



DOI: 10.15393/j2.art.2025.8783

УДК 674.81

*Статья*

## **Оценка токсичности композитов без связующих веществ на основе древесины берёзы и гидролизного лигнина**

**Артёмов Артём Вячеславович**

*кандидат технических наук, доцент, Уральский государственный лесотехнический университет (Российская Федерация), [artemovav@m.usfeu.ru](mailto:artemovav@m.usfeu.ru)*

**Бурындин Виктор Гаврилович**

*доктор технических наук, профессор, Уральский государственный лесотехнический университет (Российская Федерация), [buryndinvg@m.usfeu.ru](mailto:buryndinvg@m.usfeu.ru)*

**Шкуро Алексей Евгеньевич**

*доктор технических наук, доцент, Уральский государственный лесотехнический университет (Российская Федерация), [shkuoroae@m.usfeu.ru](mailto:shkuoroae@m.usfeu.ru)*

**Прытков Любим Николаевич**

*адъюнкт, научный сотрудник, Научно-исследовательское отделение Учебно-научного комплекса пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ, Уральский институт Государственной противопожарной службы МЧС России (Российская Федерация), [prytkov.l.n@mail.ru](mailto:prytkov.l.n@mail.ru)*

*Получена: 21 июля 2025 / Принята: 30 октября 2025 / Опубликована: 12 декабря 2025*

---

**Аннотация:** В данной работе изучены токсичные свойства пластика без связующих веществ (ПБС), полученного из композиций с различным соотношением древесного наполнителя (опилки берёзы) и порошкообразного гидролизного лигнина (ГЛ), представляющего собой отходы гидролизного производства. В качестве критериев токсичности исследуемых ПБС были приняты следующие показатели: валовое содержание тяжёлых металлов в исходном сырье; определение степени воздействия на среду обитания и здоровье человека ГЛ; выделение свободного формальдегида из ПБС; изменение показателя pH водной вытяжки при экспозиции ПБС; биотестирование водной вытяжки из ПБС. Установлено, что процессы самоочищения в ГЛ либо отсутствуют, либо находятся на крайне низком уровне активности. Токсичные свойства ГЛ не зависят от содержания в нём неорганических загрязняющих веществ (тяжёлых металлов и мышьяка), а в значительной степени определяются содержанием самого гидро-

лизного лигнина. Изучаемые образцы ПБС различных композиций, в первую очередь содержащие ГЛ в качестве наполнителя, не являются источником значительного выделения свободного формальдегида при недолговременном контакте с водой комнатной температуры. Степень токсичности водной вытяжки из ПБС имеет прямую зависимость от кислотности ГЛ. Кислая среда воды, образующаяся при длительном воздействии ПБС, не соответствует санитарным нормам и способствует возникновению других негативных процессов, влияющих на окружающую среду и здоровье человека. При общей оценке токсичности исследуемых образцов можно говорить о высокотоксичном воздействии и влиянии ПБС, как во время экспликации, так и после утраты потребительских свойств. Это может существенно ограничить применение данных материалов, как в отношении здоровья человека, так и окружающей природной среды.

**Ключевые слова:** древесные композиты; опилки берёзы; гидролизный лигнин; токсичность; кислотность; тяжёлые металлы; формальдегид

---

DOI: 10.15393/j2.art.2025.8783

Article

## Toxicity assessment of unbounded composites based on birch wood and hydrolysis lignin

**Artyom Artyomov**

*Ph. D. in engineering, associate professor, Ural State Forest Engineering University (Russian Federation), artemovav@m.usfeu.ru*

**Viktor Buryndin**

*D. Sc. in engineering, professor, Ural State Forest Engineering University (Russian Federation), buryndinvg@m.usfeu.ru*

**Aleksey Shkuro**

*D. Sc. in engineering, associate professor, Ural State Forest Engineering University (Russian Federation), shkuroae@m.usfeu.ru*

**Lyubim Prytkov**

*Adjunct, researcher, The Scientific Research Department of the Educational and Scientific Complex for Firefighting and Emergency Rescue Operations, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia (Russian Federation), prytkov.l.n@mail.ru*

*Received: 21 July 2025 / Accepted: 30 October 2025 / Published: 12 December 2025*

---

**Abstract:** In this work, the author studied the toxic properties of plastic without resins (PWR) obtained from compositions with a different ratio of wood filler (birch sawdust) and powdered hydrolyzed lignin (HL), which is a waste from hydrolysis production,. The following indicators were adopted as criteria for the toxicity of the studied PWR: the gross content of heavy metals in the feedstock; the degree of impact on the environment and human health; release of free formaldehyde from PWR; change in the pH of the aqueous extract when exposed to PWR; biotesting of water extracts from PWR. It has been established that the processes of self-purification in HL were either absent or were at an extremely low level of activity. The toxic properties of HL did not depend on the content of inorganic pollutants (heavy metals and arsenic) in it, but largely depended on the content of hydrolyzed lignin itself. The studied PWR samples of various compositions, primarily containing HL as a filler, were not a source of significant release of free formaldehyde upon short-term contact with water at room temperature. The degree of toxicity of the aqueous extract from PWR directly depended

on the acidity of the HL. The acidic environment of water formed during prolonged exposure to PWR did not comply with sanitary standards and promoted other negative processes affecting the environment and human health. In the general assessment of the toxicity of the studied samples, we can talk about PWR highly toxic effects and influence, both during explication and after the loss of consumer properties. This may significantly limit the use of these materials, both in relation to human health and in relation to the natural environment.

**Keywords:** wood composites; birch sawdust; hydrolysis lignin; toxicity; acidity; heavy metals; formaldehyde

---

## 1. Введение

В настоящее время как зарубежные, так и отечественные исследователи для получения композиционных материалов применяют первичные и переработанные лигноцеллулозосодержащие биомассы в качестве наполнителя с целью создания альтернатив традиционным материалам (в первую очередь, ценной древесины), т. к. являются возобновляемыми и более дешёвыми, что позволяет снизить себестоимость продукции [1], [2]. Одновременно ведутся работы по улучшению технологических характеристик таких композиционных материалов за счёт добавления гидролизного лигнина (ГЛ) в лигноцеллюлозосодержащие наполнители. В таких случаях ГЛ может использоваться как связывающий агент (аналогично синтетическим смолам) или выступать в роли модифицирующей добавки благодаря своим специфическим свойствам (например, гидрофобности) [3], [4].

На предприятиях гидролизной промышленности постсоветского пространства ежегодно образуется значительное количество гидролизного лигнина, который является крупнотоннажным отходом. В ближайшие годы ожидается увеличение этого объёма в 2,5—3,0 раза [5]. На отвалах заводов накоплены миллионы тонн этого отхода, а в России запасы гидролизного лигнина оцениваются примерно в 95 млн т [6]. В Республике Беларусь ежегодно в процессе гидролиза древесины хвойных и лиственных пород образуется около 5 млн т гидролизного лигнина [7].

Образующийся ГЛ характеризуется неоднородным и сложным составом, образованным в результате гидролитического распада растительных остатков. Этот состав включает лигнин, который претерпевает значительные изменения в процессе гидролиза (от 40 до 88 масс. %), трудно гидролизуемые полисахариды (от 13 до 45 масс. %), смолистые и гуминоподобные вещества (от 5 до 19 масс. %), а также зольные элементы (от 0,5 до 10 масс. %). Кроме того, в нём присутствуют редуцирующие вещества, такие как моносахариды и фурфурол, остатки серной и органических кислот, преимущественно уксусной и муравьиной, а также химически и физически связанный воды [8].

