

УДК 674.048.5

О. К. Леонович, кандидат технических наук, заведующий НИЛ ОСКиМ (БГТУ)

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ВАКУУМИРОВАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ С УЧЕТОМ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПРОНИЦАЕМОСТИ И СОПРОТИВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛА

Проведен теоретический расчет технологических параметров вакуумирования в зависимости от изменения коэффициентов проницаемости и поверхностного сопротивления древесины сосны. Исследовано влияние длины образца, коэффициентов проницаемости и поверхностного сопротивления древесины в различных направлениях, температуры среды на продолжительность вакуумирования древесины. Построены номограммы для определения продолжительности вакуумирования древесины сосны.

Theoretical calculation of technological parameters of pumping out depending on change of factors of permeability and superficial resistance of wood of a pine is carried out. Influence of length of the sample, factors of permeability and superficial resistance of wood in various directions, temperatures of environment on duration of pumping out of wood is investigated. Are constructed номограммы for definition of duration of pumping out of wood of a pine.

Введение. Вакуумирование древесины является важнейшей операцией в технологическом процессе пропитки древесины. В последнее время защите древесины уделяется все большее внимание. Продолжительность вакуумирования древесины в зависимости от физико-механических свойств древесины представляет несомненный интерес для разработки технологических режимов. Теоретические расчеты позволяют прогнозировать эти параметры, а также дадут возможность в дальнейшем автоматизировать расчеты продолжительности вакуумирования в зависимости от изменяющихся параметров материала и среды, в которой происходит процесс вакуумирования.

В проведенных ранее исследованиях определены изменения коэффициента проницаемости и поверхностного сопротивления в древесине сосны в различных направлениях. Коэффициент проницаемости заболони сосны вдоль волокон равен $0,84 \cdot 10^{-12}$ в радиальном направлении с неповрежденным лубом. Он в 50 раз меньше и составляет $1,68 \cdot 10^{-14}$, с обработанной поверхностью циркульной пилой в радиальном направлении равен $2,54 \cdot 10^{-14}$ и меньше, чем вдоль волокон, в 33 раза. Поверхностное сопротивление в различных направлениях менялось незначительно [1, 2].

Основная часть. Целью данной работы является разработка теоретических основ расчета продолжительности вакуумирования древесины в различных направлениях и различных условиях среды. В работе поставлена задача провести исследования и установить зависимость продолжительности вакуумирования древесины сосны от длины образца, коэффициентов проницаемости и сопротивления в материале, а также температуры среды, в которых находятся испытуемые образцы.

Для расчета продолжительности вакуумирования использованы следующие уравнения: В предложенной модели давление воздуха определяется как

$$P(x, \tau) = a_1(\tau)x^2 + a_3(\tau); \quad (1)$$

$$a_3(\tau) = -a_1(\tau)\delta^2 + \frac{P_c(\tau)}{1 - Aa_1^2\delta^2}; \quad (2)$$

$$\frac{da_1}{d\tau} = \frac{1,5(A_1a_1P_c - \frac{dP_c}{d\tau})(1 - Aa_1^2\delta^2)}{\delta^2[3Aa_1P_c - (1 - Aa_1^2\delta^2)]^2}. \quad (3)$$

Определены величины давления воздуха $P_c(\tau)$ в вакуумной камере и скорости изменения величины давления $\frac{dP_c(\tau)}{d\tau}$.

В формуле (3) коэффициенты A и A_1 определяются следующим образом

$$A = \frac{2K^2RT\xi_{\text{п}}}{\alpha^2\mu};$$

$$A_1 = \frac{2KRT}{\mu\Pi\alpha},$$

где K – коэффициент проницаемости, м^2 ; $\xi_{\text{п}}$ – коэффициент поверхностного сопротивления; Π – пористость древесины. При расчетах $\xi_{\text{п}} = 10^6$, $\Pi = 0,69$.

