

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/10>

УДК 630*674.419.32



Структурообразование при низкотемпературном режиме прессования фанеры ФСФ

Татьяна Н. Вахнина, t_vachnina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7201-5979>

Александр А. Федотов ✉, aafedotoff@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3668-899X>

Ирина В. Сусоева, i.susoeva@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7295-8934>

Костромской государственный университет, ул. Дзержинского, 17/11, г. Кострома, 156005, Российская Федерация

Аннотация

Фанера ФСФ используется в вагоностроении, строительстве, отделке малотоннажных судов и яхт и является эффективным заменителем древесины. Повышение конкурентоспособности фанеры возможно путем снижения расхода связующего или уменьшения температуры прессования. В работе одновременно снижены температура горячего прессования фанеры ФСФ и расхода связующего. В качестве модификатора использована сульфосалициловая кислота (ССК). На ИК-Фурье спектрометре Nicolet iS10 получены ИК-спектры связующего и фанеры. В модифицированном связующем и фанере на его основе уменьшается количество связанной воды и гидроксиметильных групп, увеличивается количество групп CH_2 . На втором этапе выполнено исследование механических свойств фанеры путем реализации эксперимента по В-плану 2-го порядка. Разработаны регрессионные модели прочности фанеры при статическом изгибе и прочности при скалывании по клеевому слою после кипячения в течение 1 часа. Варьировались факторы: температура прессования (X_1) от 85 до 105 °С, расход смолы (X_2) – от 88 до 98 г/м², доля добавки модификатора (X_3) – от 0 до 1%. Снижение расхода смолы до 88 г/м² и уменьшение температуры прессования фанеры до 85 °С на не модифицированном связующем обеспечивает показатель предела прочности материала при статическом изгибе – 76,4 МПа, при этом максимально снижается адгезионная прочность – 0,05 МПа. Образцы фанеры при испытании на скалывание после кипячения разрушаются при нагрузке 20...24 кгс, скалывание идет по клеевому слою. Фанера, изготовленная на модифицированном связующем при температуре прессования 95 °С, расходе смолы 93 г/м² и расходе ССК 0,5 % от массы смолы имеет показатели: прочность при скалывании по клеевому слою после кипячения – 0,748 МПа, прочность образцов при статическом изгибе – 111,57 МПа.

Ключевые слова: фанера ФСФ, фенолоформальдегидное связующее, модифицирующая добавка, сульфосалициловая кислота, прессование, ИК-спектры.

Финансирование: Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда и администрации Костромской области в рамках научного проекта № 24-29-20157.

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Вахнина, Т. Н. Структурообразование при низкотемпературном режиме прессования фанеры ФСФ / Т. Н. Вахнина, А. А. Федотов, И. В. Сусоева // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 2 (58). – С. 158-173. – Библиогр.: с. 170-172 (20 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/10>.

Article

Structure formation during low-temperature pressing of plywood on phenol-formaldehyde binder

Tatiana N. Vakhnina, t_vakhnina@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-7201-5979>

Alexander A. Fedotov , aafedotoff@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-3668-899X>

Irina V. Susoeva, i.susoeva@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-7295-8934>

Kostroma State University, 17/11 Dzerzhinsky str., Kostroma, 156005, Russian Federation

Plywood on phenol-formaldehyde binder is used in carriage building, construction, finishing of small-tonnage vessels and yachts and is an effective substitute for wood. Improving the competitiveness of plywood is possible by reducing the consumption of the binder or decreasing the pressing temperature. In this work, the temperature of hot pressing of plywood FSF and the consumption of the binder were simultaneously reduced. Sulfosalicylic acid was used as a modifier. IR spectra of the binder and plywood were obtained on a Nicolet iS10 IR Fourier spectrometer. In the modified binder and plywood based on it, the amount of bound water and hydroxymethyl groups decreases, the number of CH₂ groups increases. At the second stage, the study of the mechanical properties of plywood was carried out by implementing an experiment according to the 2nd order B-plan. Regression models were developed for the strength of plywood under static bending and the strength when shearing along the adhesive layer after boiling for 1 hour. The following factors were varied: pressing temperature (X₁) from 85 to 105 °C, resin consumption (X₂) from 88 to 98 g/m², modifier additive share (X₃) from 0 to 1 %. Reducing resin consumption to 88 g/m² and decreasing plywood pressing temperature to 85 °C on an unmodified binder provides the material static bending strength limit of 76.4 MPa, while maximally reducing adhesive strength - 0.05 MPa. Plywood samples are destroyed under a load of 20...24 kgf when tested for chipping after boiling, chipping occurs along the adhesive layer. Plywood made with a modified binder at a pressing temperature of 95 °C, a resin consumption of 93 g/m² of resin surface and a sulfosalicylic acid consumption of 0.5% of the resin weight has the following indicators: shear strength along the adhesive layer after boiling - 0.748 MPa, strength of samples under static bending - 111.57 MPa.

Keywords: plywood, phenol-formaldehyde binder, modifying additive, sulfosalicylic acid, pressing, IR spectra.

Funding: The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation and the administration of the Kostroma Region within the framework of scientific project No. 24-29-20157.

Acknowledgments: author thanks the reviewers for their contribution to the peer review.

Conflict of interest: the author declares no conflict of interest.

For citation: Vakhnina T. N., Fedotov A. A., Susoeva I. V. (2025). Structure formation in the low-temperature mode of pressing FSF plywood on phenol-formaldehyde binder. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 2 (58), pp. 158-173 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/10>.

Received 15.12. 2024. Revised 21.04.2025. Accepted 26.05.2025. Published online 26.06.2025.

Введение

Фанера строительного назначения составляет около половины всей фанерной продукции, изготавливаемой в России. Для производства фанеры ФСФ применяется фенолоформальдегидное связующее (ФФС), второе по использованию в мире (после карбамидоформальдегидного связующего) [1]. Широкое распространение фанеры ФСФ в строительстве обусловлено тем, что при меньшей стоимости 1 м³ водостойкой фанеры способен заменить от 4,3 до 4,9 м³ традиционных пиломатериалов. Для использования фанеры в строительной индустрии показатели данной продукции должны отвечать нормативным требованиям, предъявляемым к строительным материалам [2].

В 2023 г. Федеральной службой государственной статистики (Росстат) было зафиксировано снижение объема производства фанеры в России на 3,265 млн. м³ (на 1,1 %) в сравнении с 2022 г. Однако в июне 2023 г. объем производства фанеры вырос на 3,5 % по сравнению с июнем 2022 г., когда российские фанерные комбинаты еще экспортировали продукцию в страны ЕС [3]. Для достижения и сохранения тенденции роста объемов производства фанеры, в том числе фанеры ФСФ, необходим целый комплекс мер, в числе которых – повышение ее конкурентоспособности путем снижения затрат на производство. Существенный вклад в затраты на производство фанеры вносят стоимость связующего и затраты на горячее прессование. Т. Biadała с коллегами считают, что для прессования фанеры необходима температура 140 °С [4]. По мнению Z. Qini K. Teng, температура 130 °С является оптимальной для прессования фанеры на модифицированном фенолоформальдегидном связующем [5]. На российских производствах фанера ФСФ прессуется обычно при температуре 120–130 °С [6].