Лигнин является природным полимером ароматической структуры. В окружающей среде ГЛ деградирует под воздействием ферментативных систем многочисленных микроорганизмов с образованием широкого спектра органических соединений. Химический анализ показал, что образцы лигнина содержали фенолы, фенантрен и метанол. Наибольшее общее содержание органических соединений было отмечено в образцах лигнина, взятых непосредственно на производственном предприятии. В верхних слоях хранящихся образцов лигнина преобладали фенолы, а в нижних — формальдегид и метанол. Исследования инфузорий *Tetrahymena pyriformis* W. в качестве тест-объектов показали, что наиболее токсичны свежие образцы лигнина. Некоторые образцы оказали выраженное цитотоксическое и генетоксическое воздействие при исследовании на моллюсках *Limnaea stagnalis* и эмбриональных фибробластах мышей [9].

Результаты, полученные при изучении химического состава отходов и в различных тест-системах, свидетельствуют об опасности гидролизного лигнина для окружающей среды. Для безопасной эксплуатации материалов на основе лигнинных отходов и последующей их утилизации необходимы подтверждения о санитарно-химической и токсикологической безопасности [9], [10].

В результате исследований [9] было выявлено, что степень токсичности лигнина зависит от его химического состава и свежести. Например, проба свежего лигнина, отобранного на Бобруйском гидролизном заводе, проявила высокий уровень токсичности (2-й класс опасности). Пробы складированного лигнина, отобранные с горизонтальных уровней разной глубины, были охарактеризованы как умеренно токсичные (3-й класс опасности) и мало-токсичные (4-й класс опасности). По результатам токсикологической оценки [11] на инфузориях *Tetrahymena pyriformis* W. и изучения эмбриотоксичности на моллюсках *Lymnaea stagnalis* L. образцы отходов ГЛ РУП «Речицкий опытно-промышленный гидролизный завод» (Республика Беларусь) отнесены к 4-му классу опасности (малоопасные).

Технический лигнин, образуемый на гидролизных заводах, обычно содержит значительное количество примесей и отличается по химическому составу. В природных водах процесс разложения лигнина занимает примерно 200 дней. В ходе этого разложения образуются токсичные низкомолекулярные продукты, такие как фенолы, метанол и карбоновые кислоты. Лигнин, растворимые в воде, классифицируются как лигнинные вещества. Установлено, что лигнинные вещества оказывают токсическое воздействие на различные тест-объекты, включая дафний, рыб и водные растения. Кроме того, цитогенетическая активность множества лигнинных веществ была продемонстрирована в экспериментах на белых крысах, эндемичных моллюсках озера Байкал и растениях [12].

В работе [11] было установлено: в водную среду из проб ГЛ мигрирует невысокое содержание подвижных форм тяжёлых металлов (цинка, хрома и меди), не превышающее или незначительно превышающее предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воде водных объектов хозяйствственно-питьевого и культурно-бытового водопользования.

Наличие тяжёлых металлов и неорганических примесей в ГЛ отмечается и другими исследователями. Так, в работе [13], согласно результатам, полученным методом энергодисперсионной рентгенофлуоресцентной спектрометрии (ЭДРФС), в ГЛ содержатся неорганические примеси до 4,3 масс. % (преимущественно кремний, натрий, алюминий, железо, калий, медь, ванадий, марганец и пр.). Данные по содержанию тяжёлых металлов в ГЛ, полученные атомно-абсорбционным спектрометрическим методом анализа (ААС), показали содержание меди (0,008 масс. %), свинца (0,0005 масс. %), серебра (0,0000037 масс. %), кадмия (0,000003 масс. %) [14].

ГЛ, обладая высокой кислотностью, устойчив к контаминации, что затрудняет его естественное разложение [15]. Повышенная кислотность может обуславливать выделение формальдегида из ГЛ. Источниками формальдегида в кислой среде могут быть структурные единицы

лигнина, которые имеют в боковой цепи две гидроксильные или сопряжённую с бензольным кольцом карбонильную группу. Также формальдегид может образовываться из полисахаридов ГЛ. В кислой среде полисахариды образуют оксиметилфурфурол — относительно нестабильное химическое соединение, которое разлагается на формальдегид и фурфурол [15]. При этом сам исходный ГЛ не пригоден для связывания формальдегида по причине низкой удельной свободной поверхностной энергии частиц [16].

Применение ГЛ совместно с лигноцеллюзосодержащими наполнителями при производстве композиционных материалов может оказывать существенное влияние на качество конечных изделий. В частности, свойства ГЛ могут как улучшать, так и ухудшать характеристики композитов, в т. ч. их физико-механические, эксплуатационные и эстетические свойства, а также устойчивость к биологическим и грибковым поражениям [18—20]. Выполняются аналогичные исследования влияния ГЛ для композиционных материалов — пластиков без применения синтетических связующих (ПБС) [21], [22].

Результаты проведённых исследований [23—26] подтверждают данные результаты, но, тем не менее, можно отметить, что влияние ГЛ на свойства композитов может варьироваться в зависимости от его концентрации, метода обработки и типа используемого наполнителя и матрицы.

При разработке биоразлагаемых (компостируемых) композитных материалов с использованием ГЛ следует учитывать, что этот потенциально опасный компонент может оказывать влияние на сам процесс биодеградации изделия, а также опосредованно на здоровье человека и экосистему в целом. В случае применения ГЛ в качестве добавки к древесному наполнителю ПБС было установлено, что образование единой фазы между ними невозможно из-за различий в их физико-химических свойствах [27]. При этом наблюдается, что в процессе деструкции ПБС на основе древесного наполнителя и ГЛ в условиях окружающей среды начальный этап разрушения происходит и протекает по наименее гидрофобному компоненту — древесине. Результаты испытаний на биоразложение ПБС, содержащего древесный наполнитель и ГЛ, показывают практически полное разрушение древесины, в то время ГЛ как компонент древесного наполнителя остаётся практически неизменным [28].

Согласно литературным источникам, представленным выше, можно говорить, что ГЛ обладает потенциальной опасностью в случае использования в качестве модификатора древесного наполнителя ПБС. Такая опасность ГЛ может быть связана с наличием в нём тяжёлых металлов, а также со своей высокой кислотностью, способностью выделять свободный формальдегид и с биотоксичностью по отношению к гидробионтам.

Цель данной работы заключалась в исследовании воздействия и влияния мелкодисперсного порошкообразного ГЛ на возможные потенциально опасные (токсичные) характеристики ПБС, полученного на основе древесины лиственных пород (берёзовых опилок).

Это исследование направлено на уточнение оптимального соотношения указанных компонентов наполнителя для получения материала, который будет обладать способностью к естественной деструкции, высокими физико-механическими характеристиками и мини-

мальными токсичными свойствами по отношению к здоровью человека и окружающей природной среде. В предыдущих исследованиях [22] на основании выполненного анализа экспериментальных данных был предложен состав для получения ПБС на основе древесного наполнителя в виде берёзовых опилок с добавлением порошкообразного ГЛ в количестве 40—60 масс. %.

В данной работе была проведена оценка токсичных свойств ПБС, полученных на основе древесины лиственных пород (берёзовые опилки) с добавлением порошкообразного гидролизного лигнина в качестве модификатора. Интегральная оценка токсичности данных материалов включала: определение содержания тяжёлых металлов в исходном сырье, испытания ПБС на выделение свободного формальдегида, анализ влияния на показатель pH водной вытяжки от продолжительности экспозиции ПБС, а также биотестирование водной вытяжки из ПБС.

## 2. Материалы и методы

В качестве объекта исследований были приняты образцы ПБС в виде дисков на основе древесного наполнителя с добавлением порошкообразного ГЛ. Добавка ГЛ к древесному наполнителю принималась по массе (%) и составляла 0; 20; 40; 60; 80; 100.

