

DOI: 10.15393/j2.art.2021.5663

УДК 674.812

Статья

Модифицирование древесины микроволновой энергией

Аксенов Алексей Александрович

кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова» (Российская Федерация), aaa-aksenov@mail.ru

Малюков Сергей Владимирович

кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова» (Российская Федерация), malyukovsergey@yandex.ru

Городилов Александр Владимирович

магистр второго года обучения, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова» (Российская Федерация), gorodilov_al@mail.ru

Получена: 22 февраля 2021 / Принята: 20 марта 2021 / Опубликовано: 23 марта 2021

Аннотация: Древесина модифицированная, изготовленная по традиционным технологиям, из года в год получает всё более широкое применение для изготовления подшипников. Они достаточно эффективно заменяют подшипники из цветных и чёрных металлов, особенно в узлах трения машин, механизмов и технологического оборудования, которые работают в абразивных, загрязнённых средах и тяжёлых условиях Крайнего Севера при температурах, достигающих -60°C . Подшипники из модифицированной древесины с большим эффектом заменяют также и подшипники качения при их работе в абразивных средах, когда закрыть доступ на поверхность трения в подшипнике пыли, песка, цемента, окалины, грязи и других абразивов невозможно или это требует создания сложных и дорогостоящих лабиринтовых уплотнений. Многолетним опытом доказано, что прежде чем приступить к созданию новых материалов, необходимо, в первую очередь, глубоко изучить область их применения и установить приоритетные показатели качества, которые определяют работоспособность, надёжность и долговечность изделий, изготовляемых из этих материалов. Целью исследований является разработка теории создания высоких, экологически чистых, энергосберегающих технологий модифицирования древесины с технологическим регулированием (упрочнением) приоритетных показателей качества модифицированной древесины, используемой для изготовления подшипников.

В результате предварительных исследований выявлено, что при термообработке древесины микроволновой энергией в процессе прессования и пропитки модифицированной древесины новыми композиционными модификаторами можно получить, ещё более эффективный заменитель цветных и чёрных металлов в узлах трения машин, механизмов и технологического оборудования, работающих в тяжёлых условиях эксплуатации. Проведённое теоретическое исследование показало, что имеет место высокий эффект термообработки древесины микроволновой энергией при её модифицировании, который заключается не только в ускорении удаления влаги (сокращение цикла сушки), но и в ускорении релаксации внутренних напряжений, возникающих при уплотнении древесины, а также упрочнении модифицированной древесины, т. е. её «закаливании».

Ключевые слова: модифицированная древесина; термообработка; ускорение релаксаций напряжений; сушка древесины; твёрдость древесины; пластификация

DOI: 10.15393/j2.art.2021.5663

Article

Modification of wood microwave energy

Alexey Aksenov

Ph. D. in engineering, Voronezh state forest engineering University named after G. F. Morozov (Russian Federation), aaa-aksenov@mail.ru

Sergey Malyukov

Ph. D. in engineering, Voronezh state forest engineering University named after G. F. Morozov (Russian Federation), malyukovsergey@yandex.ru

Alexander Gorodilov

second year master, Voronezh state forest engineering University named after G. F. Morozov (Russian Federation), gorodilov_al@mail.ru

Received: 22 February / Accepted: 20 March 2021 / Published: 23 March 2021

Abstract: Modified wood manufactured with traditional technologies is increasingly used for bearings fabrication. They quite effectively replace bearings made of non-ferrous and ferrous metals, especially in friction units of machines, mechanisms and technological equipment that operate in abrasive, polluted environments and harsh conditions of the Far North at temperatures reaching minus 60 °C. Bearings made of modified wood also effectively replace rolling bearings if they operate in abrasive environments, when it is impossible to block the access of dust, sand, cement, oxide scale, dirt and other abrasives to the friction surface in the bearing or when complex and expensive cartridge-type bearings should be made. Long-term experience has proved that to create new materials it is necessary to start with deep study of their designated area and to establish priority quality indicators that determine the performance, reliability and durability of products made from these materials. The aim of the research is to develop a theory of creating high, environmentally friendly, energy-saving technologies for modifying wood with technological regulation (hardening) of the priority indicators of the quality of modified wood used for bearings manufacture. Our exploratory research revealed that heat treatment of wood with microwave energy in the process of pressing and impregnation of modified wood with new composite modifiers may result in a new, even more effective substitute for non-ferrous and ferrous metals in friction units of machines, mechanisms and technological equipment operating in difficult conditions. The authors' theoretical study showed that wood heat treatment with microwave energy is effective not only because it accelerates the removal of moisture (shortening the drying cycle), but it also

accelerates the relaxation of internal stresses arising during compaction of wood, as well as hardening of modified wood, i.e. its "hardening".