Снижение расхода фенолоформальдегидного связующего (ФФС) и уменьшение температуры горячего прессования фанеры позволяет снизить затраты. Однако следует помнить, что использование фенолоформальдегидного связующего обеспечивает длительную водостойкость только при достижении стадии резита, т.е. при прессовании в температурном интервале отверждения фенольных резольных смол 130...200 °С.

Цель данной работы – обоснованное с использованием ИК-спектроскопии и регрессионного анализа повышение механических свойств фанеры на модифицированном фенолоформальдегидном связующем, изготовленной при пониженной температуре прессования и уменьшенном расходе связующего.

В структуре фенолоформальдегидного полимера, отверждаемого при низкотемпературном режиме, имеются гидроксиметильные группы, что негативно сказывается на показателях изготавливаемых материалов [7], в том числе фанеры ФСФ.

Вопросы отверждения ФФС при более низких температурах, чем стадия резита в немодифицированном фенолоформальдегидном связующем, решаются, в числе прочих методов, использованием модификаторов на стадии синтеза смолы [8, 9], однако, по мнению Т.А. Жаббарова, эти модификации, часто улучшая некоторые показатели связующего, полученного при совместной поликонденсации, не могут существенно улучшить свойства терморезактивных композиций [10].

Существует большое количество исследований по модификации ФФС для производства фанеры [11–15]. Однако прессование фанеры при низкой температуре (100 °С), и низком расходе связующего (около 100 г/м²) в настоящее время остается нерешенной проблемой из-за физико-химических особенностей отверждения фенолоформальдегидного связующего и существенного влияния расхода связующего на показатели качества фанеры.

Объектом исследования является фанера из березового шпона на фенолоформальдегидном связующем.

Предмет исследования – связи в структуре отвержденного фенолоформальдегидного связующего и фанеры, а также механические показатели фанеры, изготавливаемой при сниженном расходе связующего в условиях низкотемпературного прессования.

В данном экспериментальном исследовании изготавливалась пятислойная фанера из березового шпона при уменьшенном расходе фенолоформальдегидного связующего на основе смолы СФЖ-3014 при сниженной температуре прессования. В качестве модификатора ФФС использована сульфосалициловая кислота двухводная C₇H₆O₆S·2H₂O (ССК),

она вводилась в связующее в водном растворе 10%-ной концентрации. Совместно с ССК в связующем использовался моноалкилфениловый эфир полиэтиленгликоля (поверхностно-активное вещество ОП-10) в количестве 1 % от массы жидкой смолы. ОП-10 вводился в растворе 10%-ной концентрации. Давление прессования составляло 2,0 МПа, время выдержки в прессе – 10 мин.

Образцы фенолоформальдегидной смолы без добавки модификатора и ФФС с добавкой 0,5 % сульфосалициловой кислоты от массы смолы отверждались в сушильном шкафу при температуре 95 °С и высушивались до постоянной массы.

ИК-спектры связующего и фанеры снимали на спектральном комплексе на базе ИК-Фурье спектрометра Nicolet iS10 в сторонней испытательной лаборатории ФГУП «ЦНИИХМ». Снимались спектры поглощения в области длин волн 4000–600 см⁻¹.

Анализ данных

Поскольку в отверждаемом при низкой температуре резольном фенолоформальдегидном олигомере имеются свободные гидроксиметильные группы, необходимо ввести в клеевую композицию модификатор, способный связывать эти группы. Для прессования фанеры при низкотемпературном режиме в качестве модификатора выбрана сульфосалициловая кислота.

Результаты

ИК-спектр ФФС без добавки модификатора и с добавкой ССК представлены на рис. 1, ИК-спектр фанеры на немодифицированном ФФС и фанеры на основе ФФС с добавкой сульфосалициловой кислоты – на рис. 2. Частоты и интенсивность поглощения спектров связующих приведены в табл. 1, характеристики спектров фанеры – в табл. 2.

В связующем с добавкой сульфосалициловой кислоты уменьшилось количество гидроксильных групп, участвующих в меж- и внутримолекулярных связях, интенсивность поглощения снизилась с 0,285 до 0,098. Уменьшилось также количество связанной воды, в полосе 1675–1650 см⁻¹ снизилась интенсивность поглощения. В спектре отвержденной фенолоформальдегидной смолы без модификатора присутствуют три пика в области 1400–1209 см⁻¹, обусловленные наличием гидроксиметильных групп. Глубина отверждения ФФС с модификатором увеличивается, снижается интенсивность поглощения в области деформационных колебаний связей О–Н в гидроксиметильной группе.

Пик в области 1332 см⁻¹ связан также с колебаниями групп SO₂ сульфосалициловой кислоты [20]. Результаты ИК-спектроскопии отвержденного связующего соответствуют характеристикам ИК-спектров образцов фанеры, изготовленной без добавки ССК и с добавлением сульфосалициловой кислоты.

Таблица 1

Характеристики поглощения немодифицированного фенолоформальдегидного связующего и фенолоформальдегидного связующего с добавкой сульфосалициловой кислоты

Table 1

Absorption characteristics of unmodified phenol-formaldehyde binder and phenol-formaldehyde binder with addition of sulfosalicylic acid

| Вид связующего Type of binder | Частота поглощения, см ⁻¹ Absorption frequency, cm ⁻¹ | Интенсивность поглощения Absorption intensity | Отнесение полос поглощения Assignment of absorption bands |
|--|---|---|---|
| Фенолоформальдегидное связующее без модификатора Phenol-formaldehyde binder without modifier | 3465 | 0,285 | Валентные колебания ОН-групп, участвующих в межмолекулярных и внутримолекулярных Н-связях Stretching vibrations of OH groups participating in intermolecular and intramolecular H-bonds |
| Фенолоформальдегидное связующее + C ₇ H ₆ O ₆ S·2H ₂ O Phenol-formaldehyde binder + C ₇ H ₆ O ₆ S·2H ₂ O | 3467 | 0,098 | Валентные колебания ОН-групп, участвующих в межмолекулярных и внутримолекулярных Н-связях Stretching vibrations of OH groups participating in intermolecular and intramolecular H-bonds |
| Фенолоформальдегидное связующее без модификатора Phenol-formaldehyde binder without modifier | 1675 | 0,258 | Деформационные колебания связей Н-О-Н, обусловлены присутствием связанной воды Deformational vibrations of H-O-H bonds are caused by the presence of bound water |
| Фенолоформальдегидное связующее + C ₇ H ₆ O ₆ S·2H ₂ O Phenol-formaldehyde binder + C ₇ H ₆ O ₆ S·2H ₂ O | 1650 | 0,068 | Деформационные колебания связей Н-О-Н, обусловлены присутствием связанной воды Deformational vibrations of H-O-H bonds are caused by the presence of bound water |
| Фенолоформальдегидное связующее без модификатора Phenol-formaldehyde binder without modifier | 1400 1335 1209 | 0,3 0,27 0,25 | Деформационные колебания связей О-Н в гидроксиметильной группе Deformation vibrations of O-H bonds in the hydroxymethyl group |
| Фенолоформальдегидное связующее + C ₇ H ₆ O ₆ S·2H ₂ O Phenol-formaldehyde binder + C ₇ H ₆ O ₆ S·2H ₂ O | 1207 | 0,064 | Деформационные колебания связей О-Н в гидроксиметильной группе Deformation vibrations of O-H bonds in the hydroxymethylgroup |
| Фенолоформальдегидное связующее + C ₇ H ₆ O ₆ S·2H ₂ O Phenol-formaldehyde binder + C ₇ H ₆ O ₆ S·2H ₂ O | 1332 | 0,055 | Колебания групп SO ₂ сульфосалициловой кислоты + деформационные колебания связей О-Н в гидроксиметильной группе Vibrations of SO ₂ groups of sulfosalicylic acid + deformation vibrations of O-H bonds in the hydroxymethyl group |