В качестве древесного наполнителя ПБС использовались опилки лиственной породы древесины — берёза повислая (*Betula pendula*). Опилки были получены путём механической обработки древесины и просеяны через вибросито через ячейки диаметром 0,7 мм.

Добавка в виде ГЛ — просушенные порошкообразные отходы Тавдинского гидролизного завода (Свердловская область). ГЛ не подвергался дополнительному фракционированию, был просеян через вибросито через ячейки диаметром 0,7 мм.

Из берёзовых опилок и ГЛ формировались композиции по принятым соотношениям. Полученные композиции подвергались перемешиванию в лабораторном смесителе и дополнительному просеиванию с помощью вибросита. По полученным композициям достигалась оптимальная влажность 12 %.

Образцы-диски (диаметр 90 мм и толщина 2 мм) из подготовленных композиций изготавливались методом горячего компрессионного прессования в закрытой пресс-форме при следующих условиях: давление прессования 40 МПа, температура прессования 180 °C, продолжительность прессования 10 мин, продолжительность охлаждения под давлением 10 мин. Полученные образцы подвергались кондиционированию в комнатных условиях в течение суток.

Испытание ПБС на физико-механические свойства осуществлялось по аттестованным методикам исследований для древесных композиционных материалов, а также по адаптированным методикам исследований для образцов-дисков ПБС. В рамках настоящего исследования были определены следующие показатели: плотность, прочность при изгибе (по ГОСТ 4648-2014), твёрдость по вдавливанию шарика (по ГОСТ 4670-2015), модуль упругости при изгибе (по прогибу образца-диска, представленного в работе [29]), число

упругости (по исследованию [30]), водопоглощение по объёму за 24 ч и разбухание по толщине за 24 ч (по ГОСТ 4650-2014).

В качестве объекта контроля физико-механических свойств были использованы композиции на основе наполнителя в виде древесной муки марки ДМ-180 (ГОСТ 16361-87) с аналогичным соотношением добавки ГЛ. Результаты испытаний на физико-механические свойства ПБС по различным композициям ГЛ сведены в таблице 1.

**Таблица 1.** Физико-механические свойства ПБС по различным композициям

**Table 1.** Physico-mechanical properties of PWR in various compositions

Физико-механические показатели	Содержание ГЛ					
	в древесном наполнителе, масс. %					
	0	20	40	60	80	100
Плотность ( $\Delta \pm 17$ ), кг/м <sup>3</sup>	957	935	946	816	764	917
	1001	960	956	951	920	
Прочность при изгибе ( $\Delta \pm 0,7$ ), МПа	10,5	8,8	7,6	4,6	3,3	2,8
	16,5	11,8	10,0	8,7	8,5	
Модуль упругости при изгибе (по прогибу образца-диска) ( $\Delta \pm 126$ ), МПа	2654	2242	2042	1458	1242	1212
	6727	4422	4298	3710	3301	
Твёрдость по вдавливанию шарика ( $\Delta \pm 0,1$ ), МПа	17,3	17,3	17,2	17,1	17,1	17,5
	17,9	17,8	17,8	17,7	17,7	
Число упругости ( $\Delta \pm 3$ ), %	34	29	27	26	23	49
	68	65	64	55	53	
Водопоглощение по объёму за 24 ч ( $\Delta \pm 6$ ), %	56	48	42	26	20	14
	46	41	27	27	25	
Разбухание по толщине за 24 ч ( $\Delta \pm 1,6$ ), %	23,5	20,2	14,7	11,6	6,5	4,3
	26,3	26,1	15,8	13,2	7,4	

*Примечание.* В верхней части двойных строк данные для ПБС на основе берёзовых опилок, в нижней части — древесной муки.

Результаты испытаний физико-механических свойств исследуемых ПБС соответствовали ранее полученным данным [21], [22], [27], [28]. В общем, полученные характеристики физико-механических свойств отвечали требованиям, необходимым для комплексной оценки образцов на токсичность по принятым показателям и критериям.

Перечень опасных (токсичных) показателей и критерии их оценки, принятые для ПБС на основе древесного наполнителя и ГЛ, представлены в таблице 2.

**Таблица 2.** Опасные (токсичные) показатели ПБС и критерии их оценки**Table 2.** Dangerous (toxic) PWR indicators and criteria for their assessment

№ п/п	Опасный (токсичный) показатель	Определяемый параметр	Критерии	Нормативный документ, методика исследований
1	Содержание неорганических элементов загрязнителей	Содержание тяжёлых металлов (цинк, свинец, ртуть, кадмий, никель, медь, хром (VI)) и мышьяка в исходном сырье (ГЛ)	Предельно допустимые концентрации (ПДК) и ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве	СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»
2	Содержание неорганических и органических веществ	Показатели опасности компонентов ГЛ	Степень воздействия на среду обитания и здоровье человека	СП 2.1.7.1386-03 «Санитарные правила по определению класса опасности токсичных отходов производства и потребления»
3	Кислотность (водородный показатель (рН))	Изменение рН водной вытяжки ПБС от продолжительности выдержки за 90 сут.	Величина рН водной вытяжки из ПБС	СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»
4	Эмиссия формальдегида	Выделение свободного формальдегида по методу WKI	Класс эмиссии формальдегида ПБС, мг/100 г плиты	ГОСТ 10632-2014 «Плиты древесно-стружечные. Технические условия»
5	Токсичность	Биотестирование водной вытяжки из ПБС	Индекс токсичности и токсикологическая величина параметра ЕС	МР 01.021-07 «Методика экспрессного определения интегральной химической токсичности питьевых, поверхностных, грунтовых, сточных и очищенных сточных вод с помощью бактериального теста "Эколюм"»

Содержание цинка, меди, кадмия, свинца и никеля осуществлялось по методике РД 52.18.685-2006 «Методические указания. Определение массовой доли металлов в пробах почв и донных отложений. Методика выполнения измерений методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии», мышьяка — согласно ПНД Ф 16.1:2.2:3.17-98 «Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений массовой доли (валового

содержания) мышьяка и сурьмы в твёрдых сыпучих материалах атомно-абсорбционным методом с предварительной генерацией гидридов» на атомно-абсорбционном спектрометре «КВАНТ-2»; ртути — согласно ПНД Ф 14.1:2:3.172-2000 «Методика выполнения измерений массовой доли общей ртути в пробах почв и грунтов на анализаторе ртути РА-915+ с приставкой РП-91С» на приборе «Анализатор ртути РА-915+».

Определение pH водной вытяжки пресс-сырья осуществлялось по ГОСТ 26483-85 «Почвы. Приготовление солевой вытяжки и определение её pH по методу ЦИНАО» на приборе «рН-метр 150 МИ».

Допустимые уровни содержания тяжёлых металлов и мышьяка (ПДК/ОДК) в ГЛ определены на основании допустимого содержания химических веществ в почве согласно СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». В настоящее время нормирование качества почвы по неорганическим веществам для ряда загрязняющих веществ зависит от типа почвы и pH солевой вытяжки. Показатель pH солевой вытяжки для исследуемого ГЛ составил 3,8. В связи с этим были установлены допустимые уровни содержания тяжёлых металлов и мышьяка, согласно СанПиН 1.2.3685-21, для кислых почв (суглинистых и глинистых) с pH KCl менее 5,5.

Оценка степени токсичности материала при наличии цветных металлов была выполнена по аналогии с определением класса опасности (токсичности) отхода по отношению к здоровью человека и среды обитания человека расчётым методом по степени воздействия на человека и окружающую среду согласно СП 2.1.7.1386-03 «Санитарные правила по определению класса опасности токсичных отходов производства и потребления».

