

Г.М.ШУТОВ, д-р техн. наук,  
А.С.ГАЛЬПЕРИН, Л.В.ИГНАТОВИЧ (БТИ)

## РАСЧЕТ ПРОЦЕССА ВАКУУМИРОВАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ ВДОЛЬ ВОЛОКОНОВ

Пропитка древесины различными модификаторами является сложным физическим процессом, зависящим от свойств древесины, пропиточного состава и технологических параметров. Глубокая пропитка древесины невозможна без удаления воздуха из материала.

Экспериментальными исследованиями установлено, что вакуумирование древесины длиной до 2–3 м происходит практически вдоль волокон.

С учетом фильтрации газа в макрокапиллярах древесины по закону Дарси и уравнения неразрывности получено дифференциальное уравнение, описывающее изменение давления воздуха в древесине вдоль волокон [1]:

$$\frac{\mu \Pi}{RT} \cdot \frac{\partial P}{\partial \tau} = \frac{k}{a} \left( \left( \frac{\partial P}{\partial x} \right)^2 + P \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \right),$$

где  $P$  – давление воздуха, Па;  $\tau$  – время, с;  $x$  – координата по длине образца, м;  $k$  – коэффициент проницаемости,  $\text{м}^2$ ;  $\Pi$  – пористость древесины;  $a$  – коэффициент, 1,53 Н/с;  $\mu$  – молярная масса воздуха, кг/моль;  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/моль·К;  $T$  – температура, К.

Начальное условие:

$$P(x, 0) = P_0.$$

Границные условия в центре образца ( $x = 0$ ):

$$\frac{\partial P(0, \tau)}{\partial x} = 0;$$

на поверхности образца ( $x = \delta$ ):

$$-\frac{k}{a} P(\delta, \tau) = \sqrt{\frac{2\mu}{RT\xi}} P(\delta, \tau) (P(\delta, \tau) - P_c(\tau)),$$

где  $\delta$  – половина длины образца, м;  $\xi$  – коэффициент поверхностного сопротивления;  $P_c(\tau)$  – давление воздуха в автоклаве, Па.

Для решения данной задачи использовался метод Кармана [2]. Аппроксимирующая функция давления

$$P(x, \tau) = a_1(\tau)x^2 + a_2(\tau)x + a_3(\tau). \quad (1)$$

В таком случае коэффициент  $a_1$  определялся из дифференциального уравнения

$$\frac{da_1}{d\tau} = \frac{1,5(A_1 a_1 P_c - \frac{dP_c}{d\tau})(1 - Aa_1^2 \delta^2)}{\delta^2 [3Aa_1 P_c - (1 - Aa_1^2 \delta^2)]}, \quad (2)$$

а коэффициент

$$a_3(\tau) = -a_1(\tau) \delta^2 + \frac{P_c(\tau)}{1 + Aa_1^2(\tau) \delta^2}, \quad (3)$$

где

$$A_1 = \frac{2kRT}{\mu Pa}, \quad \frac{m^3 c}{kg}; \quad A = \frac{2k^2 RT \xi}{a^2 \mu}, \quad \frac{m^4 c^4}{kg^4}.$$

Расчет процесса вакуумирования по уравнениям (1) – (3) выполнялся на ЭВМ [1] для образцов различной длины.

Недостатком данного метода расчета является необходимость выполнения нового расчета на ЭВМ каждый раз при изменении значения какого-либо параметра. Для устранения этого недостатка предлагается использовать не абсолютные значения параметров, а их безразмерные комплексы и критерии.

После анализа и соответствующих преобразований получены следующие выражения для расчета давления воздуха в древесине при ее вакуумировании вдоль волокон:

$$\theta = b_1 X^2 + b_3; \quad (4)$$

$$\theta_p = \frac{P}{P_0}; \quad X = \frac{x}{\delta}; \quad b_1 = \frac{a_1 \delta^2}{P_0}; \quad b_3 = \frac{a_3}{P_0}; \quad \theta_c = \frac{P_c}{P_0}, \quad (5)$$

где введены безразмерные нормированные параметры;  $\theta_p$  – давление в древесине;  $X$  – координата по длине;  $b_1, b_3$  – коэффициенты.

Коэффициент  $b_1$  определяется из дифференциального уравнения

$$\frac{db_1}{dF_0} = \frac{1,5(2b_1 \theta_c - \frac{d\theta_c}{dF_0})(1 - Lb_1^2)}{[3Lb_1 \theta_c - (1 - Lb_1^2)^2]}, \quad (6)$$

$$b_3 = -b_1 + \frac{\theta_c}{1 - Lb_1^2},$$

где  $L$  – безразмерный параметр, характеризующий соотношение потерь давления на поверхности и потери давления внутри древесины;  $F_0$  – безразмерное время процесса (аналог критерия Фурье);

