

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ  
И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

Научная статья

УДК 674.812

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-6-153-163

**Теоретическое и экспериментальное обоснование характера взаимодействия модифицированных связующих с древесиной**

*Д.С. Русаков, канд. техн. наук, доц.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4344-2779>*

*Г.С. Варанкина<sup>✉</sup>, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [H-1922-2019](https://orcid.org/0000-0003-3470-5124),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3470-5124>*

*А.Н. Чубинский, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [I-9432-2016](https://orcid.org/0000-0001-7914-8056),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7914-8056>*

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021; dima-ru25@mail.ru, varagalina@yandex.ru<sup>✉</sup>, a.n.chubinsky@gmail.com

*Поступила в редакцию 25.11.21 / Одобрена после рецензирования 20.02.22 / Принята к печати 22.02.22*

**Аннотация.** Существует множество методов анализа поверхностных явлений при склейке древесных материалов, взаимного расположения пор на подложке древесины и глубины проникновения жидкого клея в древесину. Наряду с оптическими используются электронно-микроскопические методы, атомно-силовая и сканирующая туннельная микроскопия, позволяющие оценить влияние факторов, характеризующих взаимодействие между молекулами жидкого клея и пористой поверхностью древесины. Для обоснования механизма взаимодействия модифицированных клеев с древесиной использовали фенолоформальдегидную смолу, модифицированную пектолом, и карбамидоформальдегидную смолу, модифицированную лигносульфонатами. Для исследования глубины проникновения клея в шпон применяли метод электронной микроскопии. Для производства фанеры брали модифицированные карбамидо- и фенолоформальдегидный клеи. После кондиционирования подготавливали образцы толщиной 0,025 мм и исследовали их на растровом электронном микроскопе. Показано, что при взаимодействии жидкого модифицированного пектолом фенолоформальдегидного клея с древесиной происходит последовательный рост молекулярной массы веществ и, соответственно, степени (глубины) проникновения. Исследуемые породы древесины – береза, сосна, лиственница – и модифицированные терморезистивные карбамидо- и фенолоформальдегидные клеи являются полярными материалами (клей взаимодействует с молекулами древесины с образованием межмолекулярных связей, в том числе водородных). Рост молекулярной массы и свободно сочлененный характер основной цепи (макромолекулы жидкого модифицированного клея), содержащей в большом количестве полярные функциональные группы (клея и древесины), способствуют межмолекулярной ассоциации. Формирование клеевого соединения на основе модифицированного лигносульфонатами карбамидоформальдегидного клея с древесиной происходит за счет химического взаимодействия между гидроксильными группами макромолекул

целлюлозы и метоксильными группами карбамидной смолы с образованием сложных эфиров (атомы водорода гидроксильных групп ОН замещены на углеводородные радикалы R). Образование связи между клеем и поверхностью древесины – результат действия сил молекулярного взаимодействия на границе раздела фаз жидкий клей – древесина, когда расстояние между молекулами одинаковой полярности (клея и древесины) составляет менее 0,5 нм. Далее наступает адсорбционное равновесие.

**Ключевые слова:** фенолоформальдегидная смола, карбамидоформальдегидная смола, модифицированный клей, взаимодействие модифицированного клея с древесиной, механизм взаимодействия модифицированного клея с древесиной, поверхностные явления на границе раздела фаз, глубина проникновения жидкого клея

**Для цитирования:** Русаков Д.С., Варанкина Г.С., Чубинский А.Н. Теоретическое и экспериментальное обоснование характера взаимодействия модифицированных связующих с древесиной // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 6. С. 153–163. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-6-153-163>

Original article

## Theoretical and Experimental Substantiation of the Nature of Interaction between Modified Binders and Wood

**Dmitry S. Rusakov**, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4344-2779>

**Galina S. Varankina**<sup>✉</sup>, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [H-1922-2019](https://orcid.org/0000-0003-3470-5124)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3470-5124>

**Anatoly N. Chubinsky**, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [I-9432-2016](https://orcid.org/0000-0001-7914-8056)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7914-8056>

