

ВЛИЯНИЕ СПОСОБОВ ПОЛУЧЕНИЯ БЕРЕЗОВОЙ ФАНЕРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЛАЖНОГО ШПОНА НА АДГЕЗИОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В СИСТЕМЕ КЛЕЙ — ДРЕВЕСИНА

К.А. Чумак, А.А. Титунин✉, Т.Н. Вахнина,
А.А. Федотов, И.В. Сусоева

ФГБОУ ВО «Костромской государственный университет», Россия, 156005, г. Кострома, ул. Дзержинского, д. 17/11

a_titunin@kosgos.ru

Рассмотрены направления совершенствования технологии получения березовой фанеры в целях снижения затрат и обеспечения конкурентоспособности продукции. Показано, что отечественные производители фанеры для снижения затрат в первую очередь стремятся снизить энергопотребление путем применения модифицированных смол и внедрения в технологический процесс режимов низкотемпературного прессования шпона. Недостаточная изученность процесса адгезионного взаимодействия при отверждении связующего при низких температурах, в том числе при склеивании влажного шпона, определяют актуальность настоящего исследования. Представлены результаты изучения одного из показателей качества березовой фанеры — прочности, выполненного в лабораторных условиях анализа взаимосвязи режимов склеивания шпона и адгезионной прочности между слоями шпона. Используются традиционные методы активного эксперимента и статистической обработки лабораторных исследований прочности фанеры при скалывании по клеевому слою. Для оценки значимости влияния способов склеивания и времени прессования на прочность фанеры использован метод дисперсионного анализа. При обосновании направления совершенствования технологических режимов склеивания использовались два вида смол, которые наиболее часто применяются на отечественных фанерных предприятиях — резольная фенолоформальдегидная и карбамидоформальдегидная смолы. Установлено, что при модификации фенолформальдегидной смолы солями меди вследствие повышения гидролитической устойчивости связующего и увеличения количества пространственных связей в структуре отвержденного клевого слоя становится возможным снизить температуру прессования ниже 100 °С. Подтверждено статистически значимое влияние кондиционирования полуфабриката фанерной продукции на ее прочность при скалывании. Доказано, что получение березовой фанеры двухэтапным способом с использованием влажного шпона по сравнению с традиционным пакетным способом позволяет получить продукцию с более высокими прочностными показателями.

Ключевые слова: прочность клеевых соединений, березовый лущеный шпон, адгезия

Ссылка для цитирования: Чумак К.А., Титунин А.А., Вахнина Т.Н., Федотов А.А., Сусоева И.В. Влияние способов получения березовой фанеры с использованием влажного шпона на адгезионное взаимодействие в системе клей — древесина // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2026. Т. 30. № 5. С. 94–105. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-5-94-105

Березовая фанера для многих регионов России традиционно является одним из основных видов продукции деревообработки, поэтому не случайно в Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации спрос на березовую фанеру на перспективу до 2030 года определен в объеме до 6,5 млн м³ [1]. Характеризуя современное состояние рынка фанерной продукции, следует отметить, что за последние пять лет наибольший объем производства фанеры был достигнут в 2021 г. — 4,482 млн м³.

На фоне наблюдаемого ныне постепенного восстановления российского рынка фанерной продукции после падения объемов ее производства и сбыта в 2022–2023 гг. сохраняется актуальность обеспечения конкурентоспособности готовой продукции и применения на фанерных предприятиях энергосберегающих технологий.

Конкурентоспособность фанеры во многом зависит от ценовой политики предприятий и качества производимой продукции, которое определяется комплексом прочностных, эксплуатационных и экологических показателей [2–4]. Благодаря уникальности свойств фанерной продукции ее используют в значительных

объемах в строительном комплексе. Подтверждением ожидаемого роста объема производства и потребления фанеры на ближайшие годы служит развитие индустриального деревянного домостроения [5]. С учетом специфики природно-климатических и лесорастительных условий для произрастания березовых насаждений в Вологодской, Кировской, Костромской и других областях [6, 7], а также в связи с высокими прочностными показателями березового шпона, следует ожидать, что спрос на березовую фанеру в перспективе сохранится как на внутреннем, так и внешнем рынке [8, 9].

Повысить конкурентоспособность фанерной продукции отечественные производители стремятся за счет снижения ее себестоимости при условии сохранения эксплуатационных показателей. Для снижения затрат на производство фанеры производители идут в основном по пути сокращения времени горячего прессования, а также применения технологий низкотемпературного прессования, что непосредственно связано со снижением расхода тепловой энергии на единицу продукции и уменьшением выбросов парниковых газов в окружающую среду. Для сохранения эксплуатационных показателей фанеры на требуемом уровне при использовании карбамидоформальдегидных и фенолформальдегидных смол, которые используются преимущественно на отечественных предприятиях при горячем прессовании [10, 11], обычно в состав клеевых композиций вводят различные модификаторы [12]. При этом, несмотря на достаточно обширный отечественный и зарубежный опыт производства фанерной продукции, полностью не удается избежать такого дефекта фанеры, как местные расслоения или «пузыри», образующиеся внутри пакета фанеры вследствие избыточного давления парогазовой смеси. Основной причиной образования «пузырей» считается повышенная влажность шпона, которая приводит к увеличению времени желатинизации клеевого состава и уменьшению количества реакционно способных групп на поверхности шпона [13]. Этот недостаток особенно проявляется при склеивании шпона из древесины березы с ложным ядром, который даже после обязательной технологической операции сушки имеет влажность $W = 11 \dots 12\%$. По данным исследований, выполненных в Уральском лесотехническом институте (ныне Уральский государственный лесотехнический университет) в 1970–1980 гг., в древесине ложного ядра содержится недостаточное количество молекул целлюлозы, что приводит к снижению числа образовавшихся водородных связей между древесиной и адгезивом [14].

На основе этих данных, а также по результатам, представленным в работах [13–16], в Костромском государственном университете были проведены комплексные исследования.

Цель работы

Цель работы — совершенствование технологии производства березовой фанеры на основе анализа взаимосвязи режимов склеивания шпона и адгезионной прочности между слоями шпона, в том числе шпона повышенной влажности.

Материалы и методы

В ходе исследования в лабораторных условиях изготавливалась пятислойная фанера из лущеного березового шпона (ГОСТ 99–2016) толщиной 1,5 мм в прессе марки П100-400 2Э. Давление прессования составляло 1,6 МПа, общее время выдержки в прессе — от 4 до 10 мин., в зависимости от способа получения фанеры.

На первом этапе в качестве связующего использовалась резольная фенолоформальдегидная смола марки СФЖ-3014 (ГОСТ 20907–2016) с модифицирующими добавками: ацетатом меди $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Cu}$, резорцином $\text{C}_6\text{H}_4(\text{OH})_2$ и резорцинатом меди $\text{Cu}(\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_2)_2$.