Для определения влияния отдельных параметров на продолжительность вакуумирования древесины произведем расчет на ЭВМ по формулам (1), (2), (3).

Конечное давление в центре образца

$$P(0, \tau) = a_3(\tau). \quad (4)$$

Продолжительность вакуумирования проведем для граничных условий давления в древесине:

$$P(0, \tau)_k = 1,05P_{ск}, \quad (5)$$

где P_k – конечное давление в древесине; $P_{ск}$ – давление в камере.

Плотность, учитывающая коэффициент пористости,

$$\Pi = 1 - \rho / \rho_{дв},$$

здесь $\rho_{дв}$ – плотность древесного вещества, 1530 кг/м³

Влияние размера (половины длины образца) на продолжительность вакуумирования исследовано при постоянных следующих параметрах: A – коэффициент зависимости вязкости воздуха от температуры, равный 1,53, Па·м²/с.

$$\alpha = \frac{RT}{\Pi \mu d^2} \sqrt{\frac{Tkm}{6}}, \quad (6)$$

где R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура газа, К; μ – молярная масса, кг/моль; d – диаметр молекулы; k – постоянная; m – масса молекулы. В расчетах: $R = 8,3 \cdot 10^3$ Дж/К кмоль, $T = 293$ К; $\mu = 29$ кг/кмоль.

Давление в вакуумной камере изменялось во времени по закону

$$P_c = P_0 e^{-\frac{S}{V_0} \tau}, \quad (7)$$

где P_0 – первоначальное давление в вакуумной камере; S – производительность вакуумного насоса, м³/с; V_0 – объем вакуумной камеры.

Дифференцируя, получим скорость изменения величины давления:

$$\frac{dP_c}{d\tau} = -\frac{S}{V_0} P_0 e^{-\frac{S}{V_0} \tau} = -\frac{S}{V_0} P_c. \quad (8)$$

Продолжительность вакуумирования определялась по уменьшению давления в центре образца на 5, 10, 20% относительно $P_{ск}$.

Расчет производился по уравнениям (2), (3), (4). Давление в камере определялось в соответствии с выражениями (7), (8).

Конечное давление в камере $P_{ск} = 0,5 \cdot 10^4$ Па, начальное – $P_0 = 1 \cdot 10^5$ Па.

Установлено, что длина образца оказывает большое влияние на продолжительность вакуумирования. Так, при длине образца 1,0 м $\tau_k = 1188$ с, если $P_k = 1,05P_{ск}$, а при 10,0 м – 122 816 с, τ_k увеличилось приблизительно в 100 раз при увеличении длины образца в 10 раз.

Можно сделать вывод, что вакуумирование происходит быстрее поперек волокон, так как размеры диаметра бревен находятся в пределах 0,24 м.

При аналогичных параметрах исследовано влияние коэффициента поверхностного сопротивления на продолжительность вакуумирования.

Установлено, что изменение коэффициента поверхностного сопротивления $\xi_{п}$ от 0 до 10^{10} не повлияло на продолжительность вакуумирования.

В заболони древесины сосны коэффициент фильтрации составляет $0,84 \cdot 10^{-12}$, при этом значении в образце длиной 1 м при $P_k = 1,1P_{ск}$ и $P_{ск} = 0,5880 \cdot 10^4$ Па продолжительность вакуумирования составила 1005 с (рис. 1).