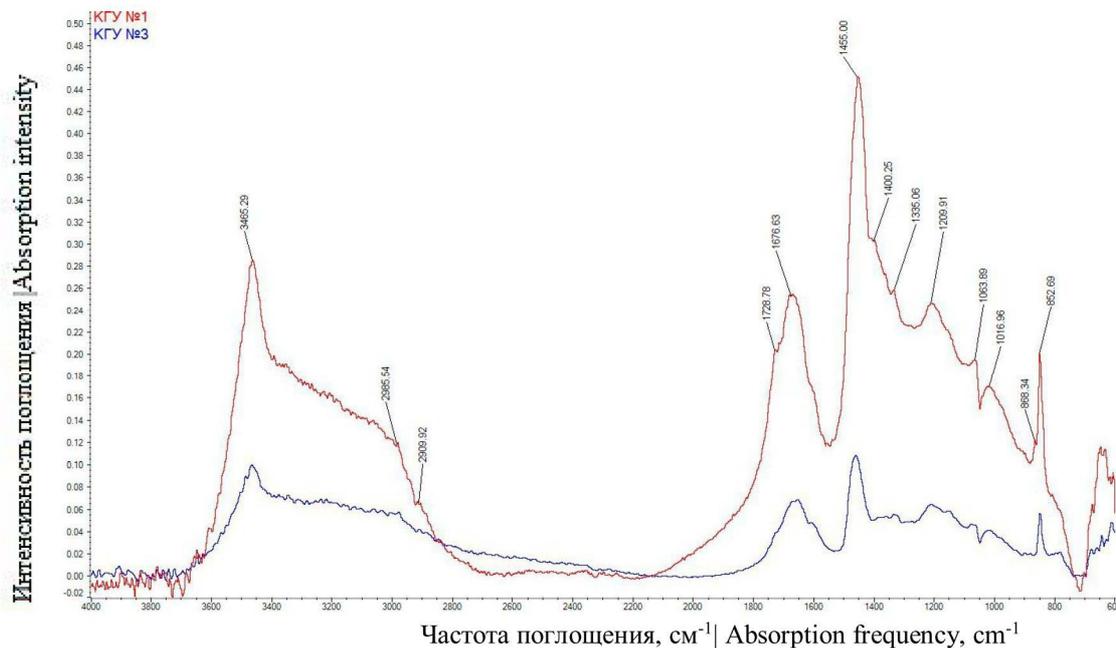


Рисунок 1. ИК-спектр фенолоформальдегидного связующего без добавки модификатора (КГУ №1) и модифицированного фенолоформальдегидного связующего (КГУ №3)

Figure 2. IR spectrum of phenol-formaldehyde binder without modifier additive (КГУ №1) and modified phenol-formaldehyde binder (КГУ №3)

Источник: данные испытательной лаборатории ФГУП «ЦНИИХМ» по заказу авторов
 Source: data from the testing laboratory of FSUE «CSRICM» commissioned by the authors

Таблица 2

Характеристики поглощения фанеры на основе фенолоформальдегидного связующего без модификатора и фанеры на основе фенолоформальдегидного связующего с добавкой сульфосалициловой кислоты

Table 2

Absorption characteristics of plywood based on phenol-formaldehyde binder without modifier and plywood based on phenol-formaldehyde binder with addition of sulfosalicylic acid

| Вид связующего Type of binder | Частота поглощения, см ⁻¹ Absorption frequency, cm ⁻¹ | Интенсивность поглощения Absorption intensity | Отнесение полос поглощения Assignment of absorption bands |
|---|---|---|--|
| Фанера на основе фенолоформальдегидного связующего без модификатора Plywood based on phenol-formaldehyde binder without modifier | 3374 | 0,122 | Валентные колебания ОН-групп, участвующих в межмолекулярных и внутримолекулярных Н-связях Stretching vibrations of OH groups participating in intermolecular and intramolecular H-bonds |

Деревопереработка. Химические технологии

| | | | |
|--|--------------|----------------|---|
| Фанера на основе фенолоформальдегидного связующего + $C_7H_6O_6S \cdot 2H_2O$ Plywood based on phenol-formaldehyde binder + $C_7H_6O_6S \cdot 2H_2O$ | 3384 | 0,145 | Валентные колебания ОН-групп, участвующих в межмолекулярных и внутримолекулярных Н-связях Stretching vibrations of OH groups participating in intermolecular and intramolecular H-bonds |
| Фанера на основе фенолоформальдегидного связующего без модификатора Plywood based on phenol-formaldehyde binder without modifier | 1650 1596 | 0,042 0,05 | Деформационные колебания связей Н–О–Н, обусловлены присутствием связанной воды Deformational vibrations of the Н–О–Н bonds are caused by the presence of bound water |
| Фанера на основе фенолоформальдегидного связующего + $C_7H_6O_6S \cdot 2H_2O$ Plywood based on phenol-formaldehyde binder + $C_7H_6O_6S \cdot 2H_2O$ | 1658 | 0,038 | Деформационные колебания связей Н–О–Н, обусловлены присутствием связанной воды Deformational vibrations of the Н–О–Н bonds are caused by the presence of bound water |
| Фанера на основе фенолоформальдегидного связующего без модификатора Plywood based on phenol-formaldehyde binder without modifier | 1332 1236 | 0,048 0,055 | Деформационные колебания связей О–Н в гидроксиметильной группе Deformation vibrations of О–Н bonds in the hydroxymethyl group |
| Фанера на основе фенолоформальдегидного связующего + $C_7H_6O_6S \cdot 2H_2O$ Plywood based on phenol-formaldehyde binder + $C_7H_6O_6S \cdot 2H_2O$ | 1332 | 0,055 | Колебания групп SO_2 сульфосалициловой кислоты + Деформационные колебания связей О–Н в гидроксиметильной группе Vibrations of SO_2 groups of sulfosalicylic acid + deformation vibrations of О–Н bonds in the hydroxymethyl group |
| Фанера на основе фенолоформальдегидного связующего без модификатора Plywood based on phenol-formaldehyde binder without modifier | 2917 | 0,04 | Валентные колебания в группах CH_2 Stretching vibrations in CH_2 groups |
| Фанера на основе фенолоформальдегидного связующего + $C_7H_6O_6S \cdot 2H_2O$ Plywood based on phenol-formaldehyde binder + $C_7H_6O_6S \cdot 2H_2O$ | 2920 | 0,049 | Валентные колебания в группах CH_2 Stretching vibrations in CH_2 groups |