Saint-Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, Institutskiy per., 5, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; [dima-ru25@mail.ru](mailto:dima-ru25@mail.ru), [varagalina@yandex.ru](mailto:varagalina@yandex.ru)<sup>✉</sup>, [a.n.chubinsky@gmail.com](mailto:a.n.chubinsky@gmail.com)

Received on November 25, 2021 / Approved after reviewing on February 20, 2022 / Accepted on February 22, 2022

**Abstract.** There are numerous methods for analyzing surface phenomena when bonding wood materials, mutual arrangement of pores in the wood substrate, and depth of liquid adhesive penetration into wood. Electron microscopic methods such as atomic force and scanning tunneling microscopy are used along with optical methods. They allow evaluating the influence of factors describing the interaction between the liquid adhesive molecules and the porous wood surface. Phenol formaldehyde resin modified with pectol and urea formaldehyde resin modified with lignosulfonates were used for substantiation of the interaction mechanism between modified adhesives and wood. Electron microscopy was used to study the depth of adhesive penetration into veneer. The plywood was produced using modified urea and phenol formaldehyde adhesives. After conditioning, samples with a thickness of 0.025 mm were cut out and examined with a scanning electron microscope. The article shows that the interaction between liquid phenol formaldehyde adhesive modified with pectol and wood results in a sequential increase in the molecular weight of the substances and, consequently, in the penetration degree (depth). The studied wood species (birch, pine and larch) and modified thermosetting urea and phenol formaldehyde adhesives are polar materials (adhesive interacts with wood molecules with the formation of intermolecular bonds, including hydrogen bonds).



The molecular weight growth and the freely joined nature of the main chain (liquid modified adhesive macromolecules), which contains a large number of polar functional groups (adhesive and wood), promote intermolecular association. The formation of an adhesive bond between urea formaldehyde adhesive modified with lignosulfonates and wood occurs due to chemical interaction between hydroxyl groups of cellulose macromolecules and methoxyl groups of urea resin with the formation of esters (hydrogen atoms of hydroxyl groups OH are substituted with hydrocarbon radicals R). The formation of a bond between the adhesive and the wood surface is the result of molecular interaction forces at the liquid adhesive – wood interface, when the distance between molecules of the same polarity (adhesive and wood) is less than 0.5 nm. Then, adsorption equilibrium sets in.

**Keywords:** phenol formaldehyde resin, urea formaldehyde resin, modified adhesive, interaction between modified adhesive and wood, mechanism of interaction between modified adhesive and wood, surface phenomena at the interface, liquid adhesive penetration depth

**For citation:** Rusakov D.S., Varankina G.S., Chubinsky A.N. Theoretical and Experimental Substantiation of the Nature of Interaction between Modified Binders and Wood. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2022, no. 6, pp. 153–163. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-6-153-163>

### Введение

Для анализа поверхностных явлений при склейке древесины [8–11], взаимного расположения пор на подложке древесины и глубины проникновения жидкого клея в древесину [9, 10] используют электронно-микроскопические методы, атомно-силовую и сканирующую туннельную микроскопию [12–20], позволяющие оценить влияние факторов, характеризующих взаимодействие между молекулами жидкого клея и пористой поверхностью древесины.

Пектол образуется смешиванием 60 % таллового пека с 40 % легкого таллового масла. Выбор пектола для модификации фенолоформальдегидных смол объясняется тем, что смоляные и жирные кислоты, входящие в состав этого продукта, реагируют с формальдегидом. В этом случае формальдегид может вступать в реакции присоединения по двойным связям жирных и смоляных кислот и участвовать в их этерификации (реакции получения сложного эфира).

В продуктах конденсации фенолоформальдегидных смол содержатся моно- и диметилфенолы, которые могут участвовать в реакциях этерификации с кислотами и реакциях присоединения по двойным связям. Изопимаровая кислота как один из представителей смоляных кислот вступает в реакцию присоединения по кратным связям с формальдегидом с образованием многоядерного циклического соединения [1, 8–11]. С *орто*-монометилфенолом изопимаровая кислота реагирует с образованием тетрациклического бензоидного соединения. Пектолы значительно снижают содержание формальдегида в готовой продукции за счет химического связывания свободного формальдегида фенолоформальдегидной смолы со смоляными кислотами омыленного таллового пека. В результате реакции присоединения с разрывом кратных связей образуется многоядерный щелочной полимер.