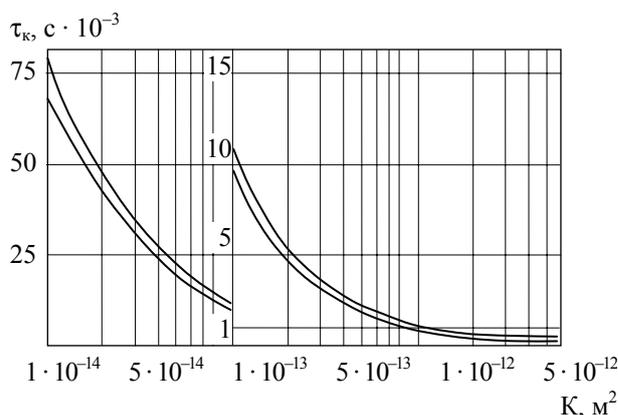


Рис. 1. Зависимость продолжительности вакуумирования заболони сосны вдоль волокон от изменения коэффициента фильтрации

При дальнейшем уменьшении коэффициента проницаемости, например до $1 \cdot 10^{-14}$, продолжительность вакуумирования составляет 70 000 с.

Установлено, что чем меньше коэффициент проницаемости, а он уменьшается с увеличением влажности, наличия смолистых веществ, например ядра сосны, тем больше времени нужно для достижения необходимой глубины вакуума.

Проведены исследования влияния температуры среды на продолжительность вакуумирования. Коэффициент фильтрации и параметры конечного давления в образце приняты аналогично, как при исследовании влияния коэффициента фильтрации. При тех же параметрах повышения температуры воздуха от 293 К до 353 К увеличилось время вакуумирования и составило для образца 1 м при $K = 0,84 \cdot 10^{-12}$ (заболонь сосны вдоль волокон) при $P_k = 1,05P_{ск}$ – 1293 с, против 1110 с, т. е. при увеличении температуры на 60 К продолжительность вакуумирования возросло на 193 с, или на 17%.

По теоретическим уравнениям проведены расчеты на ЭВМ и построены номограммы продолжительности вакуумирования при $K = 0,84 \cdot 10^{-12}$ и $K = 2,54 \cdot 10^{-14}$; $\Pi = 0,69$; $\alpha = 1,53$; $R = 8,3 \times 10^{-3}$ Дж/Ккмоль, $T = 293$ К, $\mu = 29$ кг/моль, 1/2 длине образцов от 05 до 3 м; $\xi = 10^6$, результаты занесены в табл. 1, 2 и рис 2, 3.

Конечное давление в древесине при $P_k = 1,05P_{ск} = 1,05 \cdot 0,5 \cdot 10^4 = 0,525 \cdot 10^4$ Па, $P_k = 1,2P_{ск} = 1,2 \cdot 0,5 \cdot 10^4 = 0,6 \cdot 10^4$ Па.

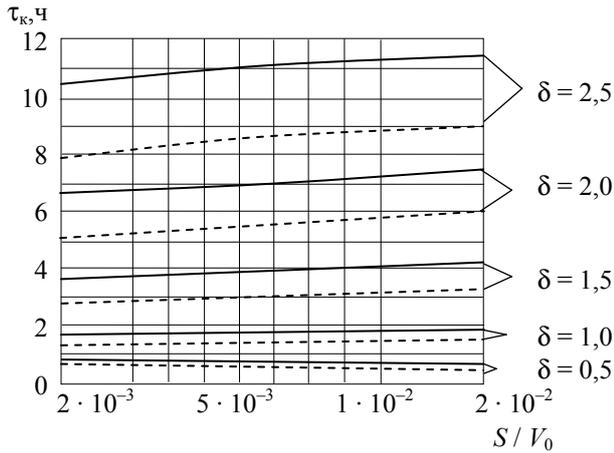


Рис. 2. Номограмма расчета продолжительности вакуумирования древесины сосны вдоль волокон от обобщенного параметра при конечном давлении в камере $P_{\text{к}} = 0,5 \cdot 10^4$ Па; при $K = 0,84 \cdot 10^{-12}$; $\delta = 1/2$ длины образца

Анализ номограммы для расчета продолжительности вакуумирования древесины сосны вдоль волокон в зависимости от обобщенного параметра $S/V_0 = 1 \cdot 10^{-2}$ при конечном давлении в камере $P_{\text{к}} = 0,5 \cdot 10^4$ Па и $K = 0,84 \cdot 10^{-12}$ показал, что при длине образцов от 0 до 1 м она имеет практическое применение, так как продолжительность вакуумирования в этом случае находится в пределах 17 мин при $P_{\text{к}} = 1,2P_{\text{к}}$.