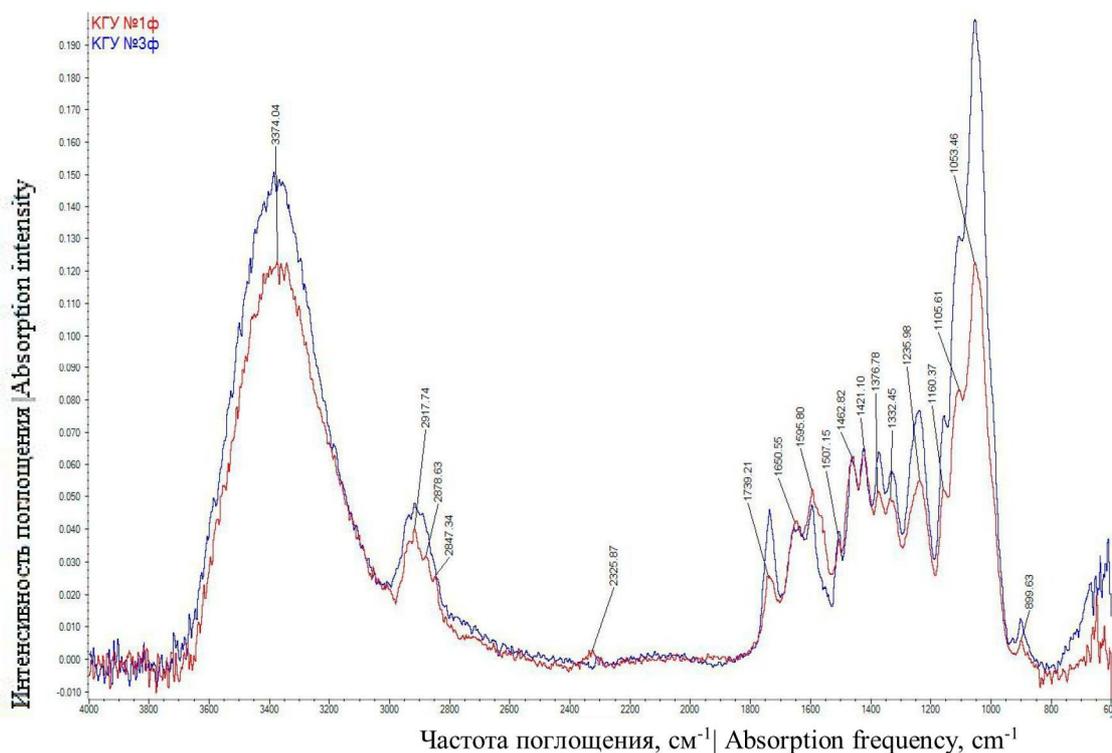


Рисунок 2. ИК-спектр фанеры на основе фенолоформальдегидного связующего без модификатора (КГУ №1ф) и фанеры на основе фенолоформальдегидного связующего с добавкой сульфосалициловой кислоты (КГУ №3ф)

Figure 2. IR spectrum of plywood based on phenol-formaldehyde binder without modifier (КГУ №1ф) and plywood based on phenol-formaldehyde binder with addition of sulfosalicylic acid (КГУ №3ф)

Источник: данные испытательной лаборатории ФГУП «ЦНИИХМ» по заказу авторов
Source: data from the testing laboratory of FSUE «CSRICM» commissioned by the authors

При модификации уменьшается количество связанной воды и гидроксиметильных групп, при этом пик в области 2920 см^{-1} свидетельствует об увеличении групп CH_2 , что свидетельствует об углублении процесса поликонденсации в отвержденном связующем с добавкой ССК.

Увеличение интенсивности поглощения с 0,122 до 0,145 в спектре фанеры на связующем, модифицированном добавкой ССК, в области $3374\text{--}3384\text{ см}^{-1}$, характеризующей валентные колебания ОН-групп, участвующих в межмолекулярных и внутримолекулярных Н-связях, подтверждает гипотезу о создании дополнительных водородных связей между связующим и компонентами лигноуглеводного комплекса древесного шпона.

Регрессионные математические модели механических показателей фанеры: прочности при статическом изгибе, МПа (Y_1) и прочности при скалывании по клеевому слою, МПа (Y_2) разработаны в эксперименте, выполненном по В-плану 2-го порядка. Диапазоны варьирования факторов X_1 , X_2 и X_3 представлены в табл. 3. В процессе прессования фанеры основной объем парогазовой смеси выделяется при нагреве прессуемого материала до 100 °C . Поэтому диапазон варьирования фактора «Температура прессования» включает температуру кипения воды (в области около максимального уровня).

Кодированные и натуральные обозначения факторов в эксперименте, выполненном по В-плану, и результаты статистической обработки данных, полученных в опытах эксперимента, представлены в табл. 4.

Таблица 3

Диапазоны варьирования факторов

Table 3

Ranges of variation of factors

| Наименование фактора Name of the factor | Обозначение фактора Factor designation | | Уровни варьирования Levels of variation | | | Интервал варьирования, Δ_i Variation interval, Δ_i |
|---|--|------------------------|---|-----|-----|--|
| | Натуральное Natural | Кодированное Encoded | -1 | 0 | +1 | |
| 1. Температура прессования, °C Pressing temperature, °C | Т | X_1 | 85 | 95 | 105 | 10 |
| 2. Расход смолы, г/м ² Resin consumption, g/m ² | Р | X_2 | 88 | 93 | 98 | 5 |
| 3. Доля добавки ССК, % The share of additive SSA, % | Д | X_3 | 0 | 0,5 | 1,0 | 0,5 |

Таблица 4

В-план эксперимента и результаты статистической обработки экспериментальных данных

