

Способы модификации и исследование физико-механических свойств термомодифицированной древесины

С.Г. Партенадзе^{1a}, Д.С. Русаков^{1b}, Г.С. Варанкина^{1c}, Ар.А. Федяев^{1d}, М.В. Степанищева^{2e}

¹ Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, пер. Институтский, 5, Санкт-Петербург, Россия

² Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

^a tdp@spbftu.ru, ^b dima-ru25@mail.ru, ^c varagalina@yandex.ru, ^d art_fedyaev@mail.ru, ^e marina01031977@inbox.ru

^a <https://orcid.org/0009-0009-6174-7988>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-4344-2779>,

^c <https://orcid.org/0000-0003-3470-5124>, ^d <https://orcid.org/0000-0001-8036-7432>,

^e <https://orcid.org/0000-0003-4867-3901>

Статья поступила 03.04.2026, принята 29.04.2026

Модификация древесины включает в себя изменение свойств древесины, главным образом химическими, биологическими или физическими методами. Крайне важно, чтобы модифицированная древесина была нетоксичной и не содержала токсичных веществ во время использования, утилизации или переработки. Химическая модификация, направленная на улучшение устойчивости древесины к гниению, морским организмам и термитам, а также на повышение размерной стабильности, огнестойкости зависит от эффективного распределения пропитанных химикатов в доступных для воды областях клеточной стенки. Многочисленные исследования показали, что обработка фурфурированием улучшает размерную стабильность древесины в условиях изменяющейся влажности. Этот процесс также снижает равновесное содержание влаги древесины примерно до половины по сравнению с необработанной древесиной при определённом уровне влажности. Фурфурирование, в отличие от ацетилирования, увеличивает объём клеточной стенки древесины без потребления гидроксильных групп. Для обоснования и выбора эффективного способа модификации древесины использовали образцы породы сосна. Термическая модификация улучшает устойчивость древесины к грибковому гниению за счёт снижения потери массы после воздействия грибков. Параметры процесса термомодификации, такие как температура, продолжительность и потеря массы, влияют на устойчивость к гниению и её долговечность, хотя некоторые механические свойства могут ухудшиться. Порода древесины также влияет на устойчивость термически модифицированной древесины к гниению. Полученные данные свидетельствуют об эффективности применения для защиты древесины от огневого воздействия состава на основе моноэтаноламина, оксиэтилидендифосфоновой кислоты и воды. Высокая прочность клеевого соединения при склеивании антипирированной древесины фенолоформальдегидной смолой холодного отверждения достигается в результате образования химических связей при взаимодействии тройной аминовой соли со свободными фенольными гидроксильными группами фенолоформальдегидной смолы.

Ключевые слова: термомодификация древесины; антипирирование древесины; химическая модификация древесины; фурфурирование; антипирен; древесина породы сосна; прочность древесины.

Modification methods and study of the physical and mechanical properties of thermally modified wood

S.G. Partenadze^{1a}, D.S. Rusakov^{1b}, G.S. Varankina^{1c}, Ar.A. Fedyaev^{1d}, M.V. Stepanishcheva^{2e}

¹ St. Petersburg State Forestry University; 5, Institutsky Lane, St. Petersburg, Russia

² Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

^a tdp@spbftu.ru, ^b dima-ru25@mail.ru, ^c varagalina@yandex.ru, ^d art_fedyaev@mail.ru, ^e marina01031977@inbox.ru

^a <https://orcid.org/0009-0009-6174-7988>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-4344-2779>,

^c <https://orcid.org/0000-0003-3470-5124>, ^d <https://orcid.org/0000-0001-8036-7432>,

^e <https://orcid.org/0000-0003-4867-3901>

Received 03.04.2026, accepted 29.04.2026

Wood modification involves altering the properties of wood, primarily through chemical, biological, or physical methods. It is crucial that modified wood is non-toxic and contains no toxic substances during use, disposal, or processing. Chemical modification, aimed at improving wood resistance to decay, marine organisms, and termites, as well as increasing dimensional stability and fire resistance, depends on the efficient distribution of impregnated chemicals in water-accessible areas of the cell wall. Numerous studies have shown that furfurylation treatment improves the dimensional stability of wood under fluctuating moisture conditions. This process also reduces the equilibrium moisture content of wood to approximately half that of untreated wood at a given moisture level. Furfurylation, unlike acetylation, increases the volume of wood cell walls without consuming hydroxyl groups. Pine samples have been used to validate and select an effective wood modification method. Thermal modification improves wood resistance to fungal decay by reducing weight loss after fungal attack. Thermal modification process parameters, such as temperature, duration, and mass loss, affect rot resistance and durability, although some mechanical properties may be degraded. Wood species also influences the rot resistance of thermally modified wood. The data obtained demonstrate the effectiveness of a composition based on monoethanolamine, oxyethylidenediphosphonic

acid, and water for protecting wood from fire. High adhesive bond strength when bonding fire-retarded wood with cold-curing phenol-formaldehyde resin is achieved through the formation of chemical bonds between the triple amine salt and the free phenolic hydroxyl groups of the phenol-formaldehyde resin.

Keywords: thermal modification of wood; wood fire retardation; chemical modification of wood; furfurylation; fire retardant; pine wood; wood strength.

