

Динамика изменения физических показателей древесины в водной среде

Рен.Х. Гайнуллин^a, Риш.Х. Гайнуллин^b, Е.М. Цветкова^c, А.В. Еросланов^d, А.А. Макаров^e

Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, 3, Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, Россия

^a gainyllinrh@yandex.ru, ^b rishat_000@mail.ru, ^c Ekaterinadudina@mail.ru,

^d toni.eroslanov@bk.ru, ^e artyom.makarov100@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-2492-8861>, ^b <https://orcid.org/0000-0003-2219-2413>,

^c <https://orcid.org/0000-0002-5664-5866>

Статья поступила 07.11.2022, принята 22.11.2022

В статье приведены результаты изучения изменения физических показателей различных пород древесины в водной среде. В ходе экспериментов исследовались следующие параметры: влажность, масса влажных и высушенных образцов, плотность, кажущаяся плотность и пористость древесины. Экспериментально подтверждено, что древесина, находящаяся в водной среде, подвергается двум основным последовательным процессам — пропитке и экстракции. Пропитка древесины сопровождается насыщением водой и разбуханием, причем практически для всех пород этот процесс происходит идентично по времени, что прослеживается по результатам экспериментальных данных. В процессе экстракции произошло снижение массы высушенных образцов на 1,23–5,05 %, массы влажных образцов на 0,56–1,59 %, плотности на 0,6–1,61 %, а также повышение влажности на 1,24–5,32 %, кажущейся плотности на 0,59–1,00 %, пористости на 1,19–2,79 % в зависимости от породы древесины. Моделированием экспериментальных данных получены функциональные зависимости физических показателей от продолжительности нахождения исследуемых образцов в водной среде. Полученные модели имеют коэффициент корреляции, близкий к единице, и малую величину дисперсии. Расхождение между экспериментальными данными и результатами расчета показателей с использованием полученных моделей составляет не более 1,27 %.

Ключевые слова: древесина; влажность; плотность; кажущаяся плотность; пористость; экстракция.

Dynamics of changes of the physical parameters of wood in the aquatic environment

Ren.Kh. Gainullin^a, Rish.Kh. Gainullin^b, E.M. Tsvetkova^c, A.V. Eroslanov^d, A.A. Makarov^e

Volga State University of Technology; 3, Lenin Sq., Yoshkar-Ola, Republic of Marii El, Russia

^a gainyllinrh@yandex.ru, ^b rishat_000@mail.ru, ^c Ekaterinadudina@mail.ru,

^d toni.eroslanov@bk.ru, ^e artyom.makarov100@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-2492-8861>, ^b <https://orcid.org/0000-0003-2219-2413>,

^c <https://orcid.org/0000-0002-5664-5866>,

Received 07.11.2022, accepted 22.11.2022

The article presents the results of studying the changes of the physical parameters of various types of wood in the aquatic environment. During the experiments, the following parameters are studied: humidity, mass of wet and dried samples, density, apparent density and porosity of wood. It has been experimentally confirmed that wood in an aqueous medium undergoes two main sequential processes – impregnation and extraction. The impregnation of wood is accompanied by water saturation and swelling, and for almost all breeds this process occurs identically in time, which can be traced by the results of experimental data. During the extraction process, there is a decrease in the mass of dried samples by 1,23-5,05 %, the mass of wet samples by 0,56-1,59 %, density by 0,6-1,61 %, as well as an increase in humidity by 1,24-5,32 %, apparent density by 0,59-1,00 %, porosity by 1,19-2,79 %, depending on the rockspring. By modeling experimental data, functional dependences of physical indicators on the duration of the studied samples in an aqueous medium are obtained. The resulting models have a correlation coefficient close to one and a small amount of variance. The discrepancy between the experimental data and the results of calculating the indicators using the obtained models is no more than 1,27 %.

Keywords: wood; moisture; density; apparent density; porosity; extraction.