Выбор модифицирующих добавок обоснован тем, что на сегодняшний день однозначных рекомендаций по эффективному использованию каких-либо добавок при производстве березовой фанеры не выявлено. Так, для снижения температуры горячего прессования фанеры марки ФСФ известны результаты модификации фенолоформальдегидного связующего (ФФС) пероксидом водорода [17, 18], спиртами и сложными эфирами [19], танинами карбамидами [20], порошком коры [21], танинами из коры [22]. Авторы работы [23] модифицировали ФФС для производства фанеры винной кислотой, хлоридом железа (III), фталевым ангидридом и экстрактом квебрахо, причем наилучший результат показала винная кислота. Возможно использование отходов алюминиевого и целлюлозно-бумажного производств [24, 25], способствующих снижению себестоимости фанеры и повышению ее прочностных характеристик, а также модификация шунгитами, алюмосиликатами и пектолом [26], позволяющая снизить время прессования и повысить предел прочности при скалывании.

В работах [17, 19] удалось уменьшить температуру прессования фанеры с сохранением, а во втором случае с повышением свойств

фанеры марки ФСФ. Однако при этом наблюдался высокий расход связующего ($140 \dots 160 \text{ г/м}^2$), что негативно сказывалось на себестоимости получаемой фанеры.

Выбранные нами добавки — ацетат меди $\text{CH}_3\text{COO}_2\text{Cu}$, резорцин $\text{C}_6\text{H}_4(\text{OH})_2$ и резорцинат меди $\text{Cu}(\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_2)_2$ вводились в ФФС в виде 10%-го водного раствора. Показатель pH растворов добавок составил для ацетата меди — $\text{pH} = 6$, резорцина — $\text{pH} = 5$, для резорцината меди — $\text{pH} = 4$.

На втором этапе исследований при отработке двухэтапного способа горячего прессования с использованием шпона повышенной влажности [27] применялась карбамидоформальдегидная смола (КФС).

При выборе температуры горячего прессования в качестве основного было принято известное положение о том, что фенолоформальдегидные полимеры являются структурами с небольшим числом узлов в трехмерной сетке).

На последней стадии отверждения степень завершенности реакции поликонденсации невелика, используется не более 25 % функциональных групп, образующих связи в трехмерной сетке [28]. Прессование фанеры при температуре, используемой на действующем производстве, обеспечивает недостаточное отверждение фенолформальдегидного связующего, что негативно сказывается на механической прочности фанеры. Образовавшийся полимер при этом все еще эластичен и частично растворим [29]. В клеевой композиции образуются слабые места, возникновение которых может быть связано с наличием в структуре отвержденного клея конденсационной воды (побочный продукт реакции поликонденсации), а также с пространственными затруднениями, обусловленными размером макромолекулы связующего. Поэтому введение модифицирующих добавок в смолу СФЖ-3014 в количестве не более 2 % должно обеспечить при температуре прессования $T = 105 \dots 110 \text{ }^\circ\text{C}$ получение фанеры с требуемыми показателями прочности.

При использовании КФС другие исследователи также отметили, с одной стороны, тормозящее влияние повышенной влажности шпона на процесс отверждения связующего [30], с другой — возможность при определенных условиях получения качественной фанеры даже при температуре ниже $100 \text{ }^\circ\text{C}$ [31, 32]. Во многом прочность клеевых соединений при этом определяется характером взаимодействия клея с поверхностью древесины в момент его нанесения, а точнее, способностью к смачиванию поверхности шпона и равномерности растекания его по всей площади листа [16].

Для оценки влияния модифицирующих добавок, вводимых в смолу СФЖ-3014, а также влияния влажности шпона на адгезионное взаимодействие в системе клей — древесина в качестве основных показателей механических свойств березовой фанеры рассматривались предел прочности при статическом изгибе и предел прочности при скалывании по клеевому слою. Для обработки полученных результатов применялись стандартные методы математической статистики и дисперсионного анализа.

Однофакторный дисперсионный анализ применялся для оценки значимости влияния способа получения фанеры с использованием шпона повышенной влажности на адгезионную прочность клеевого шва. В качестве выходной величины Y , МПа принята прочность фанеры при скалывании по клеевому слою. Управляемый фактор A изменялся в соответствии со способом изготовления фанеры.

Для склеивания пятислойной фанеры из березового шпона рассматривали применение стандартного пакетного способа и предлагаемого двухэтапного способа, при котором на первом этапе склеивается полуфабрикат из трех слоев (внутренний слой из сухого шпона $W = 6 \%$, наружные слои из шпона повышенной влажности $W = 11 \%$), после чего осуществляется доклеивание на полуфабрикат с двух сторон сухого шпона $W = 6 \%$. В ходе экспериментальных исследований время прессования полуфабриката τ составляло от 2 до 3 мин. С учетом этого уровни варьирования фактора A имеют следующий вид:

— a_1 — способ 1 (пакетный), влажность шпона $W = 6 \%$, время прессования $\tau = 5 \text{ мин.}$, смола КФС без модификатора;

— a_2 — способ 2 (пакетный), влажность шпона $W = 11 \%$, время прессования $\tau = 5 \text{ мин.}$, добавка в КФС модификатора тригидрата алюминия $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ в количестве 1 % массы связующего;

— a_3 — способ 3 (двухэтапный), время прессования полуфабриката $\tau = 2 \text{ мин.}$, промежуточная выдержка полуфабриката в течение 24 ч, доклеивание полуфабриката сухим шпоном в течение $\tau = 2 \text{ мин.}$;

— a_4 — способ 4 (двухэтапный), время прессования полуфабриката $\tau = 2,5 \text{ мин.}$, промежуточная выдержка полуфабриката в течение 24 ч, доклеивание полуфабриката сухим шпоном в течение $\tau = 2 \text{ мин.}$;

— a_5 — способ 5 (двухэтапный), время прессования полуфабриката $\tau = 3 \text{ мин.}$, промежуточная выдержка полуфабриката в течение 24 ч, доклеивание полуфабриката сухим шпоном в течение $\tau = 2 \text{ мин.}$;

– a_6 — способ 6 (двухэтапный), время прессования полуфабриката $\tau = 2$ мин., доклеивание полуфабриката без промежуточной выдержки сухим шпоном в течение $\tau = 2$ мин.;

– a_7 — способ 7 (двухэтапный), время прессования полуфабриката $\tau = 2,5$ мин., доклеивание полуфабриката без промежуточной выдержки сухим шпоном в течение $\tau = 2$ мин.;

– a_8 — способ 8 (двухэтапный), время прессования полуфабриката $\tau = 3$ мин., доклеивание полуфабриката без промежуточной выдержки сухим шпоном в течение $\tau = 2$ мин.

После требуемого кондиционирования полученных образцов фанеры из них выпиливались заготовки для проведения испытаний на статический изгиб и скалывание по клеевому слою. Количество дублированных опытов при испытаниях на изгиб было принято $n = 5$; при испытаниях на скалывание по клеевому слою — $n = 30$.

