

УДК 630*812

Ю.А. Варфоломеев, Л.А. Баданина

Варфоломеев Юрий Александрович родился в 1953 г., окончил в 1975 г. Архангельский лесотехнический институт, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой инженерных конструкций и архитектуры Архангельского государственного технического университета, заслуженный деятель науки РФ. Имеет более 300 научных трудов в области обеспечения долговечности древесины в строительстве экологически безопасными методами.



Баданина Лариса Александровна родилась в 1968 г., окончила в 1991 г. Ленинградский государственный университет, старший преподаватель кафедры высшей математики Архангельского государственного технического университета. Имеет более 10 печатных работ в области математического моделирования процесса консервации древесины.



4*

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛАГОПРОНИЦАЕМОСТИ ДРЕВЕСИНЫ
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ**

Разработана методика определения коэффициента влагопроницаемости древесины на основе закона Дарси. С надежностью 95% вычислены статистические показатели коэффициента влагопроницаемости основных элементов круглого сечения, пропитанных в автоклавной установке по режиму «вакуум–давление–вакуум».

Ключевые слова: фильтрация, нестационарный поток жидкости, коэффициент влагопроницаемости древесины, автоклавная пропитка, технологические режимы, защитная обработка.

Одной из проблем, препятствующих исследованию фильтрации растворов защитных средств в древесине, является установление истинных показателей этого процесса. Точность решения задачи, описывающей процесс пропитки древесины, зависит от степени изученности коэффициента влагопроницаемости (фильтрации). Этот вопрос очень лаконично представлен в учебниках по древесиноведению и в специальной литературе [5–7].

Коэффициент влагопроницаемости, характеризующий способность древесины пропускать жидкость, является основной фильтрационной характеристикой. Он зависит от ряда факторов (породы древесины, ее пористости, коэффициента вязкости пропиточного раствора и т.д.) и играет важную роль в теоретических расчетах технологического процесса автоклавной пропитки изделий защитными препаратами.

Исследователями предложены различные способы его определения. В эксперименте В.А. Баженова, на который ссылается Б.Н. Уголев [6], ис-

питания продолжают до установления стационарного процесса, т. е. пока не станет постоянным расход воды. Опыты проводили в лабораторных условиях на малых образцах с использованием специального прибора, который оснащен насадкой с манометром и градуированной стеклянной трубкой для измерения расхода жидкости. С одной стороны образца под давлением подавали жидкость, с другой – обеспечивали отток воздуха, что способствовало прохождению жидкости в полость нижней части корпуса прибора.

Основной показатель влагопроницаемости – количество воды, прошедшей через малый образец за сутки при установившемся режиме. В стационарном режиме распределение давления жидкости по глубине становится линейным и коэффициент влагопроницаемости можно вычислить с использованием закона Дарси:

$$k_{\phi} = \frac{Q\gamma}{S \frac{\Delta P}{\Delta l}} \quad (1)$$

Коэффициент влагопроницаемости характеризует проницаемость образца единичной длины Δl , в котором перепад давления $\Delta P = 1$ МПа поддерживает расход жидкости $Q = 1$ г/с при вязкости $\gamma = 1$ сП через сечение площадью $S = 1$ см².

Таким образом, коэффициент k_{ϕ} фактически характеризует проницаемость древесины в установившемся режиме, когда она уже полностью пропитана жидкостью. В процессе сквозной пропитки раствор защитного препарата может вымывать как водорастворимые, так и водонерастворимые компоненты. Интенсивность растворения невымываемых водой компонентов в значительной степени зависит от химического состава средств защиты. Это существенно меняет фильтрационные свойства и вносит большую погрешность в получаемые результаты. В производственных условиях процесс защитной пропитки древесины в автоклавных установках длится в среднем 2–3 ч. За такое сравнительно короткое время древесина не может пропитаться полностью. При проведении защитной обработки древесины имеет место неустановившийся процесс фильтрации. В расчетах более корректно использовать коэффициент влагопроницаемости, который получен экспериментально, именно, при неустановившемся процессе пропитки.

