

ТЕХНОЛОГИЯ ДЕРЕВООБРАБОТКИ

УДК 674.04

А.С.ГАЛЬПЕРИН, Л.В.ИГНАТОВИЧ (БТИ)

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ПРОПИТКИ ДРЕВЕСИНЫ

Процесс пропитки древесины в соответствии с физической моделью, описанной в литературе [1], представляет собой движение жидкости по сосудам и трахеидам древесины вдоль волокон от торцовых поверхностей к центру образца. По мере движения фронта жидкости часть потока ответвляется из сосудов в поперечном направлении в полости клеток. Скорость движения жидкости в эффективном капилляре древесины вдоль волокон по данной модели описывается уравнением

$$\frac{dx}{d\tau} = u - \sqrt{u^2 + v - z - z_1}, \quad (1)$$

где x — координата фронта жидкости, отсчитываемая от центра образца ($x = 0$) до его торцовой поверхности ($x = \delta$), м; δ — половина длины образца м; τ — время, с.

Величины, входящие в выражение (1):

$$u = \frac{\nu_{ж} (\delta - x) \Pi_1}{2k_{ж} (1 + \frac{\xi_{ж}}{2})} - \frac{q_{m2}}{\rho_{ж}}; \quad (2)$$

$$v = \frac{P_c + P_k - P_0}{\rho_{ж} (1 + \frac{\xi_{ж}}{2})} \frac{\delta}{x}; \quad (3)$$

$$z = \left(\frac{q_{m2}}{\rho_{ж}} \right)^2; \quad z_1 = \frac{\nu_{ж} \Pi_1}{k_{ж} (1 + \frac{\xi_{ж}}{2})} \int_{\delta}^x q_{m2} dx, \quad (4)$$

где $k_{ж}$ — коэффициент проницаемости древесины жидкостью, м²; $\xi_{ж}$ — коэффициент поверхностного сопротивления; $\nu_{ж}$ — кинематическая вязкость жидкости, м²/с; $\rho_{ж}$ — плотность жидкости, кг/м³; P_c, P_k — внешнее и капиллярное давление жидкости, Па; P_0 — давление воздуха в древесине перед про-

питкой, Па; q_{m2} — удельный массовый поток жидкости, ответвляемой из сосудов в полости клеток, кг/(м²·с).

Давление в эффективном капилляре

$$P_k = (2\sigma_n \cos\theta)/R, \quad (5)$$

где σ_n — поверхностное натяжение жидкости, Н/м; θ — угол смачивания древесины жидкостью; R — радиус эффективного капилляра для сосудов, м;

$$R = \sqrt{8k_{ж}/\Pi_1}, \quad (6)$$

где Π_1 — пористость древесины, связанная с полостями сосудов.

Результаты расчета пропитки древесины, выполненного по формулам (1) — (6), приведены в работе [1]. Анализ этих результатов показал, что для образцов древесины длиной менее 2—3 м имеет место соотношение

$$(z_1 + z) \ll u^2 + v. \quad (7)$$

Это свидетельствует о том, что поток, ответвляемый в поперечном направлении в полости клеток, значительно меньше потока, движущегося по сосудам и трахеидам вдоль волокон. Другими словами, для древесины длиной 2—3 м вначале происходит заполнение полостей сосудов и трахеид вдоль волокон, а затем заполнение жидкостью полостей клеток в поперечном направлении. В этом случае уравнение (1) с учетом соотношения (7) существенно упрощается. После несложных преобразований можно получить уравнение скорости пропитки вдоль волокон:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{k_{ж}(P_c + P_k - P_0 \frac{\delta}{x})}{\nu_{ж}\rho_{ж}(\delta - x)\Pi_1}. \quad (8)$$

Для дальнейшего анализа используем понятие безразмерных параметров, комплексов [2]:

$$\theta_{ж} = \frac{\delta - x}{\delta}; \quad D = \frac{P_c + P_k}{P_0}; \quad F_0 = \frac{k_{ж}P_0\tau}{\nu_{ж}\rho_{ж}\delta^2\Pi_1},$$

где $\theta_{ж}$ — безразмерная координата фронта пропитки; D — безразмерное давление; F_0 — безразмерное время пропитки (аналог критерия Фурье).

