

Научная статья

УДК 674.419.32

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-4-157-170

Структура и прочностные характеристики фанеры на модифицированном связующем

А.А. Федотов[✉], канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [R-1155-2018](https://orcid.org/0000-0002-3668-899X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3668-899X>

Т.Н. Вахнина, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [R-1116-2018](https://orcid.org/0000-0002-7201-5979),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7201-5979>

И.В. Сусоева, д-р техн. наук, доц.; ResearcherID: [R-1053-2018](https://orcid.org/0000-0002-7295-8934),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7295-8934>

А.А. Титунин, д-р техн. наук, доц.; ResearcherID: [W-5121-2017](https://orcid.org/0000-0002-0953-0898),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0953-0898>

Костромской государственный университет, г. Кострома, Россия; aafedotoff@yandex.ru[✉],
t_vachnina@mail.ru, i.susoeva@yandex.ru, a_titunin@kosgos.ru

Поступила в редакцию 24.11.25 / Одобрена после рецензирования 18.02.26 / Принята к печати 20.02.26

Аннотация. Целью исследования является повышение механических показателей фанеры, изготавливаемой при температуре прессования 105 °С на фенолоформальдегидной смоле, модифицированной медьсодержащими добавками или резорцином. Изготовлена 5-слойная фанера ФСФ из березового шпона толщиной 1,5 мм и связующего на основе фенолоформальдегидной смолы. В качестве модификаторов использовались ацетат меди, резорцин, резорцинат меди в виде водных растворов 10%-й концентрации. Оценивались прочность фанеры при статическом изгибе и прочность при скалывании по клеевому слою после кипячения. Получены ИК-спектры связующего и фанеры. Выявлено, что при модификации смолы ацетатом и резорцинатом меди уменьшается количество гидроксильных и гидроксиметильных групп, повышается гидролитическая устойчивость связующего вследствие образования координационных связей между ионом меди и гидроксильными группами связующего, при модификации смолы резорцином количество гидроксильных групп почти не меняется, но увеличивается число групп $-\text{CH}_2$. Установлено, что при низкотемпературном прессовании модификация смолы резорцинатом меди привела к увеличению прочности при скалывании по клеевому слою на 52,2 %, резорцином – на 70,0 %, ацетатом меди – на 78,8 % в сравнении с показателем образцов на фенолоформальдегидной смоле. Прочность фанеры при статическом изгибе максимальна для образцов с ацетатом меди и резорцином, она выше, чем у образцов, изготовленных при температуре 120 °С. Использование для модификации при 105 °С ацетата меди и резорцина обеспечивает сопоставимые механические показатели фанеры. Ввиду того, что стоимость ацетата меди ниже, чем резорцина, для промышленности при низкотемпературном прессовании рекомендуется модификация фенолоформальдегидной смолы ацетатом меди. Снижение температуры прессования позволит уменьшить затраты предприятий на производство водостойкой фанеры.

Ключевые слова: фанера ФСФ, фенолоформальдегидное связующее, модификаторы, горячее прессование, механические показатели, ИК-спектры

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ и администрации Костромской области в рамках научного проекта № 24-29-20157.

Благодарности: Использовано оборудование испытательной лаборатории ФГУП «Центрального научно-исследовательского института химии и механики» (г. Москва). Контроль результатов осуществлен в испытательной лаборатории древесных плит и фанеры ООО «Лессертика», г. Балабаново.

Для цитирования: Федотов А.А., Вахнина Т.Н., Сусоева И.В., Титунин А.А. Структура и прочностные характеристики фанеры на модифицированном связующем // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 4. С. 157–170. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-4-157-170>

Original article

Structure and Strength Properties of Plywood with Modified Binder

Aleksandr A. Fedotov[✉], Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [R-1155-2018](https://orcid.org/0000-0002-3668-899X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3668-899X>

Tatiana N. Vakhnina, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [R-1116-2018](https://orcid.org/0000-0002-7201-5979), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7201-5979>

Irina V. Susoeva, Doctor of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [R-1053-2018](https://orcid.org/0000-0002-7295-8934), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7295-8934>

Andrey A. Titunin, Doctor of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [W-5121-2017](https://orcid.org/0000-0002-0953-0898), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0953-0898>

Kostroma State University, Kostroma, Russia; aafedotoff@yandex.ru[✉], t_vakhnina@mail.ru, i.susoeva@yandex.ru, a_titunin@kosgos.ru

Received on November 24, 2025 / Approved after reviewing on February 18, 2026 / Accepted on February 20, 2026

Abstract. The research is aimed at improving the mechanical properties of plywood produced at a pressing temperature of 105 °C using phenol-formaldehyde resin modified with copper-containing additives or resorcin. The 5-layer waterproof plywood is made of 1.5 mm thick birch veneer and a phenol-formaldehyde resin binder. Copper acetate, resorcin, and copper resorcinate were used as modifiers (10 % aqueous solutions). We evaluated the strength of plywood under static bending and its strength when shearing along the adhesive layer after boiling. IR spectra of the binder and the plywood were obtained. The number of hydroxyl and hydroxymethyl groups decreases, and the hydrolytic stability of the binder increases due to the formation of coordinate bonds between the copper ion and the hydroxyl groups of the binder when the resin is modified with copper acetate and copper resorcinate. The number of hydroxyl groups remains virtually unchanged, but the number of –CH₂ groups increases when the resin is modified with resorcin. Modification of the resin with copper resorcinate during low-temperature pressing resulted in a 52.2 % increase in shearing strength along the adhesive layer, with resorcin – a 70.0 % increase, and with copper acetate – a 78.8 % increase, compared to the values for samples made with phenol-formaldehyde resin. The static bending strength of plywood is the highest for the samples containing copper acetate and resorcin; it is higher than that of the samples produced at 120 °C. The use of copper acetate and resorcin for modification at 105 °C provides comparable mechanical properties of plywood. Since copper acetate is less expensive than resorcin, the use of a copper acetate-modified phenol-formaldehyde resin is recommended for industrial applications requiring low-temperature pressing. Lowering the pressing temperature will reduce the costs associated with the production of water-resistant plywood.