Keywords: modified wood; heat treatment; acceleration of stress relaxation; drying of wood; hardness of wood; plasticization

1. Введение

При создании высоких технологий модифицирования древесины необходимо обеспечить: ощутимое сокращение длительности цикла термообработки древесины, снижение энергозатрат изготовления; самое главное — обеспечить повышение качества модифицированной древесины (МД) и высокую степень безопасности с экологической чистотой как продукции, так и производства [1], [2].

В недрах высоких технологий должны быть созданы и внедрены системы технологического регулирования с целью улучшения качественных показателей МД в процессе её производства.

На основе исследований, анализа традиционного технологического процесса модифицирования древесины определены основные задачи, успешное решение которых обеспечит переход от традиционных технологий модифицирования древесины к высоким.

По результатам поисковых [3], [4], [5] исследований необходимо установить эффект модифицирования древесины термообработкой микроволновой энергией, а также в теоретическом и практическом планах исследовать взаимодействие древесины с микроволновой энергией, а именно:

- при прогреве и ускорении удаления влаги с исходных заготовок до их пластификации;
- при снижении длительности нагрева при пластификации исходных заготовок до уплотнения;
- при ускорении релаксации напряжений в древесине при её уплотнении, что снизит энергозатраты на прессование и приведёт к уменьшению металлоёмкости кассет, фиксирующих спрессованные заготовки до термообработки;
- при термообработке спрессованной древесины в виде брусков, зафиксированных в металлических кассетах, для дальнейшего снижения влажности, ускорения релаксации напряжений, стабилизации формы, размеров и повышения показателей качества.

В настоящее время микроволновая энергия используется преимущественно для сушки древесины, но в очень ограниченных объёмах.

Из обзора литературных данных и исследований [6], [7], [8] по взаимодействию микроволновой энергии с древесиной следует, что исследований на молекулярно-атомном уровне очень мало.

На основе проведённых предварительных исследований необходимо ввести новые термины и понятия по модифицированию древесины с использованием микроволновой энергии для термообработки древесины.

Понятие «сушка древесины» при её модифицировании неприемлемо, т. к. под сушкой подразумевается только удаление влаги из древесины, а при термообработке древесины при её модифицировании одновременно с удалением влаги происходят и другие сложные явления на молекулярно-атомном уровне. При обработке древесины она пластифицируется, что приводит к снижению давления уплотнения и ускоряет релаксацию напряжений, а также происходит упрочнение древесины — стабилизация её формы и размеров, повышение твёрдости и упругости [9], [10], [11].

Под термообработкой древесины микроволновой энергией подразумевается нагрев её изнутри с целью удаления влаги (сушки), пластификации и ускорения релаксации внутренних напряжений, возникающих при уплотнении, снижения усилия при уплотнении и «закаливании» древесины, т. е. повышения её твёрдости, упругости и стабильности.

Целью исследований является разработка теории создания высоких, экологически чистых, энергосберегающих технологий модифицирования древесины с технологическим регулированием (упрочнением) приоритетных показателей качества модифицированной древесины, используемой для изготовления подшипников.

2. Материалы и методы

Для установления возможного эффекта модифицирования древесины рассмотрим состояние и способы сушки натуральной древесины, которая производится с целью удаления влаги [12], [13], [14].

Создаваемые и используемые в настоящее время установки и устройства для сушки древесины микроволновой энергией просты по комплектности и управляемости. При этом в незначительных объёмах освоена сушка натуральной древесины в волноводах-камерах в статике, когда магнетрон излучает микроволновую энергию, которая распределяется на весь пакет постоянно, омывая всю необходимую для сушки зону одновременно. Магнетроны-волноводы и камеры оборудуются рупорами, рассекателями, объёмными резонаторами, отражателями, поглотителями, обеспечивающими направление воздействия потока микроволновой энергии, её разделение, отражение и поглощение. Все эти устройства элементарно просты по конструкции.

В настоящее время известна сушка «в динамике», когда магнетрон и элементы волновода неподвижны, а излучение микроволновой энергии происходит в меандрах, через которые перемещаются обрабатываемые бруски или пакеты.

Заслуживает особого внимания не изученная до настоящего времени динамическая (зональная) сушка, когда магнетрон или отводы от него подвижны и через подвижные рупора облучается неподвижный брус или пакет. Можно установить несколько подвижных рупоров от магнетрона. В этом случае каждый из них обслуживает ту зону бруса или пакета, против которой он двигается или поворачивается на определённый угол для расширения зоны охвата.

Динамическая сушка практически ещё не освоена. Весьма эффективной может оказаться динамическая термообработка при удалении влаги способом симметричного от центра бруса в две стороны к концам перемещения магнетронов или рупоров, облучающих древесину. Рабочая скорость перемещения зоны нагрева в обе стороны от центра бруса к его концам подбирается в зависимости от начальной влажности и температуры бруса, а также плотности древесины. Этот способ удаления влаги путём сгона её в обе стороны от центра бруса перемещением тепловой зоны (динамическим внутренним движущимся обогревом) позволит во много раз сократить время сушки.