Table 4

B-plan and statistical processing of experimental results

| № | Уровни факторов Factor levels | | | | | | Средние арифметические и дисперсии результатов эксперимента Arithmetic means and dispersions of experimental results | | | |
|----|--|-------|-------|---|----|---|--|------------|----------|------------|
| | в кодированных обозначениях in coded notations | | | в натуральных обозначениях in natural notations | | | | | | |
| | X_1 | X_2 | X_3 | Т | Р | Д | Y_{1j} | S^2_{1j} | Y_{2j} | S^2_{2j} |
| | | | | | | $\sigma_{и}, \text{МПа} \sigma_{б}, \text{МПа}$ | $\sigma_{ск}, \text{МПа} \sigma_{ch}, \text{МПа}$ | | | |
| 1 | + | + | + | 105 | 98 | 1,0 | 121,5 | 22,4 | 0,98 | 0,071 |
| 2 | - | + | + | 85 | 98 | 1,0 | 101,4 | 15,36 | 0,89 | 0,075 |
| 3 | + | - | + | 105 | 88 | 1,0 | 94,3 | 21,05 | 0,93 | 0,024 |
| 4 | - | - | + | 85 | 88 | 1,0 | 62,7 | 9,55 | 0,05 | 0,001 |
| 5 | + | + | - | 105 | 98 | 0 | 113,6 | 6,50 | 1,57 | 0,044 |
| 6 | - | + | - | 85 | 98 | 0 | 89,4 | 10,8 | 0,52 | 0,035 |
| 7 | + | - | - | 105 | 88 | 0 | 82,7 | 12,6 | 0,55 | 0,018 |
| 8 | - | - | - | 85 | 88 | 0 | 76,4 | 49,28 | 0,05 | 0,002 |
| 9 | + | 0 | 0 | 105 | 93 | 0,5 | 129,6 | 27,14 | 1,39 | 0,078 |
| 10 | - | 0 | 0 | 85 | 93 | 0,5 | 95,3 | 18,10 | 1,08 | 0,015 |
| 11 | 0 | + | 0 | 95 | 98 | 0,5 | 120,6 | 14,28 | 0,75 | 0,002 |
| 12 | 0 | - | 0 | 95 | 88 | 0,5 | 78,5 | 9,66 | 0,26 | 0,012 |
| 13 | 0 | 0 | + | 95 | 93 | 1,0 | 125,5 | 6,00 | 0,70 | 0,034 |
| 14 | 0 | 0 | - | 95 | 93 | 0 | 82,2 | 25,14 | 0,18 | 0,020 |

Проверка однородности дисперсий результатов эксперимента проводилась по критерию Кохрена. Для прочности при статическом изгибе и прочности при скалывании по клеевому слою выполнялось соотношение: расчетное значение критерия Кохрена (G_p) меньше, чем табличное значение (G_T). Коэффициенты уравнений регрессии рассчитаны в программе «В-план». Были определены критические значения коэффициентов уравнений регрессии (свободных членов уравнений, линейных, квадратичных коэффициентов и коэффициентов парного взаимодействия). Значимыми являлись коэффициенты, модули которых больше, чем соответствующие критические значения.

Уравнения регрессии:

- для предела прочности фанеры при статическом изгибе:

$$Y_1 = 111,57 + 11,65X_1 + 15,19X_2 + 6,105X_3 + 0,909X_1^2 - 11,991X_2^2 - 7,681X_3^2 + 0,80X_1X_2 + 2,65X_1X_3 + 2,75X_2X_3; \quad (1)$$

- для предела прочности фанеры при скалывании по клеевому слою после кипячения в течение 1 ч:

$$Y_2 = 0,748 + 0,302X_1 + 0,306X_2 + 0,040X_3 + 0,287X_1^2 - 0,243X_2^2 - 0,273X_3^2 - 0,096X_1X_3 - 0,099X_2X_3. \quad (2)$$

Были рассчитаны дисперсии адекватности $S^2_{ад}$ и дисперсии воспроизводимости $S^2_{в}$ регрессионных моделей. Однородность данных дисперсий проверена по критерию Фишера. Проверка адекватности регрессионных математических моделей подтвердила, что модели адекватны, то есть различия между значениями, рассчитанными по уравнениям регрессии (для опытов 1–14), и средними арифметическими значениями результатов определения выходных величин в опытах сопоставимы со средним рассеянием в эксперименте.

Графики значений показателя предела прочности при скалывании по клеевому слою после кипячения в течение 1 ч при использовании в качестве модификатора сульфосалициловой кислоты представлены на рис. 3.

Обсуждение

Снижение расхода смолы до 88 г/м² и уменьшение температуры прессования фанеры до 85 °С на не модифицированном связующем обеспечивает не самые низкие показатели предела прочности материала при статическом изгибе – 76,4 МПа, но максимально снижает адгезионную прочность – 0,05 МПа. Образцы фанеры при испытании на скалывание после кипячения разрушаются уже при нагрузке 20...24 кгс, причем скалывание идет по клеевому слою. Значение показателя предела прочности при скалывании по клеевому слою (0,05 МПа) не соответствует требованию действующего государственного стандарта ГОСТ 3916.1-2018. Минимально допустимое значение предела прочности при скалывании по указанному стандарту составляет 0,2 МПа.

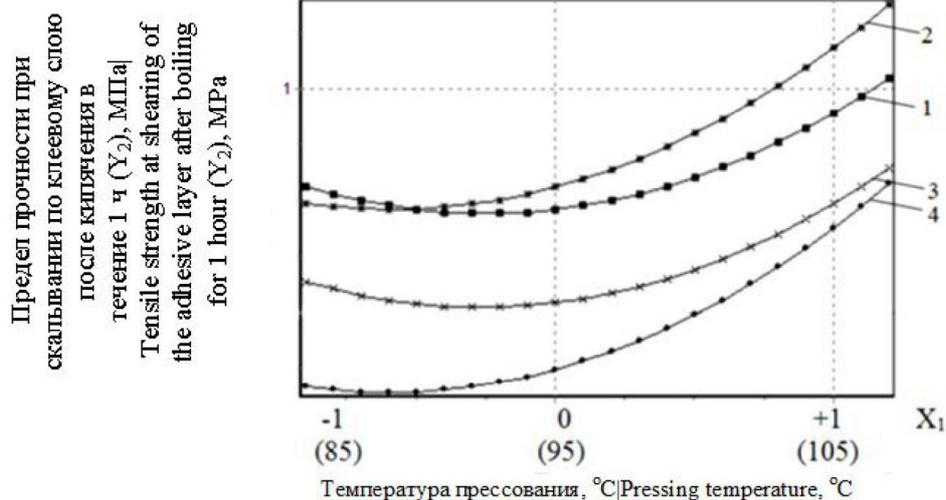
В центре плана эксперимента – при температуре прессования 95 °С, расходе смолы 93 г/м² и расходе ССК 0,5 % от массы смолы прочность фанеры при скалывании по клеевому слою после кипячения составляет 0,748 МПа, прочность образцов при статическом изгибе – 111,57 МПа. Данное улучшение, по нашему мнению, объясняется увеличением числа пространственных связей в структуре отверждающегося связующего – между функциональными группами молекул сульфосалициловой кислоты и фенолоспиртами фенолоформальдегидного связующего, а также между метилольными группами целлюлозы березового шпона и молекулами сульфосалициловой кислоты.