На завершающем этапе обработки экспериментальных данных, которые приведены в табл. 1, с использованием методики однофакторного дисперсионного анализа была выполнена оценка значимости влияния рассматриваемых способов получения фанеры на ее прочностные показатели. Для этого по общепринятой методике был выполнен расчет следующих показателей:

– оценка общего среднего

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^m \bar{Y}_i}{m}, \quad (1)$$

где $i = 1, \dots, m$ — количество уровней фактора A ;

$\bar{Y}$ — среднее арифметическое по i -му уровню;

– расчетное значение критерия Кохрена

$$G_p = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{i=1}^m S_i^2}, \quad (2)$$

где m — число уровней фактора A (число выборок);

S_i^2 — дисперсия i -й выборки;

$S_{\max}^2$ — наибольшая из m дисперсий;

– дисперсия фактора A

$$S_A^2 = \frac{n}{m-1} \sum_{i=1}^m (\bar{Y} - \bar{Y}_i)^2, \quad (3)$$

где n — объем каждой выборки;

m — число выборок (уровней фактора A);

$\bar{Y}$ — общее среднее по эксперименту;

$\bar{Y}_i$ — среднее арифметическое i -го уровня фактора A ;

– остаточная дисперсия, которая является аналогом дисперсии воспроизводимости в регрессионном анализе и характеризует среднее

рассеяние в эксперименте между элементами выборки и средним арифметическим по всему эксперименту

$$S_n^2 = \frac{\sum_{i=1}^m S_i^2}{m}. \quad (4)$$

Вычисленные с помощью формул (1)–(4) показатели использовались в дальнейшем для сравнительной оценки влияния способа склеивания на прочностные показатели фанеры.

Результаты и обсуждение

Проведенные исследования влияния модифицирующих добавок на прочность фанеры показали следующее.

1. При расходе смолы 98 г/м^2 без добавления модификатора и повышении температуры прессования фанеры от 85 до 105°C предел прочности при статическом изгибе увеличивается с 71 до $119,3 \text{ МПа}$, т. е. на $48,3 \text{ МПа}$; при введении в смолу 2% ацетата меди прочность увеличивается с $65,6$ до 135 МПа (на $69,4 \text{ МПа}$); при доле добавки 2% резорцина — с $37,1$ до $144,7 \text{ МПа}$ (на $107,6 \text{ МПа}$); при доле добавки 2% резорцината меди — с $44,3$ до $138,5 \text{ МПа}$ (на $94,2 \text{ МПа}$).

В целом показатель «предел прочности при статическом изгибе» даже при температуре прессования 85°C составляет не ниже $25,7 \text{ МПа}$, что соответствует требованиям ГОСТ 3916.1–2018.

2. При расходе не модифицированной смолы 98 г/м^2 и снижении температуры прессования от 105 до 85°C предел прочности при скалывании по клеевому слою после кипячения в течение 1 ч уменьшается с $1,41$ до $0,051 \text{ МПа}$ (более чем в 27 раз); при доле добавки 2% ацетата меди прочность уменьшается с $2,46$ до $0,2 \text{ МПа}$ (более чем в 12 раз); при доле добавки 2% резорцина — с $2,25$ до $0,25 \text{ МПа}$ (в 9 раз); при доле добавки 2% резорцината меди — с $2,13$ до $0,20 \text{ МПа}$ (более чем в 10 раз).

В целом гидролитическую устойчивость материала больше повышает модификация ацетатом меди.

Использование в качестве модификатора резорцината меди обеспечивает сопоставимый с другими двумя модификаторами показатель предела прочности фанеры при статическом изгибе, однако наблюдается более низкое значение предела прочности материала при скалывании по клеевому слою.

Проведенные исследования ИК-спектров образцов отвержденного модифицированного и не модифицированного фенолформальдегид-

ного связующего показали, что при его модификации солями меди уменьшается количество гидроксиметильных групп, т. е. повышается гидролитическая устойчивость. При этом для связующего, модифицированного резорцином, увеличивается число групп $-\text{CH}_2$ (количество пространственных связей в структуре отвержденного связующего).

Полученные нами результаты в целом не противоречат данным, которые приводятся другими авторами, которые, в частности, отмечают, что низкотемпературный режим не обеспечивает достаточной степени отверждения фенолоформальдегидного связующего, и это приводит к снижению водостойкости материала на основе данного компонента [12, 16, 32].

В производстве фанеры на предприятии с объемом выпуска продукции 100 000 м³ при добавке 2 % ацетата меди экономический эффект, выраженный в снижении затрат по статьям себестоимости, составит 22,5 млн руб., а при добавке 2 % резорцина — 2,6 млн руб.

Получены результаты определения прочности фанеры, произведенной при склеивании шпона КФС в два этапа с использованием на первом этапе влажного шпона (табл. 1).

Анализируя значения предела прочности фанеры при скалывании по клеевому слою (см. табл. 1), следует отметить, что снизить негативное влияние влажности шпона на предел прочности при скалывании по клеевому слою позволяет введение в состав клеевой композиции модификатора тригидрата алюминия $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ в количестве 1 % массы смолы. При этом предел прочности при скалывании оказывается всего лишь на 0,05 МПа ниже, чем при получении фанеры традиционным способом из сухого шпона.

Выявлена общая закономерность положительного влияния времени прессования на прочность при скалывании. С увеличением времени склеивания полуфабриката в опытах с промежуточной выдержкой после получения полуфабриката (уровни a_6 – a_8) предел прочности при скалывании увеличивается с 0,67 МПа при $\tau = 2,0$ мин. до 1,02 МПа при $\tau = 3,0$ мин. В опытах, когда после склеивания полуфабрикат практически сразу же использовался на втором этапе получения фанеры, прочность при скалывании с увеличением времени склеивания также возрастает — с 1,43 МПа до 1,71 МПа.

Результаты экспериментов показали, что без промежуточной выдержки полуфабриката прочность при скалывании оказывается больше. Одной из возможных причин отрицательного влияния промежуточной выдержки на прочностные показатели фанеры, скорее всего,

является механизм реакции поликонденсации карбамидоформальдегидного связующего, которая, как отмечается в работах многих исследователей [13, 15, 16], продолжается после размыкания плит пресса при уменьшающейся интенсивности образования связей между молекулами, расположенными в поверхностном слое древесины и в клеевой композиции. За время кондиционирования процесс отверждения карбамидоформальдегидного связующего в полуфабрикате полностью завершается, и повторная обработка при доклеивании сухим шпоном приводит к частичному разрушению связей в системе клей — древесина. Вследствие этого прочность при скалывании оказывается ниже, чем при традиционном способе и при предлагаемом двухэтапном способе без промежуточного кондиционирования полуфабриката.

Анализ экспериментальных данных (см. табл. 1) позволил также высказать гипотезу о том, что более высокие показатели прочности при скалывании по клеевому слою фанеры, полученной при двухэтапном способе без кондиционирования полуфабриката, достигнуты благодаря лучшей смачиваемости клеевой композицией поверхности влажного шпона [33, 34] как на этапе получения полуфабриката, так и при доклеивании его сухим шпоном. На первом этапе лучшая смачиваемость и равномерное растекание связующего по поверхности шпона обеспечивается благодаря его повышенной влажности. На втором этапе, когда связующее наносится на поверхность полуфабриката с температурой 38...45 °С, активность образования связей молекул адгезива с молекулами целлюлозы, лигнина и гемицеллюлоз повышается. В конечном итоге, прочность клевого слоя уже при времени склеивания $\tau = 2,5$ мин. становится сопоставимой с показателями, полученными при традиционном пакетном способе.