Keywords: waterproof plywood, phenol-formaldehyde binder, modifiers, hot pressing, mechanical properties, IR spectra

Funding: The research was carried out as part of research project No. 24-29-20157 with financial support from the Russian Science Foundation and the Administration of the Kostroma Region.

Acknowledgments: We used the equipment of the Testing Laboratory of the Federal State Unitary Enterprise “Central Research Institute of Chemistry and Mechanics” (Moscow). The results were verified at the Wood-Based Panels and Plywood Testing Laboratory of the OOO Lessertika in the city of Balabanovo.

For citation: Fedotov A.A., Vakhnina T.N., Susoeva I.V., Titunin A.A. Structure and Strength Properties of Plywood with Modified Binder. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 4, pp. 157–170. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-4-157-170>

Введение

Фенолоформальдегидное связующее традиционно используется для производства фанеры ФСФ благодаря возможности обеспечения физико-механических показателей, необходимых для применения материала в строительстве. Баланс высокой прочности при статическом изгибе и низкого разбухания по толщине после пребывания в воде позволяет использовать материал в качестве многооборотной опалубки. Характеристикой водостойкости и качества склеивания шпона в композит является прочность фанеры при скалывании по клеевому слою после кипячения.

В мировом производстве материалов на синтетических связующих самыми крупнотоннажными (в порядке объемов использования) являются карбамидоформальдегидные (КФС), меламинокарбамидоформальдегидные (МКФС), фенолоформальдегидные (ФФС) смолы и полиизоцианаты (ПМДИ) [27, 28]. При высоких физико-механических показателях фанеры на формальдегидных связующих их основным недостатком является токсичность исходных компонентов, используемых при синтезе. Поэтому в России и за рубежом ведутся работы в направлении применения бесформальдегидных связующих для производства фанеры строительного назначения. На связующем из измельченной пальмоядровой скорлупы, глицерина и лимонной кислоты группой исследователей получена фанера прочностью при скалывании по клеевому слою более 1 МПа. При этом температура прессования составляла 200 °С, что значительно увеличивает энергоемкость производства [10]. Чаще всего подобные технологии или не обеспечивают соответствия показателей материала нормативным требованиям ГОСТ 3916.1–2018, или связаны со значительным увеличением затрат на производство фанеры [4, 7, 9, 11].

Используются также способы модификации ФФС для изготовления фанеры продуктами гидролизного расщепления сульфатного лигнина хвойных пород [16], пиролизной жидкостью [22], нанолигнином с эвтектическим растворителем [30]. Близко по свойствам к фенолоформальдегидному связующему на основе лигнина из рисовой соломы [12] и связующее из лигнина листьев финиковой пальмы [13]. Однако для большинства видов клеев водостойкость на альтернативных видах связующего сохраняется только при воздействии холодной воды [8, 14, 31]; низкая гидролитическая устойчивость альтернативных связующих приводит к снижению прочности фанеры после кипячения.

В исследовании Г.А. Камке сравнивалась водостойкость фанеры, полученной прессованием на ФФС и на 1,3-диметил-4,5-дигидроксиэтиленмочевине (DMDHEU) [15]. Оценивалось разбухание фанеры по толщине после нанесения воды путем разбрызгивания, пребывания в воде и воздействия высокой влажности через 192 ч. Исследователи получили данные, что первоначально разбухание было меньше у фанеры на ФФС, но через 24 ч вымачивания в воде разбухание по толщине в образцах по двум рассмотренным в работе вариантам выравнилось. Фанера имеет чрезвычайно высокий показатель (более 60 %), в разы превышающий значение для фанеры, изготавливаемой в производственных условиях.

Такие связующие, как фурановая смола, позволяют производить фанеру с большими водостойкостью и механическими показателями [26], но стоимость фурановой смолы превышает стоимость ФФС, и она не производится в таких объемах, как ФФС.

Большое количество работ российских и зарубежных исследователей направлено на модификацию ФФС с целью улучшения физико-механических свойств и/или снижения стоимости связующего и фанеры на его основе.

Y. Zhang с коллегами модифицировали ФФС добавкой силикозоля, что улучшило нанесение на шпон и проникновение связующего в древесину, а также повысило термостойкость полученного композита [32].

J. Kawalerczyk с коллегами использовали армирование ФФС наноцеллюлозой, что позволило повысить реологические свойства связующего и водостойкость фанеры [17]. Из отечественных ученых модификацию ФФС для производства водостойкой фанеры нанокристаллической целлюлозой использовала Е.В. Ющенко [6].

В работе Е.Г. Соколовой и группы исследователей оценено влияние модифицирующей добавки технического аэросила на свойства клеевых композиций [3]. Следует отметить, что кислоты, входящие в состав аэросила, снижают pH связующего до 2,0...3,5, что в технологическом плане требует исключения операции холодной подпрессовки и обеспечения быстрой загрузки в горячий пресс пакета шпона после нанесения связующего. Также данная группа исследователей совместно с С.А. Угрюмовым использовали для модификации ФФС и меламинакарбаминоформальдегидной смолы добавки таких модификаторов, как пектол, технические лигносульфонаты и доломитовая мука. Добавление модификаторов позволило улучшить физико-химические характеристики клеев и повысить прочностные свойства фанеры [25].

Возможна и модификация фенолоформальдегидной смолы растворами хлорида алюминия и хлорида магния при низкотемпературном режиме прессования и пониженном расходе связующего, что дает снижение себестоимости материалов на фоне высоких механических характеристик [5].

Представляют интерес работы по модификации ФФС соединениями меди. Модифицирование ФФС медьсодержащими солями по-разному сказывается на показателях фенолоформальдегидного связующего и композитов на его основе. Так, в работе В.Д. Ерошенко с соавторами [2] отмечена способность резорцината меди стабилизировать гидроксильные группы ФФС путем образования химических и координационных связей. В исследовании Tengfei Yi с коллегами сделан вывод о снижении физико-механических показателей плит OSB (плит древесных с ориентированной стружкой) на связую-

щем, модифицированном наночастицами оксида меди, причем пик термического разложения модифицированной ФФС сдвинут в сторону более низких температур [29].