При дальнейшем увеличении длины образцов вакуумирование достигает десятков часов.

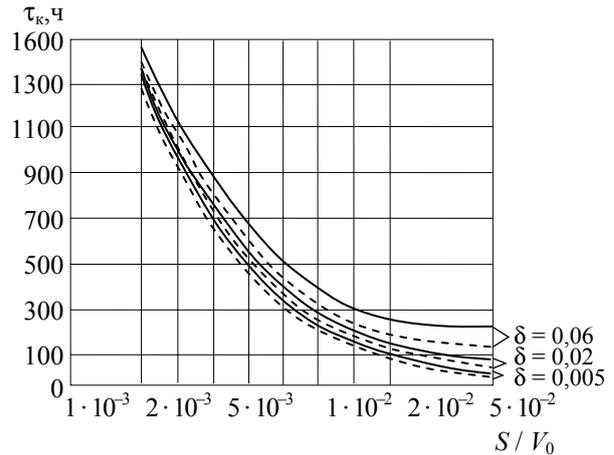


Рис. 3. Номограмма расчета продолжительности вакуумирования древесины сосны в радиальном направлении в зависимости от обобщенного параметра S/V_0 при конечном давлении в камере $P_{\text{к}} = 0,5 \cdot 10^4$ Па

Проведенные исследования вакуумирования древесины сосны поперек волокон в радиальном направлении позволили выявить, что продолжительность вакуумирования круглых сортиментов на глубину 20 мм в автоклаве 54 м³, где вакуум создается насосом ВВН-12 производительностью 0,2 м³/с, т. е. при $S/V_0 = 0,2 / 54 = 0,04$ и $P_{\text{к}} = 1,2P_{\text{к}}$ составляет 900 с, или 15 мин, при глубине вакуумирования 5 мм $\tau_{\text{к}} - 850$ с, или 14 мин, и т. д.

Значит, чем меньше коэффициент проницаемости, а он уменьшается с увеличением влажности, наличия смолистых веществ, например ядра сосны, тем больше времени нужно для достижения необходимой глубины вакуума.

Таблица 1

Продолжительность вакуумирования древесины до достижения давления в ней $0,525 \cdot 10^5$ Па и $0,6 \cdot 10^4$ Па при $K = 0,84 \cdot 10^{-12}$

Глубина вакуумирования, м	Конечное давление в древесине $P_{\text{к}}$, Па	Продолжительность вакуумирования, с при удельной производительности вакуумного насоса, с ⁻¹							
		0,002		0,005		0,010		0,020	
0,5	$P_{\text{к}} = 1,05 P_{\text{к}}$	2 176	0,6	1 500	0,42	1 350	0,38	1 400	0,38
	$P_{\text{к}} = 1,2 P_{\text{к}}$	1 833	0,51	1 150	0,32	1 000	0,28	1 050	0,29
1,0	$P_{\text{к}} = 1,05 P_{\text{к}}$	5 590	1,55	5 580	1,55	5 800	1,61	6 100	1,69
	$P_{\text{к}} = 1,2 P_{\text{к}}$	4 200	1,17	4 200	1,17	4 450	1,24	4 700	1,31
1,5	$P_{\text{к}} = 1,05 P_{\text{к}}$	12 600	3,5	13 430	3,73	14 021	3,89	14 380	3,99
	$P_{\text{к}} = 1,2 P_{\text{к}}$	9 450	2,63	10 125	2,81	10 628	2,95	10 950	3,04
2,0	$P_{\text{к}} = 1,05 P_{\text{к}}$	23 383	6,5	24 150	6,7	24 900	6,92	26 500	7,36
	$P_{\text{к}} = 1,2 P_{\text{к}}$	17 547	4,87	18 754	5,21	19 500	5,42	20 250	5,63
2,5	$P_{\text{к}} = 1,05 P_{\text{к}}$	37 500	10,4	39 600	11,0	40 680	11,3	41 000	11,4
	$P_{\text{к}} = 1,2 P_{\text{к}}$	28 457	7,9	30 240	8,4	31 320	8,7	32 000	8,9
3,0	$P_{\text{к}} = 1,05 P_{\text{к}}$	56 000	15,6	60 000	16,7	62 400	17,3	62 000	17,2
	$P_{\text{к}} = 1,2 P_{\text{к}}$	42 468	11,8	45 000	12,5	46 400	12,7	46 500	12,9