Более высокие результаты прочности при скалывании, полученные при испытаниях фанеры, склеенной без промежуточной выдержки полуфабриката, вполне согласуются с выводами о негативном влиянии длительного хранения древесных материалов на их способность к смачиванию клеевыми составами [16, 35]. Кроме того, отмечается, что хорошей смачиваемости препятствует создаваемый при сушке шпона на его поверхности инактивированный слой [34].

После статистической обработки данных (см. табл. 1) по формуле (1) было определено значение общего среднего: $\bar{Y}_i = 1,28$ МПа и выполнена проверка однородности дисперсий на всех восьми уровнях. Расчетное значение критерия Кохрена $G_p = 0,214$.

Т а б л и ц а 1

**Основные статистические показатели определения прочности фанеры
при скалывании по клеевому слою**

Basic statistical indicators for determining the strength of plywood when shearing along the adhesive layer

Уровни фактора A		Значение выходной величины Y_{ij}	Среднее арифметиче- ское уровня $\bar{Y}_i$	Среднее ква- дратическое отклонение S_i	Дисперсия уровня S_i^2
Натуральное обозначение	Кодированное обозначение				
Способ 1	a_1	0,49; 0,55; 0,85; 0,87; 0,87; 0,89; 0,91; 0,95; 1,05; 1,26; 1,36; 1,38; 1,46; 1,48; 1,56; 1,62; 1,66; 1,68; 1,70; 1,70; 1,72; 1,72; 1,78; 1,83; 1,89; 2,07; 2,09; 2,13; 2,15; 2,17	1,46	0,486	0,239
Способ 2	a_2	0,59; 1,44; 0,85; 0,81; 1,48; 0,91; 1,09; 1,52; 0,93; 1,28; 1,58; 1,14; 1,58; 1,58; 1,18; 1,58; 1,66; 1,18; 1,66; 1,72; 1,18; 1,68; 1,78; 1,30; 2,07; 1,85; 1,50; 1,70; 1,93; 1,64	1,41	0,362	0,131
Способ 3	a_3	0,10; 0,14; 0,43; 0,24; 0,39; 0,49; 0,53; 0,43; 0,59; 0,59; 0,65; 0,59; 0,61; 0,65; 0,59; 0,73; 0,73; 0,67; 0,77; 0,81; 0,79; 0,83; 0,87; 0,89; 0,95; 0,91; 1,01; 0,91; 1,01; 1,12	0,67	0,253	0,064
Способ 4	a_4	0,63; 0,69; 0,59; 0,73; 0,73; 0,69; 0,77; 0,87; 0,89; 0,77; 0,89; 1,01; 0,91; 0,95; 1,22; 0,91; 0,91; 1,60; 0,91; 0,89; 0,87; 0,93; 0,89; 0,87; 0,99; 0,91; 0,91; 0,79; 0,99; 1,02	0,89	0,192	0,037
Способ 5	a_5	0,36; 0,37; 0,53; 0,45; 0,43; 0,77; 0,89; 0,91; 0,53; 0,79; 0,95; 0,97; 0,93; 0,91; 0,97; 1,85; 0,97; 0,97; 1,09; 1,89; 1,48; 0,99; 1,42; 1,89; 1,78; 1,48; 1,03; 0,05; 1,97; 1,02	1,02	0,505	0,255
Способ 6	a_6	0,93; 0,89; 0,95; 0,95; 0,91; 1,14; 1,01; 0,91; 1,80; 1,01; 0,91; 1,81; 1,03; 0,99; 1,78; 1,03; 1,03; 2,43; 1,16; 1,20; 2,62; 1,30; 1,30; 2,82; 1,54; 1,32; 2,84; 2,23; 1,44; 1,76	1,43	0,604	0,365
Способ 7	a_7	0,77; 0,97; 1,54; 0,79; 1,03; 1,60; 0,87; 1,12; 1,68; 0,91; 1,66; 1,72; 0,91; 1,74; 1,78; 0,91; 1,91; 2,21; 1,36; 1,97; 2,33; 1,48; 2,31; 2,86; 1,60; 2,49; 2,72; 2,03; 2,51; 2,23	1,67	0,615	0,378
Способ 8	a_8	0,93; 1,19; 1,70; 1,10; 2,47; 0,81; 1,22; 2,78; 0,85; 1,32; 2,92; 0,87; 1,36; 2,92; 1,03; 1,38; 3,04; 1,58; 1,50; 1,59; 1,60; 1,68; 1,97; 1,91; 1,68; 2,03; 1,91; 1,74; 2,13; 2,07	1,71	0,633	0,401

Табличное значение критерия Кохрена:

$$G_{T(q=0,05; f=30-1=29; m=8)} = 0,218.$$

Поскольку $G_p < G_T$, следует вывод, что дисперсии выборок (уровней фактора A) однородны.

Дисперсия фактора A и остаточная дисперсия, вычисленные по формулам (2) и (3) соответственно, составили: $S_A^2 = 4,288$ и $S_n^2 = 0,234$.

Проверка по критерию Фишера показала, что дисперсии не однородны, следовательно, способ получения фанеры значительно влияет на показатель прочности при скалывании по клеевому слою: расчетное значение критерия Фишера $F_p = 4,288/0,234 = 18,326$; табличное значение критерия Фишера $F_T(q=0,05; f_A=7; f_n=8(30-1)=232) = 2,01$, т. е. $F_p > F_T$.

Т а б л и ц а 2

Оценка значимости различий между уровнями варьирования факторов

Assessing the significance of differences between levels of variation of factors

Сравнение уровней	Критерий Фишера		Вывод о значимости различий
	Расчетный	Табличный	
a_1-a_2	0,450	2,002	Не значимы
a_1-a_3	7,861		Значимы
a_1-a_5	3,429		Значимы
a_1-a_6	0,211		Не значимы
a_1-a_8	1,712		Не значимы
a_3-a_5	3,394		Значимы
a_3-a_6	6,355		Значимы
a_6-a_8	1,752		Не значимы
a_5-a_8	4,666		Значимы

Затем была проведена проверка значимости различий между уровнями фактора A . Для этого попарно проверялась однородность средних арифметических значений прочности при скалывании на каждом уровне $\bar{Y}_i$ по критерию Стьюдента. Табличное значение критерия Стьюдента t_r определяется по уровню значимости $q = 0,05$ и числу степеней свободы $f = 2n - 2$ или $f = 58$. Если справедливо неравенство $t_p > t_r$, то различия между уровнями фактора A значимы, причем тем больше, чем больше значение t_p (табл. 2).