Расчёты метод применяется, если известен качественный и количественный состав отхода и в литературных источниках имеются необходимые сведения для определения показателей опасности компонентов отхода ( $K_i$ ).

Содержание основных компонентов в гидролизном лигнине было принято на основе литературных данных [31] (масс. %): целлюлоза — 17,04; лигнин — 52,71; зола — 5,65; полисахариды — 19,61. Итого 95,01 масс. %, что соответствует требованиям СП 2.1.7.1386-03.

$K_i$  рассчитывается как отношение концентрации компонента отхода ( $C_i$ , мг/кг) и коэффициента степени опасности компонента ( $W_i$ ). Величина  $W_i$  определяется по выражению  $lg W_i = 1,2 (X_i - 1)$ , где  $X_i$  — усреднённый параметр опасности компонента отхода.

На основе качественного состава отхода проводится информационный поиск токсикологических, санитарно-гигиенических и физико-химических показателей опасности каждого его компонента  $X_i$ . Усреднённый параметр опасности компонента отхода  $X_i$  вычисляется делением суммы баллов по всем показателям, включая информационный, на общее число показателей.

Суммарный индекс опасности  $K$  равен сумме  $K_i$  всех компонентов отхода. По величине  $K$  отходы по степени воздействия на среду обитания и здоровье человека ранжируются по классам опасности:

- 1-й класс — чрезвычайно опасные ( $K > 50\ 000$ );
- 2-й класс — высокоопасные ( $K = 50\ 000 \div 1000$ );
- 3-й класс — умеренно опасные ( $K = 999 \div 100$ );
- 4-й класс — малоопасные ( $K = < 100$ ).

Испытание образцов по изменению рН водной вытяжки ПБС осуществлялось путём измерения рН воды за определённые промежутки времени. Продолжительность выдержки образцов в исследуемой воде составило 90 сут. (2160 ч). Выбор данного периода был обусловлен требованиями ГОСТ Р 57226-2016 «Пластмассы. Определение степени разложения в установленных условиях компостирования в процессе пробных испытаний», который устанавливает срок 12 недель (84 сут.), а также результатами предыдущих исследований биоразлагаемости, в которых был выявлен гидролитический механизм деструкции ПБС при компостировании [21], [22], [28].

В качестве критерия качества был принят водородный показатель (рН), соответствующий нормам для воды питьевого централизованного и нецентрализованного водоснабжения и водоисточников хозяйственно-бытового и рекреационного водопользования согласно СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания», который должен составлять 6,0—9,0 ед.

Испытание образцов ПБС на токсичность по выделению формальдегида проводилось по методу WKI, который представляет собой баночный метод определения эмиссии формальдегида [33].

Из-за отсутствия установленных критериев выделения свободного формальдегида для ПБС были приняты предельно допустимые нормы содержания формальдегида в древесно-стружечной плите (мг/100 г абсолютно сухой плиты) для классов эмиссии Е0,5, Е1 и Е2, установленные в ГОСТ 10632-2014 «Плиты древесно-стружечные. Технические условия»:

- Е0,5 — до 4,0 включительно;
- Е1 — более 4,0 до 8,0 включительно;
- Е2 — более 8,0 до 20,0 включительно.

Биотестирование водной вытяжки из ПБС, выполненное в соответствии с МР 01.021-07 «Методика экспрессного определения интегральной химической токсичности питьевых, поверхностных, грунтовых, сточных и очищенных сточных вод с помощью бактериального теста "Эколюм"», осуществлялось с использованием прибора экологического контроля «Биотокс-10М».

В качестве тест-объекта использовались препараты лиофилизованных люминесцентных бактерий или ферментные препараты бактериальной люциферазы. Биосенсор способен реагировать на токсичные соединения различной химической природы и их смеси. Критерием токсического воздействия служит измерение интенсивности биолюминесценции тест-объекта с помощью прибора «Биотокс-10М» под влиянием химических соединений, присутствующих в исследуемой водной пробе, по сравнению с раствором, свободным

от токсических веществ. Снижение интенсивности биолюминесценции пропорционально уровню токсического эффекта.

Количественные оценки тест-реакции выражаются в виде безразмерной величины — индекса токсичности Т и функциональными токсикологическими параметрами ЕС20 и ЕС50.

Индекс токсичности Т, равный отношению  $T = 100 (I_0 - I)/I_0$ , где  $I_0$  и  $I$  — соответственно интенсивность биолюминесценции контроля и опыта при фиксированном времени экспозиции исследуемой пробы с биосенсором.

Методика предусматривает три пороговых уровня индекса токсичности:

- допустимая степень токсичности образца: индекс токсичности Т меньше 20; объём пробы или концентрация вещества в пробе меньше величины ЕС20;
- образец токсичен: индекс Т равен или больше 20 и меньше 50; объём пробы (или концентрация вещества в пробе) меньше величины ЕС50 и больше или равен ЕС20;
- высокая токсичность образца: индекс токсичности Т равен или более 50; объём пробы (или концентрация вещества в пробе) равен или больше величины ЕС50.

Все выполняемые исследования и измерения были проведены не менее чем в пяти параллелях. Полученные результаты были подвергнуты статистической обработке на выявление грубых промахов и определение допустимой погрешности измерений.

### 3. Результаты

Результаты определения содержания цветных металлов и мышьяка в исходном ГЛ представлены в таблице 3.

**Таблица 3.** Содержание цветных металлов и мышьяка в исходном ГЛ

**Table 3.** The content of non-ferrous metals and arsenic in the initial hydrolyzed lignin

Показатель	Класс опасности	Валовое содержание ( $\pm \Delta$ ), мг/кг	ПДК/ОДК почвы с учётом фона (кларка), мг/кг	Лимитирующий показатель вредности (ЛПВ)
рН солевой вытяжки	—	3,8 ( $\pm 0,1$ )	для рН KCl < 5,5	—
Свинец	1	1,4 ( $\pm 0,4$ )	65	—
Кадмий	1	0,45 ( $\pm 0,14$ )	1,0	—
Цинк	1	108 ( $\pm 32$ )	110	—
Медь	2	50 ( $\pm 15$ )	66	—
Ртуть	1	0,036 ( $\pm 0,016$ )	2,1	Транслокационный
Никель	2	< 10	40	—
Хром (6+)	2	2,3 ( $\pm 0,7$ )	0,05	Общесанитарный
Мышьяк	1	< 0,20	5,0	—

Согласно данным, представленным в таблице 3, в результате проведённых исследований было установлено превышение фоновой концентрации хрома (VI) — элемента 2-го класса опасности. Шестивалентный хром характеризуется общесанитарным ЛПВ, который свидетельствует о степени изменения микробиологической активности почвы под воздействием нормируемого вещества и отражает процессы, касающиеся биологической активности биоценоза и его самоочищающей способности. Таким образом, можно сделать косвенный вывод о том, что процессы самоочищения в ГЛ либо отсутствуют, либо находятся в очень низком активном состоянии.

Исходные данные и результаты расчёта класса токсичности порошкообразного ГЛ представлены в таблице 4.

