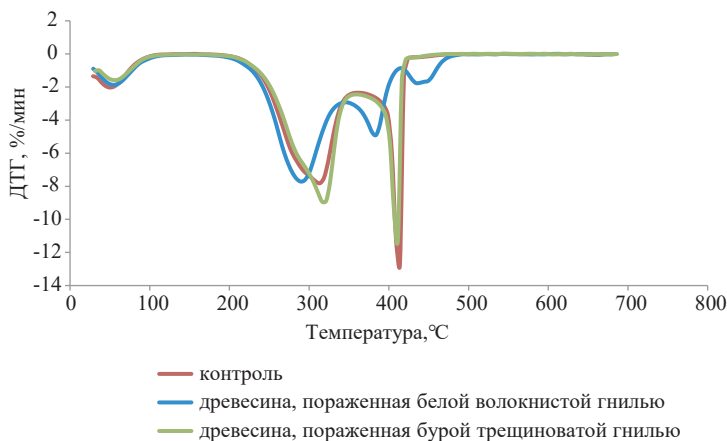


Рис. 4. Кривые ДТГ древесного сырья

Fig. 4. DTG curves of wood raw materials

Таблица 2

Результаты термического анализа испытываемой древесины
Results of thermal analysis of the tested wood

Древесина	Температурный интервал, °С			
	Потеря массы, %			
	Δm_1	Δm_2	Δm_3	Δm_4
Здоровая	<u>20–114</u> 4,23	<u>186–287</u> 18,87	<u>287–364</u> 43,24	<u>364–469</u> 29,90
Пораженная бурой трещиноватой гнилью	<u>20–99</u> 3,94	<u>170–282</u> 22,38	<u>282–344</u> 26,06	<u>344–455</u> 45,28
Пораженная белой волокнистой гнилью	<u>20–116</u> 9,68	<u>194–271</u> 15,60	<u>271–345</u> 41,13	<u>414–492</u> 7,34

На первом этапе нагревания древесины от 20 до 116 °С происходит испарение воды (Δm_1). Уменьшение массы образцов при дальнейшем повышении температуры до 360 °С обусловлено в основном термическим разложением гемицеллюлоз и аморфной части целлюлозы (Δm_2). Дальнейшая потеря массы связана с развитием термодеструкции кристаллической части целлюлозы (Δm_3) [28, 30]. На последнем этапе нагрева от 406 до 518 °С происходит преимущественная термодеструкция лигнина (Δm_4) и сгорание образовавшегося угля.

Древесина, поврежденная бурой трещиноватой гнилью, и здоровая древесина имеют близкие содержания влаги – соответственно 4,23 и 3,94 %. При этом древесина с белой волокнистой гнилью при равных условиях содержит 9,68 % влаги, что указывает на ее более высокую гигроскопичность. Это обусловлено значительной долей доступных для молекул воды гидрофильных функциональных групп, что во многом является следствием изменения углеводной части древесинного вещества [27]. В интервале температур от 116 до 360 °С потеря масс $\Delta m_2 + \Delta m_3$ у здоровой древесины составляет 66,34 %, что согласуется с априорными значениями доли углеводной части для древесины пихты сибирской [5]. Потери массы у древесины, пораженной белой волокнистой

гнилью, в данном интервале температур имеют сопоставимое значение. При этом у древесины, пораженной бурой трещиноватой гнилью, доля углеводов составляет 52,38 %, что указывает на их меньшую массу. При этом относительная доля кристаллической части целлюлозы (Δm_3) и лигнина (Δm_4) существенно больше. Помимо того, скорость потери массы у древесины, пораженной бурой трещиноватой гнилью, в области термической деструкции углеводной части значительно ниже в сравнении со здоровой древесиной, это, по-видимому, обусловлено низкой долей данной части, что указывает на крайние стадии биодеструкции. У образцов древесины, пораженной белой волокнистой гнилью, при термическом разложении ароматической части компонентов клеточной стенки скорость потери массы ниже в сравнении со здоровой древесиной, ввиду меньшей доли части, что также указывает на крайние стадии поражения бурой гнилью.

Результаты исследования влияния вида сырья на механические свойства плит представлены в табл. 3.

