

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЧНОСТИ ТЕРМИЧЕСКИ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ДРЕВЕСИНЫ ТРЕХ ЛИСТВЕННЫХ ПОРОД

Г.А. Горбачева[✉], Н.В. Скуратов, А.В. Соболев, Д.В. Усов

ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

gorbacheva@bmstu.ru

Приведены результаты комплексных испытаний механических свойств древесины березы, ясеня и дуба, подвергнутой интенсивной термической обработке по классу Thermo D. Определены показатели прочности при испытаниях в различных структурных направлениях на сжатие и статический изгиб, а также твердость и удельное сопротивление выдергиванию шурупов. Получены значения модуля упругости при статическом изгибе. Все проведенные испытания были выполнены на малых чистых образцах стандартных размеров. Проведен сравнительный анализ установленных показателей механических свойств термически модифицированной древесины березы, ясеня и дуба с аналогичными характеристиками нативной древесины тех же пород, взятыми из литературных источников. Выявлена неоднозначность влияния интенсивной термической обработки на рассматриваемые показатели механических свойств и модуля упругости при статическом изгибе указанных пород древесины. Установлено существенное снижение прочности древесины березы и дуба при статическом изгибе после проведения термической обработки, в то же время для древесины ясеня такое влияние выявить не удалось. Показано, что в результате термического модифицирования наиболее существенно снижается статическая твердость радиальных и тангенциальных поверхностей образцов березы и ясеня. Также отмечено заметное уменьшение твердости радиальных поверхностей образцов дуба, но при этом твердость их тангенциальных поверхностей изменилась незначительно. Указывается, что термическая модификация в меньшей мере влияет на прочность древесины всех рассматриваемых пород при сжатии вдоль и поперек волокон. Установлено, что в результате термической обработки древесины исследованных пород с некоторыми изменениями сохранила соотношения анизотропии механических свойств.

Ключевые слова: термическое модифицирование, древесина лиственных пород, механические свойства, анизотропия

Ссылка для цитирования: Горбачева Г.А., Скуратов Н.В., Соболев А.В., Усов Д.В. Определение показателей прочности термически модифицированной древесины трех лиственных пород // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2026. Т. 30. № 4. С. 110–121. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-4-110-121

Массивная древесина широко применяется как в практике современного малоэтажного строительства, так и в создании внешнего ландшафтного дизайна прилегающих территорий.

В последние десятилетия растет интерес к использованию термически модифицированной древесины (ТМД) в малоэтажном строительстве и ландшафтной архитектуре. Благодаря высокой биологической стойкости и размерной стабильности ТМД может успешно использоваться вне помещений и даже без защитных покрытий. В различных конструкциях находит применение не только хвойная, но и лиственная ТМД, механические свойства которой как строительного материала пока еще не в полной мере изучены.

В инновационных эксклюзивных и типовых проектах широко представлены, например, дома с деревянным каркасом фахверкового типа. Характерной особенностью таких построек является визуализация стержневых элементов каркаса в виде стоек, раскосов, прогонов и силовых узлов их соединений, вынесенных за пределы замкнутого объемно-планировочного контура здания. Разнообразные детали из древесины широко применяются для наружной отделки фасадов, покрытий пола на открытых лоджиях и террасах, а также используются в дворовом пространстве жилого комплекса в виде ограждений, беседок, скамеек, объектов детских площадок, других разнообразных элементов благоустройства. Особую выразительность и своеобразие деревянные комплектующие, входящие в состав малых архитектурных

форм, придают садово-парковым зонам городской застройки. Деревянные беседки, навесы, настилы, мосты, перголы служат самостоятельным композиционным узлом и важным декоративным элементом создания комфортной пространственной среды.

Для долговременной и надежной эксплуатации под открытым небом древесине требуется защита от неблагоприятных атмосферных воздействий, поражений грибами и биологических повреждений. Биостойкость досок, брусьев и других элементов конструкций, которые находятся в столь жестких условиях, в значительной мере обеспечивается благодаря использованию для их изготовления ТМД.

Термически модифицированной древесиной принято называть древесину, подвергнутую воздействию газообразного или жидкого агента обработки с пониженным содержанием кислорода при температуре выше 160 °С. Высокотемпературная обработка древесины проводится в целях изменения ее природных свойств без применения каких-либо химических веществ. В результате такой обработки происходят необратимые изменения химического состава и свойств древесины. На практике применяют несколько технологий, большинство из которых различаются способами минимизации содержания кислорода воздуха в агенте обработки. В качестве газообразного агента обработки чаще всего выступает водяной пар, реже азот. При термической обработке древесины в жидкой среде используется масло с высокой температурой кипения. Современные технологии позволяют с высоким качеством проводить термическое модифицирование как хвойной, так и лиственной древесины различных пород.

В настоящее время наиболее распространенной технологией термического модифицирования древесины является процесс Thermo-Wood, разработанный в Финляндии (1993). Процедура термообработки древесины состоит из трех этапов. На первом этапе древесину подвергают интенсивной высокотемпературной сушке сначала при температуре около 100 °С. Затем температуру постепенно повышают до 130 °С. В результате такой сушки влажность древесины падает почти до нуля. Собственно модифицирование происходит на втором этапе процесса, когда древесина в течение 2–3 ч подвергается термическому воздействию при температуре 185...215 °С. Продолжительность и температуру термической обработки выбирают в зависимости от назначения продукции, которая будет изготовлена из древесины. На третьем этапе древесину постепенно охлаждают и увлажняют с помощью системы водяного орошения.

К концу процесса древесина приобретает влажность в пределах 3...7 %.

Данная технология предусматривает два стандартных класса термической обработки: Thermo S и Thermo D. В результате термического модифицирования по классу Thermo S древесина за счет существенного снижения разбухания и усушки приобретает размерную стабильность. После обработки по классу Thermo D древесина становится не только стабильной, но и стойкой к биологическим поражениям.

В некоторых статьях отечественных [1–5] и зарубежных [6, 7] исследователей указаны положительные эффекты от данного вида обработки, среди которых стойкость древесины по отношению к негативным атмосферным воздействиям, формоустойчивость, гидрофобность, экологическая безопасность. Это позволяет выполнять врубки и формировать различные виды соединительных профилей непосредственно на строительной площадке с обоснованной надежной защитой образующихся при таком виде глубинной обработки древесины внутренних контуров, что очень удобно при реализации эксклюзивных проектов строительства.

В то же время большинство исследователей отмечают в качестве закономерных последствий термической модификации древесины уменьшение плотности, снижение отдельных показателей механических свойств и некоторое ослабление способности удерживать металлические крепления [3, 8, 9]. Отмечается и специфика изменчивости свойств древесины в зависимости от характера напряженного состояния при проведении испытаний, породы, а также вида и режима термического модифицирования.