Введение. Древесина имеет анатомическое строение [1]. Поперечный разрез древесины позволяет детально рассмотреть её структуру от сердцевины до коры в радиальном и тангенциальном направлениях [2]. Древесина подразделяется на сердцевину, ядро, заболонь, сосудистый камбий и кору [3].

Клеточная стенка древесины состоит из двух основных частей: первичной клеточной стенки, которая обеспечивает расширение клеток, и последующих вторичных клеточных стенок, которые существенно влияют на свойства клетки и древесины [1–3]. Содержание лигнина наиболее высоко в первичной клеточной стенке и срединной пластинке, уменьшаясь по направлению к просвету во вторичных клеточных стенках [1]. Самая толстая часть клеточной стенки существенно влияет на общие свойства древесины [1–3]. Древесина представляет собой композит из целлюлозы, гемицеллюлоз и лигнина с небольшим количеством экстрактивных веществ и минералов. Она в основном состоит из полисахаридов (65–75 %) и лигнина (18–35 %). Химический состав варьируется в зависимости от породы древесины, с разницей в содержании целлюлозы, лигнина и пентозанов [1]. Целлюлоза представляет собой линейный гомополимер с высокой молекулярной массой, она состоит из D-глюкопиранозных единиц, связанных вместе β -(1 → 4)-гликозидными связями. В древесине целлюлоза имеет среднюю степень полимеризации (СП) около 10 000 [2]. Молекулы целлюлозы связываются, образуя микрофибриллы с высокоупорядоченными кристаллическими областями, достигая плотности до 65 %. Древесная целлюлоза различается по доступности для воды и микроорганизмов. Поверхности кристаллической целлюлозы доступны, но внутренняя часть – нет. Некристаллическая целлюлоза покрывается и становится недоступной для лигнина и гемицеллюлозы. Понимание доступности целлюлозы имеет решающее значение для её химической модификации, сорбции влаги и взаимодействия с микроорганизмами [4, 5], некоторые нерешённые вопросы в этой области научных знаний позволили сформулировать общую концепцию и методологию настоящей работы.

Модификация древесины

Древесина, будучи гетерогенным и анизотропным материалом, различается по химическому составу, распределению и клеточной структуре. Эти свойства обуславливают различные механические характеристики, разную устойчивость к естественному разрушению, а также различную степень разбухания и усадки. Необходимость повышения долговечности и стабильности недолговечных пород древесины, особенно при воздействии внешних факторов, привела к растущей тенденции к использованию безбицидных технологий, основанных на модификациях древесины, таких как термическая обработка и химическая модификация, в последние два десятилетия [6].

Модификация (как метод) может быть активной или пассивной, при этом активные методы изменяют химическую структуру. Важно гарантировать отсутствие опасных остатков (в том числе промышленных отходов и следов) после процесса модификации, даже если в ходе модификации использовались опасные химические добавки и вещества [7].

Модификация древесины включает четыре основные категории: термическую, химическую, пропитку и поверхностную модификацию. Однако в данной статье основное внимание будет уделено термической обработке, химической модификации и пропитке.

Термическая модификация древесины

Нагревая древесину до определённых температур, можно изменить её свойства, сделав её менее гигроскопичной, изменив цвет и повысив её устойчивость к атмосферным воздействиям, размерную стабильность и устойчивость к дереворазрушающим грибкам [8–11]. Однако этот процесс может привести к некоторой потере механической прочности [12]. Различные используемые технологии различаются по своим конкретным условиям и этапам, таким как пиковая температура, продолжительность процесса, природа теплоносителя, что может существенно повлиять на конечный результат [13].

Исследования проводились при различных уровнях давления, включая атмосферное и более высокое [14–16]. Для термической модификации используются различные среды, такие как горячее масло, инертные газы и пар [17]. Например, в процессе термообработки древесины используется перегретый пар. Давление ниже атмосферного может быть необходимо для удаления летучих органических соединений, но оно может препятствовать передаче тепла к древесине. Эффективные системы конвективного нагрева [18] или кондуктивные нагревательные плиты могут решить эту проблему [19].

Среди полимеров древесины гемицеллюлоза отличается высокой чувствительностью к повышению температуры при термической модификации [20]. Разложение полимера гемицеллюлозы приводит к выделению уксусной кислоты, которая ускоряет дальнейшее разрушение полисахаридов клеточной стенки [21].

Термическая модификация значительно снижает способность древесины поглощать влагу [22]. Это снижение обусловлено уменьшением количества доступных для воды гидроксильных (ОН) групп в результате химических изменений, происходящих в ходе процесса [23]. Кроме того, повышенная сшивка лигново-углеводных комплексов ограничивает способность древесины поглощать воду между цепями целлюлозы [24].

Термически модифицированная древесина имеет улучшенную размерную стабильность по сравнению с необработанной древесиной из-за уменьшения набухания, что можно объяснить структурными изменениями

ями, изменениями в комплексах лигнин–углевод и эффектом увеличения объёма, вызванным заполнением микропор клеточных стенок побочными продуктами термической дегградации [25].

Механические свойства древесины, как правило, снижаются в термически модифицированной древесине. Частично снижается прочность на растяжение, а затем прочность на сдвиг и сжатие [26]. Если потеря массы составляет менее 20 %, прочность на изгиб может снизиться на 50–60 % от исходного значения [27]. Снижение гигроскопичности термически модифицированной древесины может частично компенсировать снижение прочности [28–30]. Модуль упругости минимально подвержен влиянию термической модификации, а в некоторых случаях может даже иметь более высокое значение, чем исходный из-за повышенной жёсткости древесины.

