
Экспериментальные исследования процесса пропитки древесины сосны в поле центробежных сил с учетом соотношения зон ранней и поздней древесины

Ю.И. Гончаров¹, О.А. Куницкая¹, Г.В. Григорьев¹, И.Н. Дмитриева¹

¹Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет, Санкт-Петербург

Аннотация: Представленная статья содержит результаты экспериментальных исследований по тематике пропитки древесины сосны с использованием центрифуг. Исследования проводились в направлении изучения влияния процентного соотношения ранней и поздней древесины в пропитываемых образцах на скорость центробежной пропитки, а также глубины пропитки (отношения объема впитанной жидкости к общему объему порового пространства) ранней и поздней зон пропитываемых образцов древесины. На основании представленных результатов показано, что процентное содержание поздней древесины в образце заметно не влияет на скорость перемещения фронта центробежной пропитки, процентное содержание поздней древесины в образце влияет на степень заполнения внутреннего пространства древесины жидкостью (получена регрессионная модель). Кроме того, показано, что заполнение внутреннего пространства древесины пропиточной жидкостью при пропитке с использованием центрифуг происходит равномерно по мере перемещения фронта пропитки. В заключении приводится перечень перспективных направлений дальнейших исследований по тематике пропитки древесины с использованием центрифуг.

Ключевые слова: древесина сосны, центрифугирование, пропитка, фронт пропитки, центробежный способ, глубокая пропитка, ранняя древесина, поздняя древесина, равномерность пропитки, степень пропитки.

В настоящее время перед лесозаготовительной промышленностью России стоит важная задача – повышение качества и выхода продукции лесопереработки [1,2]. Пропитка древесины различными веществами с целью модификации ее эксплуатационных свойств нашла широкое применение в лесоперерабатывающей промышленности [3,4]. Среди различных способов пропитки древесины представляет наибольший интерес способ пропитки с использованием центрифуг, т.н. «центробежный способ пропитки», «центробежная пропитка», «пропитка в поле центробежной силы». Это обусловлено тем, что с использованием указанного способа достигается глубокая пропитка заготовки (высокая степень заполнения внутреннего пространства древесины пропиточной жидкостью) за сравнительно короткое

время. Подробно суть явлений, происходящих при центробежной пропитке, освещена в работах [3–5].

Ранее проводились как экспериментальные [3 – 6], так и теоретические исследования процесса пропитки древесины [7–10], в том числе - центробежной. Однако один из важных вопросов остался практически не исследованным, а именно – вопрос влияния соотношения ранней и поздней древесины на показатели ее пропитываемости. В этой связи на базе лаборатории кафедры Технологии лесозаготовительных производств Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета (СПбГЛТУ им. Кирова) нами проведены дополнительные экспериментальные исследования, целью которых являлось:

1. Исследование влияния процентного соотношения ранней и поздней древесины в пропитываемых образцах на скорость центробежной пропитки.
2. Исследование глубины пропитки (отношения объема впитанной жидкости к общему объему порового пространства) ранней и поздней зон пропитываемых образцов древесины.

Перечень основного оборудования и приборов, использовавшихся при проведении экспериментальных исследований по изучению влияния процентного содержания поздней древесины на показатели процесса центробежной пропитки древесины, полностью аналогичен рассмотренному в статьях [3 – 6].

Образцы для проведения экспериментальных исследований получены при пилении на круглопильных станках тонкомерной древесины сосны и ели, заготовленной летом 2013 года в Охтинском учебно-опытном лесхозе. В ходе экспериментальных исследований использованы образцы древесины сосны с квадратным сечением 45x45 мм ($B = 0,045$ м, $H = 0,045$ м), длиной 200 мм.

Температура раствора (использовался водный раствор метиленовой сини), использовавшегося для пропитки образцов древесины, составляла 20 °С (контролировалась при помощи термометра).

Для проведения исследований отбирались образцы без явных, видимых глазу, пороков (сучки, гниль).

Перед каждым опытом измерялась масса образца m , с использованием измеренного значения массы образца рассчитывалась его плотность ρ и пористость C .

