

РАСЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОПИТКИ ДРЕВЕСИНЫ С УЧЕТОМ ЕЕ ПРОНИЦАЕМОСТИ ЖИДКОСТЯМИ

Леонович О.К., канд. техн. наук, заведующий НИЛ ОСКиМ (БГТУ)

В статье изложены теоретические основы пропитки древесины жидкостями и расчет продолжительности пропитки древесины сосны в зависимости от свойств древесины и пропиточного состава. Исследована зависимость продолжительности пропитки образца сосны от относительного привеса. Построена номограмма определения продолжительности процесса пропитки в зависимости от половины толщины образца и необходимого относительного привеса при определенном давлении и температуре пропиточного раствора.

In article theoretical bases of impregnation of wood by liquids and calculation of duration of impregnation of wood of a pine depending on properties of wood and structure are stated. Duration of impregnation of the sample of a pine from a relative additional weight is investigated. It is constructed nomogram definitions of duration of process of impregnation from half of thickness of the sample and a necessary relative additional weight at certain pressure and temperature a solution.

Введение. Анализ исследований в области проницаемости древесины газами и жидкостями достаточно проанализирован в предыдущих работах автора [1, 2]. В работе проанализированы основы теории проницаемости древесины жидкостями и теоретического расчета продолжительности пропитки и необходимого привеса с учетом особенностей строения древесины и гидрофильной жидкости. Целью работы является разработка оперативного метода расчета технологических параметров пропитки древесины при изменении параметров пропиточных составов.

Основная часть. Объектом исследования являются деревянные опоры линий связи и электропередачи из древесины хвойных пород с влажностью 25%. Диаметр опор 22 см, длина 6,5–11 м. Расчет коэффициентов проницаемости и поверхностного сопротивления и сопротивления в материале проведен аналогично методике, изложенной в работах [1, 2].

В исследованиях проницаемости древесины при фильтрации жидкости необходимо учитывать, потери давления не только внутри материала, но и на входной и выходной поверхностях. С учетом этого перепад давления на образце длиной δ равен:

$$P_1 - P_2 = \Delta P_{\text{вх}} + \Delta P_{\text{вых}} + \Delta P_{\text{мат}}, \quad (1)$$

а на образце длиной 2δ :

$$P'_1 - P'_2 = \Delta P'_{\text{вх}} + \Delta P'_{\text{вых}} + \Delta P'_{\text{мат}} \quad (2)$$

где P_1 и P_2 ; P'_1 и P'_2 – давление на входе и выходе соответственно длиной δ и 2δ

$\Delta P_{\text{вх}}$, $\Delta P_{\text{вых}}$ и $\Delta P'_{\text{вх}}$, $\Delta P'_{\text{вых}}$ – потери давления на входе и выходе образцов δ и 2δ ;

$\Delta P_{\text{мат}}$ и $\Delta P'_{\text{мат}}$ – потери давления в материале соответственно образцов δ и 2δ .

Перепад давления на образцах двух длин подбирается таким образом, чтобы расход жидкости практически был одинаковым. Ввиду трудности достижения одинакового расхода в экспериментальных условиях, возможно существование различия между расходами. Обозначим эти различия коэффициентом:

$$\alpha = \frac{q_m}{q'_m} = \frac{\tau_2}{\tau_1}, \quad (3)$$

где q'_m , q_m – расход жидкости на образцах длиной δ и 2δ , соответственно; τ_1 и τ_2 – время фильтрации жидкости определенного объема через образец длиной δ и 2δ , соответственно.

Учитывая, что жидкость является практически несжимаемой, положим:

$$\Delta P_{\text{вх}} = \Delta P_{\text{вых}}; \quad \Delta P_{\text{вх}} = \Delta P'_{\text{вых}}, \quad (4)$$

По теории гидродинамики, потери давления на местном сопротивлении

$$\Delta P_{\text{вх}} = \xi_{\text{п}} \frac{q_m^2}{2\rho_p}, \quad (5)$$

где $\xi_{\text{п}}$ – коэффициент поверхностного сопротивления; ρ_p – плотность жидкости раствора; q_m – удельный массовый поток жидкости через образец:

$$\Delta P'_{\text{вх}} = \xi_{\text{п}} \frac{q_m^2}{2\rho_p} = \xi_{\text{п}} \left(\frac{q_m}{\alpha} \right)^2 \cdot \frac{1}{2\rho_p} = \frac{\xi_{\text{п}} q_m^2}{2\rho_p} \cdot \frac{1}{\alpha^2} \quad (6)$$

$$\Delta P'_{\text{вх}} = \frac{1}{\alpha^2} \Delta P_{\text{вх}} \quad (7)$$

Принимаем, что фильтрация жидкости через древесину подчиняется закону Дарси.