Большую работу по определению значения коэффициента влагопроницаемости в нестационарном режиме провела Е.В. Харук [7]. При лабораторном определении коэффициента критерием проницаемости служила глубина пропитки, измеренная на разрезе образца через определенное время после начала пропитки. Процесс фильтрации в таком эксперименте не становится стационарным.

Теоретические исследования, проведенные нами, показывают, что функцию давления жидкости при неустановившейся фильтрации можно считать линейной лишь очень приблизительно и только при малой толщине пропитываемых образцов, что совершенно не соответствует реальным условиям. Ранее практиковавшиеся методы расчета коэффициента влагопрони-

цаемости, основанные на результатах испытаний малых образцов с пересчетом полученных данных непосредственно по закону Дарси, дают неточные результаты, которые не пригодны для практического применения. Кроме того, Е.Н. Харук утверждает, что в пределах одного и того же образца (на примере заболони сосны) фильтрационные процессы не соответствуют закону Дарси.

В работе П.С. Серговского и А.И. Расева [5] приведена эмпирическая формула для расчета коэффициента проводимости k (кг/(м·с·Па)) поперек волокон заболонной древесины сосны для водных растворов солей:

$$k = (3,5 + 0,015W + 0,071\omega - 3,360P) \cdot 10^{-9}. \quad (2)$$

Формула приемлема для следующих диапазонов исходных параметров: влажность древесины $8 \leq W \leq 50$ %, концентрация рабочего раствора защитного препарата $\omega \leq 15$ %, давление рабочего раствора $0,1 \leq P \leq 0,5$ МПа при температуре до $+60$ °С.

В приведенных работах можно встретить противоречивые выводы. Например, Е.В. Харук делает вывод о том, что чем больше давление жидкости, тем выше значение коэффициента влагопроницаемости, а из соотношения (2) следует обратное.

Существующие лабораторные способы основаны на фильтрации жидкости через малый образец древесины, помещенный в специальный прибор. Некоторыми исследователями было замечено, что результаты получаются более корректными при использовании образцов больших размеров [4].

Нами предложена новая методика определения коэффициента влагопроницаемости по данным, полученным на образцах натуральных размеров в производственных или экспериментальных условиях. Это позволяет исключить влияние масштабного фактора, который имеет место при моделировании процесса пропитки на малых образцах в лабораторных условиях. При этом использовали формулы взаимосвязи всех учитываемых параметров пропитки, приведенные в работе [1]. Если исследования фильтрационных свойств древесины проводят в лабораторных условиях, когда с одной стороны подают жидкость под давлением, а с противоположной – выходит беспрепятственно воздух, то для расчета коэффициента влагопроницаемости можно использовать формулу

$$k_{\phi} = \frac{\xi^2 \mu_0 \rho_0}{2(P_{\text{вн}} - P_0) t}. \quad (3)$$

Здесь ξ – глубина пропитки;
 μ_0 – коэффициент пористости древесины;
 ρ_0 – плотность пропиточной жидкости;
 $P_{\text{вн}}$ – давление пропиточной жидкости;
 P_0 – давление воздуха внутри древесины перед пропиткой;
 t – продолжительность пропитки.

По нашему мнению коэффициент влагопроницаемости характеризует именно фильтрационные свойства древесины и не зависит от того, под каким давлением подается жидкость. С увеличением давления возрастает только скорость пропитки (при условии, что структуру древесины при этом не нарушают физически и химически). Из соотношения (3) следует, что коэффициент влагопроницаемости пропорционален пористости древесины. Из этого соотношения видно, что коэффициент фильтрации древесины, пористость и плотность рабочего раствора могут быть объединены в единый коэффициент $k = \frac{k_{\phi}}{\mu_0 \rho_0}$, который более корректно называть обобщенным ко-

эффициентом влагопроницаемости, так как он характеризует свойства проницаемости древесины в целом.

