

## Математическая модель тепломассопереноса в процессе склеивания шпона повышенной влажности

Н.П. Плотников

Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

n-plotnikov@mail.ru

Статья поступила 17.05.2016, принята 22.07.2016

*Производство фанеры — это сложный физико-химический процесс, в котором взаимодействуют многие факторы, имеющие значительное влияние на режимы склеивания. Для выпуска качественной продукции наиболее важны влажность шпона, температура, давление и продолжительность склеивания, расход клея. Склеивание пакетов шпона в горячем прессе характеризуется сложными процессами тепло- и массопереноса, которые позволяют создать необходимый контакт между клеем и древесиной для обеспечения надежного и качественного соединения. Использование шпона повышенной влажности позволяет повысить сортность, уменьшить степень инактивации и обеспечить лучшее заполнение клеем пор и микродефектов поверхности, тем не менее, активные экспериментальные исследования до сих пор не обеспечили широкое внедрение шпона, влажность которого составляла бы 10 % и выше, в технологический процесс изготовления фанеры. Это объясняется необходимостью замены существующего оборудования, применения дорогих клеев и проведения дополнительных технологических операций перед формированием пакета шпона. Поэтому так важно установление параметров режима склеивания шпона повышенной влажности, которые приближались бы к традиционной технологии. Во время горячего склеивания, за счет температурного перепада по толщине пакетов, происходит перемещение влаги от более нагретых слоев шпона к менее нагретым, но на сегодня не существует моделей, описывающих тепломассоперенос в процессе склеивания шпона повышенной влажности. В связи с этим в данной статье разработана математическая модель для определения изменения температуры и влагосодержания в склеиваемом пакете шпона повышенной влажности.*

**Ключевые слова:** шпон; влажность; склеивание; математическая модель; тепломассоперенос.

## Mathematical model of heat and mass transferring when glueing veneer sheets of high humidity

N.P. Plotnikov

Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

n-plotnikov@mail.ru

Received 17.05.2016, accepted 22.07.2016

*Plywood production is a complex physicochemical process, in which a large number of factors, influencing significantly the glueing modes, interact. To manufacture the products of a high quality, humidity of veneer sheets is of paramount importance, as well as temperature, pressure, glueing duration and glue spread. Glueing sets of veneer sheets in a hot press is characterized by complex processes of heat and mass transferring, which allow creating necessary contact between the glue and wood to ensure a secure and qualitative connection. By using veneer sheets of high humidity allow improving the grade, reducing the degree of inactivation and providing better glue filling for pores and microdefects of the surface. Nevertheless, active experimental studies have not ensured large-scale implementation of veneer sheets with 10% humidity or above in manufacturing process of plywood. It can be explained by the necessity of replacing existing equipment, using expensive glues and conducting additional manufacturing operations prior to forming a set of veneer sheets. It is therefore important to establish the parameters for the mode of glueing of veneer sheets of high humidity, which would be closer to the conventional manufacturing technology. Owing to the temperature differential through the thickness of sets of veneer sheets, humidity is transferring from more heated layers of veneer sheets to less heated ones during hot glueing. However, nowadays there are no models that describe the process of heat and mass transferring in the glueing process of veneer sheets with high humidity. In this connection, a mathematical model has been developed to determine changes in temperature and humidity in a glueing set of veneer sheets of high humidity and presented in this article.*

**Key words:** veneer sheets; humidity; glueing; mathematical model; heat and mass transferring.

### Введение

Выявлено два подхода к изучению тепломассопереноса и напряженно-деформированного состояния древесных композиционных материалов во время горячего прессования. Первый подход базируется на построении

математических моделей, второй — на проведении экспериментальных исследований и установлении на их основе эмпирических зависимостей [1; 2].

Разработан ряд физико-математических моделей, описывающих тепломассоперенос в процессе прессо-

вания древесных композиционных материалов, в частности фанеры. На их основе изучено влияние технологических факторов на тепломассообменные процессы, которые происходят во время горячего прессования. В частности, предложенные модели позволяют оптимизировать продолжительности горячего склеивания и охлаждения [3–5], определить деформационное состояние материала во время склеивания в обычных и вакуумных прессах [6–8]; дать оценку степени отверждения клея в склеиваемом пакете [8].

Однако данные модели не учитывают влияния начальной влажности шпона и температуры прессования на конечную влажность фанеры. Изучение данного влияния является слишком важным, особенно во время склеивания шпона повышенной влажности, поскольку в пакет дополнительно вносится значительное количество влаги, которая существенно влияет на процесс прессования и качество производимой фанеры.

**Общие положения. Постановка задачи исследования.** Математическое моделирование процессов тепломассопереноса базируется на законах переноса массы вещества Дарси, Фурье и Фика. Рассмотрим процесс тепломассообмена во время склеивания шпона повышенной влажности. Проанализировав процесс склеивания фанеры, можно принять следующие допущения:

– древесина является однородным капиллярно-пористым материалом. На стадии нанесения клея и формирования пакета вода в древесине и клее равномерно распределена по всему объему;

– древесина не впитывает влагу из клея, поскольку его молекулы большие, и их подвижность при обычной температуре является незначительной (диффузия клея в древесину происходит только под действием давления и температуры);

– несмотря на то, что скорость смыкания плит пресса до материала не определена, будем считать изменение давления в материале мгновенным, а давление постоянным.

*Целью предлагаемого исследования* является разработка математической модели, которая бы давала возможность описать изменение температуры и влаги внутри пакета шпона во время горячего прессования и на основании этих данных предвидеть конечную влажность фанеры.

**Математическая модель.** Представим фанеру в виде области  $\Omega \in R^3$ , которая состоит из чередования двух разных видов слоев: главных (лущеный шпон) и промежуточных (клей). Каждый слой ограничен поверхностями  $D^i(y, z) \in R^2$ ,  $i = 1, 2$  и имеет толщину  $h = x_{i+1} - x_i$ ,  $i = 2, \dots, N_0$ ;  $N_0 \leq 24$ . Геометрия области  $\Omega$  с ограничительными поверхностями  $D^i$  слоев толщиной  $h$  изображена на рис. 1.

Приняв во внимание, что толщина промежуточных слоев стремится к нулю, осуществим преобразование математической модели только для основных слоев.

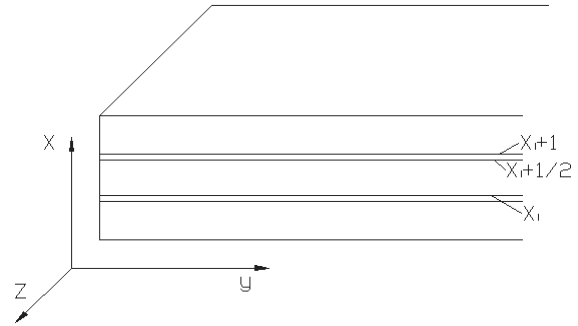


Рис. 1. Геометрия многослойной области  $\Omega$

Предположим, что  $P(\tau, x, y)$  — давление прессования,  $T(\tau, x, y)$  — температура прессования,  $U(\tau, x, y)$  — влагосодержание в точке тела с координатой  $(x, y)$  в момент времени  $\tau$ .

Система дифференциальных уравнений тепломассопереноса имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial \tau} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( E_h \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( D_h \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( F_h \frac{\partial P}{\partial x} \right) \\ \frac{\partial U}{\partial \tau} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( E_m \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( D_m \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( F_m \frac{\partial P}{\partial x} \right), \quad (1) \\ \frac{\partial P}{\partial \tau} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( E_p \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( D_p \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( F_p \frac{\partial P}{\partial x} \right) \end{aligned}$$

где  $E, D, F$  с индексами функций  $T, U, P$ .

Система дифференциальных уравнений тепломассопереноса в случае отсутствия градиента общего давления предложена профессором А.В. Лыковым в виде [9]:

$$\begin{aligned} c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} &= \frac{\partial}{\partial x_1} \left( \lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_2 \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \varepsilon \rho_0 r \frac{\partial U}{\partial \tau}; \quad (2) \\ \frac{\partial U}{\partial \tau} &= \frac{\partial}{\partial x_1} \left( a_1 \frac{\partial U}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( a_2 \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x_1} \left( a_1 \delta \frac{\partial T}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( a_2 \delta \frac{\partial T}{\partial y} \right), \end{aligned}$$

Для решения системы дифференциальных уравнений (2) необходимо добавить подходящие начальные и граничные условия, обусловленные особенностями технологического процесса склеивания шпона повышенной влажности.

Начальные распределения температуры и влажности будем считать равномерными по всему объему древесины:

$$T|_{\tau=0} = T_0; \quad U|_{\tau=0} = U_0. \quad (3)$$

Будем считать постоянной температуру плит пресса в момент их смыкания на поверхности склеиваемого пакета, а выделение влаги — отсутствующим:

$$T|_{x=h} = T_{\text{пресса}}; \quad \frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{x=h} = 0, \quad (4)$$

где  $T_{\text{пресса}}$  — температура плит пресса;  $U$  — влагосодержание в точке тела с координатой  $(x, y)$  в момент времени  $\tau$ .

Во время прогрева с торцов склеиваемого пакета будет происходить удаление влаги:

$$\lambda_i \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=b} + \rho_0(1-\varepsilon)\beta_i(U|_{y=b} - U_p) = \alpha_i(T_c - T|_{y=b});$$

$$\left( a_i \frac{\partial U}{\partial y} + a_i \delta \frac{\partial T}{\partial y} \right) \Big|_{y=b} = \beta_i(U_p - U|_{y=b}).$$

Граничные условия, которые указывают на симметричность задачи относительно осей:

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0; \quad \frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0,$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=h} = 0; \quad \frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{x=h} = 0.$$

В уравнениях (2)–(7)  $T_0, U_0$  — начальные распределения температуры и содержания влаги в материале;  $U_p$  — равновесная влажность;  $C$  — теплоемкость материала;  $\rho$  — плотность;  $\lambda_1, \lambda_2$  — коэффициенты теплопроводности в направлениях анизотропии;  $\varepsilon$  — коэффициент фазового перехода;  $\rho_0$  — базисная плотность;  $r$  — удельная теплота парообразования;  $\delta$  — термоградиентный коэффициент;  $a_1, a_2$  — коэффициенты влагопроводности в направлениях анизотропии;  $\alpha_i$  — коэффициенты теплообмена;  $\beta_i$  — коэффициенты влагообмена;  $T_c$  — температура среды.

Рассмотрим уравнение влагопереноса, чтобы определить скорость удаления влаги. Для этого в уравнениях (2) и граничных условиях (4)–(7) положим  $T = T_{precca} = const$  и перепишем их в виде:

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = a_x \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + a_y \frac{\partial^2 U}{\partial y^2}$$

с начальным условием:

$$U|_{\tau=0} = U_0$$

и граничными условиями:

$$\frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{x=h} = 0;$$

$$a_y \frac{\partial U}{\partial y} \Big|_{y=b} = \beta_i(U_p - U|_{y=b});$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0;$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0.$$

Проинтегрируем уравнение (8) по оси  $x$  на промежутке  $[0, h]$  и поделим на  $h \neq 0$ :

$$\frac{1}{h} \int_0^h \frac{\partial U}{\partial \tau} dx = \frac{a_x}{h} \int_0^h \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} dx + \frac{a_y}{h} \int_0^h \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} dx;$$

$$\frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial \tau} \int_0^h U(\tau, x, y) dx = \frac{a_x}{h} \left[ \frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{x=h} - \frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{x=0} \right] +$$

$$+ \frac{a_y}{h} \frac{\partial^2}{\partial y^2} \int_0^h U(\tau, x, y) dx$$

Введем обозначение  $U_{cx}(\tau, y)$  — среднее влагосодержание по оси  $x$ :

$$U_{cx}(\tau, y) = \frac{1}{h} \int_0^h U(\tau, x, y) dx.$$

Тогда с учетом граничных условий (10) уравнение (11) запишется:

$$\frac{\partial U_{cx}}{\partial \tau} = a_y \frac{\partial^2 U_{cx}}{\partial y^2}.$$

Аналогичные преобразования проведем относительно граничных условий (10):

$$a_y \frac{\partial U_{cx}}{\partial y} \Big|_{y=b} = \beta_y \left( \frac{1}{h} \int_0^h U_p dx - U(\tau, b) \right);$$

$$\frac{\partial U_{cx}}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0$$

и начальных условий (9):

$$U_{cx}(0, y) = \frac{1}{h} \int_0^h U_0 dx = U_0.$$

Проинтегрируем уравнение (13) по оси  $y$  на промежутке  $[0, b]$  и поделим на  $b \neq 0$ :

$$\frac{1}{b} \int_0^b \frac{\partial U_{cx}}{\partial \tau} dy = \frac{a_y}{b} \int_0^b \frac{\partial^2 U_{cx}}{\partial y^2} dy$$

$$\frac{1}{b} \frac{\partial}{\partial \tau} \int_0^b U_{cx} dy = \frac{a_y}{b} \left[ \frac{\partial U_{cx}}{\partial y} \Big|_{y=b} - \frac{\partial U_{cx}}{\partial y} \Big|_{y=0} \right]$$

Введем обозначение  $U_c(\tau)$ , среднюю влажность в объеме древесины:

$$U_c(\tau) = \frac{1}{b} \int_0^b U_{cx}(\tau, y) dy = \frac{1}{h b} \int_0^b \int_0^h U(\tau, x, y) dx dy$$

С учетом граничных условий (14) перепишем соотношение (16) в виде:

$$\frac{\partial U_c}{\partial \tau} = \frac{\beta_y}{b} [U_p - U_c(\tau, b)],$$

с начальным условием:

$$U_c(0) = \frac{1}{b} \int_0^b U_0 dy = U_0.$$

Если предположить  $U_{cx}(\tau, b) = U_c(\tau)$ , то получим обыкновенное дифференциальное уравнение:

$$U_c'(\tau) = \frac{\beta_y}{b} [U_p - U_c(\tau)],$$

решение которого запишем:

$$U_c(\tau) = U_p - C_0 e^{-\beta \tau},$$

где  $C_0$  — константа, определяемая из начального условия (20)  $C_0 = U_p - U_0$ . Таким образом, среднее влагосодержание в древесине во время изготовления фанеры изменяется по формуле:

$$U_c(\tau) = U_p - e^{-\beta\tau}(U_p - U_0). \quad (22)$$

С учетом того, что длина области  $\Omega$  всегда существенно больше толщины  $b \gg h$ , рассмотрим уравнение (2) в одномерном случае. Потеря массы через торцы пакета будет происходить по закону (22), запишем в виде внутреннего источника. Таким образом, математическая модель теплопереноса в случае неограниченной пластины толщиной  $2h$  при изменении времени на промежутке  $\tau \in [0, \Theta]$  запишется в виде системы обычных дифференциальных уравнений в частных производных [10]:

$$\begin{aligned} \text{ср} \frac{\partial T}{\partial \tau} &= \lambda_1 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \varepsilon \rho_0 r \frac{\partial U}{\partial \tau}; \\ \frac{\partial U}{\partial \tau} &= a_1 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + a_1 \delta \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - e^{-\beta\tau}(U_p - U_0), \end{aligned} \quad (23)$$

с начальными условиями:

$$T|_{\tau=0} = T_0; \quad U|_{\tau=0} = U_0 \quad (24)$$

и граничными условиями:

$$\begin{aligned} T|_{x=h} &= T_{\text{нрещу}}; \quad \frac{\partial U}{\partial x}|_{x=h} = 0; \\ \frac{\partial T}{\partial x}|_{x=0} &= 0; \quad \frac{\partial U}{\partial x}|_{x=0} = 0. \end{aligned} \quad (25)$$

Необходимо отметить, что для численного решения системы уравнений необходимо использовать значения теплофизических характеристик древесины (удельной теплоемкости, коэффициента тепло- и теплопроводности), которые являются постоянными и не меняются в направлениях и времени.

Теплоемкость влажной древесины можно рассматривать как средневзвешенную между теплоемкостью сухой древесины ( $C_p$ ) и теплоемкостью воды ( $C_w = 4,19 \text{ кДж/кг}\cdot\text{К}$ ) [11]. В случае многокомпонентных систем, таких как фанера, теплоемкость древесины и смол практически одинакова, поэтому фанеру можно рассматривать как двухфазную среду, состоящую из древесины и воды. Таким образом, теплоемкость можно рассчитывать по эмпирической формуле [11]:

$$C = 1,172 \cdot \left[ W \cdot \left(1 + \frac{T}{100}\right) \right]^{0,20}, \quad (26)$$

где  $W$  — влажность древесины, %.

Также для определения теплоемкости можно использовать диаграмму К.Г. Кантера, которая учитывает влияние температуры и влажности [12].

Плотность древесины ( $\rho$ ) с учетом ее влажности рассчитывается по формуле [5]:

$$\rho = \frac{1 + 0,12K_\alpha}{1,12} \rho_0 \frac{1 + W}{1 + K_\alpha}, \quad (27)$$

где  $\rho_0$  — базисная плотность древесины (для сосны  $\rho_0 = 500 \text{ кг/м}^3$ ) [9; 10];  $K_\alpha$  — коэффициент толщины древесного волокна ( $K_\alpha = 0,6$ ).

Коэффициент теплопроводности — некоторая условная величина, поскольку передача тепла происходит тремя способами — теплопроводностью, конвекцией и испарением. Теплопроводность увеличивается с повышением температуры. Известно, что коэффициент теплопроводности пористых тел зависит от их влажности, поскольку древесина является пористым материалом, поэтому нам необходимо учитывать влажность древесины (шпона). У влажного материала коэффициент теплопроводности может быть значительно выше, чем сухого и воды в отдельности. Этот эффект можно объяснить конвективным переносом тепла, который возникает в результате капиллярного движения воды внутри пористого материала, а также отчасти тем, что связанная влага имеет другие физические характеристики по сравнению со свободной [11–13].

Соответственно расчетное значение коэффициента теплопроводности древесины ( $\lambda$ ) вычисляется по формуле [11]:

$$\lambda = \lambda_{\text{ном}} \cdot K_p \cdot \rho_n, \quad (28)$$

где  $\lambda_{\text{ном}}$  — коэффициент теплопроводности сосны ( $\rho_0 = 500 \text{ кг/м}^3$ ) поперек волокон, который определяется с помощью графиков, построенных по экспериментальным данным К.Г. Кантера, Г.С. Шубина, Е.Б. Щедриной,  $\text{Вт/(м}\cdot\text{град)}$ ;  $K_p, \rho_n$  — соответственно поправки на плотность древесины и направление теплового потока.

Удельная теплота парообразования зависит от температуры насыщения и определяется по формуле [11]:

$$r = r_0(1 - 0,001 \cdot T_{\text{нрещу}}), \quad (29)$$

где  $r_0$  — удельная теплота парообразования воды при температуре  $0^\circ\text{C}$  ( $r_0 = 2490 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$ ).

Во время описания модели и для расчетов необходимо иметь значения термоградиентного коэффициента ( $\delta$ ), который принадлежит к термодинамическим параметрам и определяется как отношение перепада влагосодержания  $\Delta U$  к перепаду температуры  $\Delta T$ .

Коэффициент влагопроводности также относится к термодинамическим свойствам древесины, поскольку учитывает суммарный поток перемещения влаги под действием градиентов влажности, температуры и парциального давления, капиллярного потенциала. То есть, он характеризует интенсивность переноса влаги внутри древесины. Значения коэффициентов — влагопроводности и термоградиентного — отыскивали с помощью номограмм, предложенных Г.С. Шубиным [11; 14].

Численное решение краевой задачи (23)–(25) можно осуществить через ее непосредственную дискретизацию, а именно, на заданном разбиении интервала (сетке) производные, входящие в уравнения, заменяю-

тся соответствующими конечными разностями. В результате получается дискретная задача, которая выполняется во всех внутренних точках сетки. Эта задача является системой линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных значений решения в узлах сетки.

На отрезке  $[0, h]$  рассмотрим разбиение::

$$0 = x_0 < x_1 < \dots < x_n < x_{n+1} = h, \\ x_j = j \cdot \Delta x, \quad j = \overline{0, n+1}, \quad \Delta x = \frac{h}{n+1}. \quad (30)$$

Введем разбижку по времени:

$$0 = \tau_0 < \tau_1 < \dots < \tau_m = \Theta, \\ \tau_i = i \cdot \Delta \tau, \quad i = \overline{0, m}, \quad \Delta \tau = \frac{\Theta}{m}. \quad (31)$$

Тогда узловые значения искомых функций температуры и влагосодержания обозначим:

$$T(\tau_i, x_j) = T_i(x) = T^j(\tau) = T_i^j \\ U(\tau_i, x_j) = U_i(x) = U^j(\tau) = U_i^j.$$

Воспользуемся следующими конечными разностями:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{T_{i+1}(x) - T_i(x)}{\Delta \tau}, \quad \frac{\partial U}{\partial \tau} = \frac{U_{i+1}(x) - U_i(x)}{\Delta \tau}; \\ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{T^{j+1}(\tau) - 2T^j(\tau) + T^{j-1}(\tau)}{\Delta x^2},$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = \frac{U^{j+1}(\tau) - 2U^j(\tau) + U^{j-1}(\tau)}{\Delta x^2}.$$

В результате для исходной системы обыкновенных дифференциальных уравнений (24) запишем соответствующие разностные соотношения:

$$c\rho \frac{T_{i+1}^j - T_i^j}{\Delta \tau} = \lambda_1 \frac{T_i^{j+1} - 2T_i^j + T_i^{j-1}}{\Delta x^2} + \varepsilon \rho_0 r \frac{U_{i+1}^j - U_i^j}{\Delta \tau}; \\ \frac{U_{i+1}^j - U_i^j}{\Delta \tau} = a_1 \frac{U_i^{j+1} - 2U_i^j + U_i^{j-1}}{\Delta x^2} + a_1 \delta \frac{T_i^{j+1} - 2T_i^j + T_i^{j-1}}{\Delta x^2} - \exp(-\beta \tau_i) \cdot (U_p - U_i^j). \quad (32)$$

Из начальных условий (25) получим:

$$T_0^j = T_0; \quad U_0^j = U_0. \quad (33)$$

Из граничных условий (26) получим:

$$T_i^{n+1} = T_{\text{пресса}}; \quad \frac{U_i^{n+1} - U_i^n}{\Delta \tau} = 0; \\ \frac{T_i^1 - T_i^0}{\Delta \tau} = 0; \quad \frac{U_i^1 - U_i^0}{\Delta \tau} = 0. \quad (34)$$

Соотношения (32)–(34) образуют систему линейных алгебраических уравнений для нахождения значений температуры  $T_i^j$  и влажности  $U_i^j$  в узлах  $x_j$ ,  $j = \overline{0, n+1}$  на каждом временном шаге  $\tau_i$ ,  $i = \overline{0, m}$ . Решение задачи представлено на рис. 1, 2 [10].

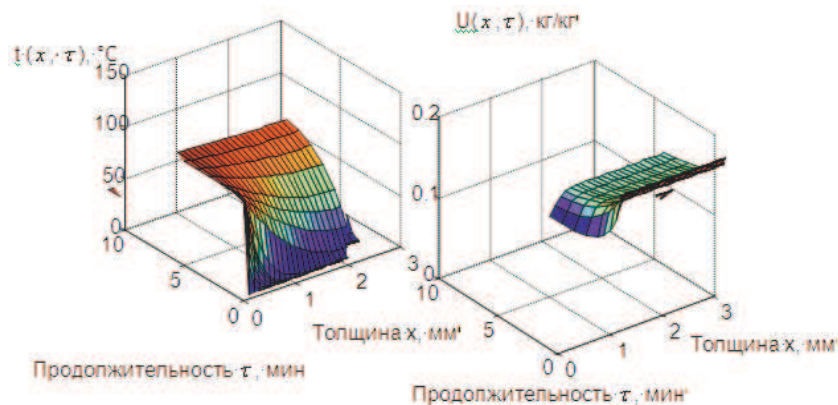


Рис. 2. Распределение температуры и влагосодержания по толщине фанеры и их изменение во времени ( $t = 150^\circ\text{C}$ ,  $W = 15\%$ )

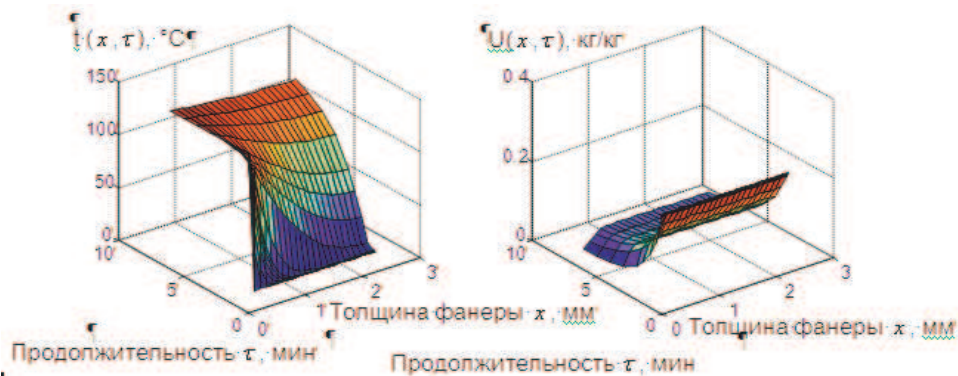


Рис. 3. Распределение температуры и влагосодержания по толщине фанеры и их изменение во времени ( $t = 150^\circ\text{C}$ ,  $W = 25\%$ )

На рис. 2, 3 показано распределение температуры и влагосодержания по толщине и их изменение во времени в процессе склеивания пакета повышенной влажности (15–25 %). Во время склеивания температура на поверхностях пакета практически моментально становится равной температуре плит пресса. Температура внутренних слоев постепенно увеличивается и пытается достичь температуры поверхности. В процессе нагревания происходит испарение влаги, а также пара, который образуется из внешних слоев и движется внутрь пакета под действием образовавшегося градиента. Поскольку температура внутренних слоев ниже температуры кипения, то влага частично конденсируется, что приводит к увеличению влаги внутри пакета шпона. В результате температура внутри приобретает значения, близкие к температуре насыщения при соответствующем давлении в пакете, и остается постоянной пока влага не испарится.

Прогнозируется, что применение температуры склеивания 150 °С, рекомендованной для клеев на основе фенолоформальдегидной смолы, приведет к уменьшению влагосодержания склеиваемого пакета до необходимой влажности, которая установлена требованиями стандарта для готовой продукции, в частности фанеры, несмотря на то что влажность шпона составит 15 или 25 %.

Итак, в течение определенного времени прессования во внутренних слоях пакета шпона температура возрастает, приближаясь к температуре плит пресса, что в свою очередь способствует уменьшению количества влаги внутри пакета. В конце процесса склеивания влажность пакета составляет 5,8–13,0 %, что соответствует нормативным значениям влажности фанеры (15 %).

#### Выводы

1. Проанализированы существующие физико-математические модели, которые описывают влияние тепломассопереноса в процессе прессования пакета шпона, что дает возможность оптимизировать продолжительности горячего склеивания и охлаждения; определить деформационное состояние материала во время склеивания в обычных и вакуумных прессах; сделать оценку степени отверждения клея в склеиваемом пакете; определить поля распределения температуры, влажности, скорости перемещения парогазовой смеси во время увлажнения верхних слоев пакета шпона.

2. Разработана математическая модель тепломассопереноса во время склеивания шпона повышенной влажности (15–25 %). Методом конечных разностей получены численные решения задачи в случае постоянных коэффициентов. Это дает возможность прогнозировать изменение температуры и влажности в склеиваемом пакете во время изготовления фанеры из шпона повышенной влажности.

3. Установлено, что в течение определенного времени прессования во внутренних слоях пакета шпона температура возрастает, приближаясь к температуре плит пресса, что в свою очередь способствует уменьшению количества влаги внутри пакета. В конце процесса прессования влажность склеиваемого пакета принимает значения 5,8–13,1 %, которые соответствуют нормативным.

#### Литература

1. Плотников Н.П., Денисов С.В. Оптимизация технологических режимов склеивания фанеры модифицированными клеевыми композициями // Вестн. КрасГАУ. Красноярск, 2010. Вып. 5. С. 143-148.
2. Плотников Н.П., Плотникова Г.П. Совершенствование технологии производства древесноплитных материалов. Новосибирск: НИ «СибАК», 2013. 112 с.
3. Артемова В.П., Ганжа Л., Журавский Г.Ы. О прогреве клееной слоистой древесины при изменении ее толщины процессе прессования // Механическая технология древесины: сб. науч. ст. Минск, 1976. Вып. 6. С. 96-101.
4. Артемова В.П., Ганжа Л., Журавский Г.Ы. О расчете температурных полей в процессе прессования слоистой древесины // Механическая технология древесины: сб. науч. ст. Минск, 1978. Вып. 8. С. 47-50.
5. Buikis A., Cepitis J., Kostjukova S. The mathematical model of the plywood production // Proceedings of the 13th WSEAS International Conference on Applied Mathematics. Spain, 2008.
6. Денисов С.В. Исследование процесса склеивания шпона повышенной влажности: дис. ... канд. техн. наук. Л., 1980. 183 с.
7. Израелит А.Б., Денисов С.В. Теоретическое исследование напряженно-деформационного состояния фанеры после склеивания влажного шпона у вакуумных прессах // Технология и оборудование деревообрабатывающих производств. 1982. № 11. С. 37-41.
8. Чубинский А.Н. Формирование клеевых соединений древесины. СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 1992. 164 с.