Для образцов древесины непосредственно перед проведением опытов по исследованию пропитываемости проводилась оценка процентного содержания поздней древесины.

На линии длиной L , проведенной на торцевой поверхности образца в радиальном направлении, с помощью измерительной лупы в каждом годичном слое измеряли ширину поздней зоны σ_i (рис. 1).

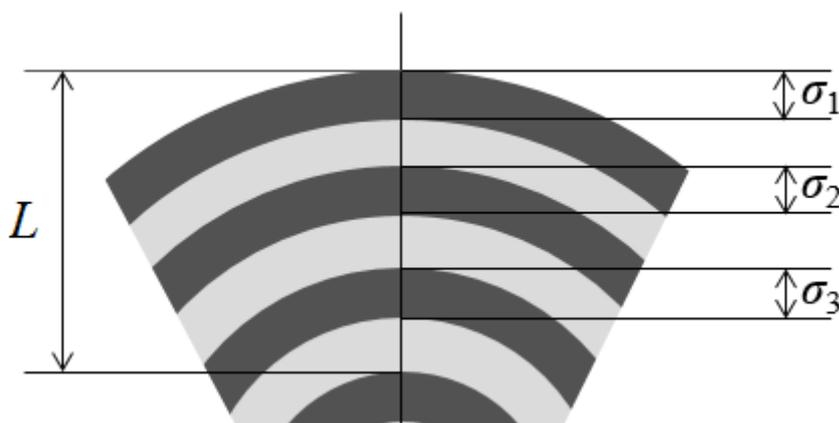


Рис.1. Определение процентного содержания поздней древесины

По полученным размерам σ_i и L процент поздней древесины рассчитывался по следующей формуле:

$$q = \frac{\sum_{i=1}^N \sigma_i}{L} \cdot 100\% \quad (1)$$

где L – общая протяженность годовых слоев, в которых измеряли ширину поздней зоны, N – число слоев.

Суть проводимых опытов заключалась в следующем.

После определения массы и влажности образца, экспериментальный образец древесины 4 (рис. 2) размещался в пропиточной емкости 2. Образец фиксировался в емкости при помощи корсета 5. Емкость заполнялась пропиточной жидкостью 3 до уровня 200 мм, герметично закрывалась крышкой (на рисунке условно не показана). Далее емкость с образцом древесины закреплялась на горизонтальной платформе центрифуги при помощи хомутов (условно не показаны на рисунке).

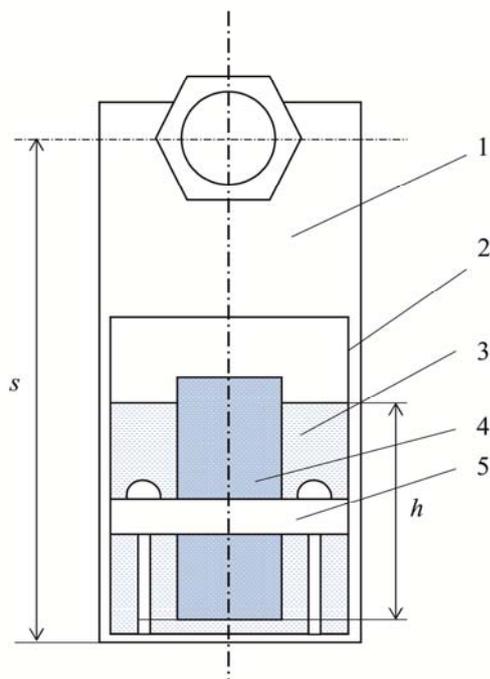


Рис. 2. Схема к опытам по центробежной пропитке древесины сосны:
1 – платформа центрифуги, 2 – пропиточная емкость, 3 – пропиточная жидкость, 4 – образец древесины, 5 – корсет

Включался привод установки, жидкость проникала во внутренне пространство древесины с торца, дальнего от радиуса вращения платформы, за счет создававшегося при вращении градиента давления. После выхода на установившийся режим вращения (в среднем 4-5 с) образец пропитывался в течение 300 либо 600 с. После окончания каждого опыта измерялся прирост массы образцов Δm . Затем образцы раскалывали вдоль волокон и определяли расстояние от погруженного в пропиточную жидкость торца до конечного положения фронта пропитки l .