Выбор древесины березы, дуба и ясеня обусловлен их индивидуальными анатомическими особенностями строения этих пород, привлекающими внимание практикующих архитекторов, проектирующих общественные здания и жилые дома, а также для широкого круга граждан, желающих приобрести или построить деревянный дом. Этому способствует выразительная текстура этих пород, высокие прочностные и эксплуатационные свойства, достаточно широкий ареал. В результате термического модифицирования по классу Thermo D размеры древесины становятся стабильными, она приобретает долговечность, стойкость к биопоражениям, способность выдерживать умеренные силовые воздействия, несмотря на некоторое изменение механических свойств [10, 11]. Последние численно оцениваются значениями

пределов прочности, которые используются в расчетах элементов деревянных конструкций. В строительной механике эти показатели принято называть нормативными сопротивлениями. При их определении обязательно учитывается природная анизотропия древесины.

В конструкциях упомянутых выше объектов многочисленные элементы испытывают разнообразные виды напряженного состояния. Например, на сжатие работают стойки, подкосы, опорные столбы лестниц, а также локальные зоны отдельных узлов в соединениях; на статический изгиб — балки, лаги, стропила, тетивы и ступени лестниц. Кроме того, для соединения деталей в узлы применяются разнообразные металлические крепления, которые должны прочно удерживаться древесиной. К важной эксплуатационной характеристике древесины как строительного материала, относится модуль упругости. От численного значения этого показателя зависит способность отдельных элементов конструкции сохранять начальную форму без превышения предельно допустимых деформаций под воздействием внешней нагрузки и возвращаться к исходному состоянию после ее устранения, что, в конечном итоге, обеспечивает надежность и устойчивость деревянных конструкций.

Также весьма существенное значение имеет показатель твердости древесины, особенно в местах установки металлических пластин, шайб, хомутов, других опорных закладных элементов. При этом направление действия нагрузки относительно волокон древесины может быть различным, что принципиально важно для древесины как анизотропного материала. В связи с этим приобретает актуальность оценка влияния термического модифицирования на анизотропию древесины указанных пород.

Цель работы

Цель работы — экспериментальное определение основных показателей механических и деформационных свойств древесины трех лиственных пород — березы, дуба и ясеня, подвергнутой термическому модифицированию.

Материалы и методы

Подготовку образцов, проведение испытаний и расчет показателей механических свойств проводили в соответствии с нормативными документами. Нагружение образцов и фиксацию экспериментальных данных выполняли на испытательных машинах Р-0,5 и INSTRON-3369. Для изготовления образцов были использованы

отрезки строганных пиломатериалов толщиной 20 мм из древесины березы, ясеня и дуба, подвергнутых термическому модифицированию по классу Thermo D. После выдержки в течение 2 мес. в помещении при температуре 22...24 °С и относительной влажности воздуха 50...60 % их влажность, определенная весовым способом по ГОСТ Р 70625–2023 «Конструкции деревянные. Пиломатериалы и детали деревянные. Сушильно-весовой метод определения влажности», оказалась равной $4,3 \pm 0,4$ %.

Испытания на сжатие были проведены на разрывной машине INSTRON-3369. Для проведения экспериментов изготовили образцы в форме прямоугольного параллелепипеда длиной 30 мм, шириной и толщиной 20 мм. Из ТМД каждой породы было изготовлено 16 образцов для определения условного предела прочности при сжатии поперек волокон в радиальном и тангенциальном направлениях по ГОСТ 16483.11–72 «Древесина. Метод определения условного предела прочности при сжатии поперек волокон». Кроме того, восемь образцов было изготовлено для определения предела прочности при сжатии вдоль волокон по ГОСТ 16483.10–73 «Древесина. Метод определения предела прочности при сжатии вдоль волокон».

В ходе проведения испытаний на сжатие поперек волокон скорость нагружения составляла 1000...1200 Н/мин, при этом условный предел прочности достигался через 1,2...2 мин. По результатам каждого испытания строили диаграммы нагружения. В качестве нагрузки, соответствующей условному пределу прочности на сжатие принимали максимальную нагрузку на линейной части диаграммы нагружения. Условный предел прочности определяли как отношение этой максимальной нагрузки к площади поперечного сечения образца.

При испытаниях на сжатие вдоль волокон образцы разрушались в течение 40...70 с при скорости нагружения 22...26 кН/мин. Предел прочности рассчитывали как частное от деления максимальной нагрузки на площадь нагружения.

Для определения пределов прочности и модуля упругости при статическом изгибе ТМД березы, ясеня и дуба из прошедших термическую обработку пиломатериалов было изготовлено 72 образца в виде прямоугольных призм, основанием 20×20 мм и длиной вдоль волокон 300 мм. В целях определения возможного влияния на предел прочности направления прикладываемой нагрузки образцы по расположению годичных слоев на торцевых поверхностях были предварительно условно подразделены на три группы: 1) радиальные; 2) тангенци-

альные и 3) смешанные. В группы радиальных и тангенциальных распределяли образцы, в которых линии годичных слоев на торцевых поверхностях были параллельны соответствующей паре граней. При проведении испытаний образцы этой группы поворачивали на 90° для тангенциального и радиального нагружения. К группе смешанных относили образцы, в которых линии годичных слоев на торцевых поверхностях занимали промежуточное положение между радиальным и тангенциальным. Направление действия нагрузки при испытаниях не ранжировали.

Испытания образцов проводили на разрывной машине Р-0,5, обработку результатов выполняли в соответствии с ГОСТ 16483.3–84 «Древесина. Метод определения предела прочности при статическом изгибе». Образцы нагружали со скоростью 1200...1400 Н/мин, при этом их разрушение наступало через 60...100 с после начала нагружения.

Определение модуля упругости при статическом изгибе, математически выраженной как соотношение между нормальными напряжениями и относительными деформациями, определяли по ГОСТ 16483.9–73 «Древесина. Методы определения модуля упругости при статическом изгибе». При проведении испытаний применяли образцы, имеющие аналогичные форму, размеры и условное деление на группы, что и для определения предела прочности при данном виде нагружения.

Для проведения экспериментов по определению твердости ТМД было подготовлено 63 березовых, ясеневых и дубовых образца древесины, не имеющих видимых пороков. Эксперименты проводились в соответствии с ГОСТ 16483.17–81 «Древесина. Метод определения статической твердости».

Перед каждым опытом образец устанавливали в специальное приспособление испытательной машины Р-0,5. В качестве пуансона использовался стандартный стальной шарик радиусом 5,64 мм, закрепленный в верхней части приспособления. Перемещение пуансона фиксировали с помощью индикатора часового типа с погрешностью измерения не более 0,01 мм. Во избежание растрескивания образцов при проведении испытаний была выбрана минимальная предлагаемая стандартом глубина вдавливания пуансона в древесину, равная 2,82 мм. Скорость нагружения подбирали так, чтобы заданной глубины вдавливания пуансона достичь через 1,5–2,0 мин. после начала эксперимента. Для расчета статической твердости использовали величину нагрузки, достигнутую при вдавливании пуансона в образец на заданную глубину.