Химическая модификация древесины

Химическая модификация, направленная на улучшение устойчивости древесины к гниению, морским организмам и термитам, а также на повышение размерной стабильности, огнестойкости зависит от эффективного распределения пропитанных химикатов в доступных для воды областях клеточной стенки. Крайне важно, чтобы химикаты, модифицирующие древесину, были способны увеличить размеры клеточных стенок древесины, облегчая проникновение и реакцию с гидроксильными группами полимера клеточной стенки древесины при температурах не выше 120 °С. К ним относятся этерификация, образование ацеталей, метод акрилонитрила и эпоксидов. Улучшенная размерная стабильность и биологическая стойкость модифицированной древесины обычно достигаются с помощью методов химической модификации.

Фурфурирование

Полученный из гидролизованной биомассы фурфуриловый спирт (ФА) служит основным возобновляе-

мым агентом для фурфурирования древесины. По сути, ключевые характеристики фурфурированной древесины зависят от удержания и полимеризации ФА в структуре древесины. Фурфурирование древесины, первоначально разработанное в 1950-х годах, со временем развивалось. Изначально исследователи использовали хлорид цинка в качестве катализатора, но это вызвало проблемы с дегградацией целлюлозы и неравномерной обработкой. С тех пор в качестве заменяющего катализатора был предложен малеиновый ангидрид. В исследованиях также изучалось использование лимонной кислоты и других слабых кислот в качестве инициаторов фурфурирования [31].

Для конкурентного использования были предприняты усилия по минимизации стоимости фурфурирования, например, путём использования танинов гуминов, полученных из биомассы растений, прошедших биорегенерацию, в качестве альтернативы ФА, что требует менее жёстких условий отверждения, а также путём использования метода фурфурирования в газовой фазе для эффективной полимеризации ФА в клеточных стенках древесины [31]. Кроме того, использование определённых веществ в процессе фурфурирования приводит к получению менее хрупкого продукта механической обработки фурфурированной древесины, что представляет собой ещё одно усовершенствование, которое можно применить к этой существующей технологии фурфурирования.

Методика исследования. Для обоснования и выбора эффективного способа модификации древесины использовали образцы породы сосна, методическая сетка представлена в табл. 1. Математико-статистическая обработка экспериментальных данных проводилась с использованием методов многофакторного планирования [32–36].

Таблица 1. Методическая сетка проведения экспериментов по исследованию прочности клеевых соединений при склеивании антипирированной древесины

Задачи исследования	Постоянные факторы		Исследуемый или переменный фактор		Критерий оценки	Количество опытов	Количество повторений опытов	Количество одновременно испытываемых образцов	Количество наблюдений	Общее количество наблюдений
	Наименование	Значение	Наименование	Значение						
Определение прочности клеевого соединения	1. Геометрические размеры образца, мм	150×20	1. Плотность древесины, кг/м ³	480; 565; 650	Прочность при скалывании вдоль волокон, МПа	4	3	1	9	108
	2. Порода древесины	сосна	2. Количество вводимого антипирина, %	30						
	3. Влажность древесины, %	10±2		50						
	4. Расход клеевого состава, г/м ²	135		70						
	5. Давление при прессовании, МПа	0,4								
	6. Время выдержки под давлением, мин	60								
	7. Температура при прессовании, °С	20								

Антипирированную (термомодифицированную) древесину получали с применением антипирена марки ФА-3 – на основе оксиэтилидендифосфоновой кислоты и моноэтаноламина [30, 31]. Физико-химические свойства антипирена ФА-3 представлены в табл. 2.

Таблица 2. Физико-химические свойства антипирена ФА-3

Наименование показателей	Значение показателей
1. Внешний вид	Вязкая сиропообразная жидкость светло-коричневого цвета
2. Количество оксиэтилидендифосфоновой кислоты, мас. ч.	17,5 ... 35,0
3. Количество моноэтаноламина, мас. ч.	5,0 ... 10,0
4. Вода	остальное
5. Плотность, кг/л	1,07 ... 1,17

Пропитка осуществлялась в автоклаве при температуре от 40 до 120 °С и давлении от 0,5 до 1,2 МПа.

Для определения способности древесины смачиваться использовали фенолоформальдегидные смолы, физико-химические свойства фенолоформальдегидной смолы холодного отверждения марки СФЖ-309 (табл. 3).

Таблица 3. Физико-химические свойства фенолоформальдегидной смолы холодного отверждения марки СФЖ-309

Наименование показателей	Значение показателей фенолоформальдегидной смолы марки СФЖ-309
1. Основа клеевого состава	Фенол и формальдегид
2. Плотность, кг/л	1,18 ... 1,21
3. Показатели кислотности среды (рН)	2,8 ... 3,2
4. Цвет	Однородно вязкая жидкость от желтовато-коричневого до тёмно-вишневого цвета
5. Вязкость при 20 °С, с	35 ... 120
6. Массовая доля нелетучих веществ (сухой остаток), %	44 ... 49
7. Массовая доля свободного формальдегида, %	0,1
8. Массовая доля щелочи, %	5,5 ... 6,5

Физико-механические свойства клеевых соединений термомодифицированной древесины определяли по методике [35].