**Таблица 4.** Расчёт класса токсичности ГЛ по отношению к здоровью человека

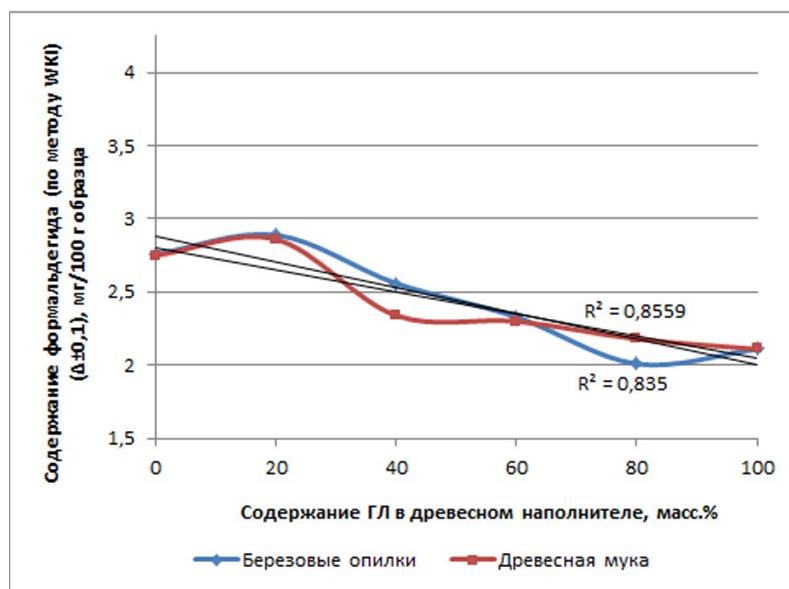
**Table 4.** Calculation of the toxicity class of hydrolyzed lignin in relation to human health

Название компонента	Усреднённый параметр опасности компонента отхода $X_i$	Коэффициент степени опасности $i$ -го компонента отхода $W_i$	Концентрация $i$ -го компонента отхода $C_i$ , мг/кг	Показатель опасности $i$ -го компонента отхода $K_i$
Свинец и его неорганические соединения ( $Pb^{2+}$ )	1,500	3,981	1,400	0,352
Кадмий ( $Cd^{2+}$ )	1,286	2,203	0,450	0,204
Цинк ( $Zn^{2+}$ )	2,286	34,914	108,000	3,093
Медь ( $Cu^{2+}$ )	1,333	2,512	50,000	19,904
Ртуть ( $Hg^{2+}$ )	1,000	1,000	0,036	0,036
Никель ( $Ni^{2+}$ )	1,750	7,943	0,000	0,000
Хром ( $Cr^{6+}$ )	2,000	15,849	2,300	0,145
Мышьяк	2,000	15,849	0,000	0,000
Целлюлоза	2,600	83,176	170400.000	2048,668
Гидролизный лигнин	2,500	63,096	527100.000	8353,937
Зола (минеральные примеси)	2,000	15,849	56500.000	3564,894
Полисахариды (гексозы и пентозы)	0,000	0,000	196100.000	—
Итого				13991,233

По результатам осуществлённых расчётов (см. таблицу 4) степень опасности отхода для окружающей среды (К) находится в диапазоне от 1000 до 50000. В соответствии с СП 2.1.7.1386-03 это позволяет классифицировать рассматриваемый ГЛ как II класс

токсичности для здоровья человека и окружающей среды (высокоопасный). Суммарное значение К, учитывающее только содержание цветных металлов в ГЛ, составило 23,735, что указывает на их малоопасную токсичность (4-й класс). Таким образом, можно утверждать, что токсичные свойства ГЛ не зависят от содержания в нём неорганических загрязняющих элементов (тяжёлых металлов и мышьяка), а в значительной степени обусловлены содержанием самого гидролизного лигнина.

Результаты испытаний ПБС по выделению формальдегида по методу WKI представлены на рисунке 1.

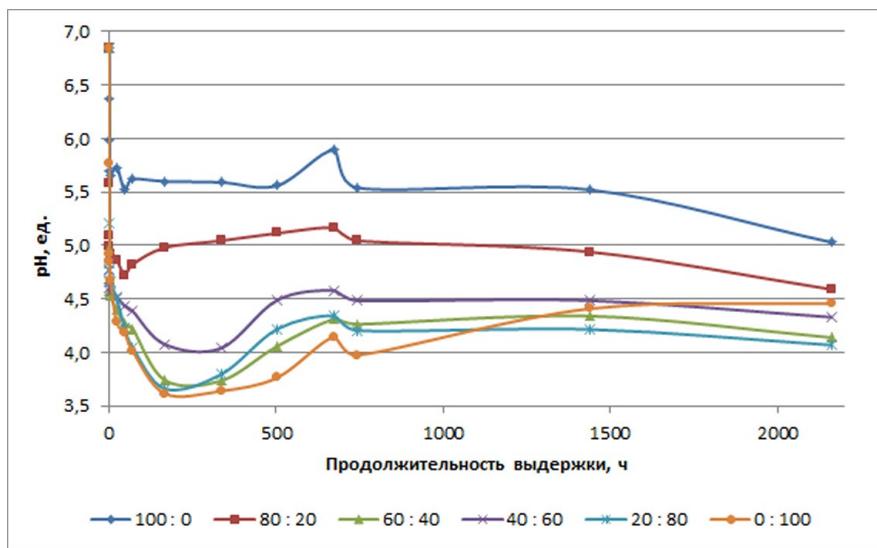


**Рисунок 1.** Определение содержания в образцах ПБС свободного формальдегида [рисунок авторов]

**Figure 1.** Determination of the content of free formaldehyde in PWR samples

Образцы ПБС, полученные на основе различных композиций, в процессе испытаний продемонстрировали уровень содержания формальдегида, соответствующий классу Е0,5 (см. рисунок 1). ПБС на основе древесины и ГЛ демонстрируют невысокую эмиссию формальдегида, что обусловлено составом используемых наполнителей. Древесина и ГЛ обладают устойчивостью к воздействию воды при комнатной температуре за непродолжительное время контактирования. При этом увеличение содержания ГЛ в композиции вносит вклад в снижение эмиссии свободного формальдегида. При увеличении содержания ГЛ наблюдается уменьшение уровня выделения формальдегида, что связано с сокращением доли древесных опилок в составе композиций. Таким образом, можно говорить о том, что исследуемые образцы ПБС различных композиций, в первую очередь наполнитель в виде ГЛ, не являются источником выделения высоконормируемых показателей свободного формальдегида в случаях кратковременного воздействия воды комнатной температуры.

Результаты испытаний ПБС по изменению рН водной вытяжки из материала представлены на рисунке 2.



**Рисунок 2.** Изменение рН водной вытяжки из ПБС на основе берёзовых опилок с различным содержанием ГЛ за 90 сут. [рисунок авторов]

**Figure 2.** Change in the pH of an aqueous extract from PWR based on birch sawdust with a different content of hydrolyzed lignin in 90 days

Показатель рН исходной воды соответствовал практически нейтральной среде 6,8. На начальном этапе выдержки образцов (для различных композиций ПБС он составлял 48÷336 ч) наблюдается значительное снижение уровня показателя рН до слабокислой и кислой среды (3,6—5,5 ед.). Данное явление, в первую очередь, обусловлено наличием в ГЛ неорганической серной кислоты. При увеличении содержания ГЛ в составе ПБС снижение рН становится более резким и выраженным.

Сама по себе древесина демонстрирует значительную устойчивость к гидролизу разбавленными кислотами при обычной температуре. Однако при длительном воздействии воды на древесину происходит растворение определённого количества водоэкстрактивных веществ. В результате взаимодействия водных растворов кислот с древесиной осуществляется гидролиз целлюлозы и гемицеллюлоз, что приводит к образованию простых сахаров, таких как глюкоза и ксилоза, а также органических кислот, например, уксусной и муравьиной. Поскольку органические кислоты являются слабыми, снижение рН у образцов с преобладанием древесного наполнителя происходит более постепенно. При этом наблюдается пик увеличения показателя рН (в пределах 504÷672 ч), причём для образцов, содержащих преобладающее количество древесины, этот максимум проявляется более явно и резко. Это, вероятно, связано с образованием сахаров из гидролизируемой древесины, обладающих нейтральной средой, что способствует частичной нейтрализации кислот.