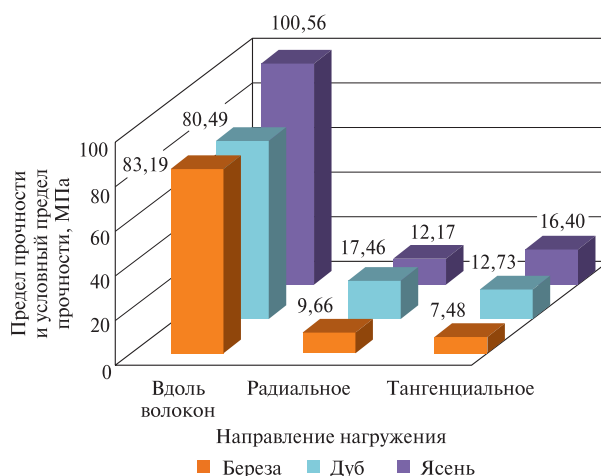


Рис. 1. Диаграмма прочности при сжатии термически модифицированной древесины березы, дуба и ясеня устойчивой влажности

Fig. 1. Compressive strength diagram for thermally modified birch, oak, and ash wood with stable moisture content

Для определения удельного сопротивления выдергиванию шурупов из ТМД исследуемых пород было подготовлено по 24 образца размером 20×20×150 мм с радиальным и тангенциальным расположением годичных слоев на их торцах. В каждом образце высверлили отверстие диаметром 2,5 мм под стандартный шуруп для древесины диаметром 4 мм и длиной 50 мм.

При проведении испытаний каждый образец устанавливали в специальное приспособление испытательной машины Р-0,5. В соответствии с ГОСТ 16483.33–77 «Древесина. Метод определения удельного сопротивления выдергиванию гвоздей и шурупов» скорость нагружения подбирали так, чтобы вырывание шурупа происходило через 1,5–2,0 мин после начала эксперимента. Величину удельного сопротивления выдергиванию шурупов определяли путем деления максимальной нагрузки на глубину ввинчивания (20 мм) шурупа в древесину.

Результаты и обсуждение

Результаты испытаний на сжатие ТМД березы, ясеня и дуба представлены на диаграмме (рис. 1).

Численные значения пределов прочности при сжатии вдоль волокон очень высокие, что свидетельствует об отсутствии значительного негативного влияния термической обработки на способность древесины сопротивляться сжатию вдоль волокон.

Данных по прочности при сжатии поперек волокон для термически обработанной древесины исследуемых пород практически нет.

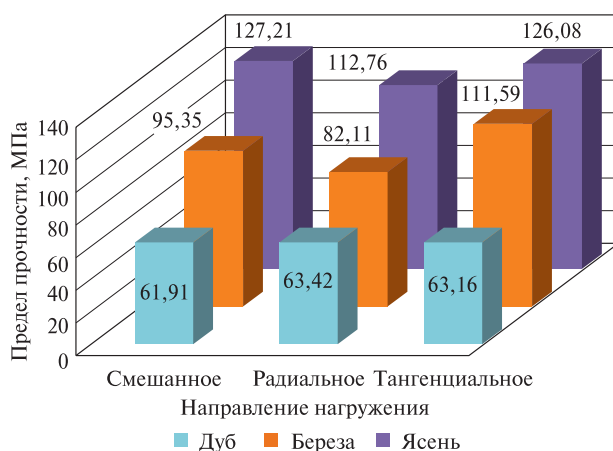


Рис. 2. Диаграмма прочности при статическом изгибе термически модифицированной древесины березы, дуба и ясеня устойчивой влажности

Fig. 2. Static flexural strength diagram for thermally modified birch, oak, and ash wood with stable moisture content

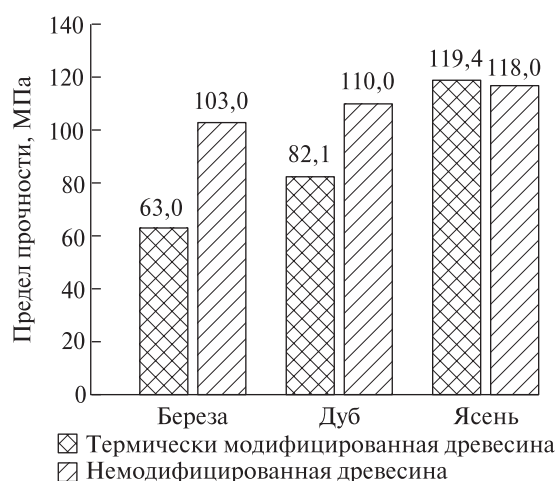


Рис. 3. Диаграмма прочности при статическом изгибе термически модифицированной древесины березы, дуба и ясеня устойчивой влажности и немодифицированной нормализованной влажности [12]

Fig. 3. Static flexural strength diagram for thermally modified birch, oak, and ash wood with stable moisture content and unmodified normalized moisture content [12]

В некоторых работах констатируется факт сопротивления древесины на порядок более слабого сжатию (и смятию) поперек волокон, чем вдоль, при этомкратно повышается ее деформация, выражающаяся в «спрессовывании» древесины без явных внешних признаков разрушения. Этот показатель заслуживает внимания как фактор, во многом определяющий стабильность и надежность как отдельных

видов соединений, так и конструкции в целом. Определение численных значений этого показателя для ТМД исследуемых пород представляется актуальным.

В результате проведенных испытаний установлено, что значения условных пределов прочности ТМД березы, ясеня и дуба при сжатии поперек волокон составляют соответственно 11, 16 и 20 % относительно их пределов прочности при сжатии вдоль волокон, что несколько превышает усредненный для всех пород соответствующий показатель для нативной древесины, который принимают равным 10 % [12].

Также можно констатировать некоторые особенности исследуемых пород древесины по показателям прочности при сжатии поперек волокон. Так, у древесины дуба, очевидно вследствие наличия многочисленных сердцевинных лучей, условный предел прочности при сжатии в радиальном направлении выше на 37 %, чем в тангенциальном, березы — только на 29 %, а у древесины ясеня, наоборот, на 26 % ниже, что хорошо согласуется с данными по нативной древесине [13].

Рассчитанные по экспериментальным данным средние значения пределов прочности при статическом изгибе для образцов каждого направления прикладываемой нагрузки, а также нормативные данные для древесины этих же пород без термической модификации при нормализованной влажности приведены на диаграммах (рис. 2, 3).

Анализируя полученные результаты, можно констатировать тенденцию к снижению прочности древесины дуба и березы после ее термического модифицирования, что подтверждается результатами ранее проведенных исследований [14, 15–18, 22, 24, 25, 28, 30]. Следует также отметить разную степень изменения показателей прочности при статическом изгибе. Так, при сопоставлении с нативной древесиной [12] прочность у древесины березы снижается на 25 %, у дуба — на 39 %, а у древесины ясеня практически не изменяется. Сравнивая породы между собой, следует отметить определенное снижение прочности при приложении нагрузки в радиальном направлении у древесины березы и ясеня при практически равных показателях для всех направлений у древесины дуба. По абсолютным показателям наибольшей прочностью обладает древесина ясеня — 119,4 МПа, значительно меньше она у древесины березы — 82,1 МПа, а самые низкие значения у древесины дуба — 63,0 МПа.