Таблица 3

Физико-механические свойства готовых плит из испытываемой древесины
Physical and mechanical properties of finished slabs from the tested wood

Показатель	Древесина		
	здоровая	пораженная трещиноватой гнилью	пораженная волокнистой гнилью
Предел прочности при статическом изгибе, МПа	17	27	35
Предел прочности при растяжении перпендикулярно к пласти, МПа	0,58	0,92	0,83
Разбухание по толщине, %	12,1	4,2	7,8

Физико-механические показатели плит, полученных из древесины на крайних стадиях биодеструкции, выше в сравнении с плитами, изготовленными из здоровой древесины. Древесина, пораженная белой гнилью, имеет превосходящую гигроскопичность и, соответственно, большее количество гидрофильных функциональных групп, которые при аутогезионном взаимодействии между частицами могут формировать водородные связи [13]. Прочность древесины определяется свойствами целлюлозы, доля которой в данном случае выше. Это, вероятно, создает условия для получения плит с пределом прочности при статическом изгибе выше более чем в 2 раза в сравнении с контрольными плитами.

Особый интерес вызывают механические свойства плит, полученных из древесины, пораженной бурой трещиноватой гнилью. Основным компонентом в данном случае является лигнин, доля целлюлозы при этом существенно ниже. Механическое измельчение такой древесины позволяет увеличить долю фракций 1000 мкм и менее до 70 %, что в 3 раза превышает показатель для древесины с белой волокнистой гнилью. По-видимому, указанный факт определяет увеличение площади межфазных поверхностей. При этом изменяются химические свойства лигнина [12]. Увеличиваются доли гидроксильных и карбоксильных групп [29]. Это создает предпосылки для роста аутогезионных взаимодействий между частицами, обуславливая высокие физико-механические показатели готовых плит из древесины, пораженной бурой трещиноватой гнилью.

Влагостойкость плит была исследована кипячением в воде (табл. 4). После высыхания и повторной фиксации размеров определен предел прочности при растяжении перпендикулярно к пласти плиты.

Таблица 4

Показатели плит после испытания кипячением
Performance of the slabs after boiling test

Показатель	Здоровая древесина	Древесина с бурой трещиноватой гнилью	Древесина с белой волокнистой гнилью
Предел прочности при растяжении перпендикулярно к пласти плиты, МПа	0,48	0,83	0,60
Разбухание, %	12,5	7,8	4,2
Остаточная деформация, %	8,2	0,3	6,1

Установлено, что плиты не разрушаются. Плиты, полученные из биодegradированной древесины, имеют большую водостойкость в сравнении с плитами из здоровой древесины. Ближайшим аналогом данных плит является MDF (medium density fiberboard). Плиты, полученные из гнилой древесины, полностью соответствуют требованиям, предъявляемым к плитам, несущим нагрузку как в сухих, так и во влажных условиях (ГОСТ 32274–2021).

Заключение

Полученные в ходе работы плиты имеют существенно более высокую влагостойкость по сравнению с традиционными древесными плитами. При этом влагостойкость достигается не за счет введения в плиты модифицирующих добавок, как у MDF, а благодаря изменениям, происходящим в структуре древесины при гниении и гидродинамической обработке.

Биодegradированная древесина может быть использована для получения плит без связующих веществ, свойства готовых плит при этом будут соответствовать требованиям стандартов, а по ряду показателей продукция превзойдет существующие аналоги. Использование древесины, пораженной белой волокнистой гнилью, в качестве сырья для производства плит без связующих позволяет получить материал с высокими физико-механическими свойствами, которые соответствуют действующим стандартам. Плиты из древесины с бурой трещиноватой гнилью имеют хорошие механические свойства и наибольшую водостойкость в сравнении с остальными испытанными образцами.

Таким образом, плиты из биодegradированной древесины благодаря высоким физико-механическим свойствам и водостойкости могут применяться в производстве мебели, строительстве, в т. ч. в условиях повышенной влажности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Ермолин В.Н., Баяндин М.А., Казичин С.Н., Намятов А.В., Острякова В.А. Водостойкость древесных плит, получаемых без использования связующих веществ // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 3. С. 151–158.

Ermolin V.N., Bayandin M.A., Kazitsin S.N., Namyatov A.V., Ostryakova V.A. Water Resistance of Wood Boards Produced Without the Use of Binders. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2020, no. 3, pp. 151–158. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-3-151-158>

2. Ерицов А.М., Волков В.Д., Ломов В.Д. Катастрофические лесные пожары последних лет // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2016. Т. 20, № 5. С. 106–110.

Yeritsov A.M., Volkov V.D., Lomov V.D. Catastrophic Forest Fires of Recent Years. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2016, vol. 20, no. 5, pp. 106–110. (In Russ.).

3. Ермолин В.Н., Баяндин М.А., Намятов В.Н., Острыкова В.А. Структурно-механические свойства гидродинамически активированной древесной массы в аддитивных технологиях // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 2. С. 121–131.