Затем рассчитывался коэффициент заполнения k внутреннего пространства образца пропиточной жидкостью:

$$k = \frac{100\Delta m}{\rho_{ж}CBHl} \cdot 100\% \quad (2)$$

где $\rho_{ж}$ - плотность пропиточной жидкости.

Статистическая обработка результатов экспериментов заключалась в проверке результатов наблюдений на наличие аномальных значений, проверке соответствия закона распределения наблюдаемых величин нормальному закону, проверке достаточности числа наблюдений и построении регрессионной модели при помощи метода наименьших квадратов.

В таблицах № 1, 2 представлены расчетные значения величин, необходимых для проверки результатов наблюдений на наличие аномальных значений и соответствие закону нормального распределения.

Таблица № 1

Расчетные данные к проверке результатов наблюдений при исследовании центробежной пропитки образцов древесины сосны на наличие аномально отклоняющихся значений и соответствие закону нормального распределения
(время пропитки 10 минут)

Величина	\bar{y}	y_{\min}	y_{\max}	S	S^2	t_{\min}	t_{\max}	χ^2
m	175,34	167	183,12	4,5184	20,4158	1,7213	1,8463	6,3843
q	26,58	23,3	29,9	2,0901	4,3686	1,5863	1,5714	8,3585
ρ	432,89	412	452	11,1727	124,8283	1,7105	1,8696	9,4153
C	71,89	70,65	73,25	0,7260	0,5271	1,8733	1,7080	5,7393
Δm	133,25	126,39	139,77	3,7771	14,2668	1,7270	1,8154	8,0824
l	139,82	136	145	2,0921	4,3768	2,4750	1,8270	10,313
k	65,46	63	68,2	1,3176	1,7360	2,0779	1,8687	7,3975

(в таблице обозначено: \bar{y} - среднее значение наблюдаемой величины, y_{\min} – минимальное значение наблюдаемой величины, y_{\max} – максимальное значение наблюдаемой величины, S – среднеквадратичное отклонение по выборке, S^2 – дисперсия по выборке, t_{\min} – расчетное значение критерия Стьюдента для минимального значения наблюдаемой величины, t_{\max} – расчетное значение критерия Стьюдента для максимального значения наблюдаемой величины, χ^2 – расчетное значение критерия Пирсона)

Таблица № 2

Расчетные данные к проверке результатов наблюдений при исследовании центробежной пропитки образцов древесины сосны на наличие anomalно отклоняющихся значений и соответствие закону нормального распределения (время пропитки 5 минут)

Величина	\bar{y}	y_{\min}	y_{\max}	S	S^2	t_{\min}	t_{\max}	χ^2
----------	-----------	------------	------------	-----	-------	------------	------------	----------

Величина	\bar{y}	y_{\min}	y_{\max}	S	S^2	t_{\min}	t_{\max}	χ^2
m	175,21	167,55	183,1	4,2980	18,4727	1,8366	1,7814	3,4344
q	26,49	23,1	30	2,0292	4,1175	1,7281	1,6723	6,6092
ρ	432,58	414	452	10,6312	113,0222	1,8269	1,7475	5,8026
C	71,91	70,65	73,12	0,6911	0,4776	1,7505	1,8235	5,4623
Δm	106,81	101,75	111,85	2,8001	7,8403	1,7985	1,8085	8,1669
l	112,04	109	114	1,3307	1,7707	1,4696	2,2879	7,0179
k	65,46	62,8	67,7	1,1840	1,4019	1,8900	2,2484	3,5842

Сопоставление расчетных значений критерия Стьюдента t_{\min} и t_{\max} , представленных в таблицах № 1, № 2, с табличным значением критерия Стьюдента $t_{\text{табл}} = 1,9873$ [11] (доверительная вероятность $p = 95 \%$, число степеней свободы $f = 44$) показывает, что результаты наблюдений не содержат аномально отклоняющихся от среднего значений.