С учетом введенных обозначений уравнение скорости пропитки (8) принимает следующий вид:

$$\frac{d\theta_{ж}}{dF_0} = \frac{D}{\theta_{ж}} - \frac{1}{\theta_{ж}(1 - \theta_{ж})}. \quad (9)$$

После интегрирования уравнения (9) получим

$$F_0 = \frac{\theta_{ж}^2}{2D} - \frac{\theta_{ж}}{D^2} - \left(\frac{D-1}{D}\right) \ln\left(\frac{D-1-D\theta_{ж}}{D-1}\right). \quad (10)$$

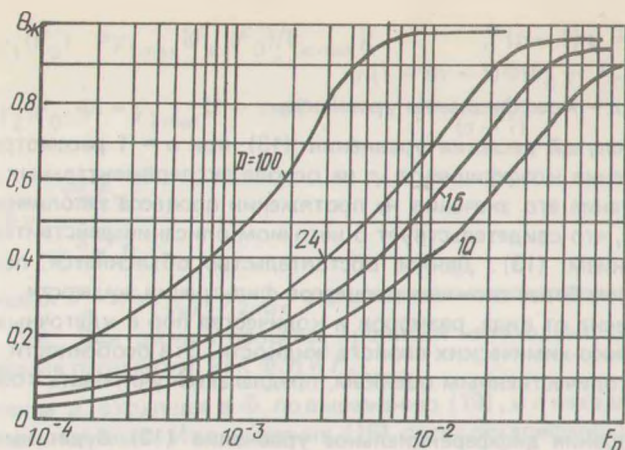


Рис. 1. Зависимость относительной глубины пропитки $\theta_{ж}$ древесины вдоль волокон от безразмерного времени F_0 при различных значениях относительного давления D

Из уравнения (9) при условии $d\theta_{ж}/dF_0 = 0$ определим значение максимальной глубины пропитки:

$$\theta_{ж\max} = (D - 1) / D. \quad (11)$$

Результаты расчета пропитки древесины по формуле (10) для различных значений D приведены на рис. 1. Из рис. 1 и выражения (11) следует, что с увеличением параметра D возрастает максимальная глубина пропитки древесины. Это связано с тем, что с увеличением внешнего давления усиливается сжатие защемленного в древесине воздуха. Значения относительного давления D более 100 не приводят к какому-либо существенному увеличению глубины фронта пропитки.

Степень пропитки древесины по массе связана со степенью объемного заполнения полостей сосудов и клеток, пор:

$$y_1 = \frac{m_{ж1}}{m_d} = \frac{\rho_{ж}}{\rho_d} \Pi_1 \theta_{ж}; \quad y_2 = \frac{m_{ж2}}{m_d} = \frac{\rho_{ж}}{\rho_d} \Pi_2 \theta_{ж} a, \quad (12)$$

где y_1, y_2 — степень пропитки (заполнение массой жидкости) полостей сосудов, а также клеток и пор; $\rho_{ж}, \rho_d$ — плотность жидкости и древесины, кг/м^3 ; Π_1, Π_2 — пористость древесины, связанная соответственно с полостями сосудов и клеток, пор; $m_{ж1}, m_{ж2}$ — масса жидкости, заполняющая полости сосудов и клеток, пор, кг ; m_d — масса древесины, кг ; a — коэффициент объемного заполнения жидкостью $V_{ж}$ полостей клеток и пор V_n ($a = V_{ж}/V_n$).

Общая степень пропитки древесины $y = y_1 + y_2$.

Объемное заполнение полостей клеток и пор в поперечном относительно сосудов направлении предлагается описывать дифференциальным уравнением:

$$\frac{da}{d\tau} = \varphi (1 - a)^n, \quad (13)$$

где φ, c^{-1} , и n — коэффициенты уравнения.

Частный случай решения уравнения (13) при $n = 1$ рассмотрен в работе [1]. Определение коэффициента φ на основе экспериментальных данных показало изменение его значения на протяжении процесса заполнения полостей клеток и пор, что свидетельствует о неточном описании действительного процесса уравнением (13). Данное обстоятельство объясняется, по-видимому, существованием более сложных процессов фильтрации жидкости, характер которых зависит от вида, размеров и количества пор в клеточных стенках, а также от физико-химических свойств жидкости. Эти особенности, не поддающиеся пока количественным оценкам, предлагается учитывать коэффициентами φ и n .