Пектолы ускоряют процесс отверждения фенолоформальдегидных смол за счет замещения гидроксильных групп фенолоформальдегидной смолы катионами натрия мицелл омыленного таллового пека с уменьшением массовой

доли щелочи в клее и увеличением активности ионов водорода (т. е. pH). Мицеллы встраиваются в молекулу полимера фенолоформальдегидной смолы, формируя пространственно-разветвленную структуру, что ведет к образованию щелочного полимера с новым комплексом свойств, обеспечивающих ускорение процесса отверждения клея и повышение прочности склеивания [1–7].

Применение лигносульфонатов [8, 10] связано с ценными коллоидно-химическими свойствами этих полиэлектролитов, в частности высокой поверхностной активностью. Макромолекула лигносульфоната образует нелинейную структуру, приближающуюся к глобулярным полимерам [8]. Особенностью подобных структур является их компактность и гибкость, несмотря на большую молекулярную массу и относительно низкое содержание связанной воды. Макромолекулы лигносульфонатов разной степени дисперсности связаны друг с другом поперечными связями, главная из которых связь  $C_{\beta}$ -O- $C_4$ , также допускается наличие водородных связей. Чем выше молекулярная масса этих частиц, тем реальнее потенциальная возможность образования после соответствующей модификации 3-мерной структуры. Лигносульфонаты представляют собой анионноактивный полимер, содержащий метоксильные, фенольные, гидроксильные, карбонильные, карбоксильные и сульфогруппы в натриевой форме.

Цель данной работы – обоснование механизма взаимодействия модифицированных клеев с древесиной с позиций поверхностных явлений.

#### *Объекты и методы исследования*

Для исследования глубины проникновения клея в субстрат использовали метод электронной микроскопии. Фанеру размером 2440×1220 мм из древесины березы, осины и лиственницы склеивали в производственных условиях фанерного завода Братского лесопромышленного комплекса при температуре 115 °С и трех уровнях давления прессования – 1,2; 1,5; 1,8 МПа. Применяли модифицированные карбамидо- и фенолоформальдегидный клеи. После технологической выдержки в течение 24 ч вырезали образцы толщиной 0,025 мм и исследовали их на растровом электронном микроскопе.

Глубину проникновения жидкого карбамидо- и фенолоформальдегидных клеев в древесину (анализ проникающего вещества) определяли при помощи системы JED-2300T Analysis Station.

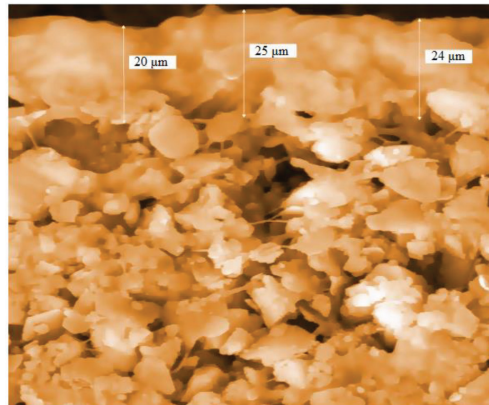
#### *Результаты исследования и их обсуждение*

Для определения характера взаимодействия модифицированного пектолом фенолоформальдегидного клея и древесины, глубины его проникновения в поры древесины проведен анализ показанных на рис. 1, 2 SEM- и EDS-изображений древесины, пропитанной клеем.

Химическое строение полимера влияет на характер адгезионного взаимодействия жидкий клей – субстрат, определяя пространственную структуру полимера, наличие в цепи макромолекулы боковых, полярных и функциональных групп, способных к физическому или химическому взаимодействию с поверхностью субстрата. Увеличение гибкости молекул адгезива (клея) приводит к большей свободе перемещения отдельных сегментов макромолекулы полимера и возможному контакту их с реакционно-активными центрами поверхности древесины.