Процесс термомеханического модифицирования древесины заключается в её уплотнении

с термообработкой и последующей пропиткой композиционным модификатором. Основной операцией процесса производства МД является прессование, протекающее при больших сложных деформациях. Не менее важными операциями являются манипуляции по обеспечению уплотнения древесины с целью уменьшения давления прессования и ускорения релаксации напряжений при термообработке брусков после уплотнения [15], [16], [17].

Термообработка древесины производится в два этапа. На первом этапе термообработки (до уплотнения) древесина нагревается, из неё удаляется влага, и она пластифицируется с целью уменьшения усилий прессования и ускорения релаксации напряжений. На втором этапе производится термообработка спрессованных и зафиксированных в кассетах заготовок (брусков) с целью снижения влажности до равновесной (6—8 %) и полной релаксации внутренних напряжений. После полной релаксации внутренних напряжений в брусках они свободно вынимаются из кассет.

Для уточнения эффекта термообработки при уплотнении рассмотрим классические уравнения, описывающие деформацию древесины при прессовании.

Малые деформации при уплотнении определяются некоторым ядром временной функции $K(t, \tau)$, характеризующим влияние внутреннего напряжения σ в момент времени t на деформацию и описываемым следующим интегральным уравнением:

$$\varepsilon = \int_{-\infty}^t K(t, \tau) \sigma(\tau) d\tau, \quad (1)$$

где ε — деформация при уплотнении во времени;

$K(t, \tau)$ — ядро, характеризующее изменение внутреннего напряжения во времени;

$\sigma(\tau)$ — напряжение деформации во времени;

t — граничное время;

τ — текущее время.

В дальнейшем в результате развития теории А. А. Ильюшиным [18] и Ю. И. Роботновым [19] получена зависимость деформации для больших напряжений:

$$K(t, \tau) = f_0(-\beta, t, -\tau) = \sum_{K=0}^{\infty} \frac{(-\beta)^K (t-\tau)^{K(\alpha)} + \alpha}{\Gamma(K+1)\alpha + 1}, \quad (2)$$

где K — коэффициент, учитывающий интенсивность изменений нагрева и деформаций;

Γ — оператор преобразования;

α и β — коэффициенты деформации, зависящие от многих факторов, определяются методом численного преобразования по экспоненциальной кривой ползучести, графоаналитически или асимптотически.

Большие деформации в древесине определяются по формуле

$$\varepsilon_n(t) = \sum_{i=0}^{\infty} [\varepsilon^{(j)}]_{t_i} \frac{t-t_j}{j} (t-t_i), \quad (3)$$

где t_i и t_j — точки отсчёта времени граничных условий.

Конечное состояние модифицированной древесины определяется остаточными деформациями, которые, однако, не являются полностью необратимыми. Согласно теории деформационного упрочнения древесины, учитывающей разрушение и трансформацию деформаций, остаточная деформация определяется по формуле

$$\varepsilon_{ост} = \frac{1}{f \cdot t_0 \sigma \cdot t_1 \beta} \cdot \left\{ 1 - \left[1 - B(1-m)\sigma_0 \varphi_0 \left(At + \frac{\alpha}{\beta_2} \exp t \frac{\alpha}{\beta_2} \right) \right]^{1-m} \right\}, \quad (4)$$

где $\sigma_0 \varphi_0$ — граничное значение напряжения и коэффициента;

$A = 1 - \frac{B}{\alpha}$ — постоянная величина;

B и m — коэффициенты, связанные со структурным параметром вязкости η , характеризующей внутреннее трение, определяются по начальным параметрам степенных кривых типа $\varepsilon_{ост} = kt^{(1-m)^{-1}}$.

Древесина имеет сложную структуру, в которой большое количество капилляр, микро- и макропор равномерно распределены по всему объёму [20], [21], [22]. Благодаря этому, она способна наполняться, уплотняться, пропитываться и обрабатываться химическими веществами и различными видами энергии и тем самым ей можно привить нужные показатели качества в широком диапазоне их значений. Например, уплотняя древесину осины с попутной обработкой СВЧ-энергией, её твёрдость можно довести до 170 МПа и более, т. е. увеличить её более чем в 10 раз, по сравнению с твёрдостью натуральной осины при влажности 30 % (15,2 МПа).

Древесину как очень сложное химическое вещество, в клеточной оболочке которого содержится большое количество веществ, основными из которых являются целлюлоза (42—58 %), лигнин (21—29 %), гексозаны и пентозаны (13—40 %), с точки зрения механики твёрдого тела можно рассматривать как совокупность конструктивных элементов с наполнителем в виде сложного с химической точки зрения вещества. Поэтому во время рассмотрения эффекта влияния микроволновой энергии при модифицировании древесины необходимо, в первую очередь, рассмотреть функции вязкости при внутреннем трении конструктивных элементов и различных температурно-влажностных условиях в силовом электромагнитном поле микроволновой энергии.