В дальнейшем (более 1440 ч выдержки) устанавливается равновесный уровень pH в пределах 4,5—4 ед., что характеризует полную деструкцию данных материалов (не образцов) в условиях кислотного гидролиза. Следует отметить, что у образцов ПБС, содержащих только гидролизный лигнин, после 1440 ч выдержки наблюдается тенденция к увеличению pH. Это может косвенно свидетельствовать о выделении формальдегида в процессе длительного гидролиза.

Полученные данные были сопоставлены с установленными нормами показателей качества различных видов вод (кроме технической воды), что позволило сделать вывод о несоответствии качества воды при продолжительной выдержке образцов ПБС требованиям СанПиН 1.2.3685-21 (показатель pH должен находиться в пределах 6,0—9,0), а также об отсутствие тенденции их к самоочищению и восстановлению.

Результаты биотестирования водной вытяжки образцов ПБС по рациональной рецептуре представлены в таблице 5.

**Таблица 5.** Определение токсичности по биотестированию водной вытяжки из ПБС

**Table 5.** Determination of toxicity by biotesting of aqueous extract from PWR

Показатель	Значение	
Содержание ГЛ, масс. %	40	40
Проба водной вытяжки	Исходная	Разбавленная
pH водной вытяжки	4,50 ± 0,01	6,53 ± 0,01
Величина индекса токсичности, у. е.	99,9 ± 0,0	0
Степень токсичности (P = 0,95)	Высокая	Допустимая

Анализ биотеста «Эколюм» для водной вытяжки образца ПБС с содержанием ГЛ (40 масс. %) показал высокую степень токсичности: индекс токсичности превысил 50 у. е. при pH 4,5 ед. В таком случае, если значение показателя pH исследуемой пробы превышает пределы 6,5÷8,0, оно корректируется до диапазона 6,8÷7,4. При pH разбавленной пробы (6,5 ед.) степень токсичности водной вытяжки соответствовала допустимой, что указывает на зависимость токсичности исследуемого раствора от кислотности ГЛ.

#### 4. Обсуждение и заключение

Результаты выполненных исследований способствовали подтверждению выбора рационального соотношения комбинированного наполнителя при получении материалов на основе ПБС, состоящего из древесного наполнителя (берёзовых опилок) и ГЛ (40 масс. %), а также анализу возможных процессов токсического влияния такого материала.

Согласно выполненным исследованиям показателей токсичности порошкообразного ГЛ в составе ПБС в качестве модификатора-наполнителя и как самостоятельного компонента ПБС, были изучены его токсические показатели и их характеристики согласно принятым

критериям. Было установлено, что основное влияние на опасные (токсичные) свойства ПБС, получаемых на основе «древесный наполнитель — ГЛ», оказывает порошкообразный ГЛ, при этом чем больше его содержание в системе наполнителя, тем данные свойства проявляются более выражено. Согласно ГОСТ 12.1.007-76 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности», ПБС с содержанием ГЛ по степени воздействия относится к высокоопасным веществам.

На основе полученных результатов данных исследований была выполнена ориентировочная классификации опасности химической продукции, представляющей собой индивидуальное вещество в соответствии с алгоритмом, представленным в ГОСТ 32419-2022 «Классификация опасности химической продукции. Общие требования» с учётом установленных норм для веществ 2-го класса вредности (ГОСТ 12.1.007-76).

Химическая продукция «ПБС на основе берёзовых опилок и гидролизного лигнина в соотношении 60:40», представляющая собой твёрдое вещество, на основе имеющихся данных предположительно обладает:

- опасностью для организма человека:
  - острая токсичность по воздействию на организм;
- опасностью для окружающей среды:
  - острая токсичность для водной среды,
  - хроническая токсичность для водной среды.

Данные, указывающие на то, что рассматриваемый ПБС обладает опасностью, обусловленной его физико-химическими свойствами, отсутствуют.

В результате классификации опасности ПБС на основе ГЛ (40 % масс.) он должен быть отнесён к следующим видам и классам опасности:

- острая токсичность по воздействию на организм — 2, 3-й классы по показателю «LD50 (в воздухе)» и «LD50к (при нанесении на кожу)»;
- острая токсичность для водной среды — 1, 2, 3-й классы по показателю «неспособность к быстрому разложению в водной среде»;
- хроническая токсичность для водной среды — 4-й класс по показателю «отсутствуют данные по способности к биоразложению».

При общей оценке токсичности ПБС (на примере ПБС из берёзовых опилок с добавлением 40 масс. % ГЛ) можно говорить об их высокотоксичном воздействии, что может существенно ограничивать использование данных материалов применительно как к здоровью человека, так и после потери потребительских свойств по отношению к окружающей природной среде, а также в случае использования их в качестве биоразлагаемых (компостируемых) материалов.

## Список литературы

1. *Satyanarayana K. G., Arizaga G. G. C., Wypych F.* Biodegradable composites based on lignocellulosic fibers-An overview // *Progress in Polymer Science.* 2009. Vol. 34, no. 9. P. 982—1021. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2008.12.002.
2. *Кузьмин А. М., Шабарин А. А., Чалганов Д. К.* Получение плёнки из биоразлагаемых композитов // *Сельский механизатор.* 2023. № 4. С. 20—21. DOI: 10.47336/0131-7393-2023-4-20-21.
3. *Леонович О. К., Божелко И. К., Коняхина О. В.* Снижение эмиссии формальдегида водостойкой фанеры // *Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов.* 2023. № 1 (264). С. 194—200. DOI: 10.52065/-2519-402X-2023-264-21.
4. *Lignin Reinforcement in Thermoplastic Composites / O. Faruk, J. Tjong, M. Sain [et al.] // Lignin in Polymer Composites, 2015.* P. 95—118. DOI: 10.1016/B978-0-323-35565-0.00006-0.
5. *Чеботарев Н. Т., Юдин А. А., Микушева Е. Н.* Влияние помётно-лигнинового компоста на свойства и продуктивность дерново-подзолистой почвы // *Аграрная наука.* 2018. № 10. С. 55—58. DOI: 10.3263/0869-8155-2018-319-10-55-58.
6. *Евстигнеев Э. И.* Проблемы валоризации лигнина (обзор) // *Химия растительного сырья.* 2022. № 1. С. 11—33. DOI: 10.14258/jcprtm.2022019211.
7. *Тимошенко В. В., Шаповалов А. В.* Исследование возможности применения гидролизного лигнина в композиционных материалах на основе полиэтилена // *Поликомтриб-2015: Тезисы докладов междунар. научно-техн. конф., Гомель, 23—26 июня 2015 года / Гомель: Государственное научное учреждение «Институт механики металлокомпозитных систем им. В. А. Белого НАН Беларусь», 2015.* С. 147.
8. *Судакова И. Г., Левданский А. В., Кузнецов Б. Н.* Методы химической и термохимической переработки гидролизного лигнина // *Журнал Сибирского федерального университета. Химия.* 2021. Т. 14, № 2. С. 263—275. DOI: 10.17516/1998-2836-0236.
9. Гигиеническая оценка гидролизного лигнина с использованием альтернативных тест-моделей / А. И. Котеленец, А. М. Войтович, Л. А. Наджарян [и др.] // *Гигиена и санитария.* 2007. № 2. С. 70—71.
10. *Воробьева Л. В., Чернова Г. И., Семенова В. В.* Эколого-гигиеническая оценка продуктов утилизации лигнинных отходов // *Гигиена и санитария.* 2002. № 1. С. 60—62.
11. Оценка токсичности лигнина гидролизного для биообъектов окружающей природной среды / О. А. Борис, С. Ю. Петрова, Т. Н. Гомолко [и др.] // *Химическая безопасность.* 2017. Т. 1, № 1. С. 216—225. DOI: 10.25514/CHS.2017.1.11446.
12. *Леонтьева О. А., Семенов Д. В.* Земноводные как биоиндикаторы антропогенных изменений среды // *Успехи современной биологии.* 1997. Т. 117, № 6. С. 726—736.
13. *Литиевые химические источники тока на основе гидролизного лигнина / С. В. Гнеденков, Д. П. Опра, С. Л. Синебрюхов [и др.] // Электрохимическая энергетика.* 2013. Т. 13, № 1. С. 23—33.
14. *Гордин А. А., Пищеничникова Л. Н., Наговицына О. А.* Исследование состава гидролизного лигнина Кировского биохимического завода // *Advanced Science.* 2017. № 4 (8). С. 7.
15. *Романенко К. А., Богданович Н. И., Канарский А. В.* Получение активных углей пиролизом гидролизного лигнина // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал.* 2017. № 4 (358). С. 162—171. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.4.162.
16. *Карпунин В. И.* Исследование технологических режимов получения модифицированных костроплит // *Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов.* 2017. № 12 (138). С. 39—51.