Сопоставление расчетных значений χ -критерия, представленных в таблицах № 1, 2, с табличным значением χ -критерия $\chi_{\text{табл}} = 15,5073$ [11] ($p = 95 \%$, $f = 8$) показывает, что закон распределения наблюдаемых величин значимо не отличается от нормального закона распределения случайной величины.

Ввиду изложенного, к полученным экспериментальным данным можно применить методы корреляционного и регрессионного анализа.

Расчетные данные, необходимые для проверки достаточности числа наблюдений исследуемых величин представлены в таблицах № 3, 4.

Таблица № 3

Статистические данные по результатам опытов по центробежной пропитке
древесины сосны (пропитка в течение 10 минут)

	m	q	ρ	C	Δm	l	k
\bar{y}	175,34	26,58	432,89	71,89	133,25	139,82	65,46
S	4,5184	2,0901	11,1727	0,7260	3,7771	2,0921	1,3176
S^2	20,4158	4,3686	124,8283	0,5271	14,2668	4,3768	1,7360
m	3,8488	1,8255	9,5012	0,6173	3,2294	1,6435	1,1347
v	2,58	7,86	2,58	1,01	2,83	1,50	2,01
p_0	2,20	6,87	2,19	0,86	2,42	1,18	1,73
$[n]$	6	5	6	6	6	7	5

(в таблице обозначено: m – среднее абсолютное отклонение наблюдаемой величины, v – коэффициент вариации наблюдаемой величины, p_0 – показатель точности, $[n]$ – достаточное число наблюдений)

Таблица № 4

Статистические данные по результатам опытов по центробежной пропитке древесины сосны (пропитка в течение 5 минут)

	m	q	ρ	C	Δm	l	k
\bar{y}	175,21	26,49	432,58	71,91	106,81	112,04	65,46
S	4,2980	2,0292	10,6312	0,6911	2,8001	1,3307	1,1840
S^2	18,4727	4,1175	113,0222	0,4776	7,8403	1,7707	1,4019
m	3,6402	1,7443	9,0163	0,5860	2,3852	0,9906	0,9692
v	2,45	7,66	2,46	0,96	2,62	1,19	1,81
p_0	2,08	6,58	2,08	0,81	2,23	0,88	1,48
$[n]$	6	5	6	6	6	7	6

Данные, представленные в таблицах № 3, 4, показывают, что во всех случаях показатель точности p_0 , характеризующий ошибку измерения экспериментальной величины, не превышал величину 5 %, при этом в

большинстве опытов достаточное число наблюдений n составляло 6 – 7. Это дает основание считать полученные экспериментальные данные удовлетворительно точными, пригодными для получения зависимостей с доверительной вероятностью 95 %.

Для древесины сосны уравнения регрессии, описывающие связь процентного содержания поздней древесины q и коэффициента насыщения внутреннего пространства древесины пропиточной жидкостью k за 5 и 10 минут пропитки имеют вид:

$$k = -0,5578q + 80,292, \quad (3)$$

$$k = -0,5153q + 79,114 \quad (4)$$

При этом описать зависимость конечного положения фронта пропитки l от процентного содержания поздней древесины q с удовлетворительной точностью не представляется возможным ни в одном случае (см. таблицы № 5, 6, в таблицах значения коэффициента корреляции величин r выделены жирным в том случае, если по результатам оценки значимости коэффициент корреляции признан значимым).