3. Результаты

Результаты анализа банка данных и имеющихся разработок позволяют выдвинуть обоснованную гипотезу о возможности технологического управления процессом перевода цельной натуральной древесины в состояние высокой пластичности с помощью обработки микроволновой энергией, что, в свою очередь, позволит резко снизить усилие прессования древесины при одновременном снижении внутренних напряжений и ускорении релаксации.

Нагрев микроволновой энергией идёт весьма быстро, поскольку отвод тепла может не поспевать за подводом энергии внутрь бруска, поэтому на частотах свыше 600 МГц рекомендуется импульсный режим нагрева при термообработке древесины. При импульсном режиме сушки, когда нагрев чередуется с остыванием, потребное количество энергии на сушку резко снижается (более чем на 30 %). Для удаления влаги нормой считается расход в количестве 2 кВт·час электроэнергии на 1 кг испаряемой влаги при сушке микроволновой энергией. Сушка конвективным способом (ПАП-32) потребляет 2,36 кВт·час на 1 кг испаряемой влаги.

Расход электроэнергии может быть значительно снижен при сочетании конвективно-контактной сушки с сушкой микроволновой энергией и, особенно, при вакуумно-конвективной сушке с сушкой микроволновой энергией более чем в 2 раза.

Термообработке при модифицировании древесины подвергаются бруски шириной 120—150 мм и высотой до 100 мм направленным потоком микроволновой энергии частотой 2,45 ГГц. При этом снимаются все проблемы вреда отражающего потока, а такие системы позволяют наиболее эффективно использовать микроволновую энергию.

Для определения функций микроволновой энергии и её влияния на различные элементы древесины при термообработке рассмотрим плотность потока влаги J , которая определяется по формуле

$$J = -a\rho_0 \frac{\partial w}{\partial x} - a\rho_0 \cdot \delta \frac{\partial T}{\partial x} - b \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (5)$$

где a — коэффициент влагопроводности;

ρ_0 — плотность древесины в сухом состоянии;

δ — термокоэффициент;

b — коэффициент молярного переноса;

$\frac{\partial w}{\partial x}$ — градиент влаги;

$\frac{\partial T}{\partial x}$ — градиент температуры;

$\frac{\partial p}{\partial x}$ — градиент внутреннего парциального давления.

4. Обсуждение и заключение

Дифференциальное уравнение деформирования древесины как композиционно-пористого материала определяется количеством нелинейности, которая определяется числом вязкостей η уравнения состояния. В своей работе В. Б. Огарков с соавт. [23] это число вязкостей принимали равным единице. Один вязкий элемент обеспечивает применение линейных уравнений связи, а также позволяет провести линейное программирование при планировании экспериментов. Исследования, проводимые рядом российских и зарубежных учёных

(О. А. Фомина, В. И. Врублевская, М. В. Аникеева, В. А. Шамаев, Х. Не, S. Ouertani, A. Koubaa, S. Azzouz и др.) [24—33], показали широкий спектр применения модифицированной древесины. Все исследования, осуществлённые ими, носят, в основном, прикладной характер и описывают процесс удаления влаги (влаго-теплоперенос) в совокупности с общетехническими явлениями и экономическими вопросами.

Таким образом, при термообработке микроволновой энергией необходимо управлять градиентами влаги, температуры и парциального давления. Электромагнитная энергия действует на градиенты внутреннего давления и температуры изнутри, что за счёт активизации электронов изменяет внутреннее состояние древесины.

В дальнейшем необходимо привести теоретические исследования процесса термообработки древесины в поле микроволновой энергии в трёх направлениях: исследовать влияния микроволновой энергии на процесс нагрева и удаления влаги; изучить влияния электромагнитных колебаний на пластификацию древесины с целью снижения усилия уплотнения; исследовать релаксацию в напряжённом состоянии при воздействии микроволновой энергии. При этом в качестве функции отклика может рассматриваться как усилие прессования (его снижение), так и реологическое проявление — релаксация внутренних напряжений или ползучесть, вызываемые внутренними процессами.

В качестве вывода можно сказать, что обработка древесины микроволновой энергией в процессе её модифицирования может дать огромный эффект за счёт интенсификации удаления влаги и снижения длительности сушки. Внутренние процессы, происходящие в древесине на молекулярно-атомном уровне, приводят к усилению её пластификации в результате снижения вязкости, к изменению релаксации внутренних напряжений и, самое главное, к «закаливанию» древесины — повышению её твёрдости, упругости и стабильности.

Создание единой совмещённой цепочки термообработки древесины микроволновой энергией при модифицировании [термообработка исходных заготовок в виде брусков с высокой влажностью с целью удаления влаги (снижения её до 20 %) и нагрева внутренних слоёв с целью пластификации древесины для снижения энергоёмкости уплотнения; термообработка спрессованных брусков в кассетах с целью снижения и выравнивания влажности до равновесной (6—8 %), релаксации напряжений и «закаливания» древесины (повышение твёрдости, упругости и стабильности)] должно обеспечить огромный эффект при прессовании древесины.