Однако в работе Li F. с группой исследователей при использовании ИК-спектроскопии доказано, что модифицированное наномедью фенолоформальдегидное связующее проникает в клеточные стенки древесины и взаимодействует с ацетильными группами гемицеллюлозы, образуя сшитую структуру. По данным авторов, механические свойства клеточных стенок древесины были улучшены после обработки ФФС модифицированной наномедью. Авторы отмечают, что наночастицы оксидов алюминия и меди широко используются для повышения физических и механических свойств ФФС [18].

Таким образом, для оценки влияния медьсодержащих модификаторов на показатели ФФС и фанеры на основе фенолоформальдегидного связующего необходима более глубокая экспериментальная проработка вопроса.

Целью данного исследования является оценка влияния медьсодержащих модификаторов (в сравнении с резорцином) на показатели фенолоформальдегидного связующего и фанеры на его основе, а также повышение механических показателей фанеры ФФС, изготавливаемой при сниженной температуре прессования, путем модификации фенолоформальдегидного связующего.

Объекты и методы исследования

На первом этапе в лабораторных условиях подготавливались образцы жидкой фенолоформальдегидной смолы без добавки модификатора и с добавкой 1 % модификатора от массы жидкой смолы. Полученные образцы помещались в сушильный шкаф ШСУ и высушивались при температуре 105 °С до постоянной массы. Далее полученные образцы измельчались в лабораторной мельнице ЛМ 201.

На втором этапе в лабораторных условиях изготавливались образцы 5-слойной фанеры ФФС в прессе П100-400 2Э из березового лущеного шпона номинальной толщиной 1,5 мм (ГОСТ 99–2016) и ФФС СФЖ-3014 (ГОСТ 20907–2016) с добавкой 1 % модификатора от массы смолы. Использовались добавки к смоле, вводимые в виде водных растворов 10%-й концентрации: ацетат меди $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Cu}$ по ГОСТ 5852–79, резорцин $\text{C}_6\text{H}_4(\text{OH})_2$ по ГОСТ 9970–74, резорцинат меди $\text{Cu}(\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_2)_2$. Резорцинат меди получали путем перемешивания эквимольной смеси растворов резорцина и ацетата меди.

Фанера производилась при следующих постоянных факторах: температура прессования – 105 °С; продолжительность прессования – 10 мин; расход смолы – 93 г/м² поверхности осмоления; удельное давление прессования – 1,6 МПа.

Контрольные образцы на ФФС без модификаторов прессовались при температуре 105 и 120 °С.

ИК-спектры связующего и фанеры снимали на спектральном комплексе на базе ИК-Фурье спектрометра Nicolet iS10. Спектры промаркированы спектрометром аббевиатурой КГУ с номером спектра. Образцы были исследованы методом ИК-спектроскопии в режиме НПВО (нарушенного полного внутреннего отражения, кристалл – германий, спектральный диапазон – 4000–600 см^{–1}).

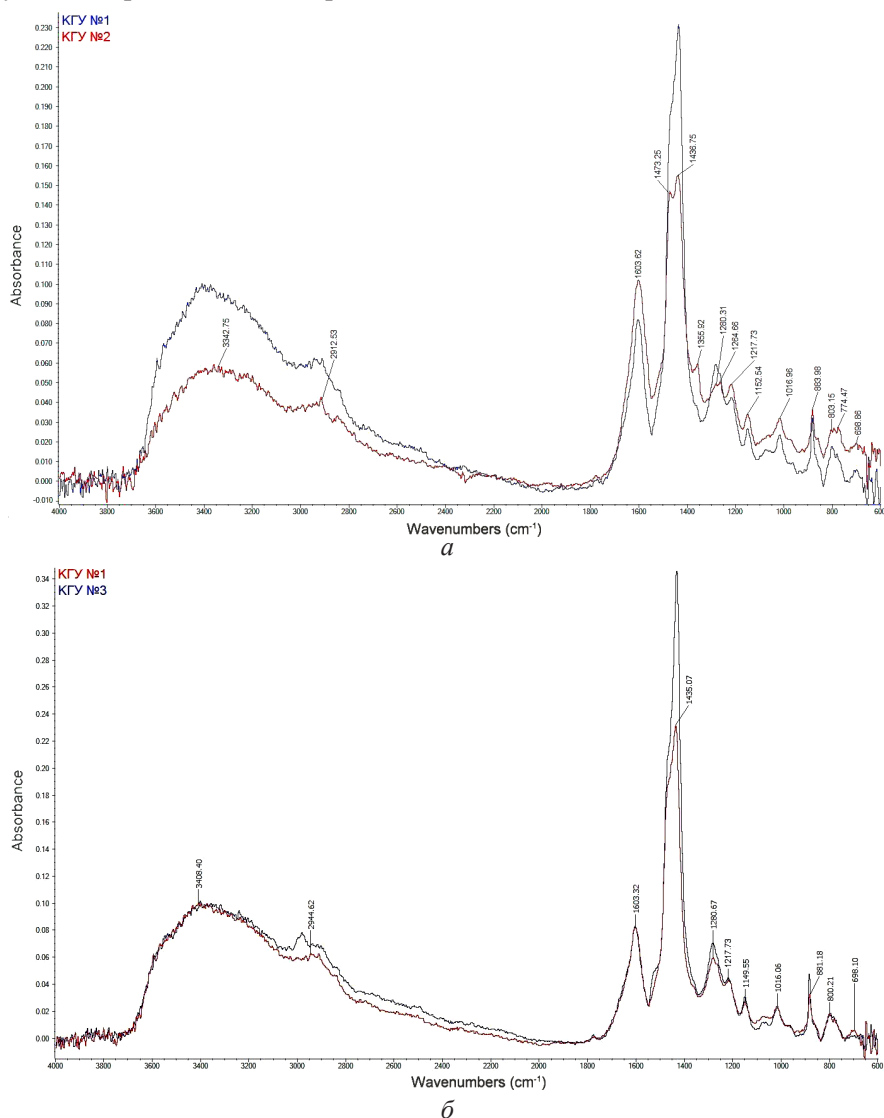
Согласно требованиям ГОСТ 3916.1–2018 оценивались предел прочности фанеры при статическом изгибе (по ГОСТ 9625–2013) и предел прочности при скалывании по клеевому слою после кипячения в течение 1 ч (по ГОСТ 9624–2009).