Ermolin V.N., Bayandin M.A., Namyatov A.V., Ostryakova V.A. Structural and Mechanical Properties of Hydrodynamically Activated Wood Pulp in Additive Technologies. *Lesnoy zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 2, pp. 121–131. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-121-131>

4. Казитин С.Н., Ермолин В.Н., Баяндин М.А., Намятов А.В. Разработка режима горячего прессования плит без связующих веществ из механоактивированных древесных частиц // Хвойные бореал. зоны. 2016. Т. 34, № 5-6. С. 315–318.

Kazitsin S.N., Ermolin V.N., Bayandin M.A., Namyatov A.V. Development of Hot Pressing Mode of Boards Without Binders From Mechanically Activated Wood Particles. *Conifers of the Boreal Zone*, 2016, vol. 34, no. 5-6, pp. 315–318. (In Russ.).

5. Лоскутов С.Р., Шапченкова О.А., Анискина А.А. Термический анализ древесины основных лесообразующих пород Средней Сибири // Сиб. лесн. журн. 2015. № 6. С. 17–30.

Loskutov S.R., Shapchenkova O.A., Aniskina A.A. Thermal Analysis of Wood of the Main Forest-Forming Species of Central Siberia. *Siberian Journal of Forest Science*, 2015, no. 6, pp. 17–30. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SJFS20150602>

6. Лоскутов С.Р., Шапченкова О.А., Петрунина Е.А., Пляшеchnik М.А., Тюткова Е.А., Пашенова Н.В., Гродницкая И.Д., Анискина А.А., Сенашова В.А. Диагностика ранних изменений физико-химических свойств древесины под действием грибных инфекций // Химия растит. сырья. 2022. № 2. С. 61–72.

Loskutov S.R., Shapchenkova O.A., Petrunina E.A., Plyashechnik M.A., Tyutkova E.A., Pashenova N.V., Grodnitskaya I.D., Aniskina A.A., Senashova V.A. Diagnostics of Early Changes in Physical and Chemical Properties of Wood Under the Influence of Fungal Infections. *Chemistry of Plant Raw Materials*, 2022, no. 2, pp. 61–72. (In Russ.).

<https://doi.org/10.14258/jcprm.2022029801>

7. Тютиков С.С. Плиты из пораженных гнилями древесных включений торфяных месторождений и валежника без связующих // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI в.: тр. IX Междунар. евразийск. симпози. Т. 9. Екатеринбург: Уральск. гос. лесотехн. ун-т, 2014. С. 100–103.

Tyutikov S.S. Slabs From Rot-Affected Wood Inclusions of Peat Deposits and Dead Wood Without Binders. *Woodworking: Technologies, Equipment, Management of the XXI Century: Proceedings of the IX International Eurasian Symposium. Vol. 9*. Yekaterinburg, Ural State Forestry Engineering University Publ., 2014, pp. 100–103. (In Russ.).

8. Adhi T., Korus R., Pometto I. Lignin Degradation and Production of Microbially Modified Lignin Polymers by *Streptomyces Viridosporus* in Slurry Reactors. *Appl Biochem Biotechnol*, 1988, no. 118, pp. 291–301. <https://doi.org/10.1007/BF02930833>

9. Barrette J., Thiffault E., Saint-Pierre F., Wetzel S., Duchesne I., Krigstin S. Dynamics of Dead Tree Degradation and Shelf-Life Following Natural Disturbances: Can Salvaged Trees From Boreal Forests ‘Fuel’ the Forestry and Bioenergy Sectors? *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 1991, vol. 88, no. 3, pp. 275–290.

<https://doi.org/10.1093/forestry/cpv007>

10. Bashaml J.T. Degradation and Loss of Wood Fibre in Spruce Budworm-Killed Timber, and Effects on Utilization. *The Forestry Chronicle*, no. 3, pp. 76–83.

11. Bekhta P. Effects of Wood Particles from Deadwood on the Properties and Formaldehyde Emission of Particleboards. *Polymers*, 2022, vol. 14, no. 17, pp. 35–37. <https://doi.org/10.3390/polym14173535>

12. Byrne T., Stonestreet C., Peter B. Characteristics and Utilization of Post-Mountain Pine Beetle Wood in Solid Wood Products. *The Mountain Pine Beetle: A Synthesis of Biology, Management, and Impacts on Lodgepole Pine*. Eds.: L. Safranyik, B. Wilson. Victoria, BC, Canada: Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Pacific Forestry Centre, 2006, pp. 233–253.