Список литературы

1. Семенов Д. Ю., Соколов И. В., Орехов А. В. К вопросу выбора способа модифицирования древесины на основании критериев — применимости и долговечности // Актуальные проблемы науки в агропромышленном комплексе: сб. ст. 69-й междунар. научно-практич. конф.: в 3 т. / под ред. С. В. Цыбакина, С. А. Полозова, А. В. Рожнова. Караваево, 2018. С. 77—82.
2. Курьянова Т. К., Платонов А. Д., Михеевская М. А., Снегирева С. Н., Первакова Е. А. Теоретические основы получения модифицированной древесины // Лесотехнический журнал. 2018. Т. 8, № 1 (29). С. 146—154. DOI:10.12737/article_5ab0dfc30d6f83.06547595.

3. *Balboni B. M., Ozarska B., Garcia J. N., Torgovnikov G.* Microwave treatment of Eucalyptus macrorhyncha timber for reducing drying defects and its impact on physical and mechanical wood properties // Eur. J. Wood Wood Prod. 2017. No. 76 (3). P. 861—870. DOI: 10.1007/s00107-017-1260-1.
4. *Aksenov A. A., Malyukov S. V.* Microwave modification of wood: determination of mechanical properties of softwood // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Forestry Forum «Forest ecosystems as global resource of the biosphere: calls, threats, solutions». 2020. P. 012—012. DOI: 10.1088 / 1755-1315 / 595/1/012012.
5. *Rajewska K., Smoczkiewicz-Wojciechowska A., Majka J.* Intensification of beech wood drying process using microwaves. // Chem. Process Eng. 2019. No. 40 (2). P. 179—187. DOI: 10.24425/cpe.2019.126110.
6. *Couceiro J., Hansson L., Sehlstedt-Persson M., Vikberg T., Sandberg D.* The conditioning regime in industrial drying of Scots pine sawn timber studied by X-ray computed tomography: a case-study // Eur. J. Wood Wood Prod. 2020. No. 78 (4). P. 673—682. DOI: 10.1007/s00107-020-01549-2.
7. *Dedic A. D., Svrzic S. V., Janevski J. N., Stojanovic B., Milenkovic M. D.* Three-dimensional model for heat and mass transfer during convective drying of wood with microwave heating // J. Porous Media. 2018. No. 21 (10). P. 877—886. DOI: 10.1615/jpormedia.2018018908.
8. *Kostoreva A. A., Kostoreva Z. A., Rogovaya L. V., Loginov V. S.* Research of heat and mass transfer processes in conditions of microwave heating of wet wood // MATEC Web Conf. 2017. No. 110. P. 01—043. DOI: 10.1051/mateconf/201711001043.
9. *Шамаев В. А., Паринов Д. А., Полилов А. Н.* Исследование подшипников скольжения из модифицированной древесины для тяжело нагруженных узлов трения // Проблемы машиностроения и надёжности машин. 2018. № 2. С. 54—59.
10. *Гаянова А. Р.* Актуальность применения подшипников из модифицированной древесины в узлах трения машин и механизмов // Сборник статей XXVIII Междунар. научно-практич. конф.: в 2 ч. Пенза, 2019. С. 70—72.
11. *Медведев И. Н.* Разработка технологии и оборудования для получения заготовок шпал и опор линий электропередач из модифицированной древесины // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2018. Т. 22, № 6. С. 102—109. DOI: 10.18698/2542-1468-2018-6-102-109.
12. *Шамаев В. А.* Стандарты в области модифицирования древесины // Строение, свойства и качество древесины — 2018: материалы VI Междунар. симпозиума имени Б. Н. Уголева, посвящённого 50-летию Регионального Координационного совета по современным проблемам древесиноведения. Новосибирск, 2018. С. 220—221.
13. *Усов Д. В., Владимирова Е. Г.* Исследование предела прочности клеевого соединения при скалывании вдоль волокон термически модифицированной древесины дуба (*Quercus robur* L.) // Деревообрабатывающая промышленность. 2018. № 4. С. 18—24.
14. *Снегирева С. Н., Платонов А. Д., Паринов Д. А., Медведев И. Н., Киселева А. В.* Повышение качества пропитки древесины берёзы различными способами // Лесотехнический журнал. 2019. Т. 9, № 4 (36). С. 126—133. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2019.4/14.
15. *Шакирова О. И.* Ползучесть и обратная ползучесть натуральной и пластифицированной древесины берёзы при прессовании поперёк волокон // Лесотехнический журнал. 2020. Т. 10, № 1 (37). С. 145—152. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2020.1/15.
16. *Medvedev I. N., Parinov D. A., Shakirova O. I.* Railroad ties produced from modified wood for cold climate regions // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Scientific and Practical Conference «Forest Ecosystems as Global Resource of the Biosphere: Calls, Threats, Solutions». 2019. P. 012—064. DOI: 10.1088 / 1755-1315 / 392/1/012064.
17. *Shamaev V. A., Medvedev I. N., Parinov D. A.* Study of modified wood as a bearing material for machine-building // Advances in Engineering Research. Proceedings of the International