Если в производственных условиях пропитывают тонкомерные изделия круглого сечения, то для определения обобщенного коэффициента следует использовать решение задачи в полярных координатах:

$$k = \frac{1}{t} \int_0^{\xi} \frac{\ln \frac{R-x}{R}}{P_0 \left(\frac{2Ra - a^2}{2Ra - a^2 - 2Rx + x^2} \right) - P_{\text{вн}}} dx, \quad (4)$$

где R – радиус изделия;

a – толщина заболони.

На автоклавном заводе в Пинежском районе Архангельской области была проведена серия производственных экспериментов. Для этого были отобраны столбы длиной 4,2 м, полученные из верхней части сосны. Перед началом пропитки влажность изделий составляла 20 ... 25 %. Предварительно образцы, помещенные в автоклавную камеру, в течение 15 мин вакуумировали при давлении 0,080 ... 0,085 МПа. По нашим расчетам среднее давление воздуха внутри древесины P_0 , которое установилось перед началом пропитки, равно 0,09 МПа [1].

Под действием избыточного давления 1 МПа были пропитаны две партии сосновых изделий в течение 120 (выборки 1а и 2а) и 150 мин (выборка 3а). После этого образцы повторно вакуумировали в течение 15 мин при давлении 0,080 ... 0,085 МПа в целях удаления избытка раствора с поверхности деревянных образцов.

Из первой партии было отобрано по 20 образцов диаметром 100 и 120 мм (соответственно 1а и 2а), из второй – 20 образцов диаметром 150 мм (3а). Пропитанные образцы были распилены пополам. Замеры глубины проникновения защитного препарата в радиальном направлении были определены с точностью $\pm 0,5$ мм.

Результаты производственных испытаний (мм):

выборка 1а: 7,5; 9,0; 10,5; 12,0; 12,0; 12,5; 13,5; 14,5; 15,0; 15,5; 16,0; 16,0; 16,5; 18,0; 19,0; 19,0; 19,5; 20,0; 20,5; 26,0;

выборка 2а: 5,5; 6,0; 8,0; 9,5; 10,5; 11,5; 12,5; 13,0; 13,5; 14,5; 15,5; 16,0; 16,0; 17,0; 17,5; 19,0; 19,5; 22,5; 24,0; 25,0;

выборка 3а: 11,0; 11,5; 14,5; 15,5; 17,0; 17,5; 17,5; 18,0; 18,5; 19,0; 19,5; 20,5; 21,0; 21,5; 22,0; 22,5; 23,5; 24,0; 25,5; 27,0.

По трем выборкам с помощью формулы (4) вычислено 60 значений обобщенного коэффициента влагопроницаемости, каждое из которых соответствует значению глубины пропитки:

выборка 1б: 0,241; 0,366; 0,529; 0,633; 0,678; 0,690; 0,825; 0,911; 1,037; 1,166; 1,183; 1,255; 1,351; 1,715; 1,926; 1,969; 2,358; 2,380; 2,400; 2,420;

выборка 2б: 0,137; 0,142; 0,304; 0,390; 0,498; 0,608; 0,730; 0,766; 0,802; 0,957; 1,100; 1,175; 1,206; 1,337; 1,424; 1,671; 1,820; 2,744; 2,830; 2,900;

выборка 3б: 0,437; 0,478; 0,760; 0,870; 1,049; 1,101; 1,114; 1,180; 1,249; 1,320; 1,393; 1,564; 1,596; 1,714; 1,802; 1,894; 2,089; 2,193; 2,544; 2,983.