При определении модуля упругости при статическом изгибе использовалась одноточечная схема нагружения, которая позволила получить значения прогиба при радиальном,

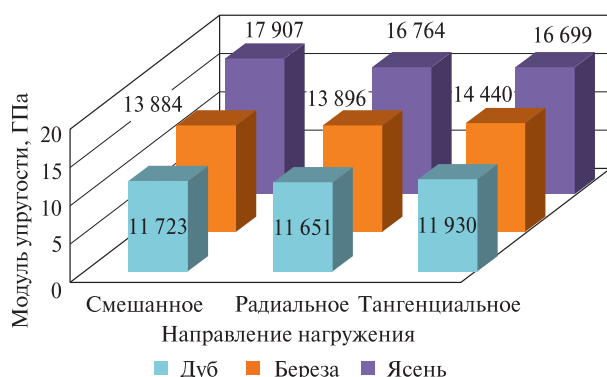


Рис. 4. Диаграмма модуля упругости при статическом изгибе термически модифицированной древесины березы, дуба и ясеня устойчивой влажности

Fig. 4. Static flexural modulus diagram for thermally modified birch, oak, and ash wood with stable moisture content

тангенциальном, а также и в промежуточном между ними направлении, обозначенное нами как смешанное (рис. 4).

Характерной особенностью представленных результатов является отсутствие значимых отличий данного показателя от направления нагружения для всех пород. В процентном отношении максимальное отличие между наибольшим и наименьшим значением не превышает 7 %, причем наиболее близкими оказались показатели древесины дуба, отличия которых составили всего 2,3 %. Оценивая абсолютные величины, отметим, что наибольшим модулем упругости, равным 17,907 ГПа, обладает ясень при смешанном, т. е. промежуточном между радиальным и тангенциальным направлением нагружения. Наименьший показатель, равный 11,651 ГПа у древесины дуба при радиальном направлении нагружения.

Рассматривая средние численные значения модулей упругости, полученных для малых чистых образцов древесины, отметим, что наибольший показатель, равный 17,123 ГПа у ТМД ясеня, несколько ниже — 14,073 ГПа у древесины березы и минимальный 11,768 ГПа — у дуба, подобная закономерность наблюдается и для других видов испытаний.

Согласно СП 64.13330.2017 (актуализированной редакции «СНИП II-25–80 Деревянные конструкции») при расчете несущих деревянных конструкций по предельным состояниям второй группы (по прогибу), значения модуля упругости должны составлять 10 ГПа. Для оценки возможности применения ТМД ясеня, березы и дуба в качестве элементов несущих конструкций по рассматриваемому критерию необходимы дальнейшие исследования.

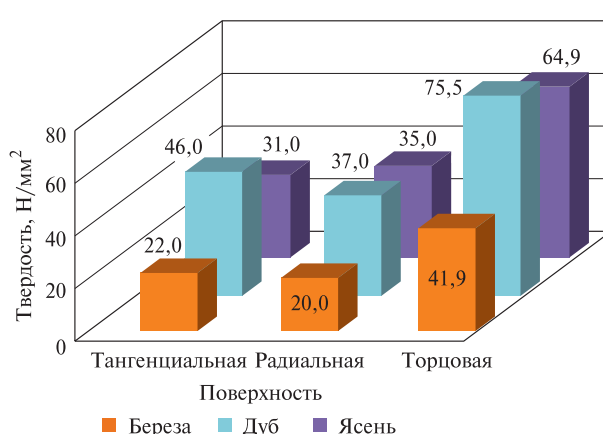


Рис. 5. Диаграмма статической твердости термически модифицированной древесины березы, дуба и ясеня устойчивой влажности

Fig. 5. Wood static hardness diagram for thermally modified birch, oak, and ash wood with stable moisture content

Т а б л и ц а 1

Статическая твердость термически модифицированной и нативной древесины березы, ясеня и дуба

Wood static hardness of thermally modified and native birch, ash, and oak wood

Порода древесины	Поверхность образца	Статическая твердость, Н/мм ²	
		Модифицированная древесина устойчивой влажности	Нативная древесина нормализованной влажности [12]
Береза	Тангенциальная	22	32,1
	Радиальная	20	35,9
	Торцовая	41,9	46,3
Ясень	Тангенциальная	31	65,1
	Радиальная	35	57,1
	Торцовая	64,9	78,3
Дуб	Тангенциальная	46	47,5
	Радиальная	37	54,5
	Торцовая	75,5	66,5

Полученные результаты статической твердости свидетельствуют о негативном влиянии термического воздействия на древесину березы и ясеня в процессе модифицирования на величину этого показателя (рис. 5, табл. 1). При сравнении с усредненными данными по на-

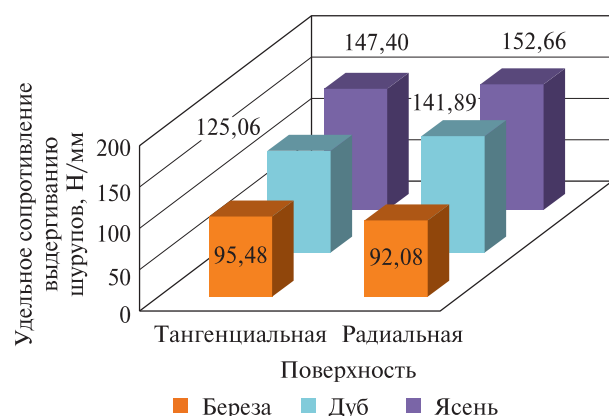


Рис. 6. Диаграмма удельного сопротивления выдергиванию шурупов из модифицированной древесины березы, дуба и ясеня устойчивой влажности

Fig. 6. Specific pull-out resistance diagram for screws made from modified birch, oak, and ash wood with stable moisture content

тивной древесине [12] наибольшее снижение твердости было отмечено у древесины ясеня, для тангенциальной поверхности которого она уменьшилась более чем в 2 раза (52 %). В то же время у древесины березы наибольшее снижение этого показателя было выявлено при воздействии на радиальную поверхность, твердость которой уменьшилась на 44 %. При испытаниях образцов из древесины дуба оказалось, что твердость его тангенциальной поверхности практически не изменилась, а радиальной — понизилась на 32 %.

Определение удельного сопротивления древесины выдергиванию шурупов проводили в тангенциальном и радиальном направлениях. Использовали стандартные шурупы для древесины диаметром 4 мм и длиной 50 мм, которые ввинчивали в предварительно высверленные сквозные отверстия диаметром 2,5 мм (рис. 6). Этот показатель является важной характеристикой древесины при ее использовании в различных изделиях и конструкциях.