Результаты исследования. При склеивании пропитанной древесины поверхностная энергия древесины должна быть несколько ниже, чем у связующих. Угол смачивания у этих связующих в нормальных условиях может достигать более 90°, что отрицательно влияет на смачиваемость древесины клеем. Отрицательное влияние на способность клея смачивать древесину могут оказывать модификаторы, антипирены и наполнители. Результаты выполненных исследований показали, что

поверхностное натяжение $\sigma_{кр}$ у древесины берёзы составляет в среднем от 40 до 50 мН/м.

Проникнув внутрь древесины (порода сосна), по капиллярам сосудов, трахеид и сердцевинных лучей, краситель окрашивает стенки клеток, диффундируя в их межкапиллярные промежутки. При этом стенки клеток окрашиваются более интенсивно, чем полости клеток, тем самым подчёркивается рисунок строения древесины (рис. 1).

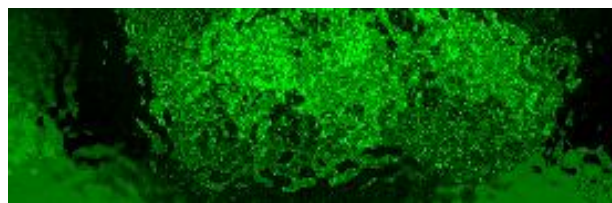


Рис. 1. Строение древесины сосны после пропитки подкрашенным модификатором (цифровое изображение)

Поскольку предложенный в работе способ антипирирования древесины подразумевает под собой автоклавную пропитку с созданием избыточного давления, то помимо фильтрации и диффузии при массообменном процессе будет характерно явление бародиффузии. При данном процессе молекулы антипирена переносятся под действием градиента избыточного давления. Плотность бародиффузионного потока определяется по формуле (1):

$$t_p = D_m \cdot \frac{\Delta P}{\Delta x} \quad (1)$$

где D_m – коэффициент молярного переноса; $\frac{\Delta P}{\Delta x}$ – градиент давления.

Применительно к капиллярно-пористым коллоидным телам принято выделять два вида бародиффузии: баромембранная фильтрация и диффузионная проницаемость. Для осуществления баромембранной фильтрации к обрабатываемой древесине необходимо приложить определённое давление, в противном случае молекула антипирена не сможет проникнуть сквозь пору в полупроницаемой мембране. При этом сама мембрана, представляющая собой пористое тело с постоянными сквозными капиллярами, встречается в древесине лишь в межклеточных порах.

Основными показателями качества клеевого соединения являются значения прочности и водостойкости клеевого слоя. Эти показатели зависят от глубины проникновения адгезива (клея) в поры древесины, толщины клеевого соединения и физико-химических свойств используемого клеевого состава. Также прочность клеевого соединения напрямую зависит и от физико-химических процессов, протекающих на поверхности древесины при нанесении клея (смачивающая способность древесины, качество подготовки поверхности древесины к склеиванию), таким образом целесообразно будет обосновать влияние термохимической модификации древесины (породы сосна) антипиреном (марки ФА-3) на качество формируемого клеевого соединения.

Результаты экспериментальных исследований по определению прочности клеевого соединения антипирированной древесины представлены в табл. 4.

Зависимость прочности клеевого соединения от концентрации антипирена представлена на рис. 2. Уравнение регрессии (по результатам многофакторного эксперимента) в натуральных единицах будет иметь вид (2):

$$\sigma = 10,43 + 0,0028 \rho + 0,0235 n \quad (2)$$

при $480 \text{ кг/м}^3 \leq \rho \leq 650 \text{ кг/м}^3$; при $30 \% \leq n \leq 70 \%$, где σ – прочность древесины (порода сосна) при скалывании вдоль волокон, МПа; ρ – плотность древесины (порода сосна), кг/м^3 ; n – количество вводимого антипирена, %.

Графическая интерпретация результатов многофакторного эксперимента представлена на рис. 3.

Таблица 4. Результаты исследований по определению прочности клеевого соединения антипирированной древесины

№ опыта (наблюдений)	Концентрация антипирена ФА-3, %	Прочность клеевого соединения (образцы породы сосна, связующее СФЖ-309), МПа
1	22,50	10,12
2	28,44	10,59
3	34,38	11,06
4	40,31	11,53
5	46,25	12,00
6	52,19	12,46
7	58,13	12,93
8	64,06	13,40
9	70,00	13,87