При использовании в качестве модификатора 0,5 % сульфосалициловой кислоты наибольшее (для данной добавки) значение предела прочности при скалывании по клеевому слою достигается при максимальных значениях температуры прессования и расхода связующего. Более высокое значение доли добавки сульфосалициловой кислоты является избыточным для данных условий. Возможная причина этого заключается в том, что отверждение связующего начинается до приложения давления прессования, прочность при скалывании снижается с увеличением доли добавки в интервале 0,5...1,0 %.

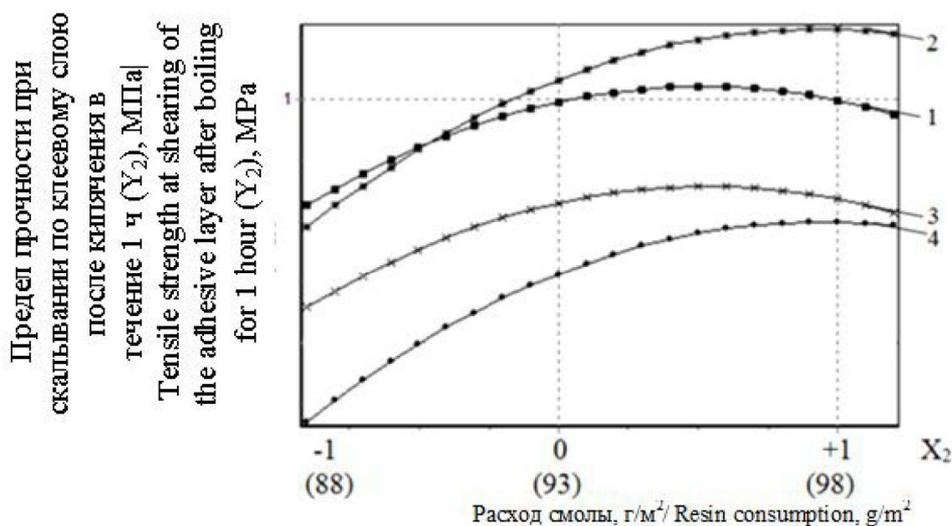
Анализ регрессионных моделей позволил сделать следующие выводы. При изготовлении фанеры на модифицированном связующем при температуре прессования 100 °С ($X_1 = 0,5$ в кодированных

Деревопереработка. Химические технологии

обозначениях), расходе смолы 98 г/м² ($X_2 = 1$) и расходе ССК 0,5 % от массы смолы ($X_3 = 0$) прочность фанеры при скалывании составит 1,03 МПа. При режимах производства $T = 105\text{ }^\circ\text{C}$ ($X_1 = 1$), расходе смолы 93 г/м² ($X_2 = 0$) и расходе ССК 0,5 % от массы смолы ($X_3 = 0$) прочность фанеры при скалывании составит 1,34 МПа.



1 – $X_2 = 1, X_3 = 1$; 2 – $X_2 = 1, X_3 = -1$; 3 – $X_2 = -1, X_3 = 1$; 4 – $X_2 = -1, X_3 = -1$



1 – $X_1 = 1, X_3 = 1$; 2 – $X_1 = 1, X_3 = -1$; 3 – $X_1 = -1, X_3 = 1$; 4 – $X_1 = -1, X_3 = -1$.

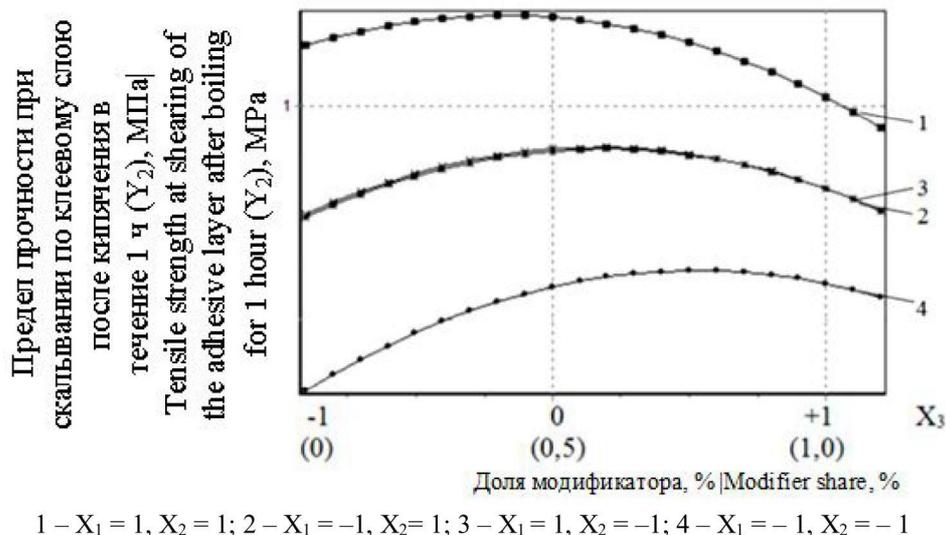


Рисунок 3. Зависимости предела прочности фанеры при скальвании по клеевому слою после кипячения в течение 1 ч от температуры прессования, расхода фенолоформальдегидной смолы и доли добавки модификатора

Figure 3. Dependence of the tensile strength of plywood when chipping along the adhesive layer after boiling for 1 hour on the pressing temperature, consumption of phenol-formaldehyde resin and the proportion of the additive modifier

Выводы

Использование ИК-спектроскопии показало, что добавка в связующее ССК уменьшает количество гидроксиметильных групп, сорбирующих воду в процессе эксплуатации фанеры ФСФ, а также снижающих прочность фанеры при скальвании по клеевому слою.

При модификации ФФС добавкой сульфосалициловой кислоты увеличивается прочность фанеры при статическом изгибе, это обусловлено созданием дополнительных межмолекулярных водородных связей между связующим и древесными компонентами.

Повышение прочности при статическом изгибе фанеры, изготавливаемой в условиях пониженной температуры и сниженного расхода связующего, даст возможность фанерным предприятиям производить конкурентоспособную продукцию для использования в строительстве, в вагоностроении и других областях использования. Целесообразность предлагаемых технологических решений была проверена экономическими расчетами. Экономические расчеты показали, что предложенные решения по

снижению температуры прессования и расхода фенолоформальдегидного связующего при использовании добавки ССК позволят сократить затраты условного предприятия на 23,78 млн. руб. в год (при годовом объеме производства фанеры ФСФ 100 000 м³).

Таким образом, в исследовании решена поставленная задача обоснования с использованием ИК-спектроскопии и регрессионного анализа повышения прочности фанеры ФСФ, производимой при низкотемпературном прессовании и сниженном расходе связующего, путем модификации связующего добавкой сульфосалициловой кислоты.