Как видно из полученных результатов, древесина исследуемых пород, подвергнутая интенсивному термическому модифицированию, достаточно хорошо сопротивляется выдергиванию шурупов в направлении поперек волокон. В пределах одной породы не выявлено значительных отличий по величине удельного сопротивления при выдергивании шурупов, ввинченных в тангенциальном и радиальном направлениях. Эксперименты показали, что наибольшее сопротивление оказывает древесина ясеня, относительно которого показатели древесины дуба ниже в среднем на 11 %, березы — на 37 %.

Определенный интерес для широкого круга потребителей могут иметь различия в прочностных характеристиках среди рассматриваемых пород в зависимости от возможного смещения вектора поперечной нагрузки от нормального до касательного положения относительно годовичных слоев.

Для анализа этого влияния определялась выраженная в процентах относительная разность (δ , %) показателей свойств ТМД и нативной древесины при радиальном (A_p) и тангенциальном (A_t) направлениях действующей нагрузки (табл. 2)

$$\delta = \frac{A_p - A_t}{A_t} \cdot 100.$$

Такой подход позволяет в значительной мере нивелировать или, наоборот, акцентировать внимание на изменчивость свойств древесины и различия в методиках испытаний. Значения показателей свойств нативной древесины взяты из доступных отечественных и зарубежных литературных источников [12–34]. К сожалению, таких данных сравнительно немного, а информации о величине удельного сопротивления выдергиванию шурупов в радиальном и тангенциальном направлениях древесины березы и ясеня найти не удалось. Анализ полученных значений дает возможность оценить степень изменения соотношений анизотропии механических свойств древесины исследуемых лиственных пород, подвергнутой термическому модифицированию.

Как показали результаты испытаний ТМД на сжатие поперек волокон, значительная разница между показателями прочности в радиальном и тангенциальном направлениях $\delta_{сж}$ древесины березы [14, 15] после термической обработки снизилась практически вдвое, но осталась довольно существенной, поскольку условный предел прочности при сжатии в радиальном направлении оказался на 29,1 % больше, чем в тангенциальном. В отличие от древесины березы величина $\delta_{сж}$ для древесины ясеня имеет отрицательное значение, поскольку его прочность на сжатие в тангенциальном направлении выше, чем в радиальном [16–18]. В результате термического модифицирования величина $\delta_{сж}$ заметно изменилась, достигнув значения –25,8 %. Взятые из литературных источников значения $\delta_{сж}$ для нативной древесины дуба 17,8 % [19] и 41,18 % [20] существенно отличаются друг от друга. Величина $\delta_{сж}$ для ТМД дуба, равная 37,2 %, оказалась несколько выше, чем среднее значение для нативной древесины дуба, что не позволяет сделать однозначный вывод о влиянии термического модифицирования на со-

Т а б л и ц а 2

Относительная разность между показателями свойств ТМД и нативной древесины в радиальном и тангенциальном направлениях по отношению к показателям в тангенциальном направлении, выраженная в процентах

Relative difference between the properties of modified birch and native wood in the radial and tangential directions compared to the properties in the tangential direction, as a percentage

Вид испытаний	Показатель	Береза			Ясень			Дуб		
		ТМД	Нативная древесина	Литературный источник	ТМД	Нативная древесина	Литературный источник	ТМД	Нативная древесина	Литературный источник
Сжатие поперек волокон	$\delta_{сж}$, %	29,1	64,50 61,43	[14] [15]	-25,8	-6,36 -9,9 -8,13	[16] [17] [18]	37,2	17,8 41,18	[19] [20]
Статический изгиб	$\delta_{изг}$, %	-26,4	4,66 -9,03	[21] [22]	-10,6	-0,64	[21]	0,4	7,85 -3,28 -2,61	[21] [23] [23]
Статическая твердость	$\delta_{тв}$, %	-9,1	-10,58 -11,26 14,58 6,06 -9,09 -2,06	[12] [13] [24] [25] [26] [27]	12,9	14,01 -8,57 5,67 2,08 3,30	[12] [13] [28] [29] [27]	-19,6	-12,84 -7,94 -10,61 -29,23 18,92	[12] [13] [23] [30] [31]
Сопротивление выдергиванию шурупов	$\delta_{выд}$, %	-3,6	—	—	3,57	—	—	13,46	-1,35 6,92 14,29 22,86	[32] [33] [33] [34]

отношение показателей прочности при сжатии в радиальном и тангенциальном направлениях.

Относительная разность между показателями прочности при испытаниях на статический изгиб в радиальном и тангенциальном направлениях $\delta_{изг}$ нативной древесины березы [21, 22] и ясеня [21] невелика. Однако в результате термической обработки она заметно увеличилась: у древесины ясеня до -10,6 %, а у древесины березы до -26,4 %. В то же время величина $\delta_{изг}$ равная всего лишь 0,98 % для древесины дуба [21, 23], в результате обработки изменилась только на 0,4 %, что свидетельствует об отсутствии значимого влияния термического модифицирования на этот показатель.

Результаты испытаний на статическую твердость показали, что относительная разность $\delta_{тв}$ между ее показателями при нагружении в радиальном и тангенциальном направлениях древесины березы [12, 13, 24–27], равная -2,06 %, в результате термического модифицирования немного изменилась, достигнув величины, равной -9,1 %. Это означает, что тангенциальная поверхность ТМД березы осталась более твердой, чем радиальная. Аналогичная направленность смещения показателей и у древесины

дуба [12, 13, 23, 33, 31], у которой величина $\delta_{тв}$ изменилась с -8,36 до -19,6 %.

В отличие от березы и дуба у древесины ясеня [12, 13, 27–29] твердость радиальной поверхности оказалась выше, чем тангенциальной. После термической обработки наблюдается увеличение разницы между показателями твердости радиальной и тангенциальной поверхностей $\delta_{тв}$ от 3,30 до 12,9 %.

Относительная разность между показателями удельного сопротивления выдергиванию шурупов из древесины в радиальном и тангенциальном направлениях определили только для древесины дуба, так как данные по березе и ясеню как в отечественной, так и зарубежной литературе отсутствуют. Для древесины дуба величина $\delta_{выд}$ изменилась незначительно, поскольку ее значение [32–34], равное 10,68 %, после термического воздействия лишь незначительно повысилось.

Выводы

Экспериментальные исследования основных механических и эксплуатационных свойств ТМД березы, ясеня и дуба позволили опре-

делить следующие диапазоны обобщенных показателей: предел прочности при сжатии вдоль волокон — от 80 до 100 МПа; условный предел прочности при сжатии — 7 до 16 МПа; предел прочности при статическом изгибе — от 62 до 127 МПа; статическая твердость торцовой поверхности — от 42 до 75 МПа, радиальной и тангенциальной поверхности — от 20 до 46 МПа; удельное сопротивление выдергиванию шурупов — от 92 до 152 Н/мм; модуль упругости при статическом изгибе — от 11 до 16 ГПа. Указанные значения получены при испытаниях малых чистых образцов устойчивой влажности. Наилучшие сравнительные показатели по комплексу исследуемых свойств имеет древесина ясеня.