Введение. Древесина занимает важное место в жизнедеятельности человека, являясь строительным материалом, сырьем для мебельного производства, топливом и т. д. Исследованиям свойств древесины посвящено множество работ [1–5]. Наиболее часто древесину исследуют как строительный материал с точки зрения прочности, плотности, тепло- и звукоизоляционных свойств и других физико-механических показателей [6–9]. Следует отметить, что практически все физико-механические свойства

древесины взаимосвязаны, и изменение одного показателя влечет закономерное изменение другого. Важным фактором изменения свойств древесины является среда, в которой она находится. В настоящее время имеется большой объем знаний, относящихся к изменению физико-механических показателей древесины в среде атмосферного воздуха. При смене воздушной среды на водную процессы изменения характеристик древесины происходят иначе. Во-первых, это касается процессов массообмена, т. е. будет происходить экстракция растворимых в воде компонентов древесины. Во-вторых, начнутся процессы химического происхождения — гидролиз и т. д. В-третьих, следует помнить об ускорении биологических процессов в водной среде, поскольку даже размещение древесных образцов в дистиллированной воде во время экспериментальных исследований не обеспечивает стерильность. В исследованиях процессов экстракции подробно описаны этапы извлечения из древесины различных компонентов, их номенклатура, применяемые режимы и используемые растворители [10–18]. Однако в них отсутствуют какие-либо сведения о динамике изменения таких показателей, как влажность древесины, плотность, кажущаяся плотность и пористость. Накопленные данные об исследованиях свойств древесины, находившейся в воде, имеют весьма ограниченный характер. Получение новой информации в данной области позволило бы существенно дополнить теоретические и практические знания о процессах экстракции, сушки и пропитки древесины. Настоящая статья направлена на устранение указанных пробелов, поэтому является актуальной.

Материалы и методы. Для экспериментальных исследований использовались стандартные (20×20×30 мм) образцы пяти различных пород: тополя, дуба, сосны, березы, ели. Первоначально указанные образцы были высушены до постоянной массы при температуре 103±2 °С, а затем, после взвешивания и измерения геометрических размеров, помещены в эксикатор с дистиллированной водой. Во время проведения эксперимента осуществлялись периодическая смена воды, а также измерение и вычисление следующих показателей: массы влажных образцов, геометрических размеров, влажности, плотности, кажущейся плотности и пористости древесины. Масса образцов измерялась с помощью электронных весов с точностью до 0,001 г, а геометрические размеры — с помощью штангенциркуля с точностью до 0,1 мм. Показатели влажности, плотности и пористости вычислялись по общеизвестным формулам:

$$W = \frac{m_w - m_0}{m_0} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где m_w — масса влажного образца; m_0 — масса высушенного образца;

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} = \frac{m_w}{a \cdot b \cdot h}, \quad (2)$$

где V_w — объем влажного образца; a , b , h — геометрические размеры образца;

$$P = \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_{каж}}\right) \cdot 100\%, \quad (3)$$

где ρ_0 — плотность высушенного образца; $\rho_{каж}$ — кажущаяся плотность образца.

Кажущаяся плотность определялась по зависимости, приведенной в работе [19]:

$$\rho_{каж} = \frac{m_0 \rho_{ж}}{V_{max} \rho_{ж} - m_{max} + m_0}, \quad (4)$$

где $\rho_{ж}$ — плотность жидкости (в данном случае воды); V_{max} — объем максимально насыщенного водой образца; m_{max} — масса максимально насыщенного водой образца.

Результаты и обсуждение. Результаты измеренных и вычисленных параметров по значимым датам приведены в табл. 1.