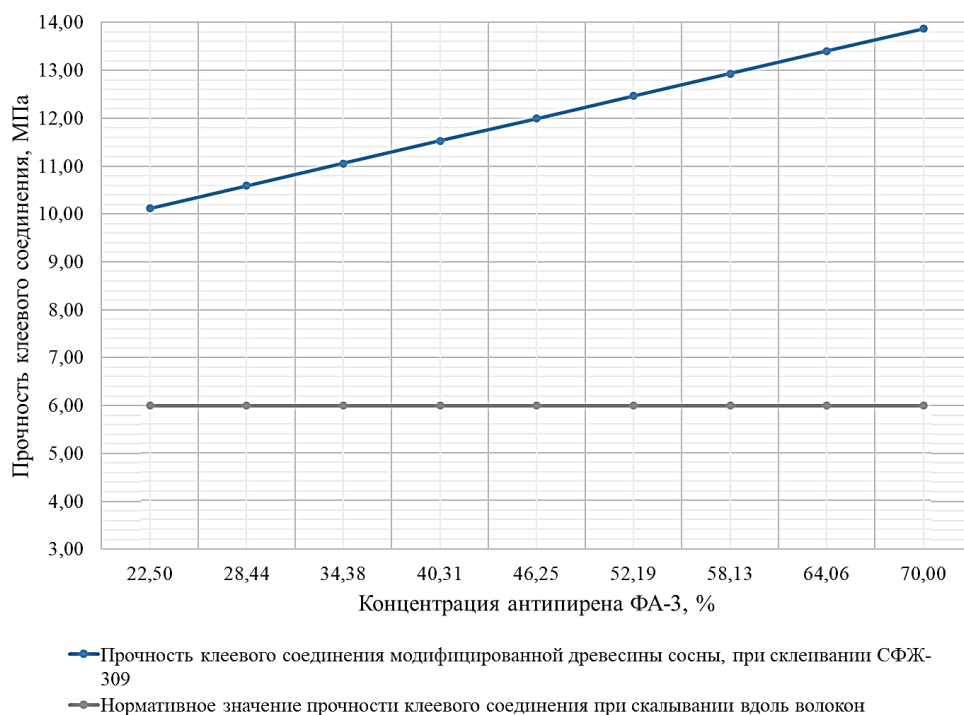


Рис. 2. График зависимости прочности клеевого соединения при склеивании антипирированной древесины (сосна) от концентрации антипирена марки ФА-3

Выводы. Термическая модификация улучшает устойчивость древесины к грибковому гниению за счёт снижения потери массы после воздействия грибов. Параметры процесса термомодификации, такие как температура, продолжительность и потеря массы, влияют на устойчивость к гниению и её долговечность, хотя некоторые механические свойства могут ухудшиться. Порода древесины также влияет на устойчивость термически модифицированной древесины к гниению. Считается, что изменения химического состава, включая разрушение гемицеллюлозы и модификацию древесных полимеров, улучшают устойчивость к гниению. Кроме того, препятствие проникновению в кле-

точную стенку древесины и образование стабильных свободных радикалов во время термической модификации способствуют устойчивости древесины к разрушению.

В последнее время добавление танина в раствор ФА может стать перспективным вариантом для повышения устойчивости фурфурелированной древесины к выщелачиванию в больших масштабах. Добавление танина также может повысить реакционную способность менее кислой органической кислоты, продлить стабильность раствора ФА, а также повысить биологическую стойкость фурфурелированной древесины и потенциально уменьшить её характерный запах.

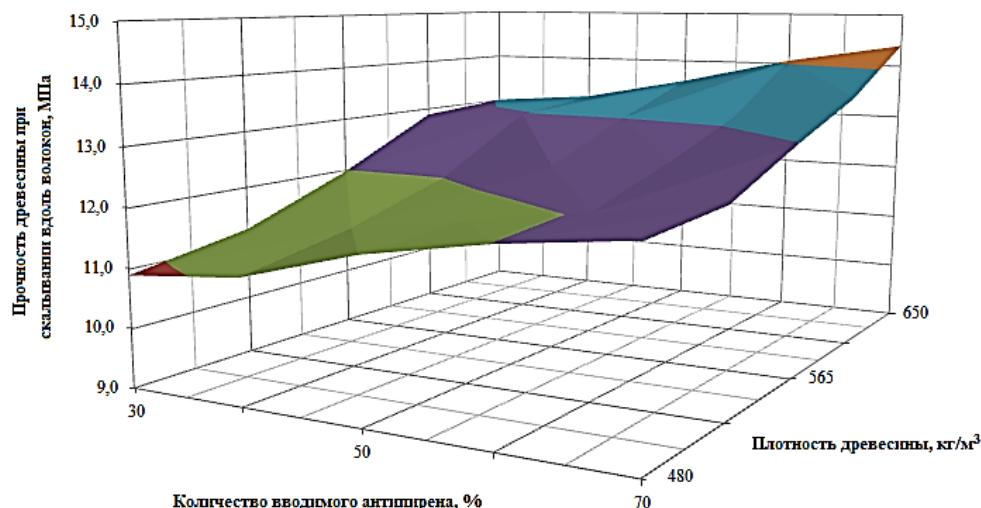


Рис. 3. График зависимости прочности клеевого соединения при скалывании вдоль волокон (антипирированная древесина, порода сосна) от концентрации антипирена марки ФА-3 и плотности древесины

Массопередача между твёрдой и жидкой фазами складывается из массоотдачи внутри жидкой фазы и переноса последней в твёрдом теле. Перенос связующего в неподвижном слое древесины представляет собой неустановившийся процесс с переменной полойной концентрацией.

Полученные данные свидетельствуют об эффективности применения для защиты древесины состава (антипирен марки ФА-3) на основе моноэтаноламина, оксидиэтилдифосфоновой кислоты и воды.

При использовании сильно концентрированного раствора антипирена марки ФА-3 поверхность древесины

сосны будет переходить из состояния полного смачивания в частичное смачивание, что снизит показатели прочности клеевого соединения.