Установлено, что древесина березы, ясеня и дуба после термической модификации по классу Thermo D с определенными количественными изменениями сохранила характер анизотропии механических свойств, присущий нативной древесине [35, 36], обладает удовлетворительными механическими и деформационными характеристиками и может быть использована в деревянных конструкциях, эксплуатируемых при умеренных нагрузках, в соответствии с требованиями строительных норм и правил.

Список литературы

- [1] Сафин Р.Р., Сафина А.В., Шаяхметова А.Х. Исследование физико-механических свойств термомодифицированной древесины березы // Вестник Казанского технологического университета, 2015. Т. 18. № 4. С. 213–217.
- [2] Федосенко И.Г., Стукач Т.В., Рапинчук Д.Л. Анализ эксплуатационных свойств древесины различных пород, эксплуатируемой на открытом воздухе // Труды БГТУ. № 2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность, 2012. № 2. С. 179–181.
- [3] Mai C., Militz H. Wood Modification // Springer Handbook of Wood Science and Technology / P. Niemz, A. Teischinger, D. Sandberg, (eds). Springer Handbooks. Cham: Springer, 2023, pp. 873–910.
- [4] Andor T., Lagaña R. Selected properties of thermally treated ash wood // Acta Facultatis Xylogiae Zvolen, 2018, t. 60, no. 1, pp. 51–60.
- [5] Gorbacheva G.A., Sanaev V.G., Bazhenov A.V., Shukhanova I. Studying changes in the structure of thermally modified beech wood by IR Fourier spectroscopy // Inorganic Materials: Applied Research, 2020, t. 11, no. 4, pp. 919–924.
- [6] Sandberg D., Kutnar A. Thermally modified timber: recent developments in Europe and North America // Wood and fiber science, 2016, t. 48, no. 1, pp. 28–39.
- [7] Godinho D. Araujo S.O., Quilhó T., Diamantino T. Thermally modified wood exposed to different weathering conditions: A review // Forests, 2021, t. 12, no. 10, pp. 1400.
- [8] Сафин Р.Р., Сафина А.В., Шаяхметова А.Х. Механические характеристики термодревеси березы // Деревообрабатывающая промышленность, 2015. Т. 1. С. 31–36.
- [9] Esteves B. Wood modification by heat treatment: A review // BioResources, 2009, no. 4(1), pp. 370–404.
- [10] Finnish ThermoWood Association. ThermoWood Handbook. Helsinki, Finland, 2003, 66 p.
- [11] Militz H. Thermal treatment of wood: European processes and their background // IRG/WP 02-40241, 33rd Annual Meeting, 12–17 May, Cardiff-Wales, 2002, no. 4, pp. 1–17.
- [12] Уголев Б.Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения. М.: МГУЛ, 2001. 340 с.
- [13] Боровиков А.М., Уголев Б.Н. Справочник по древесине: Справочник / под ред. Б.Н. Уголева. М.: Лесная промышленность, 1989. 296 с.
- [14] Al-musawi, Huber C., Grabner M., Ungerer B., Krenke T., Matz P., Teischinger A., Müller U. Compressive strength of beech and birch at different moisture contents and temperatures // J. of Materials Science, 2023, pp. 1–15.
- [15] Хвесько Г.М. Анизотропия пределов прочности древесины березы, пропитанной смолой ПН-1 // Механическая технология древесины. Вып. 6. Минск: Высшая школа, 1976. С. 207–210.
- [16] Moliński W., Roszyk E., Jabłoński A. Mechanical parameters of thermally modified ash wood determined by compression in radial direction // Maderas. Ciencia y tecnología, 2016, t. 18, no. 4, pp. 577–586.
- [17] Moliński W., Roszyk E., Jabłoński A. Mechanical parameters of thermally modified ash wood determined on compression in tangential direction // Maderas. Ciencia y tecnología, 2018, t. 20, no. 2, pp. 267–276.
- [18] Niemz P., Clauss S., Michel F., Hansch D. Physical and mechanical properties of common ash (*Fraxinus excelsior* L.) // Wood Research, 2014, t. 59, no. 4, pp. 671–682.
- [19] Volkmer T., Lorenz T., Hass P. Influence of heat pressure steaming (HPS) on the mechanical and physical properties of common oak wood // European J. of Wood and Wood Products, 2014, t. 72, no. 2, pp. 249–259.
- [20] Пауль Э.Э. Исследование прочности древесины дуба при сжатии поперек волокон // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство. Выпуск XVIII, 2010. С. 310–312.
- [21] Borůvka V., Novák D., Šedivka P. Comparison and analysis of radial and tangential bending of softwood and hardwood at static and dynamic loading // Forests, 2020, t. 11, no. 8, pp. 896.
- [22] Marttila J., Möttönen V., Bütün Y., Heräjärvi H. Bending properties of tangentially and radially sawn European aspen and silver birch wood after industrial scale thermo-mechanical modification // 2nd Conference on engineered wood products based on poplar/willow wood, León, Spain, 2016, pp. 113–124.
- [23] Uzcategui M.G.C., Seale R.D., França F.J.N. Physical and mechanical properties of clear wood from red oak and white oak // BioResources, 2020, t. 15, no. 3, pp. 4960–4971.
- [24] Швамм Е.Е., Швамм Л.Г. Изучение отдельных физико-механических свойств древесины березы, термомодифицированной по технологии «Бикос» // Труды БГТУ. № 2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность, 2014. № 2 (166). С. 214–217.
- [25] Antons A., Cirule D., Verovkins A., Kuka E. Effect of thermal treatment on physical and mechanical properties of birch and pine wood // Res Rural Dev., 2018, t. 1, pp. 78–85.