Массовый расход фильтрующей жидкости

$$q_m = -\frac{k}{v} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} \quad (8)$$

или

$$q_m = -\frac{k}{v} \cdot \frac{\partial P_m}{\delta}, \quad (9)$$

где v – кинематическая вязкость жидкости, м²/с; k – коэффициент проницаемости, м².

Отсюда для образца длиной δ

$$\Delta P_{\text{мат}} = \frac{v q_m \delta}{k}, \quad (10)$$

где δ – толщина образца; а для образца длиной 2δ

$$\Delta P'_{\text{мат}} = \frac{v q'_m 2\delta}{k}. \quad (11)$$

Следовательно из (3), (10) и (11) получим

$$\Delta P'_{\text{м}} = \frac{2}{\alpha} \Delta P_{\text{м}}. \quad (12)$$

Преобразуем уравнения (1) и (2)

$$P_1 - P_2 = 2\Delta P_{\text{вх}} + \Delta P_{\text{м}}; \quad (13)$$

$$P'_1 - P'_2 = 2\Delta P'_{\text{вх}} + \Delta P'_{\text{м}}. \quad (14)$$

Рассмотрим систему уравнений (13) и (14).

Умножим уравнение (14) на α^2 , вычтем из полученного уравнения (13) и получим выражение:

$$\alpha^2 (P'_1 - P'_2) - (P_1 - P_2) = 2\Delta P'_{\text{вх}} \alpha^2 + \Delta P'_{\text{м}} \alpha^2 - 2\Delta P_{\text{вх}} - \Delta P_{\text{м}}. \quad (15)$$

Подставим в уравнение (15) выражение (7), (12) и, проведя преобразования, получим:

$$\Delta P_{\text{м}} = \frac{\alpha^2 (P'_1 - P'_2) - (P_1 - P_2)}{2\alpha - 1}. \quad (16)$$

Из 13 следует, что $\Delta P_{\text{вх}}$ равно:

$$\Delta P_{\text{вх}} = \frac{P_1 - P_2 - \Delta P_{\text{м}}}{2}. \quad (17)$$

Подставив в (17) выражение (16) и проведя соответствующие преобразования, получим:

$$\Delta P_{\text{вх}} = \frac{\alpha}{2} \left[\frac{2(P_1 - P_2) - \alpha(P'_1 - P'_2)}{2\alpha - 1} \right]. \quad (18)$$

Из закона Дарси, коэффициент проницаемости

$$k = \frac{q_m v \delta}{\Delta P_{\text{мат}}}. \quad (19)$$

В соответствии с теорией гидродинамики, потери давления на входной или выходной поверхностях определяется из уравнения (5):

$$\Delta P_{\text{вх}} = \xi_{\text{п}} \frac{q_m^2}{2\rho_p}.$$

Отсюда

$$\xi_{\pi} = \frac{2\mu B}{RTq_m^2}, \quad (20)$$

где

$$q_m = \frac{\rho v}{\delta \tau}. \quad (21)$$

Коэффициенты проницаемости K (19) и поверхностного сопротивления ξ_{π} (20) определяются с применением методов статической обработки.

Однако, эта методика требует тщательного подбора одинаковых расходов на двух толщинах образцов, и поэтому допускается приближенный расчет с использованием вспомогательного коэффициента по формуле (3). Для упрощения методики исследований предложено коэффициент фильтрации и поверхностного сопротивления рассчитывать при измерении на данном перепаде давления, объема и времени фильтрации жидкости.

С учетом того, что перепад давления на образце состоит из потери давления на входной и выходной поверхности, и в материале (1), потери давления на входной поверхности будут прямо пропорциональны коэффициенту поверхностного сопротивления, квадрату массового расхода воздуха и обратно пропорциональны удвоенной плотности жидкости (5). Полагая на входной и выходной поверхностях потери давления равными, выразим их следующим образом:

$$\Delta P_{ax} + \Delta P_{вых} = 2\xi_{\pi} \frac{q_m^2}{\rho} = \xi_{\pi} \frac{q_m^2}{\rho}, \quad (22)$$

Потери давления в материале определим в соответствии с законом Дарси (10). Подставляя (21) и (9) в (1), получим:

$$P_1 - P_2 = 2\xi_{\pi} \frac{q_m^2}{\rho_p} + \frac{v_p \delta q_m}{\kappa}. \quad (23)$$