Высокая прочность клеевого соединения при склеивании антипирированной древесины фенолоформальдегидной смолой холодного отверждения марки СФЖ-309 достигается в результате образования химических связей при взаимодействии тройной аминной соли со свободными фенольными гидроксильными группами фенолоформальдегидной смолы.

Литература

1. Роуэлл Р. Справочник по химии древесины и древесным композитам. 2-е изд. Бока-Ратон : CRC Press, 2012. 703 с.
2. Уголев Б.Н. Древесиноведение и лесное товароведение. М.: МГУЛ, 2007. 351 с.
3. Ugolev B.N. Wood as a natural smart material. Wood Science and Technology. Journal of the International Academy of Wood Science, 2014, Vol. 48, № 3, pp. 553–568. DOI 10.1007/s00226-013-0611-2.
4. Hill, CA. Wood modification: chemical, thermal, and other processes. West Sussex: JohnWiley&Sons; 2006. 264 pp.
5. Wang S., Chen H., Li K., Koskela S., Berglund LA, Zhou Q. A strong, transparent, and thermochromic composite hydrogel based on a wood-derived highly mesoporous cellulose network and PNIPAM. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2022. 154 pp.
6. LeFloc'h A., Jourdes M., Teyssedre P.L. Oak wood polysaccharides and lignin used in cooperage: composition, interest, and analyses: a review. Carbohydrate Research. 2015. pp. 94–102.
7. Sandberg D., Kutnar A., Mantanis G. Wood modification technologies - an overview. iForest. 2017. pp. 895–908.
8. Nuopponen M., Wikberg H., Vuorinen T., Maunu S.L., Jämsä S., Vitaniemi P. Weathered heat-treated wood. Journal of Applied Polymer Science. 2003. pp. 2128–2134.
9. Altgen M., Willems W., Militz H. Wood degradation under process conditions during the thermal modification of European beech in a high-pressure reactor. European Journal of Wood and Wood Products. 2016. pp. 653–662.
10. Willems W. Firmolin®: A gentle method for thermal modification of wood (updated version, August 2014). In: European TMT Workshop Conference. Dresden, Germany: Institut für Holztechnologie Dresden gemeinnützige GmbH (IHD); August 2014. pp. 1–5.
11. Inari N.G., Petrisans M., Petrisans A., Gerard-den P. Elemental composition of wood as a potential marker for assessing heat treatment intensity. Polymer Degradation and Stability. 2009. pp. 365–368.
12. Allegretti O., Brunetti M., Cuccui I., Ferrari S., Nocetti M., Terziet N. Thermal and vacuum modification of spruce (Piceaabies Karst.) and fir (Abies white Mill.) wood. Bioresources. 2012; № 7(3). pp. 3656–3669.
13. Candelier C., Dumarçais S., Petrisans A., Desharnais L., Gérardin P. Comparison of the chemical composition and resistance to decay of heat-treated wood cured in different inert atmospheres: nitrogen or vacuum. Polymer Degradation and Stability. 2013; № 98(2) pp. 677–681.
14. Alain R., Kotilainen R., Zaman A. Thermochemical behavior of Norway spruce (Piceaabies) at 180–225 °C. Wood Science and Technology. 2002; № 36(2). pp. 163–171.
15. Wang Z., Shu L., Zhang X.-F., Yao J. Double-crosslinked wood hydrogels with high anisotropy and ionic conductivity for sensitive pressure sensing. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2023. 658 pp.
16. Tjeerdsm B.F., Boonstra M., Pizzi A., Tekely P., Militz H. Characterization of thermally modified wood: Molecular