- [26] Shi J. L., Kocaefe D., Zhang J. Mechanical behaviour of Quebec wood species heat-treated using ThermoWood process // *European J. of Wood and Wood Products*, 2007, t. 65, no. 4, pp. 255–259.
- [27] Sydor M., Pinkowski G., Kučerka M., Kminiak R., Antov P., Rogozinski T. Indentation hardness and elastic recovery of some hardwood species // *Applied Sciences*, 2022, t. 12, no. 10, p. 5049.
- [28] Grinins J., Biziks V., Andersons B. Influence of the hydro-thermal treatment on chemical composition, physical and mechanical properties of ash-tree wood // *The 5th conference on hardwood research and utilisation in Europe*, 2012, pp. 241–250.
- [29] Kielmann B.C., Militz H., Mai C., Adamopoulos S. Strength changes in ash, beech and maple wood modified with a N-methylol melamine compound and a metal-complex dye // *Wood Res.*, 2013, t. 58, no. 3, pp. 343–350.
- [30] Čermák P., Dejmál A. The effect of heat and ammonia treatment on colour response of oak wood (*Quercus robur*) and comparison of some physical and mechanical properties // *Maderas. Ciencia y tecnología*, 2013, t. 15, no. 3, pp. 375–389.
- [31] Peng H., Jiang J., Zhan T., Lu J. Influence of density and equilibrium moisture content on the hardness anisotropy of wood // *Forest Products J.*, 2016, t. 66, no. 7–8, pp. 443–452.
- [32] Aytekin A. Determination of screw and nail withdrawal resistance of some important wood species // *International J. of Molecular Sciences*, 2008, t. 9, no. 4, pp. 626–637.
- [33] Uysal M., Haviarova E. Lower Tolerance Limits for Screw Withdrawal in Wood // *Wood and Fiber Science*, 2019, t. 51, no. 4, pp. 375–386.
- [34] Kilic M., Burdurlu E., Ilker U. Comparative analysis of the nail and screw withdrawal resistances of fir (*Abies Mill.*), cherry (*Prunus Avium L.*), walnut (*Juglans Regia L.*) and oak (*Quercus L.*) wood // *Düzce Üniversitesi Orman Fakültesi Ormancılık Dergisi*, 2007, t. 2, no. 2, pp. 61–75.
- [35] Kretschmann D. Mechanical properties of wood // *Wood handbook: wood as an engineering material: chapter 5. Centennial ed. General technical report FPL; GTR-190*. Madison, WI: US Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010, t. 190, pp. 5.1–5.46.
- [36] Dinçkal Ç. Analysis of elastic anisotropy of wood material for engineering applications // *Journal of Innovative Research in Engineering and Sciences*, 2011, t. 2, no. 2, pp. 67–80.

Сведения об авторах

Горбачева Галина Александровна✉ — канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), gorbacheva@bmstu.ru

Скуратов Николай Владимирович — канд. техн. наук, доцент, ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), skuratov@bmstu.ru

Соболев Андрей Викторович — канд. техн. наук, доцент, ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), avsobolev@bmstu.ru

Усов Дмитрий Владимирович — аспирант, ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), usik82.82@mail.ru

Поступила в редакцию 20.12.2024.

Одобрено после рецензирования 07.10.2025.

Принята к публикации 10.02.2026.

TOUGHNESS INDEX OF THREE THERMALLY MODIFIED HARDWOODS

G.A. Gorbacheva✉, N.V. Skuratov, A.V. Sobolev, D.V. Usov

BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

gorbacheva@bmstu.ru

The results of complex tests of the mechanical properties of birch, ash and oak wood subjected to intensive thermal treatment according to the Thermo D class are presented. The toughness indices were determined during tests in various structural directions for compression and static bending, as well as hardness and screw pull-out resistance. The values of the modulus of elasticity under static bending were obtained. All tests were carried out on small clear specimens of standard sizes. A comparative analysis of the established indicators of the mechanical properties of thermally modified birch, ash and oak wood with similar characteristics of native wood of the same species, taken from literary sources, was conducted. The ambiguity of the effect of intensive heat treatment on the considered mechanical properties and the modulus of elasticity under static bending of these wood species was revealed. It was found that there is a significant decrease in the strength of birch and oak wood under static bending after thermal treatment, while for ash wood such an effect could not be identified. It is shown that as a result of thermal modification, the static hardness of the radial and tangential surfaces of birch and ash samples decreases most significantly. A noticeable decrease in hardness of the radial surfaces of oak specimens was also noted, but at the same time, the hardness of their tangential surfaces changed insignificantly. It is indicated that thermal modification has a lesser effect on the strength of wood of all considered species under compression along and across the grain. It was established that as a result of thermal treatment, the wood of the studied species retained the ratios of anisotropy of mechanical properties with some modifications.

Keywords: thermal modification, hardwoods, mechanical properties, anisotropy

Suggested citation: Gorbacheva G.A., Skuratov N.V., Sobolev A.V., Usov D.V. *Opreделение pokazateley prochnosti termicheski modifitsirovannoy drevesiny trekh listvennykh porod* [Toughness index of three thermally modified hardwoods]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2026, vol. 30, no. 4, pp. 110–121. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-4-110-121

References

- [1] Safin R.R., Safina A.V., Shayakhmetova A.K. *Issledovanie fiziko-mekhanicheskikh svoystv termomodifitsirovannoy drevesiny berezy* [Study of the physical and mechanical properties of thermally modified birch wood]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Kazan Technological University], 2015, t. 18, no. 4, pp. 213–217.
- [2] Fedosenko I.G., Stukach T.V., Rapinchuk D.L. *Analiz ekspluatatsionnykh svoystv drevesiny razlichnykh porod, ekspluatiruemykh na otkrytom vozdukh* [Analysis of the performance properties of wood of various species used outdoors]. *Trudy BGTU. № 2. Lesnaya i derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'* [Proceedings of BSTU, no. 2. Forestry and woodworking industry], 2012, no. 2, pp. 179–181.
- [3] Mai C., Militz H. *Wood Modification // Springer Handbook of Wood Science and Technology / P. Niemz, A. Teischinger, D. Sandberg, (eds). Springer Handbooks. Cham: Springer, 2023, pp. 873–910.*
- [4] Andor T., Lagaña R. Selected properties of thermally treated ash wood. *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen*, 2018, t. 60, no. 1, pp. 51–60.
- [5] Gorbacheva G.A., Sanaev V.G., Bazhenov A.V., Shukhanova I. Studying changes in the structure of thermally modified beech wood by IR Fourier spectroscopy. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2020, t. 11, no. 4, pp. 919–924.
- [6] Sandberg D., Kutnar A. Thermally modified timber: recent developments in Europe and North America. *Wood and fiber science*, 2016, t. 48, no. 1, pp. 28–39.
- [7] Godinho D., Araujo S.O., Quilhó T., Diamantino T. Thermally modified wood exposed to different weathering conditions: A review. *Forests*, 2021, t. 12, no. 10, pp. 1400.
- [8] Safin R.R., Safina A.V., Shayakhmetova A.K. *Mekhanicheskie kharakteristiki termodrevesiny breezy* [Mechanical characteristics of birch thermowood]. *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'* [Wood industry], 2015, t. 1, pp. 31–36.
- [9] Esteves B. Wood modification by heat treatment: A review. *BioResources*, 2009, no. 4(1), pp. 370–404.
- [10] Finnish ThermoWood Association. *ThermoWood Handbook*. Helsinki, Finland, 2003, 66 p.
- [11] Militz H. Thermal treatment of wood: European processes and their background. *IRG/WP 02-40241*, 33rd Annual Meeting, 12–17 May, Cardiff-Wales, 2002, no. 4, pp. 1–17.
- [12] Ugolev B.N. *Drevesinovedenie s osnovami lesnogo tovarovedeniya* [Wood science with the basics of forest commodity science]. Moscow: MGUL, 2001, 340 p.
- [13] Borovikov A.M., Ugolev B.N. *Spravochnik po drevesine: Spravochnik* [Wood Handbook: Handbook]. Ed. B.N. Ugolev. Moscow: Lesnaya Promyshlennost' [Timber industry], 1989, 296 p.
- [14] Al-musawi, Huber C., Grabner M., Ungerer B., Krenke T., Matz P., Teischinger A., Müller U. Compressive strength of beech and birch at different moisture contents and temperatures. *J. of Materials Science*, 2023, pp. 1–15.