Количество испытанных образцов (число дублированных опытов) – 12. Для определения прочности образцов при статическом изгибе, при скалывании по клеевому слою использовалась испытательная машина 2166 Р-5 (цена деления – 0,1 Н).

Контроль результатов определения прочности фанеры при скалывании по клеевому слою выполнен в испытательной лаборатории древесных плит и фанеры.

Результаты исследования и их обсуждение

Полученные ИК-спектры твердых образцов фенолоформальдегидного связующего представлены на рис. 1.



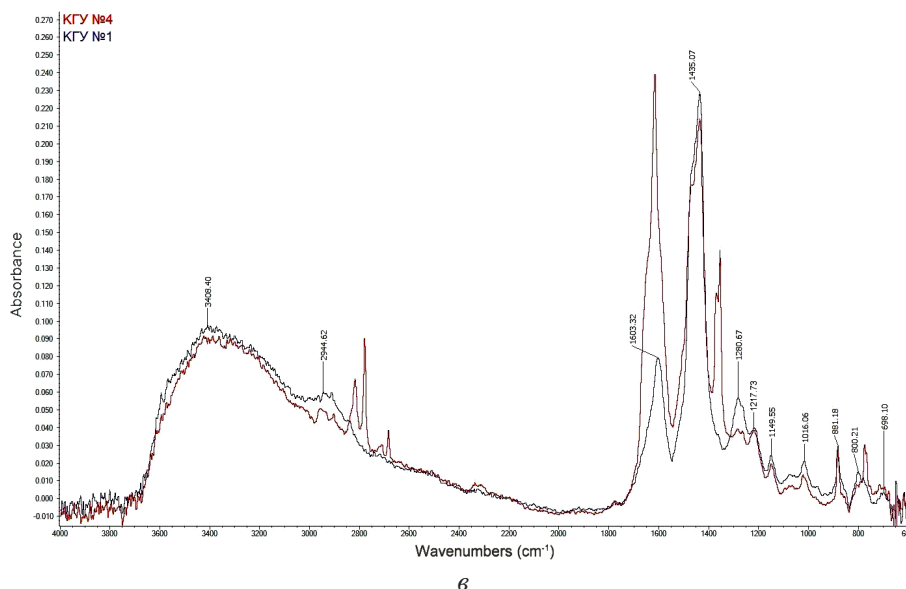


Рис. 1. ИК-спектры твердых образцов фенолоформальдегидного связующего: *а* – образцов № 1 (контрольный образец) и 2 (образец с добавкой ацетата меди); *б* – образцов № 1 и 3 (образец с добавкой резорцина); *в* – образцов № 1 и 4 (образец с добавкой резорцината меди) Здесь и на рис. 2: Absorbance – оптическая плотность; Wavenumbers – волновое число

Fig. 1. IR spectra of solid samples of a phenol-formaldehyde binder: *a* – samples no. 1 (reference sample) and 2 (sample with copper acetate added); *б* – samples no. 1 and 3 (sample with resorcin added); *в* – samples no. 1 and 4 (sample with copper resorcinate added)

При модификации ФФС ацетатом меди уменьшается количество групп –ОН, участвующих в межмолекулярных водородных связях, об этом говорит снижение интенсивности поглощения в области полосы 3400–3500 см^{-1} с 0,1 до 0,06 (рис. 1, *а*). При модификации смолы резорцином и резорцинатом меди количество групп –ОН практически не меняется (рис. 1, *б*, *в*). Пики в области полосы поглощения 1435 см^{-1} для ФФС характеризуют деформационные колебания связей в группах $-\text{CH}_2$.

Пики в области полосы поглощения 1603 см^{-1} для трех разных модификаторов имеют значительные отличия в интенсивности поглощения. Область спектра 2000–1500 см^{-1} относится к деформационным колебаниям Н–О–Н, характерным для присутствия прочно связанной воды [1]. Смола, модифицированная солями меди, и отвержденная при температуре 105 °С, содержит прочно связанную воду. В спектре контрольного образца интенсивность поглощения составляет 0,08; в спектре образца с добавкой ацетата меди – 0,1; образца с добавкой резорцина – почти не отличается от интенсивности контрольного образца. Значительное увеличение количества деформационных колебаний связей Н–О–Н (полоса 1603 см^{-1}) в спектре смолы с добавкой резорцината меди обусловлено наличием прочно связанной воды, интенсивность поглощения возрастает от 0,08 до 0,24 в сравнении с контрольным образцом без модификатора. Это объясняется тем, что резорцинат меди, как и другие соли меди [24], содержится в связующем на стадии приготовления раствора в виде кристаллогидрата. При модификации ФФС резорцином количество химически связанной воды в отвержденном связующем не изменяется. Химически связанная вода

отщепляется из кристаллогидратов, включая соли меди, при разных температурах. Из твердого вещества связанная вода выделяется при прокаливании с температуры 200...250 °С [23], а в композициях с водой она начинает выделяться при температуре около 60 °С и полностью удаляется при температуре от 90 до 108 °С [19]. В ходе исследования прессование фанеры выполнено при температуре 105 °С. Увеличение количества связанной воды требует большего времени прессования, чтобы не снизить гидролитическую устойчивость фанеры ФФСФ.

В связующем с ацетатом меди возникают колебания связей в группах $C=O$ в областях полос поглощения 1264 и 1016 cm^{-1} . Пики в области полосы поглощения около 1436 cm^{-1} характеризуют деформационные колебания связей в группах $-CH_2$, около 2944 cm^{-1} – валентные колебания связей в группах $-CH_2$. В связующем, модифицированном ацетатом меди, возникают дополнительные колебания (1473 cm^{-1}) связей в функциональных группах $C=C$, связанных с бензольным кольцом. Для связующего, модифицированного резорцинатом меди, выявлены дополнительные колебания связей в группах $-OH$ фенолоформальдегидной смолы в области полосы поглощения 1370 cm^{-1} [21]. Возможно, наличие этих групп является причиной того, что гидролитическая устойчивость связующего с резорцинатом меди ниже, чем у связующих, модифицированных ацетатом меди и резорцином.