Рис. 1. SEM-изображение, показывающее глубину проникновения в березовый шпон жидкого фенолоформальдегидного клея, модифицированного пектолом (увеличение в 40 000 раз)

Fig. 1. SEM image of the penetration depth of liquid phenol formaldehyde adhesive modified with pectol into birch veneer (40,000× magnification)



Рассмотрим первый подход к взаимодействию жидкого модифицированного клея с поверхностью древесины при условии смачивания и растекания его на подложке древесины. Данная теория учитывает возможность физико-химического взаимодействия жидкого клея с поверхностью древесины на молекулярном уровне.

Энергетическое состояние поверхности субстрата играет важную роль в фундаментальных физических процессах адсорбции, хемосорбции, миграции адсорбированных частиц вдоль поверхности и химическом взаимодействии частиц вблизи раздела двух фаз. Качество клеевых соединений в большой степени определяется уровнем адгезионного контакта на границе раздела фаз адгезив – субстрат, который в свою очередь зависит от характера межфазного взаимодействия.

В нашем случае для лиственных пород проникновение жидкого модифицированного клея на уровень клетки будет определяться размерами перфорированных отверстий в нижней и верхней частях клеток волокон либриформа. Отверстия пор в сосудах лиственных пород характеризуются большими размерами и хорошей проницаемостью. При взаимодействии (рис. 1) жидкого модифицированного пектолом фенолоформальдегидного клея с древесиной происходит последовательный рост молекулярной массы веществ и, соответственно, степени (глубины) проникновения (рис. 2). Исследуемые породы древесины и модифицированные термореактивные карбамидо- и фенолоформальдегидные клеи являются полярными материалами (клей взаимодействует с молекулами древесины с образованием межмолекулярных связей, в том числе водородных).

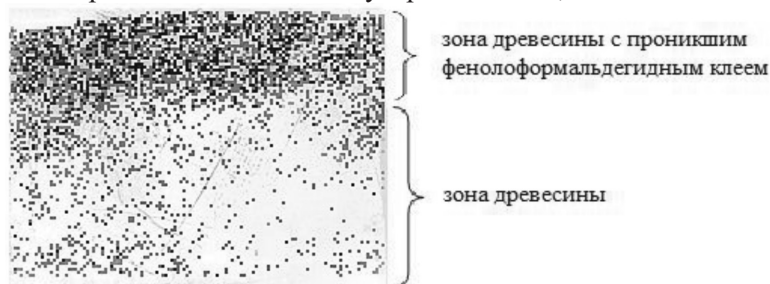


Рис. 2. EDS-изображение распределения элементов (по углероду) в структуре образца при использовании модифицированного пектолом фенолоформальдегидного клея

Fig. 2. EDS image of the elements distribution (by carbon) in the sample structure when using phenol formaldehyde adhesive modified with pectol

Взаимно притягиваясь, полярные молекулы модифицированного клея ориентируются между собой по отношению к полярным молекулам реакционноспособных активных центров на поверхности древесины. Качественное клеевое соединение при прочих равных условиях происходит в случае взаимодействия полярных материалов, причем при контакте важно, чтобы их полярность имела наименьшую разницу.

Установлено, что нанесенный на шпон клей адсорбируется древесиной (рис. 1). Исходя из этого, понятие «клеевой слой» может быть определено как зона древесины, пропитанная клеем.

На EDS-изображении (рис. 2) хорошо виден насыщенный слой, отражающий распределение углерода и характеризующий глубину проникновения в березовый шпон жидкого фенолоформальдегидного клея, модифицированного пектолом.

Второй подход к взаимодействию жидкого модифицированного клея с поверхностью древесины при условии смачивания и растекания его на подложке древесины предполагает химическое взаимодействие жидкого клея с высокомолекулярными компонентами древесины.