17. Использование модифицированного лигнина для снижения токсичности древесных плит / И. В. Тимофеев, Д. В. Иванов, А. А. Леонович [и др.] // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2018. № 222. С. 240—253. DOI: 10.21266/2079-4304.2018.-222.240-253.
18. Lignin-derived (nano)materials for environmental pollution remediation: Current challenges and future perspectives / M. Sajjadi, H. Ghafuri, F. Ahmadpoor [et al.] // International Journal of Biological Macromolecules. 2021. Vol. 178. P. 394—423. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2021.-02.165.
19. Плотникова Г. П., Плотников Н. П., Кузьминых Е. А. Применение гидролизного лигнина в производстве древесно-полимерных композитов // Системы. Методы. Технологии. 2013. № 4 (20). С. 133—138.
20. Использование химически модифицированных гидролизных лигнинов в качестве связующих при получении древесных композитов / И. Г. Судакова, Ю. Ю. Гаврилов, О. Ю. Фетисова [и др.] // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Химия. 2022. Т. 15, № 4. С. 518—528. DOI: 10.17516/1998-2836-0314.
21. Артёмов А. В., Бурындина В. Г., Ершова А. С. Исследование влияния гидрофобизирующей и антисептической добавки в виде гидролизного лигнина на эксплуатационные свойства пластиков без добавления связующих на основе древесного пресс-сырья // Хвойные бореальной зоны. 2024. Т. 42, № 2. С. 63—72. DOI: 10.53374/1993-0135-2024-2-63-72.
22. Исследование влияния гидролизного лигнина на биостойкость пластиков без связующих веществ на основе древесины берёзы / А. В. Артёмов, А. С. Ершова, В. Г. Бурындина [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2023. № 2 (58). С. 165—171. DOI: 10.18324/2077-5415-2023-2-165-171.
23. Ступак Д. П., Шкуро А. Е., Артёмов А. В. Получение и исследование свойств древесно-полимерных композитов с гидролизным лигнином // Деревообрабатывающая промышленность. 2020. № 1. С. 72—80.
24. Multifunctional lignin-based nanocomposites and nanohybrids / E. Lizundia, M. H. Sipponen, L. G. Greca [et al.] // Green Chemistry. 2021. Vol. 23, no. 18. P. 6698—6760. DOI: 10.1039/d1gc01684a.
25. Lignin-phenol-formaldehyde resin adhesives prepared with biorefinery technical lignins / S. Yang, Y. Zhang, T.-Q. Yuan [et al.] // Journal of Applied Polymer Science. 2015. Vol. 132 (36). P. 1—8. DOI: 10.1002/app.42493.
26. Каримов О. Х. Перспективные направления применения лигнинов в функциональных композитных материалах // Промышленное производство и использование эластомеров. 2023. № 3-4. С. 7—9. DOI: 10.24412/2071-8268-2024-1-7-9.
27. Исследование влияния и распределения порошкообразного гидролизного лигнина в древесном наполнителе на эксплуатационные и эстетические характеристики пластика без применения связующего / А. В. Артёмов, В. Г. Бурындина, А. С. Ершова [и др.] // Resources and Technology. 2023. Т. 20, № 4. С. 139—159. DOI: 10.15393/j2.art.2023.7303.
28. Влияние содержания гидролизного лигнина на показатели отделочного материала на основе пластика без связующего / А. В. Артёмов, А. В. Вуракко, А. С. Ершова [и др.] // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023. № 245. С. 293—307. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.245.293-307.
29. Артёмов А. В., Савиновских А. В., Бурындина В. Г. Модуль упругости при изгибе как показатель физико-механических свойств древесных пластиков без добавления связующих // Системы. Методы. Технологии. 2021. № 1 (49). С. 67—71. DOI: 10.18324/2077-5415-2021-1-67-71.

30. Исследование упругих свойств композитов на основе ацетата целлюлозы и лигноцеллюлозных наполнителей / А. Е. Шкуро, В. В. Глухих, П. С. Захаров [и др.] // Промышленное производство и использование эластомеров. 2023. № 1. С. 32—36. DOI: 10.24412-2071-8268-2023-1-32-36.
31. Болтовский В. С. Состав гидролизного лигнина из отвалов ОАО «Бобруйский завод биотехнологий» и рациональные направления его использования // Труды БГТУ. № 4: Химия, технология органических веществ и биотехнология. 2014. № 4 (168). С. 105—108.

## References

1. Satyanarayana K. G., Arizaga G. G. C., Wypych F. Biodegradable composites based on lignocellulosic fibers-An overview. *Progress in Polymer Science*, 2009, vol. 34, no. 9, pp. 982—1021. doi: 10.1016/j.progpolymsci.2008.12.002.
2. Kuzmin A. M., Shabarin A. A., Chalganov D. K. Obtaining films from biodegradable composites. *Rural mechanizer*, 2023, no. 4, pp. 20—21. doi: 10.47336/0131-7393-2023-4-20-21. (In Russ.)
3. Leonovich O. K., Bozhelko I. K., Konyakhina O. V. Reduction of formaldehyde emissions from plywood. *Proceedings of BSTU. Series 1: Forestry, environmental management and processing. renewable resources*, 2023, no. 1 (264), pp. 194—200. doi: 10.52065/2519-402X-2023-264-21. (In Russ.)
4. Faruk O., Tjong J., Sain M., Obaid N. Lignin Reinforcement in Thermoplastic Composites. *Lignin in Polymer Composites*, 2015, pp. 95—118. doi: 10.1016/B978-0-323-35565-0.00006-0.
5. Chebotarev N. T., Yudin A. A., Mikusheva E. N. The influence of pom-lignin compost on the properties and productivity of sod-podzolic soil. *Agricultural Science*, 2018, no. 10, pp. 55—58. doi: 10.3263/0869-8155-2018-319-10-55-58. (In Russ.)
6. Evtigneev E. I. Problems of valorization of lignin (review). *Chemistry of vegetable raw materials*, 2022, no. 1, pp. 11—33. doi: 10.14258/jcprm.2022019211. (In Russ.)
7. Timoshenko V. V., Shapovalov A. V. Investigation of the possibility of using hydrolyzed lignin in composite materials based on polyethylene. *Polycomtrib-2015: Abstracts of the international scientific and technical conference, Gomel, June 23—26, 2015*. V. A. Bely Institute of Mechanics of Metal Polymer Systems of the National Academy of Sciences of Belarus. Gomel, State Scientific Institution V. A. Bely Institute of Mechanics of Metal Polymer Systems of the National Academy of Sciences of Belarus, 2015, p. 147. (In Russ.)
8. Sudakova I. G., Levdansky A. V., Kuznetsov B. N. Methods of chemical and thermochemical processing of hydrolyzed lignin. *Journal of Siberian Federal University. The university. Chemistry*, 2021, vol. 14, no. (2), pp. 263—275. doi: 10.17516/1998-2836-0236. (In Russ.)
9. Kotelenets A. I., Voitovich A. M., Najarian L. A., Homolko T. N., Koneva I. I., Afonin V. Yu., Marusich M. V. Hygienic assessment of hydrolyzed lignin using alternative test models. *Hygiene and sanitation*, 2007, no. 2, pp. 70—71. (In Russ.)
10. Vorobyeva L. V., Chernova G. I., Semenova V. V. Ecological and hygienic assessment of lignin waste disposal products. *Hygiene and sanitation*, 2002, no. 1, pp. 60—62. (In Russ.)
11. Boris O. A., Petrova S. Y., Gomolko T. N., Anisovich M. V. Assessment of the toxicity of hydrolysis lignin for biological objects of the environment. *Chemical safety*, 2017, vol. 1, no. 1, pp. 216—225. doi: 10.25514/CHS.2017.1.11446. (In Russ.)
12. Leontieva O. A., Semenov D. V. Amphibians as bioindicators of anthropogenic environmental changes. *Successes of modern biology*, 1997, vol. 117, no. 6, pp. 726—736. (In Russ.)