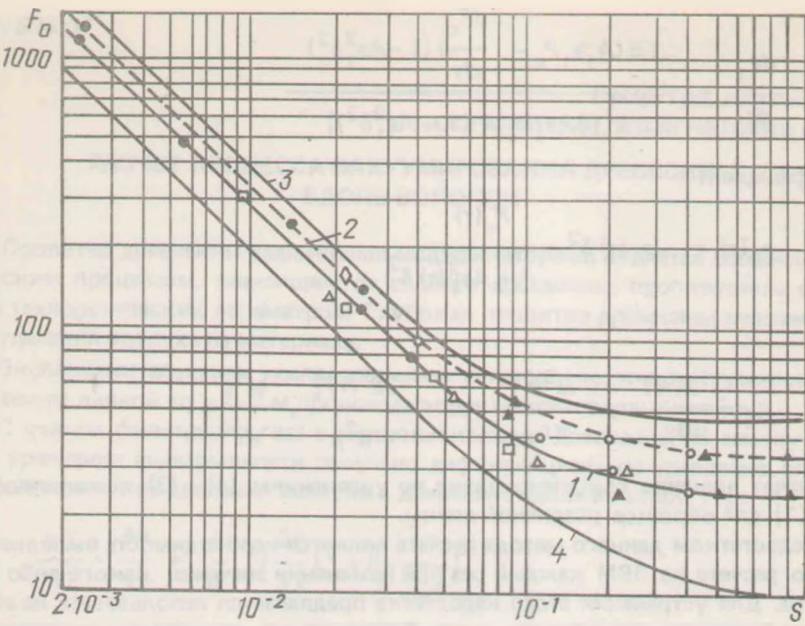


Рис. 1. Зависимость параметров  $F_0$  от  $S$  при вакуумировании древесины вдоль волокон (начальное давление  $P_0 = 0,1$  МПа, параметр  $L = 0,1$ ):

1 — конечное давление в автоклаве  $\theta_{\text{ск}} = 0,05$ , в древесине  $\theta_k = 1,2\theta_{\text{ск}}$ ; 2 —  $\theta_{\text{ск}} = 0,05$ ,  $\theta_k = 1,05\theta_{\text{ск}}$ ; 3 —  $\theta_{\text{ск}} = 0,03$ ,  $\theta_k = 1,2\theta_{\text{ск}}$ ; 4 —  $\theta_{\text{ск}} = 0,13$ ,  $\theta_k = 1,2\theta_{\text{ск}}$ . (Обозначения данных расчета вакуумирования 1 при  $\theta_{\text{ск}} = 0,05$ ,  $\theta_k = 1,2\theta_{\text{ск}}$  образцов длиной (м): ● — 0,5; □ — 1,0; Δ — 1,5; ○ — 2; ▲ — 3; ◇ — экспериментальные значения для  $\delta = 0,78$  м при  $\theta_{\text{ск}} = 0,05$ ,  $\theta_k = 1,2$ )

$$L = \frac{2kRTP_0^2 \xi}{a^2 \mu \delta^2}; \quad F_0 = \frac{kRTP_0 \tau}{\mu \text{Па} \delta^2}. \quad (7)$$

Предположим, давление в автоклаве изменяется по закону

$$\theta_c = \exp(-SF_0); \quad S = \frac{M}{V_0} - \frac{\mu \Delta \Pi \delta^2}{kRTP_0}, \quad (8)$$

где  $S$  — безразмерный параметр, характеризующий производительность вакуумного оборудования  $M$  и объем откачиваемого из автоклава воздуха  $V_0$ .

Таким образом, уравнение изменения давления воздуха при вакуумировании древесины вдоль волокон в критериальной форме

$$\theta_p = f(X, F_0, L, S). \quad (9)$$

Представление задачи вакуумирования древесины в безразмерном виде (4) – (9) позволяет существенно расширить область применения расчетных зависимостей.

В качестве примера был выполнен расчет на ЭВМ безразмерного давления  $\theta_p$  от ряда безразмерных параметров. В качестве исходных параметров использовались конкретные данные вакуумирования березы:  $M = 0,1 \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $V_0 = 6,8 \text{ м}^3$ ;  $k = 2,4 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$ ;  $\xi = 10^4$ ;  $R = 8,3 \text{ Дж/моль}\cdot\text{К}$ ;  $\mu = 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$ ;  $a = 1,53 \text{ Н/с}$ ;  $T = 293 \text{ К}$ ;  $\Pi = 0,64$ ;  $P_0 = 10^5 \text{ Па}$ . При этом параметр  $L = 0,1$ .

Результаты расчета зависимости  $F_0(S)$  для различных значений конечного давления воздуха в автоклаве  $P_{ск}$  и в древесине  $P_k$  приведены на рис. 1. На этом же графике нанесены точки, соответствующие результатам выполненного ранее расчета [1] для различных размеров образцов при  $P_{ск} = 5 \text{ кПа}$  и  $P_k = 6 \text{ кПа}$  ( $\theta_{ск} = 0,05$ ;  $\theta_k = 1,2 \theta_{ск}$ ). Данные точки тесно группируются около кривой, соответствующей таким же значениям  $\theta_{ск}$  и  $\theta_k$ . Это свидетельствует о хорошем описании процесса моделью, выраженной в критериальной форме. Экспериментальные результаты показывают различие с теоретическим значением 13 %, что является вполне удовлетворительным.

Таким образом, приведенные зависимости можно использовать для расчета продолжительности вакуумирования древесины вдоль волокон различных размеров, пород, качества обработки торцовой поверхности и параметров вакуумного оборудования.

#### Литература

1. Шутов Г.М. Модифицирование древесины термохимическим способом. Мн., 1982.
2. Лыков А.В. Теплообмен. М., 1972.

УДК 658.512.22:674.093

А.А.ЯНУШКЕВИЧ, канд. техн. наук,  
М.И. КУЛАК, канд. физ.-мат. наук,  
М.К. ЯКОВЛЕВ (БТИ)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ БРЕВНА БИКУБИЧЕСКИМ СПЛАЙНОМ

В настоящее время существуют разнообразные методы моделирования поверхностей. Среди наиболее общих из них можно отметить большой класс таких, как моделирование на основе аналитических и кусочно-аналитических описаний либо в виде тел вращения и др. Общность этих методов состоит в том, что осуществляется попытка приблизить (заменить) данную поверхность к другой, задаваемой небольшим числом легко определяемых параметров. Сравнительно простые поверхности могут быть воспроизведены таким способом. Существует, однако, достаточное число поверхностей (например, так называемые скульптурные), которые не могут быть в принципе приближены подобными методами либо точность приближения неудовлетворительна.