Для определения характера взаимодействия с древесиной и глубины проникновения в нее карбамидоформальдегидного клея, модифицированного лигносульфонатами, проведен анализ SEM- и EDS-изображений, показанных на рис. 3, 4.

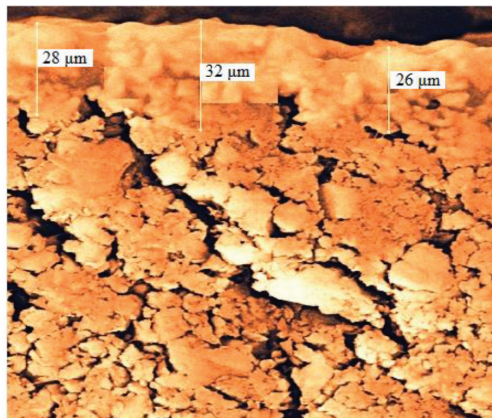


Рис. 3. SEM-изображение, показывающее глубину проникновения в березовый шпон жидкого карбамидоформальдегидного клея, модифицированного лигносульфонатами (увеличение в 40 000 раз)  
Fig. 3. SEM image of the penetration depth of liquid urea formaldehyde adhesive modified with lignosulfonates into birch veneer (40,000× magnification)

Реакционноспособные высокомолекулярные компоненты, входящие в состав древесной матрицы, определяют ее строение. Лигнин и гемицеллюлозы, сосредоточенные большей частью в межклеточном веществе и поверхностных слоях, образующих лигноуглеводную матрицу, являются наиболее реакционноспособными в процессах химического взаимодействия высокомолекулярных соединений с компонентами древесины, в том числе и при поверхностных явлениях на границе раздела двух фаз (жидкий клей – древесина).

Важно, чтобы клеящее вещество и склеиваемые поверхности обладали полярными функциональными группами, способными к взаимодействию (гидроксильные OH, карбоксильные COOH, амидные NHCO). Клеящие свойства высокомолекулярных соединений определяются наличием в них функциональных групп, их активностью, количеством и расположением в структуре макромолекулы полимера.



Рис. 4. EDS-изображение распределения элементов (по углероду) в структуре образца при использовании модифицированного лигносульфонатами карбамидоформальдегидного клея

Fig. 4. EDS image of the elements distribution (by carbon) in the sample structure when using urea formaldehyde adhesive modified with lignosulfonates

Формирование клеевого соединения на основе модифицированного лигносульфонатами карбамидоформальдегидного клея с древесиной происходит за счет химического взаимодействия между гидроксильными группами макромолекул целлюлозы и метоксильными группами карбамидной смолы с образованием сложных эфиров (атомы водорода гидроксильных групп OH замещены на углеводородные радикалы R).

Образование связи между клеем и поверхностью древесины (рис. 3, 4) – результат действия сил молекулярного взаимодействия на границе раздела фаз жидкий клей – древесина, когда расстояние между молекулами одинаковой полярности (клея и древесины) составляет менее 0,5 нм, далее наступает адсорбционное равновесие. Смачивание, растекание и проникновение жидкого модифицированного клея в древесину сопровождается поверхностной диффузией и миграцией молекул клея по поверхности. На прочность адгезионной связи также влияет проникновение участков макромолекул жидкого олигомера, несущих активные реакционноспособные группы, в поверхность материала. Такая поверхностная диффузия продолжается, пока активные группы сегментов макромолекул не адсорбируются за счет физических или химических сил на поверхности материала. Между этими группами сегментов не образуется прочная адгезионная связь.

На глубину проникания клея в древесину ( $h$ , м) влияет макро- и микростроение древесины [9, 10],  $h$  может быть определена по приведенной ниже формуле в зависимости от вязкости связующего, которая в свою очередь является функцией температуры:

$$h = \frac{\Delta P}{n \cdot 4v\eta} R_k^2 \left\{ 0,4 \left[ 1 + 0,125(T - 20)^{0,5} \right] \right\},$$

где  $\Delta P$  – давление плит пресса, Па;  $n$  – число полостей (капилляров) в единице площади, в которые проникает клей;  $v$  – скорость перемещения клея в древесине, м/с;  $\eta$  – динамическая вязкость клея, Па·с;  $R_k$  – эффективный радиус полости (капилляра) в древесине, м;  $T$  – температура клея, °С.

