

УДК 678.652'41'21:665.947.4

А. А. Кожемяко¹, Д. В. Куземкин², А. Н. Гончар³, Е. В. Дубоделова², С. И. Шпак²¹ОАО «Витебскдрев»²Белорусский государственный технологический университет³СООО «СинерджиКом»

ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛИКАРБОКСИЛАТНЫХ ЛИГНИНОВ В СИНТЕЗЕ КАРБАМИДОФОРМАЛЬДЕГИДНЫХ СМОЛ

Разработаны модифицированные поликарбоксилатным лигнином композиции карбамидоформальдегидной смолы (КФС) для древесностружечных плит. При модифицировании использованы продукты валоризации гидролизного лигнина кислого и щелочного характера линейки S-Drill™ BND (СООО «СинерджиКом») в целях создания условий по образованию повышенного количества метилольных групп и разветвленной структуры образуемых олигомеров. Установлено, что массовая доля свободного формальдегида в модифицированной смоле после синтеза за период 24 ч снижается с меньшей интенсивностью по сравнению с контрольным образцом КФС на 70,0 и 57,6% соответственно. При этом время желатинизации при 100°C увеличивается на 31,4% для контрольного образца КФС, а для экспериментального – на 2,6%. Образцы древесностружечных плит, полученные с использованием модифицированной поликарбоксилатным лигнином карбамидоформальдегидной смолы, соответствовали требованиям ГОСТ 10632–2014 для марки Р1. Для образцов плит на экспериментальных смолах наблюдалось возрастание предела прочности при растяжении перпендикулярно к пласти в среднем на 43%. Результаты исследований прошли комплексную полупромышленную апробацию на ОАО «Речицадрев».

Ключевые слова: поликарбоксилатный лигнин, карбамидоформальдегидная смола, синтез, древесностружечные плиты, содержание свободного формальдегида, предел прочности.

Для цитирования: Кожемяко А. А., Куземкин Д. В., Гончар А. Н., Дубоделова Е. В., Шпак С. И. Применение поликарбоксилатных лигнинов в синтезе карбамидоформальдегидных смол // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2023. № 1 (265). С. 104–111. DOI: 10.52065/2520-2669-2023-265-1-12.

А. А. Kazhamiaka¹, Д. В. Kuzemkin, А. Н. Gonchar³, Е. В. Dubodelova², С. И. Shpak²¹JSC “Vitebskdrrev”²Belarusian State Technological University³SynergyCom SOOO

APPLICATIONS OF POLYCARBOXYLATE LIGNINS IN THE SYNTHESIS OF UREA-FORMALDEHYDE RESINS

Compositions of urea-formaldehyde (UF) resin modified with polycarboxylate lignin for particle boards have been developed. Valorization products of acidic and alkaline nature based on hydrolysis lignin marketed by SynergyCom SOOO under the brand name S-Drill™ BND have been used to promote the formation of a branched structure with an increased amount of methylol groups in the resulting oligomers by adjusting the concentration of hydrogen ions at different stages of resin synthesis. Tests of the modified UF resins showed that free formaldehyde content in the modified resin after synthesis over a period of 24 hours decreases with a lower intensity compared to the control sample by 70.0 and 57.6%, respectively. At the same time, the gelatinization time at 100°C increases by 31.4% for the control resin sample, and for the experimental one, by 2.6%. Samples of particle boards obtained using urea-formaldehyde resin modified with polycarboxylate lignin met the requirements of GOST 10632–2014 for grade R1. For samples of particle boards on experimental resins, an increase in tensile strength perpendicular to the face by an average of 43% was observed, which indicates a high level of adhesion of the modified resins to the wood substrate. The results of the research have passed a comprehensive semi-industrial approbation at JSC “Rechitsadrev”.

Keywords: поликарбоксилатный лигнин, уреа-формальдегидная смола, синтез, древесностружечные плиты, содержание свободного формальдегида, предел прочности.

For citation: Kazhamiaka A. A., Kuzemkin D. V., Gonchar A. N., Dubodelova E. V., Shpak S. I. Applications of polycarboxylate lignins in the synthesis of urea-formaldehyde resins. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2023, no. 1 (265), pp. 104–111. DOI: 10.52065/2520-2669-2023-265-1-12 (In Russian).

Введение. В настоящее время в производстве композиционных древесных материалов (древесные плиты, фанера и др.) широкое применение в качестве связующих нашли карбамидоформальдегидные смолы (КФС), которые в целях снижения экологической нагрузки на окружающую среду производят на карбамидоформальдегидном концентрате. Их использование обусловлено рядом достоинств по сравнению с другими синтетическими смолами, например изоционатными, меламиноформальдегидными, среди которых важно отметить низкую стоимость, простую технологию синтеза, доступность химических реагентов для их производства и достаточную индифферентность к воде. Среди существенных недостатков КФС следует выделить относительно высокую эмиссию свободного формальдегида из плит по достижении требуемых значений прочностных показателей, невысокие стабильность при хранении и теплостойкость их kleевых композиций. Поэтому актуальны и широко проводятся исследовательские работы в направлении устранения недостатков КФС, сущность которых заключается в химической модификации как в процессе их синтеза, так и на стадии приготовления связующих. Эффективность модификации КФС в процессе их синтеза заключается в повышении количества метилольных групп, которые в процессе отверждения КФС способны образовывать дополнительные поперечные сшивки между макромолекулами в результате взаимодействия между собой и водородом амидной группы.

Экологически безопасными модификаторами КФС являются природные биополимеры и продукты их переработки [1–7]. В настоящее время наиболее доступным среди биополимеров при сравнительно низкой востребованности на рынке является лигнин и продукты его химической переработки [8–10]. Основная проблема при дальнейшем использовании лигнина – отхода производства химической переработки растительного сырья – заключается в его большой неоднородности по строению и свойствам, обусловленной как видом растительного сырья, так и условиями проведения химических реакций [11–14]. В связи с этим химическая переработка лигнина все еще остается ограниченной, и он преимущественно сжигается в целях регенерации химических реагентов с получением тепловой энергии, что не раскрывает потенциал лигнина в качестве источника сырья для производства ценных продуктов [15–17]. Поэтому перспективным направлением является безотходная и комплексная переработка растительного сырья за счет использования лигнина в деревообрабатывающей промышленности. Однако несмотря на высокую насыщенность лигнина фенольными структурами, способности образовывать прочные связи с древесным

субстратом, до сих пор существует лишь небольшое число компаний, предлагающих продукцию, содержащую в своем составе промышленные продукты на основе лигнина [18, 19].

Для исследований нами выбран гидролизный лигнин, который является крупнотоннажным отходом, образующимся при кислотном гидролизе древесины или получающимся при ее биоконверсии в этанол при ферментативном гидролизе. Для получения стандартизованных по свойствам продуктов требуется очистка и направленная химическая модификация гидролизного лигнина. В СООО «СинерджиКом» разработаны лигниновые продукты линейки S-Drill™ BND, полученные при валоризации гидролизного лигнина, скопившегося при функционировании гидролизного завода в г. Речица (Республика Беларусь). Характеристики продуктов линейки S-Drill™ BND приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1
Химический состав и функциональные
группы S-Drill™ BND

Показатель	Значение показателя
Среднемассовая молекулярная масса M_w , г/моль	3500–4000
Среднечисленная молекулярная масса M_n , г/моль	1400–1600
Полидисперсность	2,5
Метоксильные группы, %	Менее 10
Карбоксильные группы, %	2,5
Фенольные гидроксильные группы, ммоль/г	1,1
Алифатические гидроксильные группы, ммоль/г	0,3
Общее содержание гидроксильных групп, ммоль/г	3,9
Формальдегид	Отсутствует

Таблица 2
Основные физико-химические показатели
лигниновых продуктов линейки S-Drill™ BND

Показатель	Значение показателя	
	BND 10	BND 120
Внешний вид	Однородная суспензия коричневого цвета без механических включений	
Массовая доля сухого вещества, %, не менее	20	30
Концентрация водородных ионов, pH	1,0–2,0	12,0–14,0
Плотность, г/см ³	1,10–1,15	1,20–1,25

Из табл. 1 и 2 видно, что для лигниновых продуктов линейки S-Drill™ BND характерно наличие значительного количества функциональных

групп, которые способны вступать в реакции поликонденсации с карбамидом и формальдегидом при синтезе КФС. Кроме того, имеется возможность регулировать водородный показатель лигниновых продуктов, что позволяет использовать их на разных стадиях синтеза карбамидоформальдегидных олигомеров.

Целью исследования является оценка возможности применения поликарбоксилатных лигнинов для модификации карбамидоформальдегидных смол, используемых в производстве древесностружечных плит (ДСП).

Основная часть. На первом этапе исследований синтез карбамидоформальдегидной смолы проводили в трехгорной колбе объемом 250 см³. После отработки режимов синтеза и расходных параметров исходных реагентов в химической лаборатории учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет» использовали полупромышленный реактор объемом 5 дм³, установленный на ОАО «Речицадрев».

В реактор загружали карбамидоформальдегидный концентрат и воду в присутствии аминоспиртов, полученную смесь перемешивали и нагревали до температуры 45°C. Затем вводили первую порцию карбамида и устанавливали величину концентрации водородных ионов на уровне 6,1 ± 0,2. После этого реакционную массу нагревали до температуры 87–90°C и осуществляли выдержку в течение 15 мин.

Для поддержания концентрации водородных ионов на уровне 5,3 вводили химические реагенты кислого характера (например, водный раствор хлорида аммония) или экспериментальный лигниновый продукт кислого характера

S-Drill™ BND 10 и осуществляли набор вязкости до регламентированного технологическими картами ОАО «Речицадрев» значения. Далее поднимали концентрацию водородных ионов с помощью водного раствора гидроксида натрия или лигнинового продукта щелочного характера S-Drill™ BND 120 до величины 7,3–7,8. Затем вводили вторую порцию карбамида и снижали температуру в реакторе до 65°C. После этого реакционную массу стабилизировали и охлаждали до 50°C.

Далее осуществляли загрузку третьей порции карбамида и охлаждали полученную реакционную массу до 20°C.

В табл. 3 приведены характеристики контрольных карбамидоформальдегидных смол, которые получены в полупромышленном реакторе ОАО «Речицадрев» объемом 5 дм³.

Анализ характеристик смол (табл. 3) показал, что образцы полупромышленных КФС соответствуют по нормируемым показателям требованиям ТУ BY 400025915.008-2017, а сопоставимость величин показателей нормируемым значениям указывает на высокий уровень адаптации к промышленным условиям синтеза в реакторе объемом 25 м³. Дальнейшие исследования по синтезу КФС с применением в рецептуре поликарбоксилатных лигнинов проводились по вышеизведенной методике с заменой кислотных и щелочных регуляторов pH для создания условий по образованию повышенного количества метилольных групп и разветвленной структуры образуемого олигомера за счет функциональных групп, присущих лигниновым продуктам линейки S-Drill™ BND 10 и 120 (табл. 1 и 2).

Таблица 3

Характеристика контрольных карбамидоформальдегидных смол, полученных в реакторе объемом 5 дм³

Показатель	Нормы по ТУ BY 400025915.008-2017	Значения показателей для контрольной смолы	
		в день варки	на следующие сутки
Внешний вид	Однородная супензия от бесцветного до светло-желтого цвета без посторонних включений	Однородная супензия от бесцветного до светло-желтого цвета без посторонних включений	Однородная супензия от бесцветного до светло-желтого цвета без посторонних включений
Массовая доля сухого остатка, %	67 ± 2	67,0	67,0
Массовая доля свободного формальдегида, %, не более	0,15	0,30	0,09
Условная вязкость при (20 ± 0,5)°C по вискозиметру В3-246 (или В3-4) с соплом диаметром 4 мм, с	40–90	67	67
Концентрация водородных ионов, pH	7,0–8,5	7,6	7,6
Время желатинизации при 100°C, с	30–60	35	46
Предельная смешиваемость смолы с водой, при которой наблюдается коагуляция по объему	1 : 10	Более 1 : 10	Более 1 : 10

Необходимо отметить, что режимные параметры синтеза не требовали дополнительной коррекции и не были зафиксированы отклонения, установленные в технологических картах промышленного синтеза смол на ОАО «Речицадрев». Характеристики экспериментальных карбамидоформальдегидных смол, синтезированных с использованием S-Drill™ BND 10 и S-Drill™ BND 120, представлены в табл. 4 и 5.

Из табл. 4 видно, что при замене кислых реагентов в рецептуре синтеза олигомеров на

лигниновый продукт марки S-Drill™ BND 10 получаемые смолы соответствовали требованиям ТУ BY 400025915.008-2017 по всем нормируемым показателям, в том числе внешнего вида.

При этом в день синтеза массовая доля свободного формальдегида была ниже, чем у контрольного образца КФС на 13,3%, что свидетельствует об образовании дополнительных связей в структуре олигомера без потери реакционной способности.

Таблица 4

Характеристика экспериментальных карбамидоформальдегидных смол с заменой кислых реагентов на S-Drill™ BND 10, полученных в реакторе объемом 5 дм³

Показатель	Нормы по ТУ BY 400025915.008-2017	Значения показателей для экспериментальной смолы	
		в день варки	на следующие сутки
Внешний вид	Однородная суспензия от бесцветного до светло-желтого цвета без посторонних включений	Однородная суспензия от бесцветного до светло-желтого цвета без посторонних включений	Однородная суспензия от бесцветного до светло-желтого цвета без посторонних включений
Массовая доля сухого остатка, %	67 ± 2	67,0	67,0
Массовая доля свободного формальдегида, %, не более	0,15	0,26	0,09
Условная вязкость при (20 ± 0,5)°С по вискозиметру В3-246 (или В3-4) с соплом диаметром 4 мм, с	40–90	65	66
Концентрация водородных ионов, рН	7,0–8,5	8,3	8,3
Время желатинизации при 100°C, с	30–60	39	43
Предельная смешиваемость смолы с водой, при которой наблюдается коагуляция по объему	1 : 10	Более 1 : 10	Более 1 : 10

Таблица 5

Характеристика экспериментальных карбамидоформальдегидных смол с заменой кислых реагентов на S-Drill™ BND 10 и щелочи на S-Drill™ BND 120, полученных в реакторе объемом 5 дм³

Показатель	Нормы по ТУ BY 400025915.008-2017	Значения показателей для экспериментальной смолы		
		в день варки	на следующие сутки	через двое суток
Внешний вид	Однородная суспензия от бесцветного до светло-желтого цвета без посторонних включений	Однородная суспензия темно-коричневого цвета без посторонних включений	Однородная суспензия темно-коричневого цвета без посторонних включений	Однородная суспензия темно-коричневого цвета без посторонних включений
Массовая доля сухого остатка, %	67 ± 2	67,4	67,4	67,4
Массовая доля свободного формальдегида, %, не более	0,15	0,26	0,11	0,06
Условная вязкость при (20 ± 0,5)°С по вискозиметру В3-246 (или В3-4) с соплом диаметром 4 мм, с	40–90	67	68	65
Концентрация водородных ионов, рН	7,0–8,5	8,0	7,9	7,8
Время желатинизации при 100°C, с	30–60	39	40	42
Предельная смешиваемость смолы с водой, при которой наблюдается коагуляция по объему	1 : 10	Более 1 : 10	Более 1 : 10	Более 1 : 10

При этом контроль показателя на следующие сутки продемонстрировал уровень соответствия контрольному образцу и составил 0,09%. При использовании S-Drill™ BND 10 реакция поликонденсации протекает более полно, на что указывает незначительное увеличение времени желатинизации при 100°C по истечению 24 ч после синтеза (10,3% в сравнении с 31,4% для контрольного образца КФС).

При замене кислоты и щелочи в рецептуре синтеза олигомеров на лигниновые продукты S-Drill™ BND 10 и S-Drill™ BND 120 получаемые смолы соответствовали требованиям ТУ BY 400025915.008-2017 по всем нормирующим показателям, за исключением внешнего вида КФС, которая приобрела темно-коричневый цвет, свойственный окисленному лигнину. При этом наблюдалась еще более полная поликонденсация в процессе синтеза, так как массовая доля свободного формальдегида в процессе хранения в течение 24 ч менее значительно снижается по сравнению с контрольным образцом КФС на 70,0 и 57,6% соответственно. При этом время желатинизации при 100°C увеличивалось на 31,4% для контрольного образца, а для экспериментального – на 2,6%. Это может положительно сказаться на физико-механических показателях древесностружечных плит.

Для подтверждения высказанного предположения были изготовлены и испытаны образцы однослойных древесностружечных плит толщиной 16 мм и плотностью 650 кг/м³. Для изготовления плит использовалась стружка внутреннего слоя, полученная на линии древесностружечных плит ОАО «Речицадрев», которую осмоляли контрольной и экспериментальными КФС с расходом 10% к абсолютно сухой стружке. При этом в качестве ускорителя отверждения использовался сульфат аммония 40%-ной кон-

центрации с расходом 4% к абсолютно сухой смоле. Режим прессования следующий: давление – 2,2 МПа, температура – 195°C, продолжительность – 10 мин.

Для подготовки и проведения физико-механических испытаний ДСП руководствовались общими правилами, установленными в ГОСТ 10633–2018. Они были проведены на ОАО «Речицадрев» в соответствии с ГОСТ 10636–2018 по показателю предел прочности при изгибе, ГОСТ 10635–2018 – предел прочности при растяжении перпендикулярно к пласти плиты, ГОСТ 27678–2014 – содержание формальдегида. Результаты испытаний представлены в табл. 6.

Из табл. 6 видно, что опытные образцы древесностружечных плит соответствовали требованиям ГОСТ 10632–2014 для марки Р1. При этом образцы ДСП, полученные на контрольной КФС и экспериментальной смоле, синтез которой вели с применением двух лигниновых продуктов S-Drill™ BND 10 и S-Drill™ BND 120, характеризовались классом эмиссии Е0,5, а если использовать при синтезе смолы только S-Drill™ BND 10, то получали плиту с классом эмиссии Е1. Для образцов плит на экспериментальных смолах наблюдалось ожидаемое возрастание предела прочности при растяжении перпендикулярно к пласти в среднем на 43%, что свидетельствует о высоком уровне адгезии данных смол к древесному субстрату. Предел прочности при изгибе образцов ДСП, который определяется не только свойствами связующего, но и формой, размерами, однородностью древесного сырья, значительно не изменялся и соответствовал требованиям ГОСТ 10632–2014. Следует отметить, что темно-коричневый цвет экспериментальной смолы с S-Drill™ BND 10 и S-Drill™ BND 120 не отразился на показателях внешнего вида образцов ДСП.

Таблица 6

**Основные показатели качества и безопасности
опытных образцов ДСП толщиной 16 мм**

Показатель	Требования по ГОСТ 10632–2014 для марки Р1	Значения показателей для образцов ДСП		
		КФС	экспериментальная смола с S-Drill™ BND 10	экспериментальная смола с S-Drill™ BND 10 и S-Drill™ BND 120
Предел прочности при изгибе, МПа	Не менее 10	15,4	16,1	12,7
Предел прочности при растяжении перпендикулярно к пласти плиты, МПа				
	Не менее 0,24	0,28	0,40	0,41
Содержание формальдегида, мг/100 г	Не более 8,0	3,7	4,9	3,2

Заключение. Таким образом, поликарбоксилатные лигниновые линейки S-Drill™ BND 10 и S-Drill™ BND 120 производства СООО «СинерджиКом» могут быть использованы при синтезе карбамидоформальдегидных смол на основе карбамидоформальдегидного концентрата в качестве модификаторов, обеспечивающих полноту протекания реакции поликонденсации

карбамида с формальдегидом и, как следствие, стабильность физико-химических свойств получаемых олигомеров. Их использование в композиции древесностружечных плит обеспечивает соответствие требованиям ГОСТ 10632–2014, увеличивая предел прочности при растяжении перпендикулярно к пласти плиты на величину до 43%.

Список литературы

1. Paananen H., Pakkanen T. T. Kraft Lignin Reaction with Paraformaldehyde // *Holzforschung*. 2020. Vol. 74. P. 663–672. DOI: 10.1515/hf-2019-0147.
2. Synthesis of Lignin-Based Polyacid Catalyst and Its Utilization to Improve Water Resistance of Urea-formaldehyde Resins / S. Gao [et al.] // *Polymers*. 2020. Vol. 12. Article 175. DOI: 10.3390/polym12010175.
3. Снижение токсичности древесных kleenых материалов на основе модифицированных лигносульфонатами карбамидоформальдегидных смол / Г. С. Варанкина [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2016. № 3 (31). С. 154–160. DOI: 10.18324/2077-5415-2016-3-154-160.
4. Younesi-Kordkheili H., Pizzi A. A Comparison between Lignin Modified by Ionic Liquids and Glyoxalated Lignin as Modifiers of Urea-Formaldehyde Resin // *The Journal of Adhesion*. 2017. Vol. 93. P. 1120–1130. DOI: 10.1080/00218464.2016.1209741.
5. Катионные крахмалы – перспективные модификаторы аминоальдегидных олигомеров / С. М. Тарасов [и др.] // Лесной вестник. 2010. № 5. С. 152–156.
6. From Wood to Resin – Identifying Sustainability Levers through Hotspotting Lignin Valorisation Pathways / M. Lettner [et al.] // *Sustainability*. 2018. Vol. 10. Article 2745. DOI: 10.3390/su10082745.
7. Использование модифицированного лигнина для снижения токсичности древесных плит / И. В. Тимофеев [и др.] // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2018. Вып. 22. С. 240–253. DOI: 10.21266/2079-4304.2018.222.240-253.
8. Chakar F. S., Ragauskas A. J. Review of current and future softwood kraft lignin process chemistry // *Industrial Crops and Products*. 2004. Vol. 20. P. 131–141. DOI: 10.1016/j.indcrop.2004.04.016.
9. Paving the Way for Lignin Valorisation: Recent Advances in Bioengineering, Biorefining and Catalysis / R. Rinaldi [et al.] // *Angew. Chem. Int. Ed.* 2016. Issue 55. P. 8164–8215. DOI: 10.1002/anie.201510351.
10. De Wild P. J., Huijgen W. J. J., Gosselink R. J. A. Lignin pyrolysis for profitable lignocellulosic biorefineries // *Biofuels Bioprod. Bioref.* 2014. Vol. 8. P. 645–657. DOI: 10.1002/bbb.1474.
11. Дайнеко И. П. Утилизация лигнинов: достижения, проблемы и перспективы // Химия растительного сырья. 2012. № 1. С. 5–20.
12. Comparison on structural modification of industrial lignin by wet ball milling and ionic liquid pre-treatment / Y. Qu [et al.] // *Biotechnology Reports*. 2015. Vol. 6. P. 1–7. DOI: 10.1016/j.btre.2014.12.011.
13. Recent Advances in the Application of Functionalized Lignin in Value-Added Polymeric Materials / Y.-Y. Wang [et al.] // *Polymers*. 2020. Vol. 12. Article 2277. DOI: 10.3390/polym12102277.
14. A concise review of current lignin production, applications, products and their environmental impact / D. S. Bajwa [et al.] // *Industrial Crops and Products*. 2019. Vol. 139. Article 111526. DOI: 10.1016/j.indcrop.2019.111526.
15. Towards lignin-based functional materials in a sustainable world / D. Kai [et al.] // *Green Chemistry*. 2016. Vol. 18. P. 1175–1200. DOI: 10.1039/C5GC02616D.
16. Lignin-based adhesive crosslinked by furfuryl alcohol-glyoxal and epoxy resins / J. Zhang [et al.] // *Nordic Pulp & Paper Research Journal*. 2019. Vol. 34, issue 2. P. 228–238. DOI: 10.1515/npprj-2018-0042.
17. Evstigneyev E. I., Shevchenko S. M. Lignin valorization and cleavage of arylether bonds in chemical processing of wood: a mini-review // *Wood Science and Technology*. 2020. Vol. 54. P. 787–820. DOI: 10.1007/s00226-020-01183-4.
18. Lignineous resole adhesives for exterior-grade plywood / M. Ghorbani [et al.] // *Eur. J. Wood Prod.* 2018. Vol. 76. P. 251–258. DOI: 10.1007/s00107-017-1249-9.
19. Повышение эффективности производства древесноволокнистых плит средней плотности / А. А. Кожемяко [и др.] // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2022. № 2 (259). С. 32–40. DOI: 10.52065/2520-2669-2022-259-2-32-40.

References

1. Paananen H., Pakkanen T. T. Kraft Lignin Reaction with Paraformaldehyde. *Holzforschung*, 2020, vol. 74, pp. 663–672. DOI: 10.1515/hf-2019-0147.

2. Gao S., Liu Y., Wang C., Chu F., Xu F., Zhang D. Synthesis of Lignin-Based Polyacid Catalyst and Its Utilization to Improve Water Resistance of Urea-formaldehyde Resins. *Polymers*, 2020, vol. 12, article 175. DOI: 10.3390/polym12010175.
3. Varankina G. S., Rusakov D. S., Ivanova A. V., Ivanov A. M. Reducing the toxicity of glued wood-based materials, modified with lignosulphonates of urea-formaldehyde resins. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2016, no. 3 (31), pp. 154–160. DOI: 10.18324/2077-5415-2016-3-154-160 (In Russian).
4. Younesi-Kordkheili H., Pizzi A. A Comparison between Lignin Modified by Ionic Liquids and Glyoxalated Lignin as Modifiers of Urea-Formaldehyde Resin. *The Journal of Adhesion*, 2017, vol. 93, pp. 1120–1130. DOI: 10.1080/00218464.2016.1209741.
5. Tarasov S. M., Azarov V. I., Kononov G. N., Ivanova A. M. Cationic starches are promising modifiers of aminoaldehyde oligomers. *Lesnoy vestnik* [Forest Bulletin], 2010, no. 5, pp. 152–156 (In Russian).
6. Lettner M., Solt P., Rofriger B., Pufky-Heinrich D., Jaaskelainen A.-S., Schwarzbauer P., Hesser F. From Wood to Resin – Identifying Sustainability Levers through Hotspotting Lignin Valorisation Pathways. *Sustainability*, 2018, vol. 10, article 2745. DOI: 10.3390/su10082745.
7. Timofeyev I. V., Ivanov D. V., Leonovich A. A., Krutov S. M. Usage of modified lignin to reduce the toxicity of wood boards. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [News of the St. Petersburg Forestry Academy], 2018, issue 22, pp. 240–253. DOI: 10.21266/2079-4304.2018.222.240-253 (In Russian).
8. Chakar F. S., Ragauskas A. J. Review of current and future softwood kraft lignin process chemistry. *Industrial Crops and Products*, 2004, vol. 20, pp. 131–141. DOI: 10.1016/j.indcrop.2004.04.016.
9. Rinaldi R., Jastrzebski R., Clough M. T., Ralph J., Kennema M., Bruijnincx P. C. A., Weckhuysen B. M. Paving the Way for Lignin Valorisation: Recent Advances in Bioengineering, Biorefining and Catalysis. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2016, issue 55, pp. 8164–8215. DOI: 10.1002/anie.201510351.
10. De Wild P. J., Huijgen W. J. J., Gosselink R. J. A. Lignin pyrolysis for profitable lignocellulosic biorefineries. *Biofuels Bioprod. Bioref.*, 2014. vol. 8, pp. 645–657. DOI: 10.1002/bbb.1474.
11. Deyneko I. P. Utilization of lignins: achievements, problems and prospects. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of plant raw materials], 2012, no. 1, pp. 5–20 (In Russian).
12. Qu Y., Luo H., Li H., Xu J. Comparison on structural modification of industrial lignin by wet ball milling and ionic liquid pretreatment. *Biotechnology Reports*, 2015, vol. 6, pp. 1–7. DOI: 10.1016/j.btre.2014.12.011.
13. Wang Y.-Y., Meng X., Pu Y. J., Ragauskas A. Recent Advances in the Application of Functionalized Lignin in Value-Added Polymeric Materials. *Polymers*, 2020, vol. 12, article 2277. DOI: 10.3390/polym12102277.
14. Bajwa D. S., Pourhashem G., Ullah A. H., Bajwa S. G. A concise review of current lignin production, applications, products and their environmental impact. *Industrial Crops and Products*, 2019, vol. 139, article 111526. DOI: 10.1016/j.indcrop.2019.111526.
15. Kai D., Tan M. J., Chee P. L., Chua Y. K., Yap Y. L., Loh X. J. Towards lignin-based functional materials in a sustainable world. *Green Chemistry*, 2016, vol. 18, pp. 1175–1200. DOI: 10.1039/C5GC02616D.
16. Zhang J., Wang W., Zhou X., Liang J., Du G., Wu Z. Lignin-based adhesive crosslinked by furfuryl alcohol-glyoxal and epoxy resins. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 2019, vol. 34, issue 2, pp. 228–238. DOI: 10.1515/npprj-2018-0042.
17. Evstigneyev E. I., Shevchenko S. M. Lignin valorization and cleavage of arylether bonds in chemical processing of wood: a mini-review. *Wood Science and Technology*, 2020, vol. 54, pp. 787–820. DOI: 10.1007/s00226-020-01183-4.
18. Ghorbani M., Liebner F., van Herwijnen H. W. G., Solt P., Konnerth J. Lignous resole adhesives for exterior-grade plywood. *Eur. J. Wood Prod.*, 2018, vol. 76, pp. 251–258. DOI: 10.1007/s00107-017-1249-9.
19. Kazhamiaka A. A., Dubodelova E. V., Gonchar A. N., Shpak S. I. Improving production efficiency medium density fiberboard. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology, 2022, no. 2 (259), pp. 32–40. DOI: 10.52065/2520-2669-2022-259-2-32-40.

Информация об авторах

Кожемяко Александр Александрович – соискатель, заместитель генерального директора по производству. ОАО «Витебскдрев» (210008, г. Витебск, пер. Стахановский, 7, Республика Беларусь). E-mail: kozhemyako.a@wood.by

Куземкин Дмитрий Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазопереработки и нефтехимии. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: kuziomkin@mail.ru

Гончар Александр Николаевич – заместитель директора по научной работе. СООО «СинерджиКом» (247484, д. Пригородная, Речицкий район, Гомельская область, ул. Урожайная, 5, Республика Беларусь). E-mail: agonchar@synergyhorizon.com

Дубоделова Екатерина Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии деревообрабатывающих производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: katedubodelova@tut.by

Шпак Сергей Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры химической переработки древесины. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: spak_s@belstu.by

Information about the authors

Kazhamiaka Aleksandr Aleksandrovich – external doctorate student, Deputy General Director for Production. JSC “Vitebskdrev” (7, Stakhanovskiy lane, 210008, Vitebsk, Republic of Belarus). E-mail: kozhemyako.a@wood.by

Kuzemkin Dmitriy Vladimirovich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Oil and Gas Processing and Petroleum Chemistry. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kuziomkin@mail.ru

Gonchar Aleksandr Nikolaevich – Deputy Director for Scientific Work. SynergyCom SOOO (5, Urozhaynaya str., 247484, Prigorodnaya village, Rechitskiy district, Gomel region, Republic of Belarus). E-mail: agonchar@synergyhorizon.com

Dubodelova Ekaterina Vladimirovna – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Woodworking Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: katedubodelova@tut.by

Shpak Sergey Ivanovich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Chemical Processing of Wood. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: spak_s@belstu.by

Поступила 18.11.2022