- Conference «Aviamechanical engineering and transport» (AVENT 2018). 2018. P. 478—482. DOI: 10.2991/avent-18.2018.92.
18. *Ильюшин А. А.* Труды. Моделирование динамических процессов в твёрдых телах и инженерные приложения. М.: Физматлит, 2009. Т. 4. 620 с.
 19. *Работнов Ю. Н.* Механика деформируемого твёрдого тела: учебник. 2-е изд., испр. М.: Наука, 1988. 711 с.
 20. *Platonov A. D., Kuryanova T. K., Mikheevskaya M. A., Snegireva S. N.* Increasing the service life of sleepers made from birch wood // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Jubilee Scientific and Practical Conference «Innovative Directions of Development of the Forestry Complex (FORESTRY-2018)». 2019. P. 012—030. DOI: 10.1088 / 1755-1315 / 226/1/012030.
 21. *Medvedev I. N., Shamaev V. A., Parinov D. A., Shakirova O. I.* Producing sleepers from modified wood for railways in cold regions // Lecture Notes in Civil Engineering. 2020. Т. 49. P. 197—204. DOI: 10.1007/978-981-15-0450-1_20.
 22. *Паринов Д. А., Шамаев В. А., Медведев И. Н.* Разработка параметров технологического процесса для производства заготовок шпал из модифицированной древесины // Лесотехнический журнал. 2018. Т. 8, № 1 (29). С. 154—165. DOI: 10.12737/article_5ab0dfc4643417.34919882.
 23. *Огарков В. Б., Стородубцева Т. Н.* Расчёт напряжённо-деформированного состояния анизотропной цилиндрической оболочки: деп. рук. № 2254-B2002 25.12.2002.
 24. *Фомина О. А.* Способы модифицирования древесины лиственных пород: отечественный и зарубежный опыт // Дневник науки. 2017. № 9 (9). С. 4.
 25. *Врублевская В. И., Макеев В. В.* Абразивное изнашивание антифрикционного материала на основе модифицированной древесины берёзы // Трение и износ. 2019. Т. 40, № 5. С. 535—539.
 26. *Аникеева М. В., Врублевская В. И.* Антифрикционные характеристики подшипников скольжения из модифицированной прессованной древесины // Трение и износ. 2020. Т. 41, № 5. С. 612—618.
 27. *Shamaev V. A., Parinov D. A., Polilov A. N.* Study of the plain bearings of modified wood for heavy-loaded friction assemblies // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2018. Т. 47, No. 2. P. 168—172. DOI: 10.3103 / S1052618818020115.
 28. *Shamaev V. A.* Computer simulation of the process of end-grain wood treatment under pressure // Acta Facultatis Xylogiae Zvolen. 2020. Т. 62, No. 1. P. 29—39. DOI: 10.17423/afx.2020.62.1.03.
 29. *Yudin R. V., Parinov D. A., Medvedev I. N.* Design engineering and manufacturing of technology of bearings for heavy-duty friction units // Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2020. Т. 1. P. 1251—1258. DOI: 10.1007 / 978-3-030-22041-9_130.
 30. *Shamaev V. A., Medvedev I. N., Parinov D. A., Shakirova O. I., Anisimov M. V.* Investigation of modified wood as a material power transmission pole produced by self-pressing method // Acta Facultatis Xylogiae Zvolen. 2018. Т. 60, No. 2. P. 25—32. DOI: 10.17423/afx.2018.60.2.02.
 31. *Kiseleva A. V., Snegireva S. N., Platonov A. D., Pinchevska O. A.* Density formation along the trunk radius in various wood species based on latitudinal or altitudinal zoning // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Forestry Forum «Forest ecosystems as global resource of the biosphere: calls, threats, solutions». 2020. P. 012—055. DOI: 10.1088 / 1755-1315 / 595/1/012055.
 32. *Ouertani S., Koubaa A., Azzouz S., Bahar R., Hassini L., Belghith A.* Microwave drying kinetics of jack pine wood: determination of phytosanitary efficacy, energy consumption, and mechanical properties // Eur. J. Wood Wood Prod. 2018. No. 76 (4). P. 1101—1111. DOI: 10.1007/s00107-018-1316-x.

33. He X., Xiong X., Xie J., Li Y., Wei Y., Quan P., Mou Q., Li X. Effect of microwave pretreatment on permeability and drying properties of wood // *BioResources*. 2017. No. 12 (2). P. 3850—3863. DOI: 10.15376/biores.12.2.3850-3863.