Для определения коэффициентов проницаемости K и поверхностного сопротивления ξ рассмотрим уравнение (23) при двух различных перепадах давления на образце и, следовательно, различных удельных массовых потоках жидкости при прохождении ее через образец:

$$(P_1 - P_2)_1 = \xi_{\pi} \frac{q_{m1}^2}{\rho} + \frac{v_p \delta q_{m1}}{\kappa}. \quad (24)$$

$$(P_1 - P_2)_2 = \xi_{\pi} \frac{q_{m2}^2}{\rho} + \frac{v_p \delta q_{m2}}{\kappa}. \quad (25)$$

Умножив уравнение (24) на $v \delta q_{m2}$, уравнение (25) на $v \delta q_{m1}$, вычтя из уравнения (24) уравнение (25), определим коэффициент проницаемости:

$$K = \frac{v_p \delta q_{m1} q_{m2} (q_{m1} - q_{m2})}{(P_1 - P_2)_2 q_{m1}^2 - (P_1 - P_2)_1 q_{m2}^2}. \quad (27)$$

И поверхностного сопротивления

$$\xi_{\pi} = \frac{\rho_p}{q_{m1} q_{m2}} \cdot \frac{(P_1 - P_2)_1 q_{m2} - (P_1 - P_2)_2 q_{m1}}{q_{m1} - q_{m2}}. \quad (28)$$

Определение продолжительности пропитки и необходимого привеса проведены с учетом вязкости, температуры пропиточных составов их поверхностного натяжения, угла смачивания, особенностей анатомического строения древесины, ее влажности и температуры, гидротермического сопротивления поверхностного слоя, трения в капиллярах древесины при помощи дифференциального уравнения пропитки [1, 2].

$$-\rho(\delta - x) \frac{d^2 x}{d\tau^2} = P_c - \left(\frac{\xi}{2} + 1\right) \rho \left(\frac{dx}{d\tau}\right)^2 + \frac{\gamma(\delta - x)\Pi}{\kappa} \rho \frac{dx}{d\tau} + \frac{2\sigma_n \sqrt{\Pi \cos \theta}}{\sqrt{8\kappa}} - \frac{\delta}{x} P_0 \quad (29)$$

При решении этого дифференциального уравнения численно на ЭВМ относительно времени и глубины пропитки ($\delta - x$), определяются важнейшие технологические параметры процесса пропитки древесины гидрофобными жидкостями.

С учетом ответвления части потока в полости клеток и пор это уравнение будет иметь вид:

$$\rho_{жс} \frac{d}{d\tau} \left[(\delta - x) \frac{d(\delta - x)}{d\tau} \right] = P_c + P_{\kappa} - \frac{\xi \rho_{жс}}{2} \left(\frac{dx}{d\tau}\right)^2 - \xi q_{m2} \frac{dx}{d\tau} - \frac{\xi}{2\rho_{жс}} q_{m2}^2 + \frac{\gamma \rho_{жс} (\delta - x)}{\kappa} \left(\frac{dx}{d\tau}\right) - \frac{\gamma}{\kappa} \int_{\delta}^x q_{m2} dx - \frac{P_0 \delta}{x} \quad (30)$$

Из уравнения пропитки древесины при заполнении сосудов, полостей клеток и пор, пренебрегая второй производной $\frac{d^2 x}{d\tau^2}$, выведем следующее уравнение относительно скорости движения

$$\frac{dx}{d\tau} = \left[\frac{\gamma(\delta - x)}{2\kappa \left(1 + \frac{\xi}{2}\right)} - \sqrt{\left[\frac{\gamma(\delta - x)}{2\kappa \left(1 + \frac{\xi}{2}\right)} \right]^2 + \frac{P_c P_{\kappa} P_0 \delta}{\rho_{жс} \left(1 + \frac{\xi}{2}\right)}} \right]. \quad (31)$$

Решение дифференциального уравнения (30) численными методами при заданной определенной величине относительного привеса образца позволит рассчитать параметры для построения номограммы продолжительности процесса пропитки в зависимости от $\frac{1}{2}$ длины образца и необходимого относительного привеса. Для исследования процесса пропитки древесины сложнейшего капиллярно-пористого тела, необходимо изучить важнейшие факторы, влияющие на качество пропитки – вязкость и температуру пропитывающих составов, их поверхностное натяжение и угол смачивания, особенности анатомического строения древесины, ее влажность и температуру, гидродинамическое сопротивление поверхностного слоя, трение в капиллярах древесины.