Попарное сравнение значимости различий показало, что применение на практике предлагаемого двухэтапного способа получения фанеры с использованием влажного шпона позволяет получить фанеру с требуемыми прочностными показателями. Наиболее значимые различия в показателе прочности фанеры при скалывании по клеевому слою наблюдаются при сравнении традиционного пакетного способа получения фанеры из сухого шпона с двухэтапным способом с промежуточным кондиционированием полуфабриката при времени прессования $\tau = 2,0$ мин. (a_1-a_3). При склеивании шпона без промежуточной выдержки полуфабриката различия в показателе прочности при скалывании по сравнению с пакетным способом не значимы при любом времени выдержки в прессе. С точки зрения получения фанеры в производственных условиях такой вариант (уровни a_6-a_8) следует признать наиболее предпочтительным, поскольку в этом случае, во-первых, не требуются дополнительные площади для организации промежуточной выдержки полуфабриката; во-вторых, по показателю

«прочность при скалывании по клеевому слою» полученная фанера превосходит продукцию, произведенную пакетным способом. Как видно из табл. 2, в этом случае время выдержки в прессе менее значимо влияет на прочность при скалывании, чем при наличии кондиционирования. Поэтому для дальнейших исследований выбран способ двухэтапного получения фанеры без промежуточной операции кондиционирования полуфабриката.

Выводы

1. Модификация фенолформальдегидных смол путем введения водных растворов ацетата меди, резорцина и резорцината меди позволяет при пониженной температуре прессования получить продукцию с показателем «предел прочности при статическом изгибе» не ниже 25,7 МПа, что соответствует требованиям ГОСТ 3916.1–2018. Применение в качестве модификатора ацетата меди предпочтительнее, поскольку в этом случае имеет место более высокая гидролитическая устойчивость материала и прочность при скалывании по клеевому слою.

2. Расчетный экономический эффект при производстве фанеры 100 тыс. м³/год на основе фенолформальдегидных смол, модифицированных раствором ацетата меди (2 мас. ч.) и раствором резорцина (2 мас. ч.) составит соответственно 22,5 и 2,6 млн руб.

3. Для снижения расходов на досушивание влажного шпона предложено в клеевую композицию на основе карбамидоформальдегидной смолы вводить модификатор — тригидрат алюминия $AlCl_3 \cdot 6H_2O$ в количестве 1 % массы смолы. Однако при этом прочность при скалывании по клеевому слою несколько снижается — на 3,42 %. Более эффективным является предложенный способ двухэтапного склеивания шпона. В ходе исследований доказано, что получение березовой фанеры с использованием влажного шпона на первом этапе при склеивании полуфабриката и последующего доклеивания сухим шпоном без промежуточной выдержки по сравнению с традиционным пакетным способом позволяет получить продукцию с более высокими прочностными показателями.

4. Возможной причиной отрицательного влияния промежуточной выдержки при использовании двухэтапного способа на прочностные показатели фанеры является частичное разрушение образовавшихся при поликонденсации карбамидоформальдегидного связующего связей в системе клей — древесина в процессе повторной обработки при доклеивании полуфабриката сухим шпоном.

Список литературы

- [1] Распоряжение Правительства Российской Федерации от 11.02.2021 г. №312–р «Об утверждении Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года». URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/400235155/?ysclid=lfhqs45tec576308195> (дата обращения 19.01.2026).
- [2] Sotayo A., Bradley D., Bather M., Sareh P., Oudjene M., El-Houjeyri I., Harte A.M., Mehra S., O’Ceallaigh C., Haller P., Namari S., Makradi A., Belouettar S., Bouhala L., Deneufbourg F., Guan Z. Review of state of the art of dowel laminated timber members and densified wood materials as sustainable engineered wood products for construction and building applications // *Dev Built Environ*, 2020, v. 1, p. 100004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2019.100004>
- [3] Wang T., Wang Y., Crocetti R., Wälinder M. In-plane mechanical properties of birch plywood // *Construction and Building Materials*, 2022, v. 340, p. 127852. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127852>
- [4] Vakhnina T.N., Fedotov A.A., Susoeva I.V., Rummyantseva V.E. Plywood and Thermal Insulation Boards Based on the Modified Phenol Formaldehyde Binder // *Russian Forestry J.*, 2022, № 1, pp. 155–165. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-155-165
- [5] Государственная программа Российской Федерации «Обеспечение доступным и комфортным жильем и коммунальными услугами граждан Российской Федерации». Постановление Правительства Российской Федерации № 1710 от 30.12. 2017 г. М., 157 с. URL: <http://government.ru/docs/all/115063/> (дата обращения 20.01.2026).
- [6] Проблемы и перспективы развития промышленности России: Материалы XIII Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 20 апреля 2023 года / под ред. А.В. Быстрова. М.: Русайнс, 2023. 196 с.
- [7] Назаренко И.Н., Назаренко М.В. Состояние и перспективы развития фанерного производства // *Управленческий учет*, 2022. № 1–2. С. 299–310. <https://doi.org/10.25806/uu1-22022299-310>
- [8] Пономаренко Л.В., Кантиева Е.В., Мануковский А.Ю., Пузанова О.А., Елизаров Ю.М. Мониторинг предела прочности на растяжение лущеного шпона и фанеры некоторых лиственных пород // *Системы. Методы. Технологии*, 2023. № 4(60). С. 117–123. <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2023-4-117-123>
- [9] Чубинский А.Н., Русаков Д.С., Варанкина Г.С., Соколова Е.Г., Русакова Л.Н. Совершенствование технологии фанеры // *Леса России: политика, промышленность, наука, образование: Материалы Всерос. V науч.-техн. конф.-вебинара*. Санкт-Петербург, 16–18 июня 2020 года. Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова. СПб.: Политех-Пресс, 2020. С. 289–291.
- [10] Dorieh A., Selakjani P.P., Shahavi M.H., Pizzi A., Movahed S.G., Pour M.F., Aghaei R. Recent developments in the performance of micro-nanoparticlemodified urea-formaldehyde resins used as wood-based composite binders: A review // *International J. of Adhesion and Adhesives*, 2022, v. 114, p. 103106. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2022.103106>
- [11] Antov P., Lee S., Lubis M.A.R., Yadav S.M. Potential of Nanomaterials in Bio-Based Wood Adhesives: An Overview // *Emerging Nanomaterials*. Springer, Cham, 2023, pp. 25–63. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-17378-3_2
- [12] Леонович А.А., Захаров С.С. Модифицирование шпона амидофосфатом для изготовления огнезащитной водостойкой фанеры // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*, 2019. № 227. С. 260–270. DOI: 10.21266/2079-4304.2019.227.260-270
- [13] Engelhardt M., Böger T., Gigl M., Chen M., Soprunyuk V., Schranz W., Richter K., Sánchez-Ferrer A. Interactions of hydrophilic birch wood (*Betula pendula* Roth) extractives with adhesives for load-bearing timber structures // *International J. of Adhesion and Adhesives*, 2023, v. 125, p. 103447. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2023.103447
- [14] Перехожих Г.И., Лазарева А.Д., Коршунова Н.П., Петри В.Н. Получение пластика из древесины березы с ложным ядром // *Технология древесных плит и пластиков: межвузовский сб.; Уральский лесотехнический институт им. Ленинского комсомола*. 1979. Вып. VI. С. 49–54.
- [15] Криворотова А.И. Исследование адгезионного взаимодействия жидкого клея с древесиной: дис. ... канд. техн. наук, 05.21.05. Красноярск, 1999, 144 с.
- [16] Русаков Д.С., Варанкина Г.С., Чубинский А.Н. Теоретическое и экспериментальное обоснование характера взаимодействия модифицированных связующих с древесиной // *ИзВУЗ Лесной журнал*, 2022. № 6(390). С. 153–163. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-6-153-163>
- [17] Sedliacik J., Bekhta P., Potapova O. Technology of low-temperature production of plywood bonded with modified phenol–formaldehyde resin // *Wood research*, 2010, v. 55(4), pp. 124–130.
- [18] Шишлов О.Ф., Баулина Н.С., Глухих В.В. Влияние отвердителей на кинетику отверждения резольных фенолкарданолформальдегидных смол // *Вестник Казанского технологического университета*, 2012. Т. 15. № 6. С. 38–41.
- [19] Mirski R., Dziurka D., Lecka J. Potential of shortening pressing time or reducing pressing temperature for plywood resinated with PF resin modified using alcohols and esters // *European J. of Wood and Wood Products*, 2011, v. 69, no. 2, pp. 317–323. DOI: 10.1007/s00107-010-0436-8
- [20] Wang X.M., Riedl B., Christiansen A.W., Geimer R.L. The effects of temperature and humidity on phenol-formaldehyde resin bonding // *Wood Science and Technology*, 1995, v. 29(4), pp. 253–266.
- [21] Miyazaki J., Hirabayashi Y. Effect of the addition of *Acacia mangium* bark on thermosetting of phenol-formaldehyde resin // *Wood Sci Technology*, 2011, v. 45, pp. 449–460. DOI: 10.1007/s00226-010-0342-6
- [22] Hoong Y.B., Paridah M.T., Luqman C.A., Koh M.P., Loh Y.F. Fortification of sulfited tannin from the bark of *Acacia mangium* with phenol-formaldehyde for use as plywood adhesive // *Industrial Crops and Products*, 2009, v. 30, pp. 416–421. DOI: 10.1016/j.indcrop.2009.07.012
- [23] Valyova M., Ivanova Y. Modified phenol-phormaldehyde resins used for plywood gluing // *International J. – Wood, Design & Technology*, 2015, v. 4, no. 1, pp. 35–38.