References

1. Semenov D. Yu., Sokolov I. V., Orekhov A. V. On the issue of choosing a method for modifying wood on the basis of criteria — applicability and durability. *Actual problems of science in the agro-industrial complex. Collection of articles of the 69th international scientific-practical conference: in 3 volumes*. Ed. S. V. Tsybakina, S. A. Polozova, A. V. Rozhnova. Karavaevo, 2018, pp. 77—82. (In Russ.)
2. Kuryanova T. K., Platonov A. D., Mikheevskaya M. A., Snegireva S. N., Pervakova E. A. Theoretical foundations of obtaining modified wood. *Lesotekhnicheskii zhurnal*, 2018, vol. 8, no. 1 (29), pp. 146—154. doi: 10.12737 / article_5ab0dfc30d6f83.06547595. (In Russ.)
3. Balboni B. M., Ozarska B., Garcia J. N., Torgovnikov G. Microwave treatment of Eucalyptus macrorhyncha timber for reducing drying defects and its impact on physical and mechanical wood properties. *Eur. J. Wood Wood Prod.*, 2017, no. 76 (3), pp. 861—870. doi: 10.1007/s00107-017-1260-1.
4. Aksenov A. A., Malyukov S. V. Microwave modification of wood: determination of mechanical properties of softwood. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Forestry Forum «Forest ecosystems as global resource of the biosphere: calls, threats, solutions»*, 2020, pp. 012—012. doi: 10.1088 / 1755-1315 / 595/1/012012.
5. Rajewska K., Smoczkiwicz-Wojciechowska A., Majka J. Intensification of beech wood drying process using microwaves. *Chem. Process Eng.*, 2019, no. 40 (2), pp. 179—187. doi: 10.24425/cpe.2019.126110.
6. Couceiro J., Hansson L., Sehlstedt-Persson M., Vikberg T., Sandberg D. The conditioning regime in industrial drying of Scots pine sawn timber studied by X-ray computed tomography: a case-study. *Eur. J. Wood Wood Prod.*, 2020, no. 78 (4), pp. 673—682. doi: 10.1007/s00107-020-01549-2.
7. Dedic A. D., Svrzic S. V., Janevski J. N., Stojanovic B., Milenkovic M. D. Three-dimensional model for heat and mass transfer during convective drying of wood with microwave heating. *J. Porous Media*, 2018, no. 21 (10), pp. 877—886. doi: 10.1615/jpormedia.2018018908.
8. Kostoreva A. A., Kostoreva Z. A., Rogovaya L. V., Loginov V. S. Research of heat and mass transfer processes in conditions of microwave heating of wet wood. *MATEC Web Conf.*, 2017, no. 110, pp. 01—043. doi: 10.1051/mateconf/201711001043.
9. Shamaev V. A., Parinov D. A., Polilov A. N. Research of sliding bearings from modified wood for heavy loaded friction units. *Problems of mechanical engineering and reliability of machines*, 2018, no. 2, pp. 54—59. (In Russ.)
10. Gayanova A. R. Relevance of the use of bearings made of modified wood in friction units of machines and mechanisms. *Collection of articles of the XXVIII International Scientific and Practical Conference: in 2 hours*, Penza, 2019, pp. 70—72. (In Russ.)
11. Medvedev I. N. Development of technology and equipment for obtaining blanks of sleepers and supports for power lines from modified wood. *Forestry Bulletin*, 2018, vol. 22, no. 6, pp. 102—109. doi: 10.18698 / 2542-1468-2018-6-102-109. (In Russ.)
12. Shamaev V. A. Standards in the field of wood modification. *Structure, properties and quality of wood — 2018. Proceedings of the VI International Symposium named after B. N. Ugolev, dedicated to the 50th anniversary of the Regional Coordination Council on modern problems of wood science*, Novosibirsk, 2018, pp. 220—221. (In Russ.)