Список литературы

1. Hunt C.G, Dunky M. Analysis of future prospects and opportunities for wood adhesives: a review. *Forest Products Journal*. 2023; 72(s2): 14-22. – DOI: 10.13073/FPJ-D-23-00011.
2. Chatzimichailidou M., Dabic D., Härkönen R. Opportunities and challenges of using plywood in data-driven parametric building construction. In book: *Production Processes and Product Evolution in the Age of Disruption*. 2023: 635-642. – DOI: 10.1007/978-3-031-34821-1_69.
3. Рынок фанеры 2021-2023: Производство, цены и перспективы до 2027 года. – URL: <https://xn--7sbbgbd-jecb2aeeqwgkjh2a6aao4uje.xn--p1ai/news/rynok-proizvodstva-fanery-2021-2023>.
4. Biadała T., Czarnecki R., Dukarska D. Water resistant plywood of increased elasticity produced from european wood species. *Wood Research*. 2020; 65(1): 111-124. – DOI: 10.37763/wr.1336-4561/65.1.111124.
5. Qin Z., Teng K. Mechanical model and changed chemical structure of phenol-formaldehyde adhesive on plywood with different hot press process. *The Journal of Adhesion*. 2021; 98(15): 2348-2365. – DOI: 10.1080/00218464.2021.1970545.
6. Производство фанеры от А до Я. FORESTCOMPLEX.RU – URL: <https://forestcomplex.ru/wood-based/proizvodstvo-faneryi-ot-a-do-ya/>.
7. Mohammad A., Naheed S., Mohammad J., Mohammed N., Mohammed P. et al. A review on phenolic resin and its composites. *Current Analytical Chemistry*. 2018; 14(3): 185-197. – DOI: 10.2174/1573411013666171003154410.
8. Sahoo S.C., Sil A. Synthesis and characterization of modified low curing phenol-formaldehyde resin for manufacture of wood composites. *International Journal of Modern Agriculture*. 2021; 10: 2. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/374478288>.
9. Hasan M.S, Al-Azzawi A.M. Synthesis, modification and characterization of new phenolic resins linked to Tetra-bromophthalimide. *Iraqi Journal of Science*. 2023; 64(6): 2681-2695. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/329589007>.
10. Жаббаров Т.А. Современные методы модификации феноло-формальдегидных олигомеров // *Universum: химия и биология: электрон. научн. журн.* – 2021. – 6(84). – URL: <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/11718>.
11. Fitriani F., Lubis M.A.R., Hadi Y.S., Sari R.K., Muhammad I.M. et al. Adhesion and cohesion strength of phenol-formaldehyde resin mixed with different types and levels of catalyst for wood composites. *Journal of Composites Science*. 2023; 7:310. – DOI: 10.3390/jcs7080310.
12. Hamad S.F., Nicholas T.H.F., Teng. F., Nur F.S., Julian S.D. et al. Optimizing size and distribution of voids in phenolic resins through the choice of catalyst types. *Journal of Applied Polymer Science*. 2019; 136(47):48249. – DOI: 10.1002/app.48249.
13. Bekhta P., Sedliacik J., Kusniak I., Gryc V., Pipiska T. et al. Enhancing the properties of thermoplastic-bonded plywood by treating the birch veneers with citric acid. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2024; 134:103781. – DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2024.103781.
14. Kawalerczyk J., Dziurka D., Mirski R., Siuda J., Sedliačik J. Microcellulose as a modifier for UF and PF resins allowing the reduction of adhesive application in plywood manufacturing. *ActaFacultatisXylogologiae*. 2021; 63(2): 31-38. – DOI: 10.17423/afx.2021.63.2.03.
15. Kawalerczyk J., Dziurka D., Mirski R. The possible reduction of phenol-formaldehyde resin spread rate by its nanocellulose-reinforcement in plywood manufacturing process. *Annals of WULS SGGW (Forestry and Wood Technology)*. 2020; 111; 21-26. – DOI: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.6420>.
16. Fedotov A.A., Vahnina T.N., Susoeva I.V. Resistance to temperature and humidity changes of construction plywood and thermal-insulation boards. *Magazine of Civil Engineering*. 2021; 105(5). – URL: <https://engstroy.spbstu.ru/article/2021.105.6/ArticleNo.10506>. – DOI: 10.34910/MCE.105.6.
17. Пьянова Л.Г., Лавренов А.В., Леонтьева Н.Н., Седанова А.В., Делягина М.С., Корниенко Н.В. Физико-химические и биоспецифические свойства сорбента, полученного на основе наноглобулярного углерода и

- сульфосалициловой кислоты // Актуальные физико-химические проблемы адсорбции и синтеза нанопористых материалов: всероссийский симпозиум с международным участием, посвященный памяти В.А. Авраменко. Москва: ИФХЭ РАН. – 2022. – С. 33. – URL: <https://adsorption.phyche.ac.ru/images/Proceedings-Adsorption-Dubin-2022-10.10.2022.pdf> (phyche.ac.ru).
18. Клевцова М.В., Протопопов А.В. Получение сложных эфиров целлюлозы с сульфосалициловой и бензойной кислотами из оболочки овса // Ползуновский вестник. – 2016. – 2. – С. 181–185. – URL: <https://globalf5.com/>.
 19. Qiaolong Z.S., Shuangmei H., Chung-Yun H., Jianchun J., Junming X. 5-Sulfosalicylic acid as an acid hydrotrope for the rapid and green fractionation of woody biomass. *Industrial Crops and Products*. 2022; 177:114435. – DOI: 10.1016/j.indcrop.2021.114435.
 20. Васильев А.В. Инфракрасная спектроскопия. Введение в спектроскопию. Санкт-Петербург: СПбГУ. – 162 с. – URL: <https://chem.spbu.ru/files/Vladimir/Vasiliev/InfraRedSpektr.pdf>.