- [24] Rusakov D.S., Varankina G.S., Chubinskii A.N. Modification of Phenol- and Carbamide-Formaldehyde Resins by Cellulose By-products // *Polymer Science, Series D*, 2018, v. 11, no. 1, pp. 33–38. DOI: 10.1134/S1995421218010185
- [25] Русаков Д.С., Варанкина Г.С., Чубинский А.Н. Модификация фенолоформальдегидных смол отходами производства алюминия и целлюлозы // *ИзВУЗ Лесной журнал*, 2019. № 2. С. 130–140. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.2.130
- [26] Варанкина Г.С., Чубинский А.Н. Формирование низкотоксичных клееных древесных материалов. СПб.: Химиздат, 2014. 148 с.
- [27] Чумак К.А., Титунин А.А. Технологические аспекты двухэтапного способа получения фанеры с использованием влажного шпона // *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии*, 2024. № 3(31). С. 69–79. <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2024.3.69>
- [28] Кноп А., Шейб В. Фенольные смолы и материалы на их основе / под ред. Ф.А. Шутова. М.: Химия, 1983. 280 с.
- [29] Berdnikova P., Zhizhina E.G., Pai Z.P. Phenol-formaldehyde resins: properties, fields of application, and methods of synthesis // *Catalysis in Industry*, 2021, v. 13, pp. 119–124. <https://doi.org/10.1134/S2070050421020033>
- [30] Угрюмов С.А., Свешников А.С. Оценка адгезионной прочности и межфазного взаимодействия в структуре фанеры с внутренними слоями из древесно-клеевой композиции // *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование*, 2014. № 1(21). С. 53–68.
- [31] Израелит А.Б., Денисов С.В. Теоретическое исследование напряженно-деформационного состояния фанеры после склеивания влажного шпона в вакуумных прессах // *Технология и оборудование деревообрабатывающих производств*, 1982. № 11. С. 37–41.
- [32] Бехта П.А., Потапова О.А., Седлячик Я. Клеевые композиции для низкотемпературного склеивания шпона в производстве фанеры // *Наукові праці Лісівничої академії наук України*, 2009. № 7. С. 131–133.
- [33] Плотникова Н.П., Трошкин С.Н. Обоснование выбора модифицирующих веществ для склеивания шпона повышенной влажности // *Системы. Методы. Технологии*, 2017. № 1(33). С. 107–113. DOI 10.18324/2077-5415-2017-1-107-113
- [34] Мурзин В.С., Ищенко Т.Л., Лавлинская О.В. Исследование смачиваемости поверхности шпона и других композиционных материалов // *Лесотехнический журнал*, 2012. № 3(7). С. 14–20.
- [35] Побединский А.А., Побединский В.В., Кокошин С.Н. Особенности технологии и параметры фанеры из шпона, полученного различными методами лущения // *Хвойные бореальной зоны*, 2020. Т. XXXVIII. № 5-6. С. 311–317.

Сведения об авторах

Чумак Ксения Александровна — аспирант, ФГБОУ ВО «Костромской государственный университет», ksusha.strugova93@yandex.ru

Титунин Андрей Александрович — д-р техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Костромской государственный университет», a_titunin@kosgos.ru

Вахнина Татьяна Николаевна — канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Костромской государственный университет», t_vachnina@mail.ru

Федотов Александр Андреевич — канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Костромской государственный университет», aafedotoff@yandex.ru

Сусоева Ирина Вячеславовна — д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Костромской государственный университет», i.susoeva@yandex.ru

Поступила в редакцию 04.02.2026.

Одобрено после рецензирования 14.05.2026.

Принята к публикации 24.09.2026.

INFLUENCE OF METHODS FOR PRODUCING BIRCH PLYWOOD USING WET VENEER ON ADHESIVE INTERACTION IN GLUE-WOOD SYSTEM

K.A. Chumak, A.A. Titunin[✉], T.N. Vakhnina,
A.A. Fedotov, I.V. Susoeva

Kostroma State University, 17/11, Dzerzhinsky st., 156005, Kostroma, Russia

ksusha.strugova93@yandex.ru

This article examines areas for improving birch plywood production technology to reduce costs and ensure product competitiveness. It is shown that domestic plywood manufacturers primarily strive to reduce energy consumption by using modified resins and implementing low-temperature veneer pressing techniques. However, localized delamination or «blisters» that form within the plywood package due to excessive vapor-gas mixture pressure cannot be completely eliminated. Given the prospects for plywood production and consumption, including for industrial wood housing construction, research into further improving methods for producing plywood of the required quality is relevant. This article examines one of the key quality indicators of birch plywood — its strength. The results of a laboratory analysis of the relationship between veneer gluing modes and the adhesion strength between veneer layers are presented. During the experimental studies, five-layer plywood was manufactured from 1,5 mm thick rotary-cut birch veneer. Two types of resins, most commonly used in domestic plywood factories — resole phenol-formaldehyde resin and urea-formaldehyde resin — were used for gluing the veneer. In the first stage, modifying additives were added to the phenol-formaldehyde resin to reduce the pressing temperature: copper acetate $(CH_3COO)_2Cu$, resorcinol $C_6H_4(OH)_2$, and copper resorcinate $Cu(C_6H_5O_2)_2$. It was found that modifying the binder with copper salts increases its hydrolytic stability and the number of spatial bonds in the structure of the cured binder. This makes it possible to reduce the pressing temperature below 100 °C. At the second stage of the research, a two-stage method of hot gluing birch veneer was considered, which, according to the authors, allows the use of veneer with a moisture content of $W = 11–12\%$ and eliminates the costs of drying it to a moisture content of $W = 6\%$ in production conditions.