Затем были вычислены точечные оценки параметров распределения (среднее значение обобщенного коэффициента влагопроницаемости $k_{\text{ср}}$, дисперсия $D(X)$, среднее квадратическое отклонение $\sigma(X)$, коэффициент вариации ν) для каждой из трех групп отдельно по следующим формулам:

$$k_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^{20} X_i}{20}; \quad (5)$$

$$D(X) = \frac{\sum_{i=1}^{20} (X_i - \xi_{\text{ср}})^2}{19}; \quad \sigma(X) = \sqrt{D(X)}; \quad \nu = \frac{k_{\text{ср}}}{\sigma(X)}$$

Результаты расчетов приведены в таблице.

С помощью критерия Вилкоксона [3] проверена гипотеза об однородности независимых выборок *1б* и *2б*, *2б* и *3б*, *1б* и *3б*. При уровне значимости $\alpha = 0,05$ получены нижнее и верхнее критические значения: $W_{\text{н.кр}} = 337$; $W_{\text{в.кр}} = 483$. По расчетам наблюдаемые значения для соответствующих выборок находятся в пределах $337 \dots 483$ ($W_{\text{набл.1,2}} = 434$; $W_{\text{набл.2,3}} = 468$ и $W_{\text{набл.1,3}} = 432$). Это позволило принять гипотезу об однородности выборок и считать, что они получены из одной и той же генеральной совокупности и имеют одинаковые функции распределения.

Используя критерий Стьюдента, проверили гипотезу о равенстве математических ожиданий средних значений выборок *1б* и *2б*, *2б* и *3б*, *1б* и *3б*. При уровне значимости $\alpha = 0,05$ и $r = n_1 + n_2 - 2 = 38$ степеней свободы получили критическое значение $Z_{\text{кр}} = 2,02$. Поскольку наблюдаемое значение, вычисленное по выборкам *1б*, *2б*, $Z_{\text{набл.1,2}} = 0,538$ меньше $Z_{\text{кр}}$, то гипотезу $H_0: M(\xi_1) = M(\xi_2)$ принимаем. Следовательно, выборочные средние \bar{k}_1 и \bar{k}_2 различаются статистически незначимо по величине. Аналогично по вы-

боркам 2б, 3б и 1б, 3б вычислили наблюдаемые значения $Z_{\text{набл.2,3}} = 1,201$ и $Z_{\text{набл.1,3}} = 0,841$ и приняли следующие гипотезы: $H_0 : M(\xi_2) = M(\xi_3)$ и $H_0 : M(\xi_1) = M(\xi_3)$.

Таким образом, выборки 1б, 2б и 3б можно объединить и вычислить среднее значение и дисперсию для общей выборки объемом 60 образцов.

Точечные оценки для трех групп

Показатель	Значение показателя для группы		
	1	2	3
Среднее значение обобщенного коэффициента влагопроницаемости \bar{k}_i , мм ² /(МПа·мин)	1,301	1,177	1,466
Дисперсия	0,336	0,725	0,433
Среднее квадратическое отклонение	0,579	0,852	0,658
Коэффициент вариации, %	44,50	72,39	44,88

Исходя из этого, имеем:

среднее значение обобщенного коэффициента

$$k_{\text{общ}} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 k_{\text{ср}}^j = 1,315; \quad (6)$$

внутригрупповая и межгрупповая дисперсии

$$D_{\text{вн.гр}} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 D_{\text{гр}}^j = 0,425; D_{\text{меж.гр}} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 (M_{\text{гр}}^j - M_{\text{общ}})^2 = 0,014; \quad (7)$$

общая дисперсия

$$D_{\text{общ}} = D_{\text{вн.гр}} + D_{\text{меж.гр}} = 0,439; \quad (8)$$

среднее квадратическое отклонение

$$\sigma_{\text{общ}} = \sqrt{D_{\text{общ}}} = 0,663. \quad (9)$$

Проверка гипотезы о нормальном распределении по критерию Пирсона подтвердилась при уровне значимости $\alpha = 0,05$. Доверительные интервалы для генерального среднего значения обобщенного коэффициента влагопроницаемости и дисперсии:

$$1,143 < k_{\text{ген}} < 1,486; \quad 0,127 < D_{\text{ген}} < 0,271.$$

Таким образом, в качестве среднего значения обобщенного коэффициента влагопроницаемости заболони сосны с надежностью $\gamma = 0,95$ можно принять значение $k_{\text{общ}} = 1,315$ мм²/(МПа·мин).