- [15] Khves'ko G.M. *Anizotropiya predelov prochnosti drevesiny berezy, propitannoy smoloy PN-1* [Anisotropy of the tensile strength of birch wood impregnated with PN-1 resin]. Mekhanicheskaya tekhnologiya drevesiny: respublikanskiy mezhvedomstvennyy sbornik [Mechanical technology of wood: republican interdepartmental collection]. Vyp. 6. Minsk: Vysheyshaya shkola, 1976, pp. 207–210.
- [16] Moliński W., Roszyk E., Jabłoński A. Mechanical parameters of thermally modified ash wood determined by compression in radial direction. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 2016, t. 18, no. 4, pp. 577–586.
- [17] Moliński W., Roszyk E., Jabłoński A. Mechanical parameters of thermally modified ash wood determined on compression in tangential direction. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 2018, t. 20, no. 2, pp. 267–276.
- [18] Niemz P., Clauss S., Michel F., Hansch D. Physical and mechanical properties of common ash (*Fraxinus excelsior* L.). *Wood Research*, 2014, t. 59, no. 4, pp. 671–682.
- [19] Volkmer T., Lorenz T., Hass P. Influence of heat pressure steaming (HPS) on the mechanical and physical properties of common oak wood. *European J. of Wood and Wood Products*, 2014, t. 72, no. 2, pp. 249–259.
- [20] Paul' E.E. *Issledovanie prochnosti drevesiny duba pri szhatii poperek volokon* [Study of the strength of oak wood under compression across the grain]. Trudy BGTU. Seriya 1: Lesnoe khozyaystvo. Vypusk XVIII [Proceedings of BSTU. Series 1: Forestry, iss. XVIII], 2010, pp. 310–312.
- [21] Borůvka V., Novák D., Šedivka P. Comparison and analysis of radial and tangential bending of softwood and hardwood at static and dynamic loading. *Forests*, 2020, t. 11, no. 8, pp. 896.
- [22] Marttila J., Möttönen V., Bütün Y., Heräjärvi H. Bending properties of tangentially and radially sawn European aspen and silver birch wood after industrial scale thermo-mechanical modification. 2nd Conference on engineered wood products based on poplar/willow wood, León, Spain, 2016, pp. 113–124.
- [23] Uzategui M.G.C., Seale R.D., França F.J.N. Physical and mechanical properties of clear wood from red oak and white oak. *BioResources*, 2020, t. 15, no. 3, pp. 4960–4971.
- [24] Shvamm E.E., Shvamm L.G. *Izuchenie otdel'nykh fiziko-mekhanicheskikh svoystv drevesiny berezy, termomodifitsirovannoy po tekhnologii «Bikos»* [Study of individual physical and mechanical properties of birch wood, thermally modified using the Bikos technology]. Trudy BGTU. № 2. Lesnaya i derevoobrabatvyvayushchaya promyshlennost' [Proceedings of BSTU, no. 2, Forestry and woodworking industry], 2014, no. 2 (166), pp. 214–217.
- [25] Antons A., Cirule D., Verovkins A., Kuka E. Effect of thermal treatment on physical and mechanical properties of birch and pine wood. *Res Rural Dev.*, 2018, t. 1, pp. 78–85.
- [26] Shi J. L., Kocaefe D., Zhang J. Mechanical behaviour of Quebec wood species heat-treated using ThermoWood process. *European J. of Wood and Wood Products*, 2007, t. 65, no. 4, pp. 255–259.
- [27] Sydor M., Pinkowski G., Kučerka M., Kminiak R., Antov P., Rogozinski T. Indentation hardness and elastic recovery of some hardwood species. *Applied Sciences*, 2022, t. 12, no. 10, p. 5049.
- [28] Grinins J., Biziks V., Andersons B. Influence of the hydro-thermal treatment on chemical composition, physical and mechanical properties of ash-tree wood. The 5th conference on hardwood research and utilisation in Europe, 2012, pp. 241–250.
- [29] Kielmann B.C., Militz H., Mai C., Adamopoulos S. Strength changes in ash, beech and maple wood modified with a N-methylol melamine compound and a metal-complex dye. *Wood Res.*, 2013, t. 58, no. 3, pp. 343–350.
- [30] Čermák P., Dejmal A. The effect of heat and ammonia treatment on colour response of oak wood (*Quercus robur*) and comparison of some physical and mechanical properties. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 2013, t. 15, no. 3, pp. 375–389.
- [31] Peng H., Jiang J., Zhan T., Lu J. Influence of density and equilibrium moisture content on the hardness anisotropy of wood. *Forest Products J.*, 2016, t. 66, no. 7–8, pp. 443–452.
- [32] Aytekin A. Determination of screw and nail withdrawal resistance of some important wood species. *International J. of Molecular Sciences*, 2008, t. 9, no. 4, pp. 626–637.
- [33] Uysal M., Haviarova E. Lower Tolerance Limits for Screw Withdrawal in Wood. *Wood and Fiber Science*, 2019, t. 51, no. 4, pp. 375–386.
- [34] Kilic M., Burdurlu E., Ilker U. Comparative analysis of the nail and screw withdrawal resistances of fir (*Abies Mill.*), cherry (*Prunus Avium L.*), walnut (*Juglans Regia L.*) and oak (*Quercus L.*) wood. *Düzce Üniversitesi Orman Fakültesi Ormancılık Dergisi*, 2007, t. 2, no. 2, pp. 61–75.
- [35] Kretschmann D. Mechanical properties of wood // *Wood handbook: wood as an engineering material: chapter 5*. Centennial ed. General technical report FPL; GTR-190. Madison, WI: US Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010, t. 190, pp. 5.1–5.46.
- [36] Dinçkal Ç. Analysis of elastic anisotropy of wood material for engineering applications // *Journal of Innovative Research in Engineering and Sciences*, 2011, t. 2, no. 2, pp. 67–80.

Authors' information

Gorbacheva Galina Aleksandrovna — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), gorbacheva@bmstu.ru

Skuratov Nikolay Vladimirovich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), skuratov@bmstu.ru

Sobolev Andrey Vicnorovich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), avsobolev@bmstu.ru

Usov Dmitry Vladimirovich — PhD student of the BMSTU, (Mytishchi branch) usik82.82@mail.ru

Received 20.12.2024.

Approved after review 07.10.2025.

Accepted for publication 10.02.2026.

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