Наши результаты близки к данным, представленным в работах других исследователей. Например, Taohong Li и группой исследователей теоретически обосновано ускорение поликонденсации ФФС с добавкой резорцина [20]. Во Zhao с коллегами доказали, что добавление резорцина увеличивает количество активных центров в молекулах смолы и снижает энергию активации, необходимую для отверждения [33].

На основании полученных данных было принято решение изготовить фанеру на ФФС с модифицирующими добавками (ацетат меди, резорцин, резорцинат меди) в условиях низкотемпературного прессования. Контрольные образцы фанеры модифицирующих добавок в связующем прессовались при температурах 105 и 120 °С.

Результаты определения показателей фанеры приведены в табл. 1, 2. Контрольные испытания для установления прочности фанеры при скалывании по клеевому слою выполнены в испытательной лаборатории древесных плит и фанеры.

Таблица 1

Прочность фанеры при скалывании по клеевому слою после 1 ч кипячения, МПа
Plywood strength when shearing along the adhesive layer after 1 hour of boiling, MPa

Вид фанеры	Определение в КГУ		Определение в лаборатории	
	среднее арифметическое	среднее квадратическое отклонение	среднее арифметическое	среднее квадратическое отклонение
С ацетатом меди	2,02	0,22	1,84	0,21
С резорцином	1,93	0,37	1,83	0,39
С резорцинатом меди	1,72	0,24	1,65	0,31
Контроль 1 (температура прессования – 105 °С)*	1,13	0,33	–	–
Контроль 2 (температура прессования 120 °С)*	1,63	0,35	1,39	0,40

*Образцы, испытанные в КГУ.

Таблица 2

Прочность фанеры при статическом изгибе, МПа
Plywood strength under static bending, MPa

Вид фанеры	Среднее арифметическое	Среднее квадратическое отклонение
С ацетатом меди	150,4	7,03
С резорцином	150,9	6,95
С резорцинатом меди	117,8	6,20
Контроль 1	106,5	6,96
Контроль 2	144,8	6,02

Наилучшую прочность при скалывании по клеевому слою имеют образцы, изготовленные на ФФС, модифицированной ацетатом меди. Различия в средней прочности при скалывании незначительные в сравнении с результатами испытаний образцов на связующем, модифицированном резорцином, но среднее квадратическое отклонение для модификатора ацетата меди меньше почти в 2 раза. Данные наших испытаний подтверждаются результатами испытаний в лаборатории. При низкотемпературном прессовании (температура 105 °С) фанеры модификация ФФС ацетатом меди привела к увеличению прочности при скалывании по клеевому слою на 78,8 %, резорцином – на 70,0 %, резорцинатом меди – на 52,2 % в сравнении с показателем образцов, изготовленных на ФФС. Прочность фанеры при статическом изгибе максимальная для образцов с ацетатом меди и резорцином, она превышает показатель образцов, полученных при температуре 120 °С.

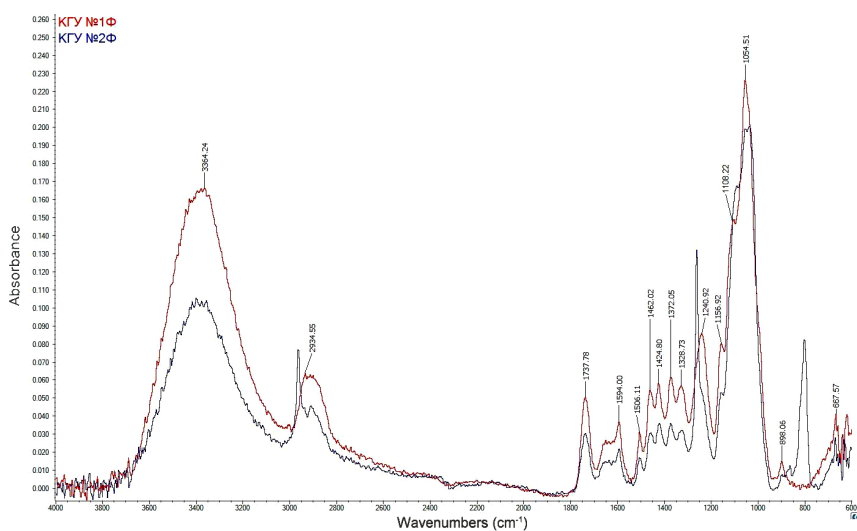
В ходе проведения работы снимались спектры твердых образцов фанеры ФФС, изготовленной с использованием модификаторов (ацетат меди, резорцин, резорцинат меди) и без них. ИК-спектры образцов фанеры, изготовленных на модифицированном связующем, в сравнении со спектром контрольного образца (без модификатора) представлены на рис. 2.

Пик в области полосы поглощения 3364 см⁻¹ в спектре фанеры характеризует валентные колебания связей в группах –ОН (участвующих во внутри- и межмолекулярных связях), причем, как и для связующего, сохраняется закономерность снижения количества Н-связей в образце фанеры с ацетатом меди в сравнении со спектром контрольного образца. Это наблюдается и в спектре образца связующего, модифицированного резорцинатом меди. Причиной этого, по мнению авторов, является образование координационных связей между ионом меди и гидроксильными группами фенолоформальдегидного связующего. Дополнительная сшивка сетки отвержденного фенолоформальдегидного полимера повышает его гидролитическую устойчивость, а следовательно, и прочность фанеры на модифицированном ацетатом меди клее при скалывании по клеевому слою после кипячения. Результаты испытаний фанеры на прочность при скалывании после кипячения также являются косвенным подтверждением формирования более прочной сетки фенолоформальдегидного полимера с добавкой ацетата меди. В случае прессования при температуре 105 °С прочность при скалывании фанеры на связующем, модифицированном ацетатом меди, в 1,79 раза (на 78,8 %) больше, чем показатель фанеры на смоле без модификатора (2,02 и 1,13 МПа). Возможно, отмеченный эффект является подтверждением выводов Li F. с коллегами [18] об участии ионов меди в создании связей