13. Felby C., Thygesen L., Sanadi A., Barsberg S. Native Lignin for Bonding of Fiber Boards-Evaluation of Bonding Mechanisms in Boards Made From Laccase-Treated Fibers of Beech. *Industrial Crops and Products*, 2004, no. 20, pp. 181–185. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2004.04.020>

14. Goodell B. Brown-Rot Fungal Degradation of Wood: Our Evolving View. *ACS Symposium Series*, 2003, vol. 845, pp. 97–118. <https://doi.org/10.1021/bk-2003-0845.ch006>

15. Hoeger T., Gleisner R., José Negrón J., Orlando Rojas J., Zhu J.Y. Mountain Pine Beetle-Killed Lodgepole Pine for the Production of Submicron Lignocellulose Fibrils, *Forest Science*, 2014, vol. 60, no. 3, pp. 502–511.

16. Jouzani G., Tabatabaei M., Aghbashlo A. Fungi in Fuel Biotechnology. *Springer International Publishing*, 2020, no. 2, pp. 141–146.

17. Kaliyan N., Morey R.V. Factors Affecting Strength and Durability of Densified Biomass Products. *Biomass Bioenergy*, 2012, no. 33, pp. 337–359. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.08.005>

18. Körner I., Kühne G., Pecina H. Unsterile Fermentation von Hackschnitzeln eine Holzvorbehandlungsmethode für die Faserplattenherstellung. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 2001, vol. 59, pp. 334–341. (In Germ.). <https://doi.org/10.1007/s001070100222>

19. Lewis K.L., Thompson D., Hartley I., Pasca S. Wood Decay and Degradation in Standing Lodgepole Pine (*Pinus contorta* var. *latifolia* Engelm.) Killed by Mountain Pine Beetle (*Dendroctonus ponderosae* Hopkins: Coleoptera). *Natural Resources Canada, Mountain Pine Beetle Initiative Working Paper*, 2006, no. 11, pp. 26–31.

20. Muhcu S., Nemli G., Ayırmis N., Bardak S., Baharoğlu M., Sarı B., Gerçek Z. Effect of Log Position in European Larch (*Larix decidua* Mill.). Tree on the Technological Properties of Particleboard. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2015, vol. 30, no. 4, pp. 357–362. <https://doi.org/10.1080/02827581.2014.986522>

21. Nassar M., MacKay G. Mechanism of Thermal Decomposition of Lignin. *Wood and Fiber Science*, 1984, no. 16, pp. 441–453.

22. Poletto M., Dettenborn J., Pistor V., Zeni M., Zattera A.J. Materials Produced From Plantbiomass. Part I: Evaluation of Thermal Stability and Pyrolysis of Wood. *Materials Research*, 2010, no. 13(3), pp. 375–379. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392010000300016>

23. Poletto M., Zattera A.J., Forte M.M.C., Santana R.M.C. Thermal Decomposition of Wood: Influence of Wood Components and Cellulose Crystallite Size. *Bioresource Technology*, 2012, vol. 109, no 1, pp. 148–154. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.122>

24. Qi J., Li F., Zhang X., Luo B., Zhou Y., Fan M., Xia Y. Different Selectivity and Biodegradation Path of White and Brown Rot Fungi Between Softwood and Hardwood. *Research Square*, 2022. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2116440/v1>

25. Rayner A., Boddy L. *Fungal Decomposition of Wood. Its Biology and Ecology*. UK, Wiley, 1998. 587 p.

26. Scheffer T., Wilson T., Luxford R., Hartley C. The Effect of Certain Heart Rot. *USDA Technical Bulletin. Washington D.C.*, 1941, no. 779, pp. 1024–1031.

27. Schell D.J., Harwood C. Milling of Lignocellulosic Biomass. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 1994, no. 45, pp. 159–168. <https://doi.org/10.1007/BF02941795>

28. Watson P. Impact of the Mountain Pine Beetle on Pulp and Papermaking. *The Mountain Pine Beetle: A Synthesis of Biology, Management, and Impacts on Lodgepole Pine*. Ed. by L. Safranyik, B. Wilson. Victoria, BC, Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Pacific Forestry Centre, 2006, pp. 255–275.

29. Widsten P., Laine J.E., Tuominen S. Radical Formation on Laccase Treatment of Wood Defibrated at High Temperatures. Part 1. Studies With Hardwood Fibers. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 2002, no. 17, pp. 139–146.

<https://doi.org/10.3183/npprj-2002-17-02-p139-146>

30. Witomski P., Olek W., Bonarski J.T. Effects of White and Brown Rot Decay on Changes of Wood Ultrastructure. *BioResources*, 2014, vol. 9, no. 4, pp. 7363–7371.

<https://doi.org/10.15376/biores.9.4.7363-7371>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest