

DOI: 10.17516/1998-2836-0314

EDN: ITWFWR

УДК: 547:631.0.861.16

## The Use of Chemically Modified Hydrolytic Lignins as Binders in the Obtaining of Wood Composites

Irina G. Sudakova<sup>\*a</sup>, Yuri Yu. Gavrillov<sup>a</sup>,  
Olga Yu. Fetisova<sup>a</sup> and Boris N. Kuznetsov<sup>a, b</sup>

*<sup>a</sup>Institute of Chemistry and Chemical Technology SB RAS  
FRC “Krasnoyarsk Science Center SB RAS”*

*Krasnoyarsk, Russian Federation*

*<sup>b</sup>Siberian Federal University*

*Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 12.08.2022, received in revised form 11.10.2022, accepted 27.10.2022

**Abstract.** A study on the possibility of using samples of hydrolytic lignin chemically modified by alkaline and oxidative treatment as a binder in the production of wood composites was carried out. The functional composition and thermal stability of samples of initial and hydrolyzed lignin treated with alkali and hydrogen peroxide have been studied. It was found that in order to obtain fuel briquettes with high density and water resistance, it is advisable to use a binder from lignin treated with hydrogen peroxide. To obtain wood-based board materials with high bending strength and low water absorption, it is proposed to use hydrolytic lignin treated with alkali as a binder. By experimental and mathematical optimization, the parameters of the pressing process, which ensure the production of wood-based board materials with high physical and mechanical characteristics using hydrolytic lignin modified with NaOH as a binder, were determined.

**Keywords:** hydrolytic lignin, chemical modification, sodium hydroxide, hydrogen peroxide, binder, wood composites, physical and mechanical characteristics.

**Acknowledgments.** This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, the Krasnoyarsk Territory Government and the edge of Science Foundation (grant no. 20–43–242904) within the framework of the state task ICCT SB RAS, project 0287–2021–0017, using the equipment of Krasnoyarsk Regional Research Equipment Centre of SB RAS.

---

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

\* Corresponding author E-mail address: Sudakova\_irina@mail.ru

Citation: Sudakova, I.G., Gavrilov, Y. Yu., Fetisova, O. Yu., Kuznetsov, B.N. The use of chemically modified hydrolytic lignins as binders in the obtaining of wood composites. J. Sib. Fed. Univ. Chem., 2022, 15(4), 518–528. DOI: 10.17516/1998-2836-0314.



## Использование химически модифицированных гидролизных лигнинов в качестве связующих при получении древесных композитов

И. Г. Судакова<sup>а</sup>, Ю. Ю. Гаврилов<sup>а</sup>,  
О. Ю. Фетисова<sup>а</sup>, Б. Н. Кузнецов<sup>а, б</sup>

<sup>а</sup>Институт химии и химической технологии СО РАН  
ФИЦ «Красноярский научный центр СО РАН»

Российская Федерация, Красноярск

<sup>б</sup>Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, Красноярск

**Аннотация.** Проведено исследование по возможности использования образцов химически модифицированного щелочной и окислительной обработкой гидролизного лигнина в качестве связующих при получении древесных композитов. Изучен функциональный состав и термостабильность исходного и химически модифицированных образцов гидролизного лигнина. Установлено, что для получения топливных брикетов с высокой плотностью и водостойкостью целесообразно использовать связующее из лигнина, обработанного пероксидом водорода. Для получения древесных плитных материалов с высокой прочностью на изгиб и низким водопоглощением предложено использовать в качестве связующего гидролизный лигнин, обработанный щелочью. Путем экспериментальной и математической оптимизации определены параметры процесса прессования, обеспечивающие получение древесных плитных материалов с высокими физико-механическими характеристиками при использовании в качестве связующего гидролизного лигнина модифицированного NaOH.

**Ключевые слова:** гидролизный лигнин, химическая модификация, натрия гидроксид, пероксид водорода, связующее, древесные композиты, физико-механические характеристики.

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края и краевого фонда науки (грант № 20–43–242904) в рамках Государственного задания ИХХТ СО РАН ФИЦ КНЦ СО РАН, проект 0287–2021–0017, с использованием оборудования Красноярского регионального центра коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН.

Цитирование: Судакова, И. Г. Использование химически модифицированных гидролизных лигнинов в качестве связующих при получении древесных композитов / И. Г. Судакова, Ю. Ю. Гаврилов, О. Ю. Фетисова, Б. Н. Кузнецов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Химия, 2022, 15(4). С. 518–528. DOI: 10.17516/1998-2836-0314

## Введение

Древесные композитные материалы, такие как древесные плиты и топливные брикеты, изготавливают прессованием отходов деревообрабатывающих предприятий (опилки, стружка, шпон) при повышенной температуре и давлении с использованием связующих. В качестве таких связующих может быть использован природный полимер – лигнин. Включение лигнина в композитные материалы привлекло внимание из-за его широкой доступности, биоразлагаемости, возобновляемости и способности к модификации его химической структуры [1].

Перспективным направлением является использование в качестве связующих для производства древесных композитов на полностью биологической основе (без использования смол) гидролизного лигнина, крупнотоннажного, малоиспользуемого побочного продукта гидролизного производства этанола. Только в РФ в отвалах заводов накоплены десятки миллионов тонн отходов гидролизного лигнина, что приводит к серьезным экологическим проблемам [2, 3].

Однако гидролизный лигнин обладает менее эффективными связующими свойствами по сравнению с традиционными смолами (фенолоформальдегидными) из-за более высокой степени конденсации, низкой реакционной способности и высокой влажности, что не позволяет получать древесные композиты с высокими физико-механическими характеристиками [4].

С целью повышения реакционной способности гидролизного лигнина при протекании реакций конденсации в условиях термопрессования обычно проводят его химическую модификацию [5], а для целенаправленного регулирования прочностных показателей древесных прессованных материалов необходимо определить основные факторы, влияющие на свойства получаемого древесного композита.

Целью данной работы являлось изучение возможности использования образцов исходного и химически модифицированного щелочью и пероксидом водорода гидролизного лигнина в качестве связующих для получения древесных композитов, определение влияния параметров процесса прессования на их физико-механические характеристики, проведение математической оптимизации процесса прессования для установления параметров, обеспечивающих получение древесных плит с максимальной прочностью и минимальным водопоглощением.

## Экспериментальная часть

В качестве исходного сырья использовали гидролизный лигнин Кировского биохимического завода (фракция 0,5–1,0 мм).

Химическую модификацию гидролизного лигнина осуществляли в стеклянном реакторе, снабженном механической мешалкой и холодильником. Температуру процесса поддерживали с помощью термостата «Термекс» (Томск, Россия).

Щелочную модификацию гидролизного лигнина проводили обработкой раствором, содержащим 2 мас. % NaOH при 85 °С в течение 2 часов при гидромодуле 10.

Окисление исходного и обработанного щелочью гидролизного лигнина осуществляли в растворе, содержащем 25 мас. %  $\text{H}_2\text{O}_2$ , и 2 мас. %  $\text{H}_2\text{SO}_4$  при температуре 90 °С в течение 2,5 часов при гидромодуле 8.

Определение функциональных групп исходного и модифицированных образцов гидролизного лигнина проводили по методикам, описанным в работе [6].

Регистрацию ИК-спектров образцов исходного и модифицированного лигнина осуществляли в области 4000–400  $\text{см}^{-1}$  с использованием ИК Фурье-спектрометра Shimadzu IR Tracer-100. Обработку спектральной информации проводили с использованием пакета программы OPUS, версия 5.0.

Термогравиметрический анализ проводили с помощью прибора STA 449 F1 Jupiter (NETZSCH, Германия). Образцы лигнина анализировали в аргоне при скорости нагрева 10 °С/мин от 30 до 900 °С. Обработка результатов измерений проводилась с помощью пакета программ «NETZSCH. ProteusThermalAnalysis.5.1.0».

Древесные прессованные материалы получали механическим смешением образцов гидролизного лигнина (30–50 мас. %) с древесным наполнителем (опилки лиственницы фракционного состава 1–2 мм с влажностью 6,8 мас. %) при температуре 25 °С. Прессование проводили при давлении 6,5 и 10 МПа. Температура прессования варьировалась от 150 до 180 °С. При заданном давлении и температуре пресс-массу выдерживали в течение 5 мин. Образцы прессованных материалов охлаждали под давлением в течение 15 мин.

Древесные прессованные материалы оценивали по плотности, пределу прочности при статическом изгибе, водопоглощению и набуханию по толщине [7, 8].

## Результаты и обсуждение

### *Физико-химические характеристики исходных и модифицированных образцов гидролизного лигнина*

Химический состав исходного и модифицированных образцов лигнина, выполненный по стандартным методикам [9], представлен в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав исходного и модифицированных образцов гидролизного лигнина

Table 1. Chemical composition of the original and modified samples of hydrolytic lignin

| Наименование образца  | Влажность, мас. % | Зольность, мас. % | Содержание в лигнине, мас. % |                     |                        |
|---|-------------------|-------------------|------------------------------|---------------------|------------------------|
|   |                   |                   | Лигнин                       | Остаточные углеводы | Экстрактивные вещества |
| Исходный гидролизный лигнин (ИГЛ)                                     | 6,6               | 2,6               | 78,6                         | 15,2                | 3,6                    |
| Гидролизный лигнин, обработанный NaOH (ЩГЛ)                           | 12,5              | 2,1               | 81,9                         | 12,7                | 3,5                    |
| Гидролизный лигнин, обработанный $\text{H}_2\text{O}_2$ (ОГЛ)         | 15,8              | 2,0               | 85,1                         | 9,5                 | 3,4                    |
| Гидролизный лигнин, обработанный NaOH и $\text{H}_2\text{O}_2$ (ЩОГЛ) | 14,1              | 1,7               | 89,1                         | 9,2                 | 2,9                    |

При химической модификации гидролизного лигнина увеличивается содержание лигнина и возрастает аналитическая влажность образцов. Окислительная обработка исходного и щелочного лигнина приводит к значительному снижению остаточных углеводов и зольности (табл. 1).

Методом ИК-спектроскопии определен состав функциональных групп исследуемых образцов гидролизного лигнина (рис. 1).

В ИК-спектрах всех образцов лигнина присутствуют полосы поглощения, характерные для функциональных групп лигнина [10]. В спектре лигнина, обработанного щелочью, наблюдается снижение интенсивности всех полос поглощения. Обработка гидролизного лигнина раствором NaOH приводит к снижению содержания остаточных углеводов, на что указывает отсутствие полосы поглощения при  $1717\text{ см}^{-1}$ . Окислительная модификация гидролизного лигнина  $\text{H}_2\text{O}_2$  приводит к снижению количества метоксильных групп (уменьшение интенсивности полосы поглощения при  $1462\text{ см}^{-1}$ ) и увеличению числа кислородсодержащих ( $-\text{COOH}$  и фенольных  $-\text{OH}$ ) групп, сопровождающемуся ростом интенсивностей полос поглощения с частотой  $1717$  и  $1213\text{ см}^{-1}$  соответственно.

Наиболее высокое содержание фенольных (6,7 мас. %) и карбоксильных групп (3,52 мас. %) наблюдается в образце окисленного лигнина после обработки щелочью (рис. 2). Окислительное модифицирование гидролизного лигнина увеличивает количество алифатических гидроксильных групп примерно в 1,5 раза, а фенольных гидроксидов в 2,5 раза. При обработке лигнина щелочью количество всех кислородсодержащих функциональных групп снижается.

Изучение термической стабильности исходного и модифицированных образцов гидролизного лигнина проводили с использованием метода ДТА (рис. 3).

При температуре  $60\text{--}85\text{ }^\circ\text{C}$  для всех образцов лигнина происходит потеря массы за счет удаления адсорбированной воды. Термическое разложение исходного и окисленных образцов лигнина начинается в температурном интервале  $140\text{--}150\text{ }^\circ\text{C}$ , и их максимальная деструкция происходит около  $410\text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 3б, кривые 1,3,4), тогда как начальная стадия разложения для

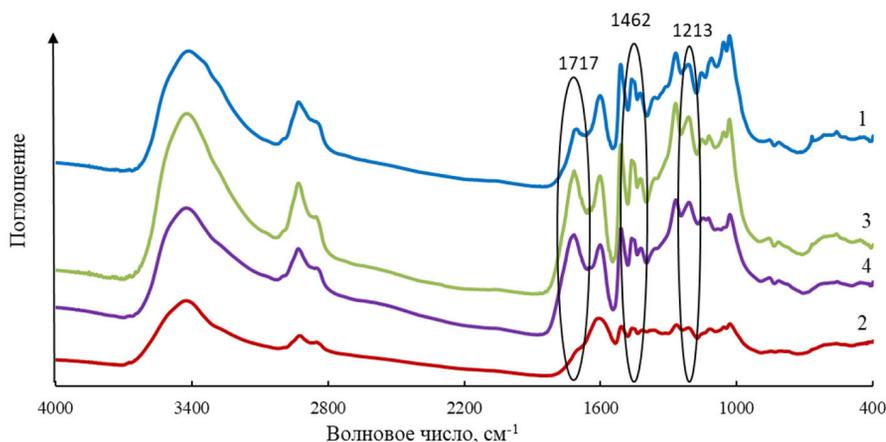


Рис. 1. ИК-спектры образцов лигнина: 1 – (ИГЛ); 2 – (ЩГЛ); 3 – (ОГЛ); 4 – (ЩОГЛ)

Fig. 1. FT-IR spectra of lignin samples: 1 – initial hydrolytic lignin (IHL); 2 – alkaline hydrolysis lignin (AHL); 3 – oxidized hydrolytic lignin (OHL); 4 – alkaline oxidized lignin (AOHL)

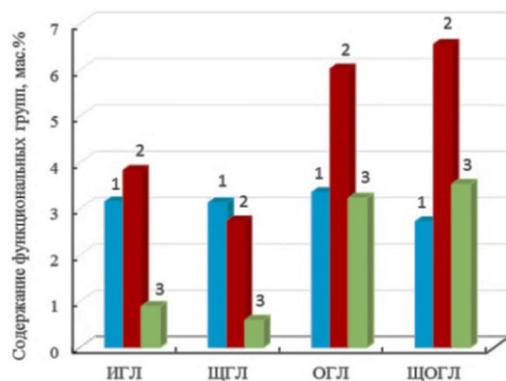


Рис. 2. Содержание кислородсодержащих функциональных групп в образцах лигнина: 1 – алифатические [–ОН]; 2 – фенольные [–ОН] и 3 – карбоксильные [–COOH] группы

Fig. 2. The content of oxygen-containing functional groups in lignin samples: 1 – aliphatic [–OH]; 2 – phenolic [–OH] and 3 – carboxyl [–COOH] groups

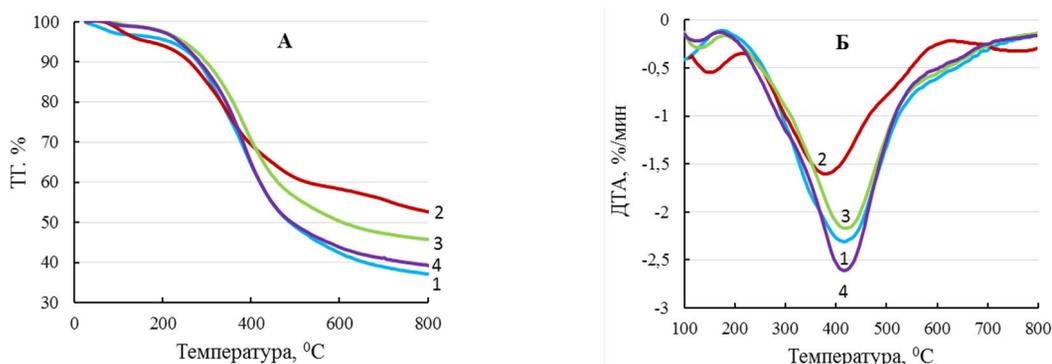


Рис. 3. Кривые (а) ТГ и (б) ДТА образцов исходного и модифицированного лигнина: 1- ИГЛ; 2 – ЩГЛ; 3 – ОГЛ; 4 – ЩОГЛ

Fig. 3. Curves (a) of TG and (б) DTA of original and modified lignin samples: 1- IHL; 2 – AHL; 3 – OHL; 4 – AOHNL

ЩГЛ наблюдается при 185,8 °С, а скорость деградации становится максимальной при 355,8 °С (рис. 3б, кривая 2). По количеству твердого остатка наиболее термически стабильным является образец лигнина, обработанный NaOH (51,6 мас. %), а наименее – окисленный гидролизный лигнин (36,2 мас. %).

#### *Применение связующих из модифицированных образцов гидролизного лигнина при получении древесных композитов*

Максимальной прочностью и низким водопоглощением обладают образцы древесных композитов, полученные при использовании в качестве связующего исходного и щелочного гидролизного лигнина и составляют 22,1–27,5 МПа и 5,4–4,9 мас. % (рис. 4), что выше этих показателей для древесных прессованных масс. Окисленные образцы гидролизного лигнина имеют показатели прочности ниже, при этом по водопоглощению они не превышают стандартных значений.

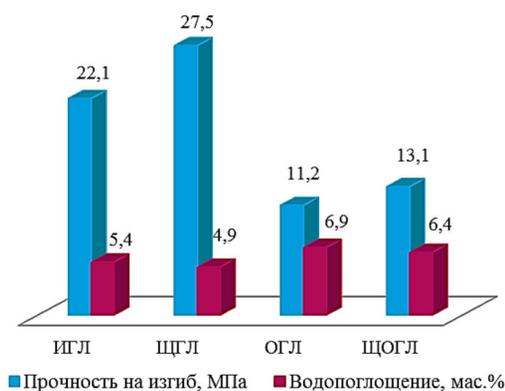


Рис. 4. Влияние добавок лигнинового связующего на физико-механические свойства плитных материалов. Условия прессования: концентрация лигнина в пресс-массе – 40 мас. %; давление – 6,5 МПа; температура – 160 °С

Fig. 4. Effect of lignin binder additives on physical and mechanical properties of board materials. Pressing conditions: lignin concentration in the press mass – 40 wt. %; pressure – 6.5 MPa; temperature – 160 °C

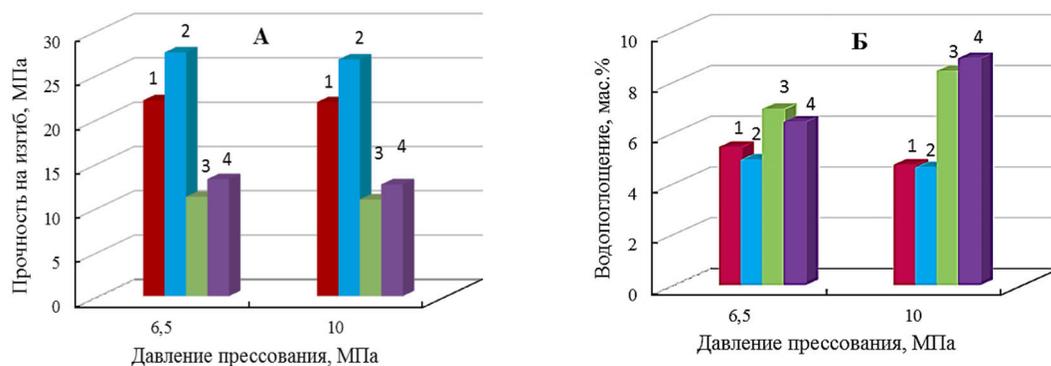


Рис. 5. Влияние давления прессования на (а) прочность на изгиб и (б) водопоглощение древесных плитных материалов. Условия прессования: концентрация лигнина в пресс-массе – 40 мас. %; температура – 160 °С. (1 – ИГЛ; 2 – ЩГЛ; 3 – ОГЛ; 4 – ЩОГЛ)

Fig. 5. Effect of pressing pressure on (a) bending strength and (б) water absorption of wood-based board materials. Pressing conditions: lignin concentration in the press mass – 40 wt. %; temperature – 160 °C. (1 – IHL; 2 – AHL; 3 – OHL; 4 – AOHL)

При повышении давления прессования до 10 МПа прочность на изгиб для всех образцов гидролизного лигнина незначительно снижается (рис. 5а). При этом водостойкость прессованных материалов, полученных с использованием связующих из окисленных образцов гидролизного лигнина, возрастает (рис. 5б). Плотность этих образцов составляет 1058 и 1093 кг/м<sup>3</sup> для ОГЛ и ЩОГЛ соответственно.

*Экспериментальная и математическая оптимизация параметров процесса прессования древесных плитных материалов*

Влияние содержания обработанного NaOH гидролизного лигнина в композите на физико-механические характеристики древесных плитных материалов представлено на рис. 6.

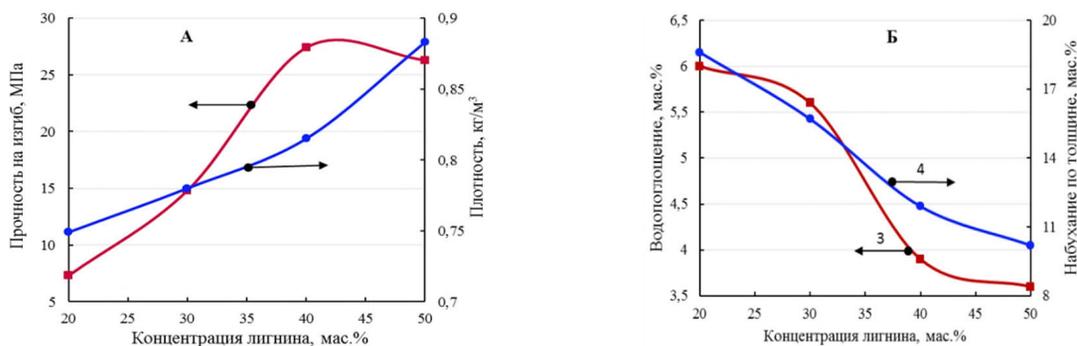


Рис. 6. Влияние концентрации ЩГЛ на (а) прочность и (б) влагостойкость древесных плитных материалов при давлении прессования 6,5 МПа и температуре прессования 160 °С. (1 – прочность на изгиб; 2 – плотность; 3 – водопоглощение; 4 – набухание по толщине)

Fig. 6. Effect of AHL concentration on (a) strength and (б) moisture resistance of wood-based board materials at a pressing pressure of 6.5 MPa and a pressing temperature of 160 °C. (1 – bending strength; 2 – density; 3 – water absorption; 4 – swelling in thickness)

При введении в композит 20–30 мас. % щелочного лигнина плотность древесных плит изменяется от 749 до 780 кг/м<sup>3</sup> и имеет предел прочности на изгиб 7,3–14,8 МПа. При повышении содержания лигнина в пресс-массе до 40 мас. % возрастает плотность образцов до 815 кг/м<sup>3</sup>. Получаемые при этом древесные плитные материалы имеют предел прочности при изгибе 27,5 МПа, что 1,5 раза выше прочностных показателей коммерческих плит.

Водопоглощение и набухание по толщине образцов плитных материалов составляет 4,9 и 13,4 соответственно при содержании в пресс-массе 40 мас. % ЩГЛ. Увеличение содержания связующего до 50 мас. % приводит к снижению прочности полученных образцов плит, в то время как водостойкость их незначительно увеличивается и составляет 4,0 и 11,9 мас. % для водопоглощения и набухания по толщине. Увеличение температуры прессования от 130 до 160 °С при давлении прессования 6,5 МПа приводит к возрастанию плотности плитных материалов, а также их прочности и водостойкости (рис. 7). При повышении температуры прессования до 180 °С наблюдается увеличение плотности древесных композитов до 892 кг/м<sup>3</sup>, при этом прочность на изгиб уменьшается до 26,3 МПа. Водопоглощение и набухание по толщине древесных плит снижаются до 3,7 и 10,9 мас. % соответственно.

Математическую оптимизацию процесса прессования древесных плит проводили с использованием пакета прикладных программ Statgraphics Centurion XVI, блок DOE (Design of Experiment) методом построения поверхностей отклика [11].

На основании экспериментальных данных были выбраны следующие переменные факторы:  $X_1$  – температура прессования, °С и  $X_2$  – концентрация лигнинового связующего в пресс-массе, мас. %. В качестве выходных параметров использовали  $Y_1$  – прочность на изгиб, МПа и  $Y_2$  – водопоглощение, мас. % (табл. 2).

Дисперсионный анализ показал, что зависимости прочности на изгиб ( $Y_1$ ) и водопоглощение ( $Y_2$ ) древесных плитных материалов от переменных факторов процесса прессования хорошо аппроксимируются следующими уравнениями регрессии:

$$Y_1 = -554,85 + 6,05 \cdot X_1 + 2,53 \cdot X_2 - 0,019 \cdot X_1^2 + 0,013 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,052 \cdot X_2^2$$

$$Y_2 = 6,59 + 0,07 \cdot X_1 + 0,05 \cdot X_2 - 0,002 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,003 \cdot X_2^2$$

Об удовлетворительных прогностических свойствах этих уравнений свидетельствуют высокие значения коэффициентов детерминации: 95,9 и 94,8 % для прочности на изгиб и водопоглощения соответственно.

Поверхности отклика выходных параметров  $Y_1$  и  $Y_2$  при изменении переменных факторов  $X_1$  и  $X_2$  представлены на рис. 8.

Таким образом, максимальное значение прочности на изгиб для древесных плитных материалов составляет 28,2 МПа и достигается в точке, соответствующей значениям температуры прессования 175 °С и концентрации ЩГЛ 43,2 мас. %, а минимальное водопогло-

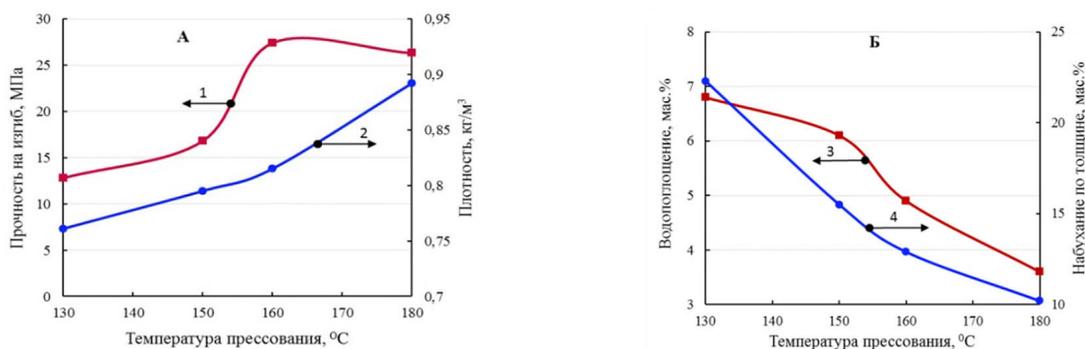


Рис. 7. Влияние температуры прессования на (а) прочность и (б) влагостойкость древесных плитных материалов при давлении прессования 6,5 МПа и концентрации ЩГЛ в пресс-массе – 40 мас. % (1 – прочность на изгиб; 2 – плотность; 3 – водопоглощение; 4 – набухание по толщине)

Fig. 7. Effect of pressing temperature on (a) strength and (б) moisture resistance of wood-based board materials at a pressing pressure of 6.5 MPa and an AHL concentration in the press mass – 40 wt. % (1 – bending strength; 2 – density; 3 – water absorption; 4 – swelling in thickness)

Таблица 2. Матрица оптимизации экспериментов и результаты ее реализации

Table 2. Matrix of optimization of experiments and the results of its implementation

| № опыта | Температура прессования, °C ( $X_1$ ) | Концентрация связующего в пресс-массе, мас. % ( $X_2$ ) | Прочность на изгиб, МПа | Водопоглощение, мас. % |
|---------|---------------------------------------|---|-------------------------|------------------------|
| 1       | 150,0                                 | 30,0  | 11,9                    | 7                      |
| 2       | 160,0                                 | 30,0  | 13,1                    | 6,4                    |
| 3       | 180,0                                 | 30,0  | 12,7                    | 5,9                    |
| 4       | 150,0                                 | 40,0  | 14,4                    | 6,9                    |
| 5       | 160,0                                 | 40,0  | 27,4                    | 4,9                    |
| 6       | 180,0                                 | 40,0  | 26,8                    | 3,7                    |
| 7       | 150,0                                 | 50,0  | 16,8                    | 6,1                    |
| 8       | 160,0                                 | 50,0  | 26,4                    | 5,7                    |
| 9       | 180,0                                 | 50,0  | 25,3                    | 3,6                    |

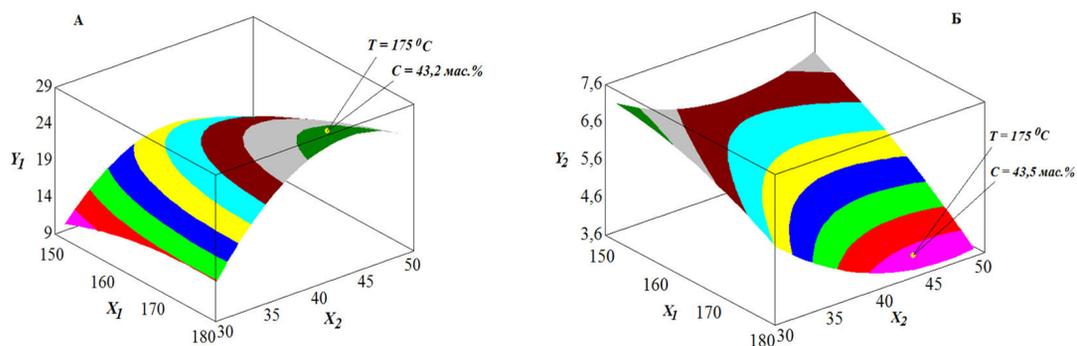


Рис. 8. Поверхности отклика выходных параметров (а)  $Y_1$  – прочность на изгиб и (б)  $Y_2$  – водопоглощение от переменных факторов,  $X_1$  – температура прессования и  $X_2$  – концентрация ЩГЛ в пресс-массе

Fig. 8. Response surfaces of output parameters (a)  $Y_1$  – bending strength and (б)  $Y_2$  – water absorption from variable factors  $X_1$  – pressing temperature and  $X_2$  – AHL concentration in press mass

щение – 3,9 мас. % при той же температуре прессования и концентрации ЩГЛ в пресс-массе 43,5 мас. %.

### Заключение

Проведено исследование по возможности использования образцов химически модифицированного щелочной и окислительной обработкой гидролизного лигнина в качестве связующих при получении древесных композитов.

Определено, что модификация гидролизного лигнина пероксидом водорода приводит к увеличению кислородсодержащих функциональных групп, а обработка щелочью снижает их содержание. Установлено, что наиболее высокой термостабильностью обладает образец гидролизного лигнина, обработанный NaOH.

Отмечено, что высокие показатели водостойкости и плотности древесных композитов, полученных с использованием образцов окисленного гидролизного лигнина в качестве связующих, дают возможность использовать их для получения топливных брикетов. Для изготовления древесных плитных материалов с высокой прочностью на изгиб и водостойкостью могут быть использованы образцы гидролизного лигнина, обработанного NaOH, в качестве связующего.

Установлено, что при содержании 40–50 мас. % модифицированного щелочью гидролизного лигнина в композите были получены плитные материалы, имеющие предел прочности при изгибе в 1,5 раза выше прочностных показателей плит, получаемых в промышленности. Древесные плитные материалы, полученные при содержании в пресс-массе 50 мас. % лигнина, обработанного щелочью, имели максимальную водостойкость.

Расчетным методом определены оптимальные параметры процесса прессования древесных плитных материалов в присутствии гидролизного лигнина, обработанного NaOH, в качестве связующего: содержание связующего в пресс-массе – 43 мас. %; температура прессования – 175 °C; давление прессования – 6,5 МПа. Расчетные качественные показатели древесных плит: максимальная прочность на изгиб 28,2 МПа, а минимальное водопоглощение 3,9 мас. %.

## Список литературы / References

1. Zevallos Torres L. A., Lorenci Woiciechowski A., de Andrade Tanobe V. O., Karp S. G., Guimarães Lorenci L. C., Faulds C., Soccol C. R. Lignin as a potential source of high-added value compounds: A review. *Journal of Cleaner Production* 2020. 121499. doi:10.1016/j.jclepro.2020.121499
2. Евстигнеев Э. И. Проблемы валоризации лигнина (обзор). *Химия растительного сырья* 2022. № 1. С. 11–33. doi:10.14258/jcprm.2022019211 [Evstigneev E. I. Problems of lignin valorization (review.) *Chemistry of plant raw materials* 2022. 1. 11–33. (in Russ.)]
3. Цветков М. В., Салганский Е. А. Лигнин: Направления использования и способы утилизации (обзор). *Журнал прикладной химии* 2018. 91, 7. 988–997. doi:10.1134/S 0044461818070095 [Tsvetkov M. V., Salgansky E. A. Lignin: Directions for use and methods of disposal (review). *Journal of Applied Chemistry* 2018. 91, 7. 988–997. (in Russ.)]
4. Иванов Д. В., Рябинков А. А., Орехов Е. В. Аспекты изготовления древесноволокнистых плит без использования синтетических смол. Древесные плиты и фанера: теория и практика: *Всерос. науч.-практ. конф. СПб. 2021*. 79–86. [Ivanov D. V., Ryabinkov A. A., Orekhov E. V. Aspects of the manufacture of fibreboard without the use of synthetic resins. Wood boards and plywood: theory and practice: *All-Russian Scientific and Practical Conference St. Petersburg 2021*. 79–86. (in Russ.)]
5. Судакова И. Г., Руденко Н. Б. Получение твердых биотоплив из растительных отходов (обзор) *Журнал СВУ. Химия* 2015. 8(4). 499–513 doi:10.17516/1998–2836–2015–8–4–499–513 [Sudakova I. G., Rudenko N. B. Obtaining solid biofuels from plant waste (review) *Journal of SibFU. Chemistry* 2015. 8(4). 499–513. (in Russ.)]
6. El Mansouri N.-E., Salvadó J. Analytical methods for determining functional groups in various technical lignins. *Industrial Crops and Products* 2007. 26(2). 116–124. doi:10.1016/j.indcrop.2007.02
7. ГОСТ 10632–2014. Плиты древесностружечные. Технические условия. М., 15. [GOST 10632–2014. Chipboards. Specifications. Moscow. 15. (in Russ.)]
8. ГОСТ 10634–88. Плиты древесностружечные. Методы определения физических свойств. М. 7 [GOST 10634–88. Particle boards. Methods for determining physical properties. Moscow, 7 (in Russ.)]
9. Sakakibara M. A. Chemistry of lignin. Wood and cellulosic chemistry. New York, Basel: Marcel Dekker. 1991. 111–168
10. Huang Y., Wang L., Chao Y., Nawawi D. S., Akiyama T., Yokoyama T., Matsumoto Y. Analysis of Lignin Aromatic Structure in Wood Based on the IR Spectrum. *Journal of Wood Chemistry and Technology*. 2012. 32(4). 294–303. doi:10.1080/02773813.2012.666316
11. Пен Р. З. Планирование эксперимента в Statgraphics Centurion. Красноярск, 2014. 293 [Pen R. Z. Planning of experiment in Statgraphics Centurion. Krasnoyarsk, 2014. 293. (in Russ.)]