13. Gnedenkov S. V., Oprah D. P., Sinebryukhov S. L., Tsvetnikov A. K., Ustinov A. Yu., Sergienko V. I. Lithium chemical current sources based on hydrolyzed lignin. *Electrochemical power engineering*, 2013, vol. 13, no. 1, pp. 23—33. (In Russ.)
14. Gordin A. A., Pshenichnikova L. N., Nagovitsyna O. A. Investigation of the composition of hydrolyzed lignin of the Kirov Biochemical Plant. *Advanced Science*, 2017, no. 4 (8), p. 7. (In Russ.)
15. Romanenko K. A., Bogdanovich N. I., Kanarsky A. V. Preparation of activated carbons by pyrolysis of hydrolyzed lignin. *News of higher educational institutions. Forest Magazine*, 2017, no. 4 (358), pp. 162—171. doi: 10.17238/issn0536-1036.2017.4.162. (In Russ.)
16. Karpunin V. I. Investigation of technological modes of obtaining modified fire plates. *Journal of scientific publications of graduate students and doctoral students*, 2017, no. 12 (138), pp. 39—51. (In Russ.)
17. Timofeev I. V., Ivanov D. V., Leonovich A. A., Krutov S. M. Using modified lignin to reduce the toxicity of wood panels. *Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Academy*, 2018, no. 222, pp. 240—253. doi: 10.21266/2079-4304.2018.222.240-253. (In Russ.)
18. Sajjadi M., Ghafuri H., Ahmadpoor F., Nasrollahzadeh M. Lignin-derived (nano)materials for environmental pollution remediation: Current challenges and future perspectives. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, vol. 178, pp. 394—423. doi: 10.1016/j.ijbiomac.-2021.02.165.
19. Plotnikova G. P., Plotnikov N. P., Kuzminykh E. A. The use of hydrolyzed lignin in the production of wood-polymer composites. *Systems. Methods. Technologies*, 2013, no. 4 (20), pp. 133—138. (In Russ.)
20. Sudakova I. G., Gavrilov Yu. Yu., Fetisova O. Yu., Kuznetsov B. N. The use of chemically modified hydrolysis lignins as binders in the production of wood composites. *Journal of the Siberian Federal University. Series: Chemistry*, 2022, vol. 15, no. 4, pp. 518—528. doi: 10.17516/-1998-2836-0314. (In Russ.)
21. Artyomov A. V., Buryndin V. G., Ershova A. S. Investigation of the effect of a hydrophobic and antiseptic additive in the form of hydrolyzed lignin on the performance properties of plastics without the addition of binders based on wood press materials. *Conifers of the boreal zone*, 2024, vol. 42, no. 2, pp. 63—72. doi: 10.53374/1993-0135-2024-2-63-72. (In Russ.)
22. Artyomov A. V., Yershova A. S., Burindin V. G., Yakimova A. B. Investigation of the effect of hydrolyzed lignin on the biostability of plastics without binders based on birch wood. *System. Methods. Technologies*, 2023, no. 2 (58), pp. 165—171. doi: 10.18324/2077-5415-2023-2-165-171. (In Russ.)
23. Stupak D. P., Shkuro A. E., Artemov A. V. Preparation and investigation of properties of wood-polymer composites with hydrolyzed lignin. *The woodworking industry*, 2020, no. 1, pp. 72—80. (In Russ.)
24. Lizundia E., Sipponen M. H., Greca L. G., Balakshin M., Tardy B. L., Rojas O. J., Puglia D. Multifunctional lignin-based nanocomposites and nanohybrids. *Green Chemistry*, 2021, vol. 23, no. 18, pp. 6698—6760. doi: 10.1039/d1gc-01684a.
25. Yang S., Zhang Y., Yuan T.-Q., Sun R.-C. Lignin-phenol-formaldehyde resin adhesives prepared with biorefinery technical lignins. *Journal of Applied Polymer Science*, 2015, vol. 132 (36), pp. 1—8. doi:10.1002/app.42493.
26. Karimov O. H. Promising areas of application of lignins in functional composite materials. *Industrial production and use of elastomers*, 2023, no. 3-4, pp. 7—9. doi: 10.24412/2071-8268-2024-1-7-9. (In Russ.)
27. Artemov A. V., Buryndin V. G., Ershova A. S., Zakharov P. S. Investigation of the effect and distribution of powdered hydrolyzed lignin in wood filler on operational and aesthetic

characteristics of plastic without the use of a binder. *Resources and Technology*, 2023, vol. 20, no. 4, pp. 139—159. doi: 10.15393/j2.art.2023.7303. (In Russ.)

28. Artyomov A. V., Vurasko A. V., Yershova A. S., Buryndin V. G. Influence of the content of hydrolyzed lignin on the indicators of finishing material based on plastic without binder. *Izvestiya Saint Petersburg Forestry Academy*, 2023, no. 245, pp. 293—307. doi: 10.21266/20-79-4304.2023245.293-307. (In Russ.)
29. Artyomov A. V., Savinovskikh A. V., Buryndin V. G. Modulus of elasticity under bending as an indicator of the physico-mechanical properties of wood plastics without the addition of binders. *Systems. Methods. Technologies*, 2021, no. 1 (49), pp. 67—71. doi: 10.18324/2077-5415-2021-1-67-71. (In Russ.)
30. Shkuro A. E., Glukhykh V. V., Zakharov P. S., Abzaldinov H. S. Investigation of elastic properties of composites based on cellulose acetate and lignocellulose fillers. *Industrial production and use of elastomers*, 2023, no. 1, pp. 32—36. doi: 10.24412/2071-8268-2023-1-32-36. (In Russ.)
31. Boltovsky V. S. The composition of hydrolyzed lignin from the dumps of JSC Bobruisk Biotechnology Plant and rational directions for its use. *Proceedings of BSTU. No. 4: Chemistry, technology of organic substances and biotechnology*, 2014, no. 4 (168), pp. 105—108. (In Russ.)

© Артёмов А. В., Бурындин В. Г., Шкуро А. Е., Прытков Л. Н., 2025