Число полостей (капилляров) в единице площади, в которые проникает клей, определяли по микрофотографиям срезов фанеры толщиной 0,025 мм.

Результаты расчета по приведенной формуле глубины проникновения модифицированных карбамидо- и фенолоформальдегидного клеев показаны в таблице.

Теоретические представления о характере взаимодействия жидкого клея с древесиной в целом согласуются с экспериментальными данными и расчетами, позволяют определить глубину проникновения жидкого клея в древесину и фактическую площадь его контакта с древесиной.

**Сравнительная таблица результатов расчета глубины проникновения жидкого клея в березовый шпон, мкм**

**Comparative table of the results of calculating the liquid adhesive penetration depth in birch veneer,  $\mu\text{m}$**

Связующее	Значение	
	экспериментальное	теоретическое
Фенолоформальдегидный клей, модифицированный пектолом	20–25	27
Карбамидоформальдегидный клей, модифицированный лигносульфонатами	26–32	25

Примечание: Среднее число полостей (капилляров), в которые проникает клей, – 10.

Таким образом, с помощью сканирующей электронной микроскопии и рентгеновского спектрального микроанализа были установлены характер распределения жидкого клея на поверхности и глубина его проникновения в поры древесины.

*Выводы*

1. При взаимодействии с древесиной жидкого фенолоформальдегидного клея, модифицированного пектолом, происходят нарастание молекулярной массы и увеличение глубины проникновения клея в древесину. Исследуемые породы древесины (береза, сосна, лиственница) и модифицированные термо-реактивные карбамидо- и фенолоформальдегидные клеи являются полярными материалами. Клей взаимодействует с молекулами древесины с образованием межмолекулярных связей, в том числе водородных.

2. Формирование клеевого соединения на основе модифицированного лигносульфонатами карбамидоформальдегидного клея и древесины происходит за счет химического взаимодействия между гидроксильными группами макромолекул целлюлозы и метоксильными группами карбамидной смолы с образованием сложных эфиров (атомы водорода гидроксильных групп OH замещены на углеводородные радикалы R). Образование связи между клеем и поверхностью древесины – результат действия сил молекулярного взаимодействия на границе раздела фаз жидкий клей – древесина, когда расстояние между молекулами одинаковой полярности (клея и древесины) составляет менее 0,5 нм, далее наступает адсорбционное равновесие.



3. Характер SEM- и EDS-изображений свидетельствует о взаимодействии жидких модифицированных отходами целлюлозного производства клеев с древесиной, глубина проникновения клея 20–30 мкм, что согласуется с общими представлениями молекулярно-адсорбционной теории жидких полимеров о взаимодействии с древесиной.

4. Глубину проникновения жидких модифицированных клеев оценивали по энергии эмиссии углерода на рентгеновских EDS-спектрах структуры образца. Спектры отвержденных образцов на основе модифицированных карбамидо- и фенолоформальдегидных клеев, более насыщенные по сравнению со спектрами образцов клея без модификаторов, имеют характерные полосы выделения углерода, что в целом свидетельствует о взаимодействии клея и древесины, проникновении модифицированных клеев в ее поры. Экспериментальные исследования и результаты расчетов глубины проникновения модифицированных карбамидо- и фенолоформальдегидных клеев в поры древесины в целом согласуются с теоретическими представлениями об этом процессе.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Варанкина Г.С., Русаков Д.С. Модификация фенолоформальдегидной смолы побочными продуктами сульфатно-целлюлозного производства // Изв. СПбЛТА. 2013. Вып. 204. С. 130–137.

Varankina G.S., Rusakov D.S. Modification of Phenol Resin by the By-Products of Sulphate Pulp Production. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotehniceskoy akademii = News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy*, 2013, iss. 204, pp. 130–137. (In Russ.).