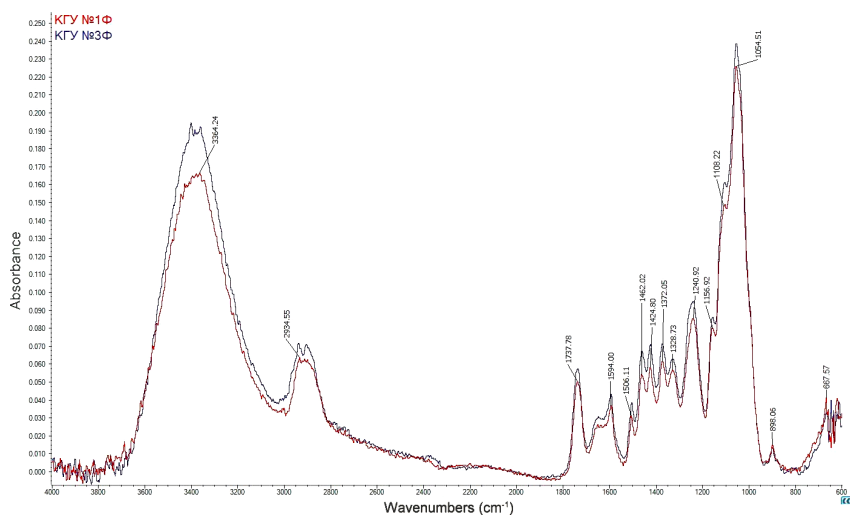
с элементами клеточных стенок древесины, т. к. для партии фанеры на связующем с добавкой ацетата меди при испытании наблюдается увеличение числа образцов со скалыванием по древесине.

В спектре образца на связующем, модифицированном резорцином, количество водородных связей больше, чем в спектре контрольного образца.

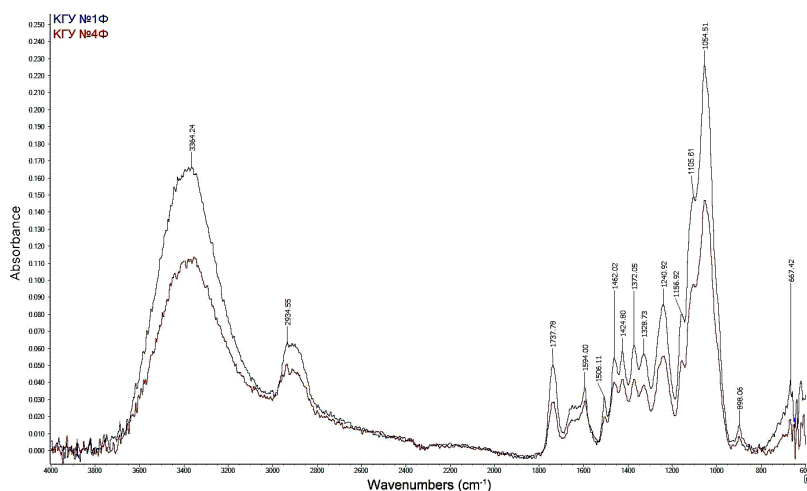
Пики в области полосы поглощения 1054 см^{-1} в спектрах образцов фанеры относятся к валентным колебаниям связей С-О в гидроксиметильных группах ФФС $-\text{CH}_2\text{OH}$ [21]. В спектре контрольного образца фанеры интенсивность поглощения составляет 0,225, для фанеры на связующем, модифицированном добавкой ацетата меди, – снижается до 0,2. В данной области спектров полоса поглощения 1054 см^{-1} расположена рядом с полосами поглощения $1108,0$ и $1156,9\text{ см}^{-1}$, которые относятся к валентным колебаниям связей С-О в полисахаридах древесины. К этим же связям принадлежит пик в области полосы поглощения 1060 см^{-1} , наложения пиков связей в разных компонентах фанеры видны на рис. 2.



а



б



6

Рис. 2. ИК-спектры твердых образцов фанеры ФСФ: *a* – образцов № 1Ф (контрольный образец) и 2Ф (образец с добавкой ацетата меди); *б* – образцов № 1Ф и 3Ф (образец с добавкой резорцина); *в* – образцов № 1Ф и 4Ф (образец с добавкой резорцината меди)

Fig. 2. IR spectra of solid waterproof plywood samples: *a* – samples no. 1Ф (reference sample) and 2Ф (sample with copper acetate added); *б* – samples no. 1Ф and 3Ф (sample with resorcin added); *в* – samples no. 1Ф and 4Ф (sample with copper resorcinate added)

Заклучение

Анализ спектров ФФС и твердых образцов фанеры ФСФ показал, что при модификации связующего солями меди уменьшается количество гидроксильных групп $-\text{OH}$, участвующих в межмолекулярных водородных связях, и уменьшается количество гидроксиметильных групп $-\text{CH}_2\text{OH}$, т. е. повышается гидролитическая устойчивость связующего. Это подтверждают и результаты определения прочности фанеры при скалывании по клеевому слою. При этом для связующего, модифицированного резорцином, количество гидроксильных групп практически не меняется, но увеличивается число групп $-\text{CH}_2-$.

Использование ацетата меди, резорцина и резорцината меди для модификации фенолоформальдегидной смолы при изготовлении фанеры в условиях низкотемпературного прессования (температура $105\text{ }^{\circ}\text{C}$) позволяет значительно повысить прочность фанеры при скалывании по клеевому слою. Это обусловлено образованием координационных связей между ионом меди и гидроксильными группами фенолоформальдегидного связующего. Дополнительная сшивка сетки отвержденного фенолоформальдегидного полимера повышает его гидролитическую устойчивость.