В большинстве научных трудов приведены именно значения коэффициента влагопроницаемости, а не обобщенного. При коэффициенте пористости для заболони сосны 0,64 ... 0,70 и плотности пропиточной жидкости 1,0143 г/см³ (водный раствор препарата ХМ-11 концентрацией 7 %) имеем следующий доверительный интервал для коэффициента влагопроницаемости: $7,42 \cdot 10^{-3} \dots 1,055 \cdot 10^{-2}$ г/(см·мин·МПа).

Полученные результаты подтверждены экспериментальными данными других исследователей. Например, в работе Е.В. Харук [7] коэффициент влагопроницаемости для заболони сосны по экспериментальным данным изменяется в пределах $8,82 \cdot 10^{-4} \dots 1,23 \cdot 10^{-2}$ г/(см·мин·МПа). Из этих данных видно, что верхняя граница практически совпадает, а нижняя – меньше в 10 раз.

Следует отметить, что значения коэффициентов влагопроницаемости получены нами для заболони сосны, подвергшейся предварительному вакуумированию, которое улучшает фильтрационные свойства древесины. Именно этим можно объяснить то, что полученная нами нижняя граница значения коэффициента влагопроницаемости для заболони сосны на порядок больше, чем в работе Е.В. Харук, не использовавшей в своих опытах предварительное вакуумирование.

Предложенная методика может быть использована для быстрого определения режимов пропитки различных изделий, изготавливаемых из сухой ели, пораженной деревоокрашивающими грибами [2], при комплексной переработке заготавливаемого сырья непосредственно в зоне усыхания лесов в междуречье Северной Двины и Пинеги.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баданина, Л.А. Расчет влагопроницаемости древесины, наиболее приемлемый для использования в инженерной практике на производстве [Текст]: тез. докл. IV межрегиональной молодежной науч. конф. «Севергеоэкотех-2003» / Л.А. Баданина. – Ухта: УГТУ, 2003. – С. 272–275.
2. Булатов, А.Ф. Социально-экономические последствия биопоражения и усыхания лесов в междуречье Северной Двины и Пинеги [Текст] / А.Ф. Булатов, Ю.А. Варфоломеев, Ю.Г. Трубин // Наука северному региону: науч. тр. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 2005. – Вып. 62. – С. 224–227.
3. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика [Текст] / В.Е. Гмурман. – М.: Высш. шк., 1977. – 480 с.
4. Коллинз, Р. Течения жидкостей через пористые материалы [Текст] / Р. Коллинз. – М.: Мир, 1964. – 350 с.
5. Серговский, П.С. Гидротермическая обработка и консервирование древесины [Текст] / П.С. Серговский, А.И. Расев. – М.: Лесн. пром-сть, 1987. – 360 с.
6. Уголев, Б.Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения [Текст]: учеб. для вузов / Б.Н. Уголев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Лесн. пром-сть, 1986. – 366 с.
7. Харук, Е.В. Проницаемость древесины некоторых хвойных пород [Текст] / Е.В. Харук. – Красноярск: Краснояр. кн. изд-во, 1969. – 94 с.

Архангельский государственный
технический университет

Поступила 20.02.06 г.

Yu.A. Varfolomeev, L.A. Badanina

Determination of Wood Moisture Resistance Based on Production Test.

Method of determining moisture resistance factor of wood is developed based on Darcy law. Statistical indices of moisture resistance factor for pine elements of circular section impregnated in autoclave device according to the mode «vacuum-pressure-vacuum» are calculated with reliability of 95 %.