- causes of improved wood performance. *Holz als Roh- und Werkstoff*. 1998; № 56. pp. 149–153.
17. Sundqvist B, Karlsson O, Westermark U. Determination of formic and acetic acid concentrations formed during hydrothermal treatment of birch wood and their relationship to color, strength, and hardness. *Wood Science and Technology*. 2006; №40(7): 549–561
 18. Hill KAS, Ramsey J, Keating B, Lane K, Rautkari L, Hughes M, et al. Water vapor sorption properties of thermally modified and densified wood. *J. Materials Science*. 2012. №47(7). pp. 3191–3197.
 19. Englund TE, Thygesen LG, Svensson S, Hill KAS. A critical discussion of the physics of wood-water interactions. *Wood Science and Technology*. 2013. № 47(1). pp. 141–161.
 20. Bizics V., Andersons B., Sansonetti E., Andersons I., Militz H., Grinins J. Single-stage thermohydro-treatment (THT) of hardwood: Dimensional stability analysis after five soaking-drying cycles. *Holzforschung*. 2015. № 69(5). pp. 563–571.
 21. Cermak P., Rautkari L., Horacek P., Saake B., Rademacher P., Sablik P. Dimensional stability analysis of thermally modified wood subjected to rewetting cycles. *Bioresources*. 2015. №10(2). pp. 3242–3253
 22. Boonstra M.J., van Acker J., Tjeerdsmā B., Kegel E. Strength properties of thermally modified softwood and their relationship with the polymeric structural components of wood. *Annals of Forest Science*. 2007. № 64. pp. 679–690.
 23. Korkut S., Akgul M., Dundar T. Effect of heat treatment on some technological properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) Wood. *Bioresources*. 2008. №99(6). pp. 1861–1868.
 24. Rautkari L., Honkanen J., Hill KAS, Ridley-Ellis D, Hughes M. Mechanical and physical properties of thermally modified Scots pine wood in a high-pressure reactor under saturated steam conditions at 120, 150, and 180 °C. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2014. № 72(1). pp. 33–41.
 25. Rowell R.M., Ibach R.E., McSweeney J., Nilsson T. Understanding decay resistance, dimensional stability, and strength changes in heat-treated and acetylated wood. *Wood Material Science & Engineering*. 2009. № 4. pp. 14–22.
 26. Varankina G.S., Chubinsky A.N. Modification of urea – formaldehyde resins shungite sorbents/Development and modernization of production // International conference on production engineering. Bihac: Bihac University. 2013. p. 1–4.
 27. Соколова Е.Г. Влияние модификатора в составе клеевых композиций на свойства готовой продукции / Материалы XXVIII международной научно-практической конференции Фундаментальные и прикладные науки сегодня 18–19 апреля 2022 г. Bengaluru, Karnataka, India С. 159–164.
 28. Соколова Е.Г. Исследование процессов склеивания шпона при производстве фанеры повышенной водостойкости с использованием доломитовой муки // Леса России: Политика, Промышленность, Наука, Образование. Матлы Всеросс. IV науч.-техн. конф.-вебинара. Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова. Санкт-Петербург, 2019. С. 252–254.
 29. 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. Т. 11. № 1. С. 33–38.
 30. Колесов Н.Г., Варанкина Г.С., Шишлянникова А.Б., Русаков Д.С. Исследование физико-механических свойств модифицированных антипирированных материалов // Клен. Герметики. Технологии. 2005, № 5. С. 2–7.
 31. Варанкина Г.С., Колесов Н.Г., Аносов С.В., Русаков Д.С., Федяев Ар.А. Способ повышения огнестойкости массивной древесины // Клен. Герметики. Технологии. 2005, №7. С. 41–48.
 32. Русаков Д.С., Чубинский А.Н., Варанкина Г.С. Совершенствование технологии склеивания древесных материалов модифицированными клеями. СПб. : СПбГЛТУ, 2019 г. 127 с.
 33. Варанкина Г.С., Чубинский А.Н. Формирование низко-токсичных клеевых древесных материалов : моногр. – СПб. : Химиздат, 2014. 148 с.
 34. Федяев А.А., Чубинский А.Н. Неразрушающие методы контроля свойств продукции из древесины. СПб. : ГА-ЛАНИКА, 2022 г. 118 с.
 35. Чубинский А.Н. Формирование клеевых соединений древесины. СПб. : СПбГУ, 1992. 164 с.
 36. Чубинский А.Н., Сергеевичев В.В. Моделирование процессов склеивания древесных материалов. СПб. : Издательский дом Герда, 2007. 176 с.

References

1. Rowell R. Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2012. 703 p. (In Russ.)
2. Ugolev B.N. Wood Science and Forest Commodity Science. Moscow State University of Forestry, 2007. 351 p. (In Russ.)
3. Ugolev B.N. Wood as a natural smart material. *Wood Science and Technology. Journal of the International Academy of Wood Science*, 2014, Vol. 48, № 3, pp. 553–568.
4. Hill C.A. Wood modification: chemical, thermal, and other processes. West Sussex : JohnWiley&Sons; 2006. 264 pp.
5. Wang S., Chen H., Li K., Koskela S., Berglund LA, Zhou Q. A strong, transparent, and thermochromic composite hydrogel based on a wood-derived highly mesoporous cellulose network and PNIPAM. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2022. 154 pp.
6. LeFloc'h A., Jourdes M., Teyssedre P.L. Oak wood polysaccharides and lignin used in cooperage: composition, interest, and analyses: a review. *Carbohydrate Research*. 2015. pp. 94–102.
7. Sandberg D., Kutnar A., Mantanis G. Wood modification technologies – an overview. *iForest*. 2017. pp. 895–908.
8. Nuopponen M., Wikberg H., Vuorinen T., Maunu S.L., Jämsä S., Vitaniemi P. Weathered heat-treated wood. *Journal of Applied Polymer Science*. 2003. pp. 2128–2134.
9. Altgen M., Willems W., Militz H. Wood degradation under process conditions during the thermal modification of European beech in a high-pressure reactor. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2016. pp. 653–662.
10. Willems W. Firmolin®: A gentle method for thermal modification of wood (updated version, August 2014). In: European TMT Workshop Conference. Dresden, Germany: Institut für Holztechnologie Dresden gemeinnützige GmbH (IHD); August 2014. pp. 1–5.
11. Inari N.G., Petrisans M., Gerard-den P. Elemental composition of wood as a potential marker for assessing heat treatment intensity. *Polymer Degradation and Stability*. 2009. pp. 365–368.
12. Allegretti O, Brunetti M, Cuccui I, Ferrari S, Nocetti M, Terziev N. Thermal and vacuum modification of spruce (*Picea abies* Karst.) and fir (*Abies white* Mill.) wood. *Bioresources*. 2012; №7(3). pp. 3656–3669.
13. Candelier C., Dumarçais S., Petrisans A., Desharnais L., Gérardin P. Comparison of the chemical composition and resistance to decay of heat-treated wood cured in different inert atmospheres: nitrogen or vacuum. *Polymer Degradation and Stability*. 2013; №98(2) pp. 677–681.
14. Alain R., Kotilainen R., Zaman A. Thermochemical behavior of Norway spruce (*Picea abies*) at 180–225 °C. *Wood Science and Technology*. 2002; №36(2). pp. 163–171.
15. Wang Z., Shu L., Zhang X.-F., Yao J. Double-crosslinked wood hydrogels with high anisotropy and ionic conductivity for sensitive pressure sensing. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2023. 658 pp.
16. Tjeerdsmā B.F., Boonstra M., Pizzi A., Tekely P., Militz H. Characterization of thermally modified wood: Molecular