Keywords: adhesive strength, birch peeled veneer, adhesion

Suggested citation: Chumak K.A., Titunin A.A., Vakhnina T.N., Fedotov A.A., Susoyeva I.V. *Vliyaniye sposobov polucheniya berezovoy fanery s ispol'zovaniyem vlazhnogo shpona na adgezionnoye vzaimodeystviye v sisteme kley — drevesina* [Influence of methods for producing birch plywood using wet veneer on adhesive interaction in glue — wood system]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2026, vol. 30, no. 5, pp. 94–105. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-5-94-105

References

- [1] *Rasporyazheniye Pravitel'stva RF ot 11.02.2021g. №312–r Ob utverzhdenii Strategii razvitiya lesnogo kompleksa Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda* [Order of the Government of the Russian Federation dated February 11, 2021 No. 312–r On approval of the Strategy for the Development of the Forest Complex of the Russian Federation until 2030] Available at: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/400235155/?ysclid=lfhqs45tec576308195> (accessed 19.01.2026).
- [2] Sotayo A., Bradley D., Bather M., Sareh P., Oudjene M., El-Houjeiry I., Harte A.M., Mehra S., O'Ceallaigh C., Haller P., Namari S., Makradi A., Belouettar S., Bouhala L., Deneufbourg F., Guan Z. Review of state of the art of dowel laminated timber members and densified wood materials as sustainable engineered wood products for construction and building applications. *Dev Built Environ*, 2020, v. 1, p. 100004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2019.100004>
- [3] Wang T., Wang Y., Crocetti R., Wålinder M. In-plane mechanical properties of birch plywood. *Construction and Building Materials*, 2022, v. 340, p. 127852. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127852>
- [4] Vakhnina T.N., Fedotov A.A., Susoeva I.V., Rumyantseva V.E. Plywood and Thermal Insulation Boards Based on the Modified Phenol Formaldehyde Binder // *Russian Forestry J.*, 2022. № 1. C. 155–165. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-155-165
- [5] *Gosudarstvennaya programma RF «Obespecheniye dostupnym i komfortnym zhil'yem i kommunal'nyimi uslugami grazhdan Rossiyskoy Federatsii». Postanovleniye Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii № 1710 ot 30.12. 2017 g.* [State Program of the Russian Federation «Providing Citizens of the Russian Federation with Affordable and Comfortable Housing and Public Utilities». Resolution of the Government of the Russian Federation no. 1710 of December 30, 2017], p. 157.

- [6] *Problemy i perspektivy razvitiya promyshlennosti Rossii: sb. mater. XIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Problems and Prospects for the Development of Industry in Russia: Proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference], Moscow, April 20, 2023. Ed. A.V. Bystrov. Moscow: Rusains, 2023, p.196.
- [7] Nazarenko I.N., Nazarenko M.V. *Sostoyanie i perspektivy` razvitiya fanernogo proizvodstva* [State and development prospects of plywood production]. *Upravlencheskiy uchët* [Management accounting], 2022, no. 1–2, pp. 299–310. <https://doi.org/10.25806/uu1-22022299-310>
- [8] Ponomarenko L.V., Kantieva E.V., Manukovskiy A.Yu., Puzanova O.A., Elizarov Yu.M. *Monitoring predela prochnosti na rastyazhenie lushchenogo shpona i fanery nekotorykh listvennykh porod* [Monitoring the Tensile Strength of Rotary Cut Veneer and Plywood of Certain Hardwood Species]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2023, no. 4(60), pp. 117–123. <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2023-4-117-123>
- [9] Chubinsky A.N., Rusakov D.S., Varankina G.S., Sokolova E.G., Rusakova L.N. *Sovershenstvovanie texnologii fanery* [Improving plywood technology]. *Lesa Rossii: politika, promyshlennost`, nauka, obrazovanie: materialy` Vserossiyskoy V nauchno-texnicheskoy konferentsii-vebinara*. [Forests of Russia: policy, industry, science, education: materials of the V All-Russian scientific and technical conference-webinar]. St. Petersburg, June 16–18, 2020. St. Petersburg: State Forest Engineering University named after S.M. Kirov. St. Petersburg: Polytech-Press, 2020, pp. 289–291.
- [10] Dorieh A., Selakjani P.P., Shahavi M.H., Pizzi A., Movahed S.G., Pour M.F., Aghaei R. Recent developments in the performance of micro-nanoparticlemodified urea-formaldehyde resins used as wood-based composite binders: A review. *International J. of Adhesion and Adhesives*, 2022, v. 114, p. 103106. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2022.103106>
- [11] Antov P., Lee S., Lubis M.A.R., Yadav S.M. Potential of Nanomaterials in Bio-Based Wood Adhesives: An Overview. *Emerging Nanomaterials*. Springer, Cham, 2023, pp. 25–63. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-17378-3_2
- [12] Leonovich A.A., Zakharov S.S. *Modifitsirovanie shpona amidofosfatom dlya izgotovleniya ognезashchishchennoy vodostoykoy fanery* [Modification of veneer with amidophosphate for the production of fire-protected waterproof plywood]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [Bulletin of the St. Petersburg Forest Engineering Academy], 2019, no. 227, pp. 260–270. DOI: 10.21266/2079-4304.2019.227.260-270
- [13] Engelhardt M., Böger T., Gigl M., Chen M., Soprunyuk V., Schranz W., Richter K., Sánchez-Ferrer A. Interactions of hydrophilic birch wood (*Betula pendula* Roth) extractives with adhesives for load-bearing timber structures. *International J. of Adhesion and Adhesives*, 2023, v. 125, p. 103447. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2023.103447
- [14] Perekhovich G.I., Lazareva A.D., Korshunova N.P., Petri V.N. *Poluchenie plastika iz drevesiny berezy s lozhnym yadrom* [Production of plastic from birch wood with a false core]. *Tekhnologiya drevesnykh plit i plastikov: mezhvuzovskiy sbornik* [Technology of wood panels and plastics: interuniversity collection]. Ural'skiy lesotekhnicheskii institut im. Leninskogo komsomola. [Ural Forest Engineering Institute named after Lenin Komsomol], 1979, iss. VI, pp. 49–54.
- [15] Krivorotova A.I. *Issledovanie adgezionnogo vzaimodeystviya zhidkogo kleya s drevesinoy* [Study of adhesive interaction of liquid glue with wood]. *Dis. Cand. Sci. (Tech.)*, 05.21.05. Krasnoyarsk, 1999, 144 p.
- [16] Rusakov D.S., Varankina G.S., Chubinsky A.N. *Teoreticheskoe i eksperimental'noe obosnovanie kharaktera vzaimodeystviya modifitsirovannykh svyazuyushchikh s drevesinoy* [Theoretical and experimental substantiation of the nature of the interaction of modified binders with wood]. *Russian Forestry J.*, 2022, no. 6 (390), p. 153–163. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-6-153-163>
- [17] Sedliacik J., Bekhta P., Potapova O. Technology of low-temperature production of plywood bonded with modified phenol-formaldehyde resin. *Wood research*, 2010, v. 55(4), pp. 124–130.
- [18] Shishlov O.F., Baulina N.S., Glukhikh V.V. *Vliyaniye otverditeley na kinetiku otverzheniya rezol'nykh fenolkardanolformal'degidnykh smol* [Influence of hardeners on the kinetics of curing of resol phenol-cardanol-formaldehyde resins]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan Technological University], 2012, v. 15, no. 6, pp. 38–41.
- [19] Mirski R., Dziurka D., Lecka J. Potential of shortening pressing time or reducing pressing temperature for plywood resinated with PF resin modified using alcohols and esters. *European J. of Wood and Wood Products*, 2011, v. 69, no. 2, pp. 317–323. DOI: 10.1007/s00107-010-0436-8
- [20] Wang X.M., Riedl B., Christiansen A.W., Geimer R.L. The effects of temperature and humidity on phenol-formaldehyde resin bonding. *Wood Science and Technology*, 1995, v. 29(4), pp. 253–266.
- [21] Miyazaki J., Hirabayashi Y. Effect of the addition of Acacia mangium bark on thermosetting of phenol-formaldehyde resin. *Wood Sci Technology*, 2011, v. 45, pp. 449–460. DOI: 10.1007 / s00226-010-0342-6
- [22] Hoong Y.B., Paridah M.T., Luqman C.A., Koh M.P., Loh Y.F. Fortification of sulfited tannin from the bark of Acacia mangium with phenol-formaldehyde for use as plywood adhesive. *Industrial Crops and Products*, 2009, v. 30, pp. 416–421. DOI:10.1016/j.indcrop.2009.07.012
- [23] Valyova M., Ivanova Y. Modified phenol-phormaldehyde resins used for playwood gluing. *International J. – Wood, Design & Technology*, 2015, v. 4, no. 1, pp. 35–38.
- [24] Rusakov D.S., Varankina G.S., Chubinskii A.N. Modification of Phenol- and Carbamide-Formaldehyde Resins by Cellulose By-products. *Polymer Science, Series D*, 2018, v. 11, no. 1, pp. 33–38. DOI: 10.1134/S1995421218010185
- [25] Rusakov D.S., Varankina G.S., Chubinsky A.N. *Modifikatsiya fenoloformal'degidnykh smol otkhodami proizvodstva alyuminiya i tsellyulozy* [Modification of phenol-formaldehyde resins with waste from aluminum and cellulose production]. *Russian Forestry J.*, 2019, no. 2, pp. 130–140. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.2.130
- [26] Varankina G.S., Chubinsky A.N. *Formirovanie nizkotoksichnykh kleennykh drevesnykh materialov* [Formation of low-toxic glued wood materials]. St. Petersburg: Khimizdat, 2014, 148 p.
- [27] Chumak K.A., Titunin A.A. *Tekhnologicheskie aspekty dvukhetapnogo sposoba polucheniya fanery s ispol'zovaniem vlazhnogo shpona* [Technological aspects of a two-stage method for producing plywood using wet veneer]. *Vestnik*

- Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Materialy. Konstruktsii. Tekhnologii [Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Materials. Designs. Technologies], 2024, no. 3(31), pp. 69–79. <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2024.3.69>
- [28] Knop A., Sheib V. *Fenol'nye smoly i materialy na ikh osnov* [Phenolic resins and materials based on them]. Ed. F.A. Shutov. Moscow: Chemistry, 1983, 280 p.
- [29] Berdnikova P., Zhizhina E.G., Pai Z.P. Phenol-formaldehyde resins: properties, fields of application, and methods of synthesis. *Catalysis in Industry*, 2021, v. 13, pp. 119–124. <https://doi.org/10.1134/S2070050421020033>
- [30] Ugryumov S. A., Sveshnikov A. S. *Otsenka adgezionnoy prochnosti i mezhfaznogo vzaimodeystviya v strukture fanery s vnutrennimi sloyami iz drevesno-kleevoy kompozitsii* [Evaluation of adhesive strength and interphase interaction in the structure of plywood with inner layers of wood-glue composite] *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser. Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* [Bulletin of the Volga Region State Technological University. Series: Forest. Ecology. Nature Management], 2014, no. 1(21), pp. 53–68.
- [31] Izraelite A.B., Denisov S.V. *Teoreticheskoe issledovanie napryazhenno-deformatsionnogo sostoyaniya fanery posle skleivaniya vlazhnogo shpona v vakuumnykh pressakh* [Theoretical study of the stress-strain state of plywood after gluing wet veneer in vacuum presses] *Tekhnologiya i oborudovanie derevoobrabatyvayushchikh proizvodstv* [Technology and equipment for woodworking industries], 1982, no. 11, pp. 37–41.
- [32] Bekhta P.A., Potapova O.A., Sedlyachik Y. *Kleevye kompozitsii dlya nizkotemperaturnogo skleivaniya shpona v proizvodstve fanery* [Adhesive compositions for low-temperature gluing of veneer in plywood production] *Naukovi pratsi Lisivnichoi akademii nauk Ukraini* [Sciences of the Lisovnyh Academy of Sciences of Ukraine], 2009, no. 7, pp. 131–133.
- [33] Plotnikova N.P., Troshkin S.N. *Obosnovanie vybora modifitsiruyushchikh veshchestv dlya skleivaniya shpona povyshennoy vlazhnosti* [Justification of the choice of modifying substances for gluing veneer with high humidity]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2017, no. 1(33), pp. 107–113. DOI 10.18324/2077-5415-2017-1-107-113
- [34] Murzin V.S., Ishchenko T.L., Lavlinskaya O.V. *Issledovanie smachivaemosti poverkhnosti shpona i drugikh kompozitsionnykh materialov* [Study of wettability of the surface of veneer and other composite materials] *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Journal], 2012, no. 3(7), pp. 14–20.
- [35] Pobedinsky A.A., Pobedinsky V.V., Kokoshin S.N. *Osobennosti tekhnologii i parametry fanery iz shpona, poluchennogo razlichnymi metodami lushcheniya* [Features of technology and parameters of plywood from veneer obtained by various peeling methods]. *Khvoynye boreal'noy zony* [Conifers of the boreal zone], 2020, v. XXXVIII, no. 5–6, pp. 311–317.

Authors' information

Chumak Kseniya Aleksandrovna — pg. of the Kostroma State University, ksusha.strugova93@yandex.ru

Titunin Andrey Aleksandrovich — Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Kostroma State University, a_titunin@kosgos.ru

Vakhnina Tat'yana Nikolaevna — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Kostroma State University, t_vachnina@mail.ru

Fedotov Aleksandr Andreevich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Kostroma State University, aafedotoff@yandex.ru

Susoeva Irina Vyacheslavovna — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the Kostroma State University, i.susoeva@yandex.ru

Received 04.02.2026.

Approved after review 14.05.2026.

Accepted for publication 24.09.2026.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

The authors declare that there is no conflict of interest