13. Usov D. V., Vladimirova E. G. Study of the ultimate strength of the adhesive joint when chipping along the fibers of thermally modified oak wood (*Quercus robur* L.). *Woodworking industry*, 2018, no. 4, pp. 18—24. (In Russ.)
14. Snegireva S. N., Platonov A. D., Parinov D. A., Medvedev I. N., Kiseleva A. V. Improving the quality of impregnation of birch wood by various methods. *Lesotekhnicheskii zhurnal*, 2019, vol. 9, no. 4 (36), pp. 126—133. doi: 10.34220/issn.2222-7962/2019.4/14. (In Russ.)
15. Shakirova O. I. Creep and reverse creep of natural and plasticized birch wood when pressing across the fibers. *Lesotekhnicheskii zhurnal*, 2020, vol. 10, no. 1 (37), pp. 145—152. doi: 10.34220/issn.2222-7962/2020.1/15. (In Russ.)
16. Medvedev I. N., Parinov D. A., Shakirova O. I. Railroad ties produced from modified wood for cold climate regions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Scientific and Practical Conference «Forest Ecosystems as Global Resource of the Biosphere: Calls, Threats, Solutions»*, 2019, pp. 012—064. doi: 10.1088 / 1755-1315 / 392/1/012064.
17. Shamaev V. A., Medvedev I. N., Parinov D. A. Study of modified wood as a bearing material for machine-building. *Advances in Engineering Research. Proceedings of the International Conference «Aviamechanical engineering and transport» (AVENT 2018)*, 2018, pp. 478—482. doi: 10.2991/avent-18.2018.92.
18. Ilyushin A. A. *Proceedings. Simulation of dynamic processes in solids and engineering applications*. Moscow, 2009, vol. 4. 620 p. (In Russ.)
19. Rabotnov Yu. N. *Mechanics of a deformable solid: textbook*. 2nd ed., Rev. Moscow, 1988. 711 p. (In Russ.)
20. Platonov A. D., Kuryanova T. K., Mikheevskaya M. A., Snegireva S. N. Increasing the service life of sleepers made from birch wood. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Jubilee Scientific and Practical Conference «Innovative Directions of Development of the Forestry Complex (FORESTRY-2018)»*, 2019, pp. 012—030. doi: 10.1088 / 1755-1315 / 226/1/012030.
21. Medvedev I. N., Shamaev V. A., Parinov D. A., Shakirova O. I. Producing sleepers from modified wood for railways in cold regions. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2020, vol. 49, pp. 197—204. doi: 10.1007/978-981-15-0450-1_20.
22. Parinov D. A., Shamaev V. A., Medvedev I. N. Development of parameters of the technological process for the production of blanks of sleepers from modified wood. *Lesotekhnicheskii zhurnal*, 2018, vol. 8, no. 1 (29), pp. 154—165. doi: 10.12737/article_5ab0dfc4643417.34919882. (In Russ.)
23. Ogarkov V. B., Storodubtseva T. N. *Calculation of the stress-strain state of an anisotropic cylindrical shell. Deposited manuscript*, no. 2254-B2002 25.12.2002. (In Russ.)
24. Fomina O. A. Methods for modifying hardwood: domestic and foreign experience. *Science Diary*, 2017, no. 9 (9), p. 4. (In Russ.)
25. Vrublevskaya V. I., Makeev V. V. Abrasive wear of antifriction material based on modified birch wood. *Friction and wear*, 2019, vol. 40, no. 5, pp. 535—539. (In Russ.)
26. Anikeeva M. V., Vrublevskaya V. I. Antifriction characteristics of sliding bearings made of modified pressed wood. *Friction and wear*, 2020, vol. 41, no. 5, pp. 612—618. (In Russ.)
27. Shamaev V. A., Parinov D. A., Polilov A. N. Study of the plain bearings of modified wood for heavy-loaded friction assemblies. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2018, vol. 47, no. 2, pp. 168—172. doi: 10.3103 / S1052618818020115.
28. Shamaev V. A. Computer simulation of the process of end-grain wood treatment under pressure. *Acta Facultatis Xylologiae Zvolen*, 2020, vol. 62, no. 1, pp. 29—39. doi: 10.17423/afx.2020.62.1.03.

29. Yudin R. V., Parinov D. A., Medvedev I. N. Design engineering and manufacturing of technology of bearings for heavy-duty friction units. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2020, vol. 1, pp. 1251—1258. doi: 10.1007 / 978-3-030-22041-9_130.
30. Shamaev V. A., Medvedev I. N., Parinov D. A., Shakirova O. I., Anisimov M. V. Investigation of modified wood as a material power transmission pole produced by self-pressing method. *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen*, 2018, vol. 60, no. 2, pp. 25—32. doi: 10.17423/afx.2018.60.2.02.
31. Kiseleva A. V., Snegireva S. N., Platonov A. D., Pinchevska O. A. Density formation along the trunk radius in various wood species based on latitudinal or altitudinal zoning. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Forestry Forum «Forest ecosystems as global resource of the biosphere: calls, threats, solutions»*, 2020, pp. 012—055. doi: 10.1088 / 1755-1315 / 595/1/012055.
32. Ouertani S., Koubaa A., Azzouz S., Bahar R., Hassini L., Belghith A. Microwave drying kinetics of jack pine wood: determination of phytosanitary efficacy, energy consumption, and mechanical properties. *Eur. J. Wood Wood Prod.*, 2018, no. 76 (4), pp. 1101—1111. doi: 10.1007/s00107-018-1316-x.
33. He X., Xiong X., Xie J., Li Y., Wei Y., Quan P., Mou Q., Li X. Effect of microwave pretreatment on permeability and drying properties of wood. *BioResources*, 2017, no. 12 (2), pp. 3850—3863. doi: 10.15376/biores.12.2.3850-3863.