Исследована зависимость кинематической вязкости гидрофобного защитного состава с 6% ГМТА от температуры. При температуре 20 °C она составляла $94 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, при 50 °C – $1,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, причем в области 40–60 °C влияние температуры уменьшилось, так при 50 °C она была равна $1,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, т. е. дальнейший подъем температуры не понижает вязкость. В тех же пределах температур исследована зависимость пропитки древесины от температуры. Образцы диаметром 36 мм и длиной 15 мм пропитывались способом вакуум-давление атмосферное, соответственно 0,085–1,000 МПа в течение 120 мин в установке с поплавковой системой, позволяющей определить количество поглощенного раствора по глубине погружения поплавок.

$$P_1 + P_2 + P_3 = P, \quad (32)$$

где P – масса жидкости, вытесненной поплавком; P_2 – масса верхнего объемомера; P_3 – масса образца древесины; V_1, V_2, V_3 – их объемы; V – объем жидкости, вытесненной поплавком, тогда:

$$P = V d_{\tau} \quad (33)$$

$$d_{\tau} = V_1 + k V_2 + V_3, \quad (34)$$

где k – коэффициент, который показывает верхнюю часть поплавка при погружении в жидкость;

$$P = (V + k V_2 + V_3) d_{\tau}; \quad (35)$$

$$P_3 = V_3 d_w \quad (36)$$

$$d_w = P - V_1 d_{\tau} - k V_2 d_{\tau}; \quad (37)$$

$$V_3 d_{\tau} = P - V_1 d_{\tau} \quad (37)$$

при $K=0$, поплавок плавает, верхняя часть не погружена вообще.

$$V_3 d_{\tau} = P - V_1 d_{\tau} - k 0,2 V_2 d_{\tau}, \text{ при } K=0,2 \quad (38)$$

Процент пропитки образца P_{κ} с учетом кинетики разбухания по изменению D_{κ}, D_n , соответственно конечного и начального диаметров образцов:

$$P_{\kappa} = \frac{V_n + \frac{\pi D_{\kappa}^2 - \pi D_n^2}{4} l}{P_0} \cdot 100, \quad (39)$$

V_n – объем погружения поплавка к моменту испытания; P_0 – исходная масса древесины.

Исходя из расчета, по формуле (38), построена зависимость пропитки древесины гидрофобной жидкостью, содержащей 6% ГМТА, от температуры, установлено, что при температуре 40–50 °C достигается наибольшая эффективная

пропитка, причем основное поглощение значительно замедляется, особенно это характерно для составов с температурой 40–50 °С. Так, за 60 мин при температуре 40 °С древесина поглотила 18,75 г состава при объеме образца 0,00031 м³ или 61,4 кг/м³, а при 20 °С этот же образец поглотил 8,5 г или 62,2 кг/м³ древесины, т. е. практически одинаковое количество, как и при 40 °С.

Наиболее низкую вязкость и высокую пропитываемость имеет состав фенольная смола с 6% ГМТА при температуре 50 °С, которая в дальнейшем и выбрана за оптимальную.

Исследованы коэффициенты проницаемости и поверхностного сопротивления заболони сосны в радиальном направлении при фильтрации через нее пропитывающего состава, содержащего гидрофобной жидкости 94 % масс., ГМТА – 6 % масс.

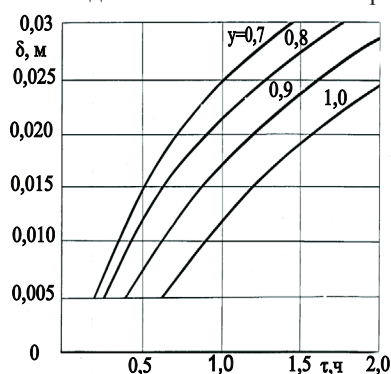
Исследованы параметры пропиточного состава свойств древесины, коэффициентов проницаемости и поверхностного сопротивления в радиальном направлении и другие параметры, необходимые для расчета продолжительности пропитки по заданной глубине пропитки и привесу образца. Исследования проведены на образцах древесины сосны диаметром 22 см с толщиной заболони 30 мм плотностью 470 кг/м³. Поверхностное натяжение, косинус угла смачивания определяли при температуре 50 °С. Расчеты относительного привеса y_1 и y_2 рассчитывали на образцах с изолированными торцами. Коэффициенты проницаемости рассчитаны по трем прямолинейным участкам, обозначенным К1, К2, К3. Привес $y = 0,7–0,8$ показывает, что для данного состава возможно определить время пропитки на другую глубину при заданных относительных привесах (Рисунок).

Номограмма определения продолжительности пропитки от половины толщины образца δ и необходимого привеса образца y при давлении среды 0,8 МПа.

Заклучение. 1. Рассчитаны коэффициенты проницаемости и сопротивления заболони древесины сосны при фильтрации через них гидрофобной жидкости.

2. По дифференциальному уравнению определена продолжительность пропитки относительно времени и привеса гидрофобной жидкости

3. Построена номограмма для определения продолжительности пропитки древесины от половины толщины образца и необходимого относительного привеса образца.



Литература

1. 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, 10-15 июля 1985. – С. 181–183.

2. 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 в редакцию 20.02.2013 г.