Модификация ФФС ацетатом меди привела к увеличению прочности при скалывании по клеевому слою на $78,8\%$, резорцином – на $70,0\%$, резорцинатом меди – на $52,2\%$ в сравнении с прочностью контрольных образцов. Модификация смолы также обеспечивает высокую прочность фанеры при статическом изгибе, сопоставимую с прочностью фанеры, изготовленной при температуре прессования $120\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Использование ацетата меди для модификации смолы для фанеры, производимой при сниженной (до $105\text{ }^{\circ}\text{C}$) температуре прессования обеспечивает

механические показатели фанеры, сопоставимые с показателями при использовании смолы, модифицированной резорцином, причем стоимость ацетата меди ниже, чем стоимость резорцина. Для промышленности при низкотемпературном прессовании можно рекомендовать модификацию смолы ацетатом меди.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Азаров В.И., Буров А.В., Оболенская А.В. Химия древесины и синтетических полимеров. СПб.: Лань, 2021. 620 с.

Azarov V.I., Burov A.V., Obolenskaya A.V. *Chemistry of Wood and Synthetic Polymers*. Saint Petersburg, Lan' Publ., 2021. 620 p. (In Russ.).

2. Ерошенко В.Д., Фокин В.П., Овчинников А.Н., Ефименко А.А., Белянкина Л.М. Исследование кинетики процесса отверждения резольной фенолоформальдегидной смолы, модифицированной резорцином меди // Изв. вузов. Сев.-кавказ. регион. Техн. науки. 2019. № 2. С. 48–54.

Eroshenko V.D., Fokin V.P., Ovchinnikov A.N., Efimenko A.A., Belyankina L.M. Study of the Kinetics of the Process of the Curing of Reshonic Phenolomomedehide Resin Modified by Metal Salts. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus region. Technical Sciences*, 2019, no. 2, pp. 48–54. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.17213/0321-2653-2019-2-48-54>

3. Соколова Е.Г., Русаков Д.С., Варанкина Г.С., Чубинский А.Н. Влияние аэро-сила технического на свойства клеевых композиций // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 3. С. 133–144.

Sokolova E.G., Rusakov D.S., Varankina G.S., Chubinsky A.N. Effect of Technical Aerosil on the Properties of Adhesive Compositions. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2021, no. 3, pp. 133–144. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-3-133-144>

4. Тесленко А.Ю., Шишлов О.Ф., Глухих В.В., Ельцов О.С. Перспективные связующие для фанеры на основе эпоксидных систем с карданолсодержащими основаниями Манниха // Системы. Методы. Технологии. 2020. № 1(45). С. 85–90.

Teslenko A.Yu., Shishlov O.F., Glukhikh V.V., Yeltsov O.S. Advanced Binders for Plywood Based on Epoxy Systems with Mannich's Cardanol-Containing Bases. *Systems. Methods. Technologies*, 2020, no. 1(45), pp. 85–90. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2020-1-85-90>

5. Федотов А.А., Вахнина Т.Н., Сусоева И.В., Титунин А.А. Моделирование показателей конкурентоспособных материалов для изготовления опалубки при строительстве промышленных зданий // Строит. материалы. 2024. № 12. С. 68–72.

Fedotov A.A., Vahnina T.N., Susoeva I.V., Titunin A.A. Modeling of Indicators of Competitive Materials for the Manufacture of Formwork in the Construction of Industrial Buildings. *Construction Materials*, 2024, no. 12, pp. 68–72. (In Russ.). <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2024-831-12-68-72>

6. Ющенко Е.В. Разработка инновационного способа повышения прочности и экологичности фанеры: дис. ... канд. техн. наук. Воронеж. 2025. 245 с.

Yushchenko E.V. *Development of an Innovative Method for Improving the Strength and Environmental Friendliness of Plywood*: Cand. Engin. Sci. Diss. Voronezh, 2025. 245 p. (In Russ.).

7. Bekhta P., Sedliacik J. Environmentally-Friendly High-Density Polyethylene-Bonded Plywood Panels. *Polymers*, 2019, vol. 11, iss. 7, art. 1166. <https://doi.org/10.3390/polym11071166>

8. Biadała T., Czarnecki R., Dukarska D. Water Resistant Plywood of Increased Elasticity Produced from European Wood Species. *Wood Research*, 2020, vol. 65(1), pp. 111–124. <https://doi.org/10.37763/wr.1336-4561/65.1.111124>

9. Chen N., Huang J., Li K. Investigation of a Formaldehyde-Free Cottonseed Flour-Based Adhesive for Interior Plywood. *BioResources*, 2020, vol. 15(3), pp. 5546–5557. <https://doi.org/10.15376/biores.15.3.5546-5557>