2. Варфоломеев А.А. Фенолоформальдегидные смолы, модифицированные лигнином // Перспективы развития технологии, экологии и автоматизации химических, пищевых и металлургических производств: материалы науч.-практ. конф. Иркутск: ИрГТУ, 2007. С. 48–51.

Varfolomeev A.A. Phenol Formaldehyde Resins Modified with Lignin. *Prospects for the Development of Technology, Ecology and Automation of Chemical, Food and Metallurgical Industries: Proceedings of the Scientific and Practical Conference*. Irkutsk, ISTU Publ., 2007, pp. 48–51. (In Russ.).

3. Варфоломеев А.А., Синегибская А.Д., Гоготов А.Ф. Модифицированные лигнинфенолоформальдегидные смолы // Новые достижения в химии и химической технологии растительного сырья: материалы III Всерос. конф.: в 3 кн. Барнаул: АлтГУ, 2007. Кн. 3. С. 128–132.

Varfolomeev A.A., Sinegibskaya A.D., Gogotov A.F. Modified Lignin Phenol Formaldehyde Resins. *New Achievements in Chemistry and Chemical Technology of Plant Raw Materials: Proceedings of the 3rd All-Russian Conference: In 3 Books*. Barnaul, ASU Publ., 2007, book 3, pp. 128–132. (In Russ.).

4. Кондратьев В.П. Новые виды экологически чистых синтетических смол для деревообработки // Деревообаб. пром-сть. 2002. № 4. С. 10–12.

Kondratiev V.P. New Types of Environmentally Friendly Synthetic Resins for Woodworking. *Derevoobrabativalnaya promishlennost' = Woodworking industry*, 2002, no. 4, pp. 10–12. (In Russ.).

5. Кондратьев В.П., Кондращенко В.И. Синтетические клеи для древесных материалов. М.: Науч. мир, 2004. 520 с.

Kondratiev V.P., Kondrashchenko V.I. *Synthetic Adhesives for Wood Materials*. Moscow, Nauchnyy mir Publ., 2004. 520 p. (In Russ.).

6. Кондратьев В.П., Чубов А.Б., Соколова Е.Г. Новые виды эффективных клеев для производства водостойкой экологически чистой фанеры // Изв. СПбЛТА. 2010. Вып. 191. С. 169–179.

Kondratiev V.P., Chubov A.B., Sokolova E.G. New Effective Adhesives For Manufacturing Of Water-Resistant And Ecologically Pure Plywood. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotehniceskoy akademii* = News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy, 2010, iss. 191, pp. 169–179. (In Russ.).

7. Кондратьев В.П., Чубов А.Б., Соколова Е.Г. Совершенствование эксплуатационных свойств и технологии фанеры повышенной водостойкости // Изв. СПбЛТА. 2011. Вып. 194. С. 114–120.

Kondratiev V.P., Chubov A.B., Sokolova E.G. The Improvement of Application Properties and Technology of Increased Water Resistance Plywood. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotehniceskoy akademii* = News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy, 2011, iss. 194, pp. 114–120. (In Russ.).

8. Русаков Д.С., Варанкина Г.С., Чубинский А.Н. Модификация феноло- и карбамидоформальдегидных смол побочными продуктами производства целлюлозы // Клеи. Герметики. Технологии. 2017. № 8. С. 16–21.

Rusakov D.S., Varankina G.S., Chubinskiy A.N. Modification of Phenol- and Urea-Formaldehyde Resins by Additive Products of Cellulose Manufacture. *Klei. Germetiki. Tekhnologii* = Adhesives. Sealants. Technologies, 2017, no. 8, pp. 16–21. (In Russ.).

9. Русаков Д.С., Варанкина Г.С., Чубинский А.Н., Степаннищева М.В. Влияние строения и структуры древесины различных пород на расход клея при производстве фанеры // Системы. Методы. Технологии. 2019. № 4(44). С. 112–117.