Таблица 2

Продолжительность вакуумирования древесины при $K = 2,54 \cdot 10^{-14}$, $\xi = 10^6$
до давления $0,525 \cdot 10^4$ Па при $P = 1,05 \cdot 0,5 \cdot 10^4$ и $0,6 \cdot 10^4$ Па при $P = 1,2P_{\text{ск}} = 1,2 \cdot 0,5 \cdot 10^4$

Глубина вакуумирования, м	Конечное давление в древесине P_k , Па	Продолжительность вакуумирования, с при удельной производительности вакуум-насоса, с^{-1}				
		0,002	0,005	0,010	0,020	0,05
0,005	$P_k = 1,05 P_{\text{ск}}$	1475	617	295	152	60
	$P_k = 1,2 P_{\text{ск}}$	1408	591	282	141	58
0,01	$P_k = 1,05 P_{\text{ск}}$	1480	671	304	156	65
	$P_k = 1,2 P_{\text{ск}}$	1412	640	288	146	63
0,015	$P_k = 1,05 P_{\text{ск}}$	1484	684	313	161	78
	$P_k = 1,2 P_{\text{ск}}$	1417	649	295	150	68
0,02	$P_k = 1,05 P_{\text{ск}}$	1492	648	332	175	99
	$P_k = 1,2 P_{\text{ск}}$	1435	613	310	155	81
0,04	$P_k = 1,05 P_{\text{ск}}$	1519,2	697,6	391,2	211,8	151
	$P_k = 1,2 P_{\text{ск}}$	1452	648,2	354,8	177,4	118
0,06	$P_k = 1,05 P_{\text{ск}}$	1589,9	825	544	305,8	296
	$P_k = 1,2 P_{\text{ск}}$	1522	739	469	235	214

Таким образом проведенные исследования позволяют спрогнозировать продолжительность вакуумирования древесины сосны при составлении технологических регламентов пропитки древесины способами: вакуум-атмосферное давление; вакуум-давление вакуум и других способов автоклавной пропитки древесины с учетом различных параметров древесины и среды.

Заключение. 1. Разработана теоретическая модель для расчета продолжительности вакуумирования древесины хвойных пород.

2. Установлено, что проницаемость поперек волокон играет основную роль при дальнейших расчетах процессов вакуумирования длинномерной древесины.

3. Построены номограммы продолжительности вакуумирования древесины вдоль волокон и в радиальном направлениях.

4. Результаты исследований могут быть использованы при разработке технологических

режимов вакуумной сушки и вакуумирования при различных способах пропитки древесины.

Литература

1. Леонович, О. К. Исследования проницаемости древесины газами / О. К. Леонович // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. – 2010. – Вып XVIII. – С. 165–169.

2. Леонович, О. К. Проницаемость древесины газами и жидкостями в технологическом процессе модификации древесины столбов линий связи и электропередачи // Комплексное и рациональное использование лесных ресурсов: тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. – Минск, 1985. – С. 181–183.

3. Леонович, О. К. Технология производства модифицированной древесины для опор линий связи и электропередачи: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.05 / О. К. Леонович. – Минск, 1988. – 345 л.

Поступила 14.03.2011