Таблица № 5

Коэффициент корреляции исследуемых величин в опытах по центробежной пропитке древесины сосны (пропитка в течение 10 минут)

	Δm	k	l	q	ρ
Δm	-	0,8104	0,2068	-0,9172	-0,8963
k	0,8104	-	-0,3842	-0,8849	-0,8550
l	0,2068	-0,3842	-	0,0856	0,1226
q	-0,9172	-0,8849	0,0856	-	0,9465
ρ	-0,8963	-0,8550	0,1226	0,9465	-

Таблица № 6

Коэффициент корреляции исследуемых величин в опытах по центробежной пропитке древесины сосны (пропитка в течение 5 минут)

	Δm	k	l	q	ρ
Δm	-	0,8240	0,1968	-0,9720	-0,9395
k	0,8240	-	-0,3725	-0,8831	-0,8356
l	0,1968	-0,3725	-	-0,0310	0,0030
q	-0,9720	-0,8831	-0,0310	-	0,9567
ρ	-0,9395	-0,8356	0,0030	0,9567	-

Данные таблиц № 5, 6 подтверждают тесные линейные связи плотности, прироста массы образцов, а также коэффициента заполнения порового пространства пропиточной жидкостью во всех проведенных опытах, при этом статистически значимая связь процентного содержания поздней древесины в образцах и конченого положения фронта пропитки не выявлена. При этом значения коэффициентов линейной корреляции коэффициента заполнения внутреннего пространства древесины пропиточной жидкостью и процентного содержания поздней древесины в образце, полученные для данных опытов при пропитке в течение 10 и 5 минут у обеих исследованных пород практически равны. Таким образом, можно утверждать, что процесс насыщения образцов древесины сосны жидкостью имел схожий характер.

Вышеизложенное приводит к ряду выводов:

1. Процентное содержание поздней древесины в образце заметно не влияет на скорость перемещения фронта центробежной пропитки.
2. Процентное содержание поздней древесины в образце влияет на степень заполнения внутреннего пространства древесины жидкостью.

3. Заполнение внутреннего пространства древесины пропиточной жидкостью происходит равномерно по мере перемещения фронта пропитки.

По результатам статистической обработки экспериментальных данных получены регрессионные модели, связывающие процентное содержание поздней древесины q [%], плотность образцов древесины ρ [кг/м³] и степень пропитки образцов k [%]. Для древесины сосны модели представлены следующими формулами:

$$k = -0,5369q + 79,7144, \quad (5)$$

$$k = -0,0971\rho + 107,4890, \quad (6)$$

$$\rho = 5,0358q + 299,0890 \quad (7)$$

Также была произведена оценка доверительных ($p = 95$ %) интервалов изменения параметров моделей (5) – (7), результаты представлены в таблице № 7 (в таблице обозначено: a_0 – свободные члены в уравнениях (5) – (7), a_1 – параметры при аргументах).

Таблица № 7

Оценки и доверительные интервалы коэффициентов регрессионных моделей по результатам опытов по центробежной пропитке древесины сосны

Уравнение	Параметр	Оценка	Стандартная ошибка	Доверительный интервал	
				Нижняя граница	Верхняя граница
(5)	a_0	79,7114	0,8091	78,1034	81,3193
	a_1	-0,5369	0,0304	-0,5973	-0,4765
(6)	a_0	107,4890	2,8288	101,8670	113,1110
	a_1	-0,0971	0,0065	-0,1101	-0,0841
(7)	a_0	299,0890	4,6286	289,8910	308,2880

В заключение, считаем целесообразным привести направления дальнейших исследований, представляющие, на наш взгляд, теоретический и практический интерес:

1. Исследование влияния процентного соотношения ранней и поздней древесины в пропитываемых образцах на скорость центробежной пропитки других пород древесины.
2. Исследование влияния процентного соотношения ранней и поздней древесины в пропитываемых образцах на скорость центробежной пропитки с учетом вязкости пропиточной жидкости.
3. Обоснование энергетической эффективности процесса модификации древесины путем центробежной пропитки в рамках концепции оценки эффективности лесозаготовительного производства, изложенной в [12].