Rusakov D.S., Varankina G.S., Chubinsky A.N., Stepanishcheva M.V. The Influence of the Structure and Texture of Wood of Various Species on the Consumption of Glue in the Production of Plywood. *Systems. Methods. Technologies*, 2019, no. 4(44), pp. 112–117. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2019-4-112-117>

10. Русаков Д.С., Чубинский А.Н., Варанкина Г.С. Совершенствование технологии склеивания древесных материалов модифицированными клеями. СПб.: СПбГЛТУ, 2019. 127 с.

Rusakov D.S., Chubinsky A.N., Varankina G.S. *Improving the Technology of Gluing Wood Materials with Modified Adhesives*. Saint Petersburg, SPbFTU Publ., 2019. 127 p. (In Russ.).

11. Русаков Д.С., Чубинский А.Н., Русакова Л.Н., Варанкина Г.С. Исследование свойств модифицированных фенолоформальдегидных клеев // Изв. СПбЛТА. 2018. Вып. 222. С. 155–174.

Rusakov D.S., Chubinsky A.N., Rusakova L.N., Varankina G.S. Investigation of the Properties of Modified Phenol-Formaldehyde Adhesives. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotehniceskoy akademii* = News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy, 2018, iss. 222, pp. 155–174. (In Russ.). <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2018.222.155-174>

12. Ravikovitch P.I., Neimark A.V. Calculations of Pore Size Distributions in Nanoporous Materials from Adsorption and Desorption Isotherms. *Studies in Surface Science and Catalysis*, 2000, vol. 129, pp. 597–606. [https://doi.org/10.1016/S0167-2991\(00\)80262-1](https://doi.org/10.1016/S0167-2991(00)80262-1)

13. Rouquerol J., Avnir D., Fairbridge C.W., Everett D.H., Haynes J.M., Pernicone N., Ramsay J.D.F., Sing K.S.W., Unger K.K. Recommendations for the Characterization of Porous Solids (Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 1994, vol. 66, no. 8, pp. 1739–1758. <https://doi.org/10.1351/pac199466081739>

14. Rouquerol J., Llewellyn P., Rouquerol F. Is the BET Equation Applicable to Microporous Adsorbents? *Studies in Surface Science and Catalysis*, 2007, vol. 160, pp. 49–56. [https://doi.org/10.1016/S0167-2991\(07\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0167-2991(07)80008-5)

15. Selbo M.L. *Adhesive Bonding of Wood*. Technical Bulletin No. 1512. Washington, D.C., USDA, 1975. 124 p.
16. Sing K.S.W., Everett D.H., Haul R.A.W., Moscou L., Pierotti R.A., Rouquerol J., Siemieniewska T. Reporting Physisorption Data for Gas/Solid Systems with Special Reference to the Determination of Surface Area and Porosity (Recommendations 1984). *Pure and Applied Chemistry*, 1985, vol. 57, no. 4, pp. 603–619. <https://doi.org/10.1351/pac198557040603>
17. Stoeckli H.F., Kraehenbuehl F. The External Surface of Microporous Carbons, Derived from Adsorption and Immersion Studies. *Carbon*, 1984, vol. 22, iss. 3, pp. 297–299. [https://doi.org/10.1016/0008-6223\(84\)90174-X](https://doi.org/10.1016/0008-6223(84)90174-X)
18. Ugolev B.N. Wood as a Natural Smart Material. *Wood Science and Technology*, 2014, vol. 48, iss. 3, pp. 553–568. <https://doi.org/10.1007/s00226-013-0611-2>
19. Ustinov E.A., Fenelonov V.B., Yakovlev V.A., Eletsii P.I. Characterization of the Porous Structure of Carbon Materials by Means of Density Functional Theory. *Kinetics and Catalysis*, 2007, vol. 48, iss. 4, pp. 589–598. <https://doi.org/10.1134/S0023158407040180>
20. Walton K.S., Snurr R.Q. Applicability of the BET Method for Determining Surface Areas of Microporous Metal–Organic Frameworks. *Journal of the American Chemical Society*, 2007, vol. 129, iss. 27, pp. 8552–8556. <https://doi.org/10.1021/ja071174k>

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