После решения дифференциальное уравнение (13) будет иметь следующий вид:

$$a = 1 - \exp\left(-\frac{\ln(1 + (n-1)\varphi\tau)}{(n-1)}\right), \quad (14)$$

тогда с учетом выражений (12) и (14) степень пропитки

$$\begin{aligned} y_1(\tau) &= y_{1\max} (\theta / \theta_{\text{жmax}}); \\ y_2(\tau) &= y_{2\max} \left(1 - \exp\left(-\frac{\ln(1 + (n-1)\varphi\tau)}{(n-1)}\right)\right), \end{aligned} \quad (15)$$

где $y_{1\max}, y_{2\max}$ — максимальные степени пропитки;

$$y_{1\max} = \Pi_1 \theta_{\text{жmax}}; \quad y_{2\max} = \Pi_2 \theta_{\text{жmax}}. \quad (16)$$

Таким образом, кинетика пропитки древесины может быть представлена

$$y(\tau) = \begin{cases} y_1(\tau) & \text{при } 0 \leq \tau \leq \tau_{1\max}; \\ y_{1\max} + y_2(\tau) & \tau > \tau_{1\max}. \end{cases} \quad (17)$$

где $\tau_{1\max}$ — время, при котором происходит полное заполнение сосудов и трахеид вдоль волокон и начиная с которого происходит заполнение полостей клеток и пор.

Для получения более универсальных выражений, описывающих процесс пропитки, целесообразно использовать безразмерные нормированные параметры и комплексы [2], аналогично рассмотренным ранее. В этом случае выражения степени пропитки (17) будут иметь следующий вид:

$$y = \begin{cases} y_1(F_0) & \text{при } 0 \leq F_0 \leq F_{01\max}; \\ y_{1\max} + y_2(F_0, \Phi) & F_0 > F_{01\max}; \end{cases}$$

$$y_1(F_0) = y_{1\max} (\theta_{\text{ж}}(F_0)/\theta_{\text{ж}\max});$$

$$y_2(F_0, \Phi) = y_{2\max} \left(1 - \exp\left(-\frac{\ln(1 + (n-1)\Phi(F_0 - F_{01\max}))}{(n-1)}\right) \right); \quad (18)$$

$$\Phi = \frac{\varphi \nu_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}} \delta^2}{k_{\text{ж}} P_0}. \quad (19)$$

Значения $\theta_{\text{ж}}$ и $y_{1\max}$, $y_{2\max}$ определяются соответственно по формулам (10) и (16). Для расчета процесса пропитки необходимо определить такие безразмерные параметры, как Φ , n и $F_{01\max}$.

Значение φ , входящее в Φ по выражению (19), и n находятся по методике, приведенной ниже. Из выражения (15) после логарифмирования получим

$$\frac{\ln(1 + (n-1)\varphi(\tau - \tau_{1\max}))}{(n-1)} = -\ln\left(1 - \frac{y_2(\tau)}{y_{2\max}}\right). \quad (20)$$

Здесь время пропитки $\tau > \tau_{1\max}$, т.е. рассматривается процесс заполнения полостей клеток и пор. Левая часть уравнения (20) обозначается $a(\tau)$, а в правой части степень пропитки заменяется на $y(\tau) - y_{1\max}$ в соответствии с формулой (17).

Для нахождения неизвестных φ и n решается система двух уравнений, составленных для двух различных продолжительностей пропитки τ_1 и τ_2 , причем $\tau_{1,2} > \tau_{1\max}$:

$$\begin{cases} \ln(1 + (n-1)\varphi(\tau_1 - \tau_{1\max})) = (n-1)a(\tau_1); \\ \ln(1 + (n-1)\varphi(\tau_2 - \tau_{1\max})) = (n-1)a(\tau_2). \end{cases} \quad (21)$$

Решение системы (21) может быть осуществлено различными способами, например путем преобразования в трансцендентное уравнение и его решения численным методом на ЭВМ:

$$(1 + (n-1)\varphi(\tau_1 - \tau_{1\max})) = (1 + (n-1)\varphi(\tau_2 - \tau_{1\max}))^{a(\tau_1)/a(\tau_2)}.$$

Для иллюстрации метода был выполнен расчет пропитки древесины березы мочевино-формальдегидной смолой МФПС-2. Параметры φ и n определялись по шести парам экспериментальных точек кинетики пропитки коротких образцов. Расчеты, проведенные по указанной выше методике, показали независимость φ и n от продолжительности пропитки. Статистическая обработка привела к следующим значениям: $\varphi = (2,17 \pm 0,33) \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$; $n = 5,6 \pm 0,2$. Остальные параметры, полученные из различных экспериментов, имели следующие средние величины: $k_{\text{ж}} = 4,2 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$; $\rho_{\text{ж}} = 1182 \text{ кг/м}^3$; $\nu_{\text{ж}} = 24 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $\rho_{\text{д}} = 590 \text{ кг/м}^3$; $\Pi_1 = 0,24$, $\Pi_2 = 0,37$. Давление воздуха в

Таблица 1. Расчет степени пропитки древесины вдоль волокон (заполнение сосудов) ($D=16$)