10. Choowang R., Luengchavanon M., Raknarong J. Employing a Mixture of Fine-Particle PKS, Glycerol, and Citric Acid as an Eco-Friendly Binder for Plywood Production from Rubberwood (*Hevea brasiliensis*) Veneer. *Journal of Wood Science*, 2024, vol. 70, art. 31. <https://doi.org/10.1186/s10086-024-02145-1>
11. Chrobak J., Howska J., Chrobok A. Formaldehyde-Free Resins for the Wood-Based Panel Industry: Alternatives to Formaldehyde and Novel Hardeners. *Molecules*, 2022, vol. 27, iss. 15, art. 4862. <https://doi.org/10.3390/molecules27154862>
12. El Mansouri N., Yuan Q., Huang F. Preparation and Characterization of Phenol-Formaldehyde Resins Modified with Alkaline Rice Straw Lignin. *BioResources*, 2018, vol. 13(4), pp. 8061–8075. <https://doi.org/10.15376/biores.13.4.8061-8075>
13. Huzyan H.I., Abdul Aziz A., Hussin M.H. Ecofriendly Wood Adhesives from Date Palm Fronds Lignin for Plywood. *BioResources*, 2021, vol. 16(2), pp. 4106–4125. <https://doi.org/10.15376/biores.16.2.4106-4125>
14. Jorda J., Cesprini E., Barbu M.-C., Tondi G., Zanetti M., Král P. Quebracho Tannin Bio-Based Adhesives for Plywood. *Polymers*, 2022, vol. 14, iss. 11, art. 2257. <https://doi.org/10.3390/polym14112257>
15. Kamke F.A., Irribarra L.M., Leavengood S. Dynamic Moisture Resistance of Chemical and Thermal Modified Plywood. *Wood Material Science and Engineering*, 2022, vol. 18, iss. 1, pp. 29–34. <https://doi.org/10.1080/17480272.2022.2109990>
16. Karthäuser J., Raskop S., Slabohm M., Militz H. Modification of Plywood with Phenol-Formaldehyde Resin: Substitution of Phenol by Pyrolysis Cleavage Products of Softwood Kraft Lignin. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2024, vol. 82, pp. 309–319. <https://doi.org/10.1007/s00107-023-02029-z>
17. Kawalerczyk J., Dziurka D., Mirski R., Siuda, J., Szentner K. The Effect of Nano-cellulose Addition to Phenol-Formaldehyde Adhesive in Water-Resistant Plywood Manufacturing. *BioResources*, 2020, vol. 15(3), pp. 5388–5401. <https://doi.org/10.15376/biores.15.3.5388-5401>
18. Li F., Ye C., Huang Y., Liu X., Fei B. Incorporation of *in situ* Synthesized Nano-Copper Modified Phenol-Formaldehyde Resin to Improve the Mechanical Properties of Chinese Fir: A Preliminary Study. *Polymers*, 2021, vol. 13(6), art. 876. <https://doi.org/10.3390/polym13060876>
19. Li S., Wang C., Zhang X., Zou L., Dai Z. Classification and Characterization of Bound Water in Marine Mucky Silty Clay. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, vol. 19, pp. 2509–2519. <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02242-5>
20. Li T., Cao M., Liang J., Xie X., Du G. Mechanism of Base-Catalyzed Resorcinol-Formaldehyde and Phenol-Resorcinol-Formaldehyde Condensation Reactions: A Theoretical Study. *Polymers*, 2017, vol. 9(9), art. 426. <https://doi.org/10.3390/polym9090426>
21. Poljanšek I., Krajnc M. Characterization of Phenol-Formaldehyde Prepolymer Resins by In Line FT-IR Spectroscopy. *Acta Chimica Slovenica*, 2005, vol. 52, iss. 3, pp. 238–244.
22. Rusakov D.S., Varankina G.S., Belova O.A. Modification of Phenol Formaldehyde Resins with Wood-Pyrolysis Liquid. *Polymer Science, Series D*, 2024, vol. 17, pp. 242–246. <https://doi.org/10.1134/S1995421224700400>
23. Sibokoza S.B., Moloto M.J., Mtunzi F., Moloto N. Thermal Decomposition of Copper Acetate at Various Temperature and Time to form Copper Oxide/Copper Nanoparticles. *Asian Journal of Chemistry*, 2022, vol. 34, no. 1, pp. 239–244. <https://doi.org/10.14233/ajchem.2022.23495>
24. Singh M., Kumar D., Thomas J., Ramanan A. Crystallization of Copper(II) Sulfate Based Minerals and MOF from Solution: Chemical Insights into the Supramolecular Interactions. *Journal of Chemical Sciences*, 2010, vol. 122, pp. 757–769. <https://doi.org/10.1007/s12039-010-0064-1>

25. Sokolova E.G., Rusakov D.S., Chubinskiy A.N., Varankina G.S., Ugryumov S.A. Estimation of Service Properties of Modified Synthetic Resins and Plywood Based on Them. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2020, no. 9, pp. 10–15. <https://doi.org/10.31044/1813-7008-2020-0-9-10-15>

26. Varodi A.M., Beldean E.C., Timar M.C. Furan Resin as Potential Substitute for Phenol-Formaldehyde Resin in Plywood Manufacturing. *BioResources*, 2019, vol. 14(2), pp. 2727–2739. <https://doi.org/10.15376/biores.14.2.2727-2739>

27. *Wood Adhesives and Binders Market Report by Product Type (Urea-Formaldehyde, Melamine-Urea-Formaldehyde, Phenol-Formaldehyde, Isocyanates, Soy-Based, and Others), Application (Flooring Products, Furniture and Subcomponents, Windows and Doors, Cabinets, and Others), and Region 2025–2033*. 2025. Available at: <https://www.imarcgroup.com/wood-adhesive-binders-market> (accessed 20.06.26).

28. *Wood Adhesives and Binders Market Size & Share 2016 – 2024: A Report*. 2015. 128 p. Available at: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/wood-adhesives-and-binders-market> (accessed 20.06.26).

29. Yi T., Guo C., Zhao S., Zhan K., Gao W., Yang L., et al. The Simultaneous Preparation of Nano Cupric Oxide (CuO) and Phenol Formaldehyde (PF) Resin in One System: Aimed to Apply as Wood Adhesives. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2020, vol. 78, pp. 471–482. <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01514-z>

30. Younesi-Kordkheili H., Pizzi A. Modification of Nanolignin by Deep Eutectic Solvent to Improve the Properties of Phenol-Formaldehyde Resin. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2024, vol. 82, pp. 2099–2108. <https://doi.org/10.1007/s00107-024-02147-2>

31. Yu C., Chen Y., Li R., Jiang J., Wang X. A Narrative Review: Modification of Bio-Based Wood Adhesive for Performance Improvement. *Coatings*, 2024, vol. 14(9), art. 1153. <https://doi.org/10.3390/coatings14091153>

32. Zhang Y., Liu Y., Liu M., Li C. Preparation and Performance Study of Modified Silica Sol/Phenolic Resin. *BioResources*, 2021, vol. 16(4), pp. 6669–6683. <https://doi.org/10.15376/biores.16.4.6669-6683>

33. Zhao B., Leng Y., Xue M., Xue M., Zhang Q., Dong H., et al. Cure-Promoting Strategies for Phenol-Resorcinol-Formaldehyde Resins: High-Ortho Catalysis, Hydrogen Bond Activation, and Their Impact on Curing Kinetics. *Journal of Applied Polymer Science*, 2025, vol. 142, iss. 25, art. e57047. <https://doi.org/10.1002/app.57047>

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