References

1. Hunt C.G, Dunky M. *Analysis of future prospects and opportunities for wood adhesives: a review*. *Forest Products Journal*. 2023; 72(s2): 14-22. DOI: 10.13073/FPJ-D-23-00011.
2. Chatzimichailidou M., Dabic D., Härkönen R. *Opportunities and challenges of using plywood in data-driven parametric building construction*. In book: *Production Processes and Product Evolution in the Age of Disruption*. 2023: 635-642. DOI: 10.1007/978-3-031-34821-1_69.
3. *Rynek fanery 2021-2023: Produkcja, ceny i perspektywy do 2027 roku*. [Plywood market 2021-2023: Production, prices and prospects until 2027]. (In Russ.). URL: <https://xn-7sbbgdjeb2aeeqwgkjh2a6aao4uje.xn-plai/news/rynek-proizvodstva-fanery-2021-2023>.
4. Biadała T., Czarnecki R., Dukarska D. *Water resistant plywood of increased elasticity produced from european wood species*. *Wood Research*. 2020; 65(1): 111-124. DOI: 10.37763/wr.1336-4561/65.1.111124.
5. Qin Z., Teng K. *Mechanical model and changed chemical structure of phenol-formaldehyde adhesive on plywood with different hot press process*. *The Journal of Adhesion*. 2021; 98(15): 2348-2365. DOI: 10.1080/00218464.2021.1970545.
6. *Produkcja fanery od A do YA*. [Plywood production from A to I]. FORESTCOMPLEX.RU. (In Russ.). URL: <https://forestcomplex.ru/wood-based/proizvodstvo-fanery-ot-a-do-ya/>
7. Mohammad A., Naheed S., Mohammad J., Mohammed N., Mohammed P. et al. *A review on phenolic resin and its composites*. *Current Analytical Chemistry*. 2018; 14(3): 185-197. DOI: 10.2174/1573411013666171003154410.
8. Sahoo S.C., Sil A. *Synthesis and characterization of modified low curing phenol-formaldehyde resin for manufacture of wood composites*. *International Journal of Modern Agriculture*. 2021; 10: 2. URL: <https://www.researchgate.net/publication/374478288>.
9. Hasan M.S, Al-Azzawi A.M. *Synthesis, modification and characterization of new phenolic resins linked to Tetra-bromophthalimide*. *Iraqi Journal of Science*. 2023; 64(6): 2681-2695. URL: <https://www.researchgate.net/publication/329589007>.
10. Zhabbarov T.A. *Sovremennye metody modifikacii fenolo-formal'degidnyh oligomerov*. [Modern methods of modification of phenol-formaldehyde oligomers]. *Universum: himiya i biologiya: elektronnyj nauchnyj zhurnal = Universum: chemistry and biology: electronic. scientific journal*. 2021; 6(84). (In Russ.). URL: <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/11718>.
11. Fitriani F., Lubis M.A.R., Hadi Y.S., Sari R.K., Muhammad I.M. et al. *Adhesion and cohesion strength of phenol-formaldehyde resin mixed with different types and levels of catalyst for wood composites*. *Journal of Composites Science*. 2023; 7:310. DOI: 10.3390/jcs7080310.

12. Hamad S.F., Nicholas T.H.F., Teng. F., Nur F.S., Julian S.D. et al. *Optimizing size and distribution of voids in phenolic resins through the choice of catalyst types*. Journal of Applied Polymer Science. 2019; 136(47):48249. DOI: 10.1002/app.48249.
13. Bekhta P., Sedliacik J., Kusniak I., Gryc V., Pipiska T. et al. *Enhancing the properties of thermoplastic-bonded plywood by treating the birch veneers with citric acid*. International Journal of Adhesion and Adhesives. 2024; 134:103781. DOI: 10.1016/j.ijadhadh. 2024.103781.
14. Kawalerczyk J., Dziurka D., Mirski R., Siuda J., Sedliačik J. *Microcellulose as a modifier for UF and PF resins allowing the reduction of adhesive application in plywood manufacturing*. ActaFacultatisXylogologiae. 2021; 63(2): 31-38. DOI: 10.17423/afx.2021.63.2.03.
15. Kawalerczyk J., Dziurka D., Mirski R. *The possible reduction of phenol-formaldehyde resin spread rate by its nano-cellulose-reinforcement in plywood manufacturing process*. Annals of WULS SGGW (Forestry and Wood Technology). 2020; 111; 21-26. DOI: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.6420>.
16. Fedotov A.A., Vahnina T.N., Susoeva I.V. *Resistance to temperature and humidity changes of construction plywood and thermal-insulation boards*. Magazine of Civil Engineering. 2021; 105(5). Article No. 10506. DOI: 10.34910/MCE.105.6.
17. Pyanova L.G., Lavrenov A.V., Leontyeva N.N., Sedanova A.V., Delyagina M.S., Kornienko N.V. *Fiziko-himicheskie i biospecificheskie svojstva sorbenta, poluchennogo na osnove nanoglobulyarnogo ugleroda i sul'fosalicilovoj kisloty*. [Physicochemical and biospecific properties of a sorbent obtained on the basis of nanoglobular carbon and sulfosalicylic acid]. Aktual'nye fiziko-himicheskie problemy adsorbicii i sinteza nanoporistykh materialov: vserossijskij simpozium s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennyj pamyati V.A. Avramenko = Actual physico-chemical problems of adsorption and synthesis of nanoporous materials: All-Russian symposium with international participation, dedicated to the memory of V.A. Avramenko. – Moscow: IFHE RAS, 2022. (In Russ.). URL: <https://adsorption.phyche.ac.ru/images/Proceedings-Adsorption-Dubinina-2022-10.10.2022.pdf> (phyche.ac.ru)
18. Klevtsova M.V., Protopopov A.V. *Poluchenie slozhnykh efirov cellyulozy s sul'fosalicilovoj i benzojnoj kislotami iz obolochki ovsa*. [Obtaining cellulose esters with sulfosalicylic and benzoic acids from oat husks]. Polzunovskij vestnik = Polzunovsky Vestnik. 2016; 2: 181–185. (In Russ.). URL: <https://globalf5.com/>.
19. Qiaolong Z.S., Shuangmei H., Chung-Yun H., Jianchun J., Junming X. *5-Sulfosalicylic acid as an acid hydrotrope for the rapid and green fractionation of woody biomass*. Industrial Crops and Products. 2022; 177:114435. DOI: 10.1016/j.indcrop.2021.114435.
20. Vasiliev A.V. *Infrakrasnaya spektroskopiya. Vvedenie v spektroskopiyu*. [Infrared spectroscopy. Introduction to spectroscopy]. St. Petersburg: St. Petersburg State University. 162 p. (In Russ.). URL: <https://chem.spbu.ru/files/Vladimir/Vasiliev/InfraRedSpektr.pdf>

Сведения об авторах

Вахнина Татьяна Николаевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Костромской государственной университет», г. Кострома, Российская Федерация, 156005, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7201-5979>, e-mail: t_vachnina@mail.ru.

✉ *Федотов Александр Андреевич* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Костромской государственной университет», г. Кострома, Российская Федерация, 156005, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3668-899X>, e-mail: aafedotoff@yandex.ru.

Сусоева Ирина Вячеславовна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Костромской государственной университет», г. Кострома, Российская Федерация, 156005, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7295-8934>, e-mail: i.susoeva@yandex.ru.

Information about authors

Tatyana N. Vachnina – Ph. D in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department of logging and wood processing industries Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Kostroma state University», Kostroma, Russian Federation, 156005, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7201-5979>, e-mail: t_vachnina@mail.ru.

✉ *Alexander A. Fedotov* – Ph. D in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department of logging and wood processing industries Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Kostroma state University», Kostroma, Russian Federation, 156005, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3668-899X>, e-mail: aafedotoff@yandex.ru.

Irina V. Susoeva – doctor of engineering, Associate Professor, Professor of department of logging and wood processing industries Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Kostroma state University», Kostroma, Russian Federation, 156005, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7295-8934>, e-mail: i.susoeva@yandex.ru.

✉ - Для контактов/Corresponding