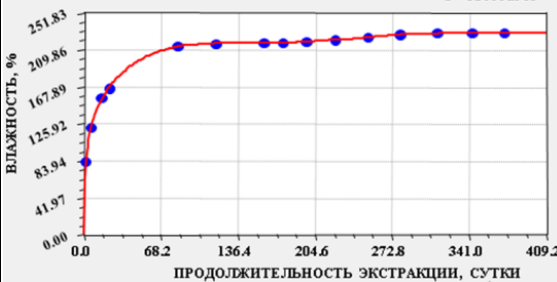
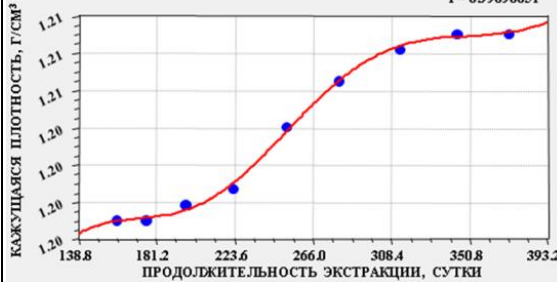
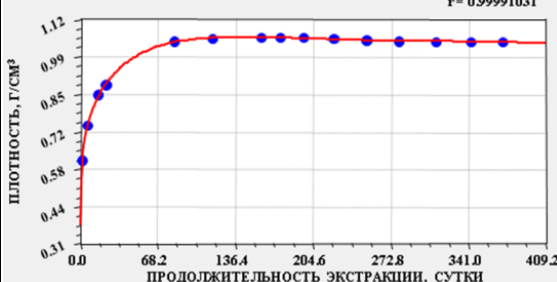
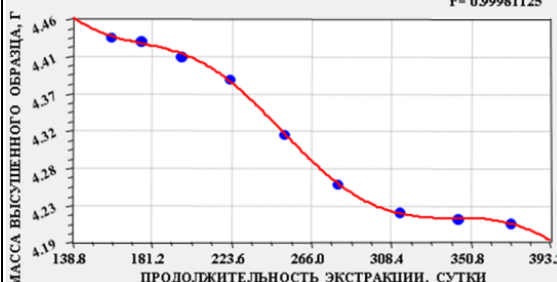
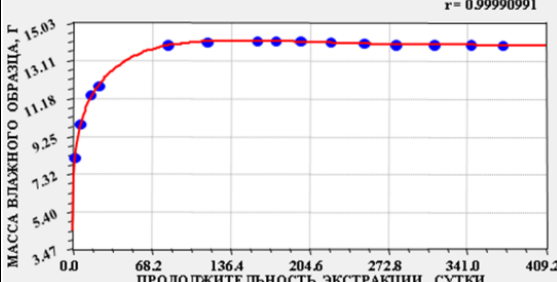
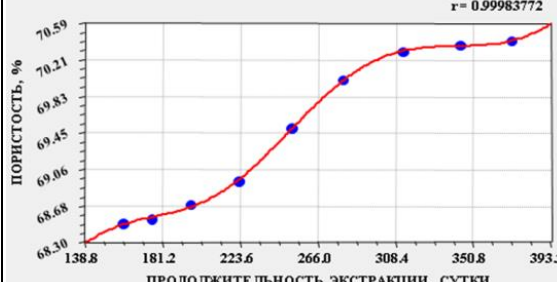
По результатам экспериментальных данных есть возможность проанализировать динамику их изменения. Массы влажных образцов тополя, дуба, сосны и ели увеличивались до 17.11.2021 г., у березы — до 03.12.2022 г. До этих дат происходил процесс интенсивного насыщения образцов водой, когда скорость пропитки древесины выше скорости экстракции из древесины растворимых в воде компонентов. Дальнейшее снижение массы влажных образцов можно связать с состоянием их предельного насыщения водой и торможением процесса увлажнения, а также ускоряющимся процессом экстракции. Т. е. скорость пропитки древесины водой снижается и становится ниже скорости экстракции, которая к этому моменту увеличивается. Логично предположить, что дальнейшее снижение массы влажных образцов ведет к снижению массы высушенных образцов на аналогичную величину, что отражено в табл. 1. Такая же тенденция характерна для показателя плотности образцов. Характер изменения показателя влажности похож на предыдущие, но, в отличие от показателей массы и плотности после 17.11.2021 г. для тополя, дуба, сосны, ели, а также после 03.12.2022 г. для березы, в дальнейшем происходит медленное повышение. Это связано с тем, что экстрагируемые из древесины компоненты замещаются водой. Расчетные значения показателей кажущейся плотности и пористости древесины, по нашему мнению, следует отсчитывать с момента набора максимальной массы влажными образцами, который для тополя, дуба, сосны и ели соответствует дате 17.11.2021 г., а для березы — 03.12.2022 г.

Исходя из вышеизложенных допущений, полученные результаты были смоделированы в программной среде *Curve Expert-1.40*, где исследуемые параметры изменялись в зависимости от продолжительности экстракции (времени нахождения образцов в воде). Необходимо отметить, что модели, полученные с помощью указанной программной среды, содержат тренд и волновую функцию остатков [20]. Результаты моделирования приведены в табл. 2.

Таблица 1. Результаты экспериментальных данных

Параметр/ Порода	Масса высушенного образца m_0 , г	Масса влажного образца m_w , г	Ширина образца a , мм	Толщина образца b , мм	Длина образца h , мм	Объем образца V_w , см ³	Влажность образца W , %	Плотность образца ρ_w , г/см ³	Кажущаяся плотность образца $\rho_{\text{каж}}$, г/см ³	Пористость P , %
Дата	07.06.2021 г.									
Тополь	4,433	4,433	19,7	19,7	30,3	11,759	0	0,377	0,377	0,00
Дуб	7,287	7,287	19,8	19,9	29,9	11,781	0	0,619	0,619	0,00
Сосна	4,661	4,661	19,8	19,9	30	11,821	0	0,394	0,394	0,00
Береза	7,661	7,661	19,5	19,6	30,3	11,581	0	0,662	0,662	0,00
Ель	5,539	5,539	19,5	19,6	30,3	11,581	0	0,478	0,478	0,00
Дата	09.06.2021 г.									
Тополь	4,433	8,137	20,7	21,2	30,4	13,341	83,56	0,610	0,460	18,05
Дуб	7,287	11,091	20,6	21,4	30	13,225	52,20	0,839	0,773	20,03
Сосна	4,661	7,610	20,7	21	30,1	13,084	63,27	0,582	0,460	14,26
Береза	7,661	11,081	21,4	21,4	30,5	13,968	44,64	0,793	0,726	8,92
Ель	5,539	9,579	20,9	21,8	30,4	13,851	72,94	0,692	0,565	15,28
Дата	17.11.2021 г.									
Тополь	4,433	14,069	20,7	21,2	30,4	13,341	217,37	1,055	1,197	68,49
Дуб	7,287	15,766	20,7	21,7	30	13,476	116,36	1,170	1,458	57,59
Сосна	4,661	14,452	20,7	21,1	30,1	13,147	210,06	1,099	1,389	71,61
Береза	7,661	16,664	21,6	21,7	30,5	14,296	117,52	1,166	1,447	54,29
Ель	5,539	15,443	21	21,8	30,5	13,963	178,80	1,106	1,365	64,95
Дата	03.12.2021 г.									
Тополь	4,428	14,064	20,7	21,2	30,4	13,341	217,62	1,054	1,197	68,54
Дуб	7,275	15,754	20,7	21,7	30	13,476	116,55	1,169	1,459	57,69
Сосна	4,641	14,432	20,7	21,1	30,1	13,147	210,97	1,098	1,391	71,78
Береза	7,661	16,668	21,6	21,7	30,5	14,296	117,57	1,166	1,448	54,33
Ель	5,533	15,427	21	21,8	30,5	13,963	178,82	1,105	1,365	65,00
Дата	17.06.2022 г.									
Тополь	4,209	13,845	20,7	21,2	30,4	13,341	228,94	1,038	1,209	70,40
Дуб	7,169	15,648	20,7	21,7	30	13,476	118,27	1,161	1,469	58,59
Сосна	4,559	14,350	20,7	21,1	30,1	13,147	214,76	1,092	1,401	72,47
Береза	7,567	16,574	21,6	21,7	30,5	14,296	119,03	1,159	1,457	55,14
Ель	5,45	15,344	21	21,8	30,5	13,963	181,54	1,099	1,373	65,72

Таблица 2. Результаты моделирования

Порода	Тополь				
Показатель	График		Показатель	График	
Влажность	 $y = 232,64897 - 224,71286\exp(-0,34557x^{0,40977}) + 12,41109\exp(-0,00655x) \times \cos(\pi x / (115,80584 + 0,02696x) + 4,01961)$		Кажущаяся плотность	 $y = 1,18565 + 0,00007x + 0,00077\exp(0,00286x) \times \cos(\pi x / (40,99364 + 0,07414x) - 2,15016)$	
Плотность	 $y = 1,08362 - 0,70071\exp(-0,28962x^{0,48426}) + 0,01054\exp(0,004x) \times \cos(\pi x / (33,79135 + 0,31717x) + 2,14998)$			Масса высушенного образца	 $y = 4,65496 - 0,00132x - 0,00763\exp(-0,00488x) \times \cos(\pi x / (37,19353 + 0,06937x) - 3,2287)$
Масса влажного образца	 $y = 14,46552 - 9,69689\exp(-0,357x^{0,4187}) + 0,35424\exp(0,00115x) \times \cos(\pi x / (53,36515 + 0,42287x) + 3,4714)$		Пористость		 $y = 66,59725 + 0,01123x + 0,06125\exp(0,00506x) \times \cos(\pi x / (36,22261 + 0,06999x) - 3,44794)$

Графики изменения физических показателей других пород древесины аналогичны тем, что приведены для тополя в табл. 2. Поэтому результаты моделирования

изменения физических показателей остальных пород без графического отображения приведены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты моделирования

Порода	Дуб		
Показатель	Модель	Показатель	Модель
Влажность	$y=118,65349-113,29088\exp(-0,44544x^{0,43631})+5,36864\exp(-0,01093x)\times\cos(\pi x/(11,67296+0,20206x)+3,1844);$ $S=0,05577248;$ $r=0,99999932$	Кажущая плотность	$y=1,45012+0,00006x+0,00028\exp(0,004x)\times\cos(\pi x/(15,91441+0,10981x)-0,47632);$ $S=0,00061538;$ $r=0,99740288$
Плотность	$y=1,16401-0,54826\exp(-0,39365x^{0,5088})+0,01054\exp(-0,01585x)\times\cos(\pi x/(5,48372+0,22627x)-4,91797);$ $S=0,00103417;$ $r=0,99998967$	Масса высушенного образца	$y=7,37758-0,0006x+0,00102\exp(0,00884x)\times\cos(\pi x/(56,09596+0,1192x)-0,12554);$ $S=0,00205114;$ $r=0,99974507$
Масса влажного образца	$y=15,58128-8,48918\exp(-0,4467x^{0,52172})+0,19461\exp(0,0016x)\times\cos(\pi x/(3,3314+0,21603x)+0,00366);$ $S=0,00877861;$ $r=0,99999670$	Пористость	$y=56,80216+0,00488x+0,01008\exp(0,01042x)\times\cos(\pi x/(96,81692+0,1883x)-13,46867);$ $S=0,01053416;$ $r=0,99990614$
Порода	Сосна		
Влажность	$y=215,00047-252,33622\exp(-0,20388x^{0,59111})+40,54527\exp(-0,0213x)\times\cos(\pi x/(43,62804+0,10807x)+0,39504);$ $S=0,76591138;$ $r=0,99996924$	Кажущая плотность	$y=1,38166+0,00006x-0,00173\exp(0,00193x)\times\cos(\pi x/(66,93292+0,14814x)-1,60956);$ $S=0,00061491;$ $r=0,99774083$
Плотность	$y=1,22084-0,81365\exp(-0,17066x^{0,49263})+0,02504\exp(0,00393x)\times\cos(\pi x/(11,36291+0,23048x)-2,11199);$ $S=0,00195626;$ $r=0,99998218$	Масса высушенного образца	$y=4,72196-0,00042x+0,06871\exp(-0,00265x)\times\cos(\pi x/(125,5871+0,1608x)-1,86696);$ $S=0,00462089;$ $r=0,99807429$
Масса влажного образца	$y=18,83571-13,92139\exp(-0,17362x^{0,3953})+0,28128\exp(0,00669x)\times\cos(\pi x/(9,96525+0,21516x)-2,69545);$ $S=0,01882119;$ $r=0,99999103$	Пористость	$y=69,97393+0,00429x+0,46974\exp(0,00464x)\times\cos(\pi x/(13,79133+0,26016x)-3,06332);$ $S=0,02885762;$ $r=0,99895260$
Порода	Береза		
Влажность	$y=119,19939-129,52075\exp(-0,30635x^{0,51836})+12,38077\exp(-0,01647x)\times\cos(\pi x/(36,1237+0,20301x)+0,58126);$ $S=0,42811387;$ $r=0,99996475$	Кажущая плотность	$y=1,44056+0,00005x+0,00089\exp(0,00101x)\times\cos(\pi x/(58,03982+0,06694x)-4,64009);$ $S=0,00029021;$ $r=0,99943743$
Плотность	$y=1,15645-0,50161\exp(-0,1933x^{0,60869})+0,02608\exp(0,00022x)\times\cos(\pi x/(2,14964+0,19914x)-1,29289);$ $S=0,00058347;$ $r=0,99999688$	Масса высушенного образца	$y=7,74057-0,00047x-0,00194\exp(0,00644x)\times\cos(\pi x/(46,96709+0,1353x)-0,89913);$ $S=0,00410766;$ $r=0,99908133$
Масса влажного образца	$y=19,31898-11,49889\exp(-0,27366x^{0,35891})+0,1614\exp(0,00822x)\times\cos(\pi x/(7,86641+0,20658x)-3,28069);$ $S=0,01550611;$ $r=0,99999191$	Пористость	$y=53,70635+0,00367x+0,01334\exp(0,00874x)\times\cos(\pi x/(28,0799+0,14066x)-5,47769);$ $S=0,03665518;$ $r=0,99901604$

Порода	Ель		
Влажность	$y=182,50722-196,41163\exp(-0,36037x^{0,45941})+36,04198\exp(-0,0194x)\times\cos(\pi x/(56,22297+0,17258x)+1,17386);$ $S=0,73524622;$ $r=0,99995504$	Кажущаяся плотность	$y=1,3584+0,00004x+0,00023*\exp(0,00518x)\times\cos(\pi x/(105,71884+0,05669x)+0,80815);$ $S=0,00071220;$ $r=0,99363944$
Плотность	$y=1,22156-0,75649\exp(-0,23899x^{0,40897})+0,02347\exp(0,00301x)\times\cos(\pi x/(15,50619+0,25593x)-0,97768);$ $S=0,00222573;$ $r=0,99996843$	Масса высушенного образца	$y=5,61016-0,00046x-0,00057\exp(0,00924x)\times\cos(\pi x/(29,10386+0,1123x)+1,41886);$ $S=0,00281371;$ $r=0,99916425$
Масса влажного образца	$y=27,30937-21,67184\exp(-0,16561x^{0,264})+0,25789\exp(0,00644x)\times\cos(\pi x/(12,49265+0,22608x)-1,96005);$ $S=0,01191652;$ $r=0,99999603$	Пористость	$y=64,26187+0,00432x+0,00113\exp(0,01307x)\times\cos(\pi x/(105,13379-0,00794x)-1,98171);$ $S=0,01769064;$ $r=0,99955913$

Параметры влажности, массы влажных образцов и плотности в трендовой части модели содержат функцию Вейбулла, а массы высушенных образцов, кажущейся плотности и пористости — линейную функцию. Примечательно, что волновые функции остатков моделей для всех показателей имеют одинаковую конструкцию. Коэффициенты корреляции, близкие к значению единицы, и малые значения дисперсий опытов свидетельствуют о высокой степени достоверности результатов.

Таблица 3. Максимальные значения ошибок опытов, %

Порода	Параметр					
	Влажность	Масса влажного образца	Плотность	Масса высушенного образца	Кажущаяся плотность	Пористость
Тополь	1,27	0,79	0,74	1,04	-0,10	0,04
Дуб	0,06	-0,10	1,00	0,02	-0,26	-0,86
Сосна	1,00	-0,24	-0,28	0,09	0,32	-0,04
Береза	0,91	0,18	-0,09	-0,31	-0,11	0,71
Ель	1,17	0,13	0,43	0,39	0,15	-0,02

В табл. 4 приведены величины изменения показателей с момента набора максимальной массы влажными образцами, т. е. для тополя, дуба, сосны и

ели отсчет от даты 17.11.2021 г., а для березы — от 03.12.2022 г.

$$\Delta = \frac{Y_{\text{факт}} - Y_{\text{теор}}}{Y_{\text{факт}}} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где $Y_{\text{факт}}$ — фактическое значение параметра; $Y_{\text{теор}}$ — значение параметра, рассчитанное с использованием полученной модели.

Таблица 4. Величина изменения показателей, %

Порода	Параметр					
	Влажность	Масса влажного образца	Плотность	Масса высушенного образца	Кажущаяся плотность	Пористость
Тополь	5,32	-1,59	-1,61	-5,05	1,00	2,79
Дуб	1,64	-0,75	-0,77	-1,62	0,75	1,74
Сосна	2,34	-0,71	-0,64	-2,19	0,86	1,20
Береза	1,24	-0,56	-0,60	-1,23	0,68	1,49
Ель	1,53	-0,64	-0,63	-1,61	0,59	1,19

Из данных табл. 4 следует, что положительную динамику имеют показатели влажности, кажущейся плотности и пористости, а показатели массы влажного образца, плотности и массы высушенного образца — отрицательную. Кроме того, прослеживаются идентичные изменения численных значений влажности

и массы высушенного образца, а также массы влажного образца и плотности. Снижение массы высушенного образца в процессе экстракции соответствует аналогичному в процентном выражении повышению влажности. Снижение массы влажного образца соответствует аналогичному в процентном выражении

снижению плотности. Идентичность величин изменений кажущейся плотности и пористости с другими параметрами не прослеживается. Вероятно, это связано с тем, что данные параметры являются расчетными, кроме того, отсутствуют достоверные сведения о влиянии процессов усушки и разбухания на указанные показатели. С целью выявления тесноты связи между исследуемыми параметрами необходимо моделирование взаимного влияния показателей друг на друга.

Выводы. Длительное пребывание древесины в водной среде сопровождается двумя основными последовательными процессами. Первоначально происходит пропитка водой, а затем экстракция растворимых в воде компонентов древесины. Экстракция характеризуется не только массообменными процессами, но и изменением физических показателей древесины, сопровождаемым,

в том числе, процессом разбухания. В данном контексте очевидным является снижение массы влажного и высушенного образцов и, соответственно, плотности, а также повышение влажности. Предопределить изменение показателей кажущейся плотности и пористости невозможно, однако по результатам экспериментов и соответствующих расчетов выявлена положительная динамика их изменения в процессе экстракции. Для количественной оценки динамики изменения физических показателей древесины в водной среде моделированием результатов экспериментальных данных получены функциональные зависимости. Полученные модели позволяют спрогнозировать изменение физических показателей различных пород древесины в зависимости от времени нахождения в водной среде, а также могут являться основой для оптимизации процесса экстракции из древесины различных компонентов.

Литература

- Уголев Б.Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения. 2-е изд., перераб. М.: Лесная промышленность, 1986. 368 с.
- Полубояринов О. И. Плотность древесины. М.: Лесная промышленность, 1976. 160 с.
- Перельгин Л.М. Древесиноведение. М.: Лесная промышленность, 1969. 156 с.
- Kollmann F., Cote W. Principles of Wood Science and Technology. Springer-Verlag, 1968. 592 p. Doi 10.1007/978-3-642-87928-9.
- Демитрова И.П., Чемоданов А.Н. Физика древесины: учебное пособие. Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2016. 160 с. ISBN 978-5-8158-1726-5.
- Plötze M., Niemz P. Porosity and pore size distribution of different wood types as determined by mercury intrusion porosimetry // European journal of wood and wood products. 2010. № 69. P. 649-657. Doi 10.1007/s00107-010-0504-0.
- Zauer M., Pfriend A., Wagenführ A. Toward improved understanding of the cell-wall density and porosity of wood determined by gas pycnometry // Wood science and technology. 2013. № 47. P. 1197-1211. Doi 10.1007/S00226-013-0568-1.
- Руднов В.С. Строительные материалы и изделия. Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2018. 203 с. ISBN 978-5-7996-2352-4.
- Mingbin L., Youfu S., Chen S. Study on thermal insulation and heat transfer properties of wood frame walls // Wood research. 2018. Vol. 63(2). P. 249-260.
- Longuetaud F., Mothe F., Fournier M., Dlouha J., Santenoise P., Deleuzem C. Within-stem maps of wood density and water content for characterization of species: a case study on three hardwood and two softwood species // Annals of Forest Science. 2016. № 73. P. 601-614. DOI 10.1007/s13595-016-0555-4.
- Чудинов Б.С. Вода в древесине. Новосибирск: Наука. 1984. 269 с.
- Рыбин Б.М., Завражнова И.А., Рыбин Д.Б. Определение физических показателей лигноуглеводного комплекса древесинного вещества // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2018. Т. 22. № 5. С. 94-102.
- Рунова Е.М., Сергеев А.Д., Иванов В.А. Свойства древесины, затопленной на корню в ложах водохранилищ // Лесной вестник. 2001. № 5. С. 133-137.
- Серговский П.С., Расев А.И. Гидротермическая обработка и консервирование древесины: учебник для вузов. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Лесная промышленность, 1987. 360 с.
- Климов А.М., Рудобашта С.П., Тепляков Ю.А., Нечаев В.М. Расчет кинетики процессов экстрагирования из однородно-пористых материалов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2010. Том 15. № 2. С. 594-598.
- Тепляков Ю.А., Рудобашта С.П., Нечаев В.М., Климов А.М. Внутренний массоперенос веществ при экстрагировании из однородно-пористых материалов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2010. Том 16. № 2. С. 319-325.
- Кузнецов В.Г., Кузнецов Р.К., Аминова Г.А. О связи коэффициентов свободной и стесненной диффузии в процессах массопереноса в системах с твердой фазой // Вестник Казанского технологического университета. 2011. № 19. С. 77-80.
- Richarz W., Adler H.P., Guger A. Eihfluss der Porenstruktur anf die Gasdiffusion in porösen Körpern // Helv. chim. acta. 1965. V. 48, No. 37. P. 328.
- Способ определения истинной плотности древесины: пат. 2779377 Рос. Федерация. № 2021132351 / Гайнуллин Рен.Х., Гайнуллин Риш.Х., Цветкова Е.М., Макаров А.А., Еросланов А.В.; заявл. 08.11.2021; опубл. 06.09.2022, Бюл. № 25.
- Мазуркин П.М., Сафин Р.Г., Просвириков Д.Б. Статистическое моделирование процессов деревообработки: учеб. пособие. Казань: КНИТУ, 2014. 333 с. ISBN 978-5-7882-1676-8.

References

- Ugolev B.N. Wood science with the basics of forest commodity science. 2-e izd., pererab. M.: Lesnaya promyshlennost', 1986. 368 p.
- Poluboyarinov O.I. Wood density. M.: Lesnaya promyshlennost', 1976. 160 p.
- Perelygin L.M. Wood science. M.: Lesnaya promyshlennost', 1969. 156 p.
- Kollmann F., Cote W. Principles of Wood Science and Technology. Springer-Verlag, 1968. 592 p. Doi 10.1007/978-3-642-87928-9.
- Demitrova I.P., Chemodanov A.N. Physics of wood. Yoshkar-Ola: Povolzhskij gosudarstvennyj tekhnologicheskij universitet, 2016. 160 p.
- Plötze M., Niemz P. Porosity and pore size distribution of different wood types as determined by mercury intrusion porosimetry // European journal of wood and wood products. 2010. № 69. P. 649-657. Doi 10.1007/s00107-010-0504-0.

7. Zauer M., Pfriem A., Wagenführ A. Toward improved understanding of the cell-wall density and porosity of wood determined by gas pycnometry // *Wood science and technology*. 2013. № 47. P. 1197-1211. Doi 10.1007/S00226-013-0568-1.
8. Rudnov V.S. Building materials and products. Ekaterinburg: Izd-vo Ural'skogo universiteta, 2018. 203 p. ISBN 978-5-7996-2352-4.
9. Mingbin L., Youfu S., Chen S. Study on thermal insulation and heat transfer properties of wood frame walls // *Wood research*. 2018. Vol. 63 (2). P. 249-260.
10. Longuetaud F., Mothe F., Fournier M., Dlouha J., Santenoise P., Deleuzem C. Within-stem maps of wood density and water content for characterization of species: a case study on three hardwood and two softwood species // *Annals of Forest Science*. 2016. № 73. P. 601-614. DOI 10.1007/s13595-016-0555-4.
11. Chudinov B.S. Water in wood. Novosibirsk: Nauka. 1984. 269 p.
12. Rybin B.M., Zavrazhnova I.A., Rybin D.B. Determination of physical parameters of the lignocarbon complex of wood substance // *Forestry Bulletin*. 2018. V. 22. № 5. P. 94-102.
13. Runova E.M., Sergeev A.D., Ivanov V.A. Properties of wood flooded at the root in the beds of reservoirs // *Forestry Bulletin*. 2001. № 5. P. 133-137.
14. Sergovskij P.S., Rasev A.I. Hydrothermal treatment and preservation of wood. M.: Lesnaya promyshlennost', 1987. 360 p.
15. Klimov A.M., Rudobashta S.P., Teplyakov Yu.A., Nechaev V.M. Calculation of the kinetics of extraction processes from homogeneous porous materials // *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2010. V. 15. № 2. P. 594-598.
16. Teplyakov Yu.A., Rudobashta S.P., Nechaev V.M., Klimov A.M. Internal mass transfer of substances during extraction from homogeneous porous materials // *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2010. V. 16. № 2. P. 319-325.
17. Kuznecov V.G., Kuznecov R.K., Aminova G.A. On the relationship between the coefficients of free and constrained diffusion in mass transfer processes in systems with a solid phase // *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2011. № 19. P. 77-80.
18. Richarz W., Adler H.P., Guger A. Eihfluss der Porenstruktur auf die Gasdiffusion in porösen Körpern // *Helv. chim. acta*. 1965. V. 48, No. 37. P. 328.
19. Gainullin Ren.Kh., Gainullin Rish.Kh., Tsvetkova E.M., Makarov A.A., Eroslanov A.V. Sposob opredeleniya istinnoj plotnosti drevesiny [Method for determining the true density of wood] Patent RF, № 2779377, 2022.
20. Mazurkin P.M., Safin R.G., Prosvirnikov D.B. Statistical modeling of woodworking processes. Kazan': KNITU, 2014. 333 p. ISBN 978-5-7882-1676-8.