- causes of improved wood performance. *Holz als Roh- und Werkstoff*. 1998; № 56. pp. 149–153.
17. Sundqvist B, Karlsson O, Westermark U. Determination of formic and acetic acid concentrations formed during hydrothermal treatment of birch wood and their relationship to color, strength, and hardness. *Wood Science and Technology*. 2006; № 40 (7). 549–561
18. Hill KAS, Ramsey J, Keating B, Lane K, Rautkari L, Hughes M, et al. Water vapor sorption properties of thermally modified and densified wood. *J. Materials Science*. 2012. № 47(7). pp. 3191–3197.
19. Engelund TE, Thygesen LG, Svensson S, Hill KAS. A critical discussion of the physics of wood-water interactions. *Wood Science and Technology*. 2013. № 47(1). pp. 141–161.
20. Bizics V., Andersons B., Sansonetti E., Andersons I., Militz H., Grinins J. Single-stage thermohydro-treatment (THT) of hardwood: Dimensional stability analysis after five soaking-drying cycles. *Holzforschung*. 2015. №69(5). pp. 563–571.
21. Cermak P., Rautkari L., Horacek P., Saake B., Rademacher P., Sablik P. Dimensional stability analysis of thermally modified wood subjected to rewetting cycles. *Bioresources*. 2015. №10(2). pp. 3242–3253
22. Boonstra MJ, vanAcker J., Tjeerdsmā B., Kegel E. Strength properties of thermally modified softwood and their relationship with the polymeric structural components of wood. *Annals of Forest Science*. 2007. № 64. pp. 679–690.
23. Korkut S., Akgul M., Dundar T. Effect of heat treatment on some technological properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) Wood. *Bioresources*. 2008. № 99(6). pp. 1861–1868.
24. Rautkari L, Honkanen J, Hill KAS, Ridley-Ellis D, Hughes M. Mechanical and physical properties of thermally modified Scots pine wood in a high-pressure reactor under saturated steam conditions at 120, 150, and 180 °C. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2014. №72(1). pp. 33–41.
25. Rowell RM, Ibach RE, McSweeney J, Nilsson T. Understanding decay resistance, dimensional stability, and strength changes in heat-treated and acetylated wood. *Wood Material Science & Engineering*. 2009. № 4. pp. 14–22.
26. Varankina G.S., Chubinsky A.N. Modification of urea – formaldehyde resins shungite sorbents / Development and modernization of production//International conference on production engineering. Bihac: Bihac University. 2013. p. 1–4.
27. Sokolova E.G. Influence of the modifier in the composition of adhesive compositions on the properties of finished products / Proceedings of the XXVIII International Scientific and Practical Conference Fundamental and Applied Sciences Today, April 18–19, 2022, Bengaluru, Karnataka, India, pp. 159–164. (In Russ.)
28. Sokolova E.G. Study of veneer gluing processes in the production of high-water-resistant plywood using dolomite flour // Forests of Russia: Politics, Industry, Science, Education. Proceedings of the IV All-Russian Scientific and Technical Conference-Webinar. St. Petersburg State Forest Engineering University named after S.M. Kirov. St. Petersburg, 2019. pp. 252–254. (In Russ.)
29. 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. Vol. 11. No. 1. Pp. 33–38.
30. Kolesov N.G., Varankina G.S., Shishlyannikova A.B., Rusakov D.S. Study of the physical and mechanical properties of modified flame retardant materials // Adhesives. Sealants. Technologies. 2005, No. 5. Pp. 2–7. (In Russ.)
31. Varankina G.S., Kolesov N.G., Anosov S.V., Rusakov D.S., Fedyaev Ar.A. Method for increasing the fire resistance of solid wood // Adhesives. Sealants. Technologies. 2005, No. 7. P. 41–48. (In Russ.)
32. Rusakov D.S., Chubinsky A.N., Varankina G.S. Improving the Technology of Gluing Wood Materials with Modified Adhesives. St. Petersburg: SPbGLTU, 2019. 127 p. (In Russ.)
33. Varankina G.S., Chubinsky A.N. Formation of Low-Toxicity Glued Wood Materials // Monograph. St. Petersburg: Khimizdat, 2014. 148 p. (In Russ.)
34. Fedyaev A.A., Chubinsky A.N. Non-destructive Methods of Testing the Properties of Wood Products. St. Petersburg: GALANIKA, 2022. 118 p. (In Russ.)
35. Chubinsky A.N. Formation of Adhesive Joints in Wood. St. Petersburg: St. Petersburg State University, 1992. 164 p. (In Russ.)
36. Chubinsky A.N., Sergeevichev V.V. Modeling of wood material gluing processes. St. Petersburg : Gerda Publishing House, 2007. 176 p. (In Russ.)