$\theta_{\text{ж}}$	0	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,80	0,94
F_0	0	$2,9 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$4,8 \cdot 10^{-3}$	$7,6 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$2,1 \cdot 10^{-2}$	$3,3 \cdot 10^{-2}$
y_1	0	0,05	0,09	0,14	0,18	0,23	0,27	0,36	0,43

Таблица 2. Расчет степени пропитки древесины поперек волокон (заполнение полостей клеток и пор)

F_0	$3,3 \cdot 10^{-2}$	$12,7 \cdot 10^{-2}$	$64,4 \cdot 10^{-2}$	2,27	10,3	80
y_2	0	0,24	0,39	0,46	0,53	0,58

Таблица 3. Расчет общей пропитки древесины

F_0	0	$2,9 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$4,8 \cdot 10^{-3}$	$7,6 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-2}$	$12,7 \cdot 10^{-2}$	$64,4 \cdot 10^{-2}$	2,3	80
y	0	0,05	0,09	0,18	0,23	0,43	0,72	0,87	0,94	1,06

Таблица 4. Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными

F_0	$y_p, \%$	$y_3, \%$	$\epsilon, \%$
0,12	72	80	-10,0
0,26	76	87	-12,6
0,64	84	89	- 5,6
1,96	100	99	+ 1,0

древесине перед пропиткой в результате вакуумирования составило $P_0 = 6$ кПа. Длина образца 150 мм.

Расчет степени пропитки сосудов вдоль волокон y_1 и безразмерного времени F_0 при различной глубине фронта пропитки $\theta_{\text{ж}}$ выполняется по формулам (10) и (12), а его результаты представлены в табл. 1. Расчет степени пропитки древесины поперек волокон y_2 (заполнение полостей клеток и пор) осуществлялся по формулам (16), (18) с учетом того, что $F_0 = 0,033$ (табл. 2). Значения общей степени пропитки древесины от значения F_0 приведены в табл. 3. Сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными (табл. 4) показывает их удовлетворительное согласование.

Таким образом, рассмотренная модель пропитки древесины, которая представлена в критериальной форме, позволяет эффективно осуществить расчет процесса и получить необходимые технологические параметры.

Литература

1. Ш у т о в Г.М. Основы модифицирования древесины термохимическим способом: Дис. ... д-ра техн. наук. М., 1982. 2. Л ы к о в А.В. Теория теплопроводности. М., 1967.

УДК 674.059:621.931.44

Б.В.ГРИНБЕРГ, А.А.ЛАРИОНОВ,
канд-ты техн. наук (БТИ)

НЕПРЕРЫВНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ ШПОНА В ПРОЦЕССЕ СУШКИ

Одним из основных параметров, характеризующих качество шпона, является его влажность. Применяемые для измерения влажности шпона диэлектрические и емкостные влагомеры имеют целый ряд существенных недостатков. Показания влагомеров зависят от температуры и влажности окружающей среды, силы прижатия к поверхности шпона. Кроме того, эти влагомеры нельзя использовать для непрерывного измерения влажности шпона в потоке в процессе его сушки.

Перечисленных недостатков лишен инфракрасный влагомер, принцип действия которого основан на сравнении сигнала, соответствующего селективному поглощению инфракрасного излучения молекулами воды, с опорным сигналом. Устройство инфракрасного влагомера, основанного на этом принципе, изложено в работе [1].

Отличительной особенностью измерения влажности шпона по сравнению с измерением влажности бумаги, текстильных и различных сыпучих материалов, идущих непрерывным потоком, являются разрывы между листами шпона, приводящие к резким отклонениям в показаниях влагомера. Прерывание измерительной информации в моменты прохождения через зону измерения разрывов между листами не позволяет использовать влагомер в качестве датчика в автоматических системах регулирования влажности шпона. Для устранения этого недостатка был разработан датчик наличия листа в зоне измерения (рис. 1). Датчик содержит фотодиоды 1, преобразователи ток-напряжение 2, фильтры низких частот 3, компараторы 4 и логический элемент 2И 5, который управляет электронными ключами 6, расположенными в эталонном и рабочем каналах схемы влагомера. Когда лист шпона находится в зоне измерения и перекрывает поле обоих фотодиодов, на входах схемы 2И образуется потенциальный уровень логической единицы, электронные ключи открываются и сигналы рабочего и эталонного каналов поступают на входы интеграторов соответствующих каналов.

При выходе шпона из зоны измерения датчик наличия листа вырабатывает сигнал, который закрывает электронные ключи. При этом происходит "запоминание" уровня рабочего и эталонного сигналов на интегрирующих