Литература

1. Шегельман И. Р. Исследование направлений модернизации техники и технологии лесозаготовок / И. Р. Шегельман // Инженерный вестник Дона, 2012, № 2. URL: ivdon.ru/magazine/latest/n2y2012/866/
2. Шегельман И. Р. Ресурсные вызовы в области региональной биоэнергетики и пути их преодоления / И. Р. Шегельман, П. О. Щукин, М. А. Морозов // Инженерный вестник Дона, 2012, № 2. URL: ivdon.ru/magazine/latest/n2y2012/819/
3. Григорьев Г. В., Хитров Е. Г., Есин Г. Ю., Гумерова О. М. Кинетика насыщения древесины жидкостью при центробежной пропитке // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2013. № 203. С. 108-116.
4. Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьев Г.В., Есин Г.Ю. Исследование кинетики центробежной пропитки древесины // «Лесной журнал». 2013. № 2. С. 156-162.
5. Григорьев Г.В., Куницкая О.А. Использование нелинейного выражения для связи скорости фронта и гидравлического напора при центробежной



пропитке древесины // Технология и оборудование лесопромышленного комплекса: сборник научных трудов. 2013. № 6. С. 77 – 82.

6. Куницкая О.А., Ржавцев А.А., Есин Г.Ю. Пропитка древесины в силовых полях для производства материалов с новыми физико-механическими и химическими свойствами // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2010. № 193. С. 247 – 256.

7. Bramhall G. The validity of Darcy's law in the axial penetration of wood // Wood Science and Technology. 1971. № 5. P. 121–134.

8. Drain A., Taverdet J. L. Vergnaud J. Modeling the kinetics of moisture adsorption by wood // Wood Science and Technology. 1974. № 22. P. 11–20.

9. Prak A.L. Unsteady – State Gas Permeability of Wood. Wood Science and Technology // 1970. № 1. P. 50–69.

10. Resch A. Unsteady – State Flow of Compressible Fluid through Wood // Forest Production Journal. 1967. №3. P.48-54.

11. Гланц С. Медико-биологическая статистика. М.: Практика, 1998. 459 С.

12. Григорьев И.В., Григорьева О.И., Никифорова А.И., Куницкая О.А. Обоснование методики оценки экологической эффективности лесопользования // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2012. № 6. С. 72-77.

References

1. Shegel'man I. R. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2012, № 2. URL: ivdon.ru/magazine/latest/n2y2012/866/

2. Shegel'man I. R. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2012, № 2. URL: ivdon.ru/magazine/latest/n2y2012/819/

3. Grigor'ev G. V., Khitrov E. G., Esin G. Yu., Gumerova O. M. Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii. 2013, № 203, pp. 108-116.



4. Grigor'ev I.V., Kunitskaya O.A., Grigor'ev G.V., Esin G.Yu. Lesnoy zhurnal, 2013, № 2. pp. 156-162.
5. Grigor'ev G.V., Kunitskaya O.A. Tekhnologiya i oborudovanie lesopromyshlennogo kompleksa: sbornik nauchnykh trudov [Technology and equipment timber industry: collection of scientific papers]. 2013. № 6. pp. 77 – 82.
6. Kunitskaya O.A., Rzhavtsev A.A., Esin G.Yu. Propitka drevesiny v silovykh polyakh dlya proizvodstva materialov s novymi fiziko-mekhanicheskimi i khimicheskimi svoystvami [Impregnation of wood in the force fields for the production of materials with novel physical, mechanical and chemical properties] // Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii. 2010. № 193. pp. 247 – 256.
7. Bramhall G. Wood Science and Technology. 1971. № 5. pp. 121–134.
8. Drain A., Taverdet J. L. Vergnaud J. Wood Science and Technology. 1974. № 22. pp. 11–20.
9. Prak A.L. Wood Science and Technology. 1970. № 1. pp. 50–69.
10. Resch A. Unsteady Forest Production Journal. 1967. №3. pp.48-54.
11. Glants S. Mediko-biologicheskaya statistika [Biomedical statistics]. M.: Praktika, 1998. 459 p.
12. Grigor'ev I.V., Grigor'eva O.I., Nikiforova A.I., Kunitskaya O.A. Obosnovanie metodiki otsenki ekologicheskoy effektivnosti lesopol'zovaniya [Substantiation of environmental performance evaluation of forest management] // Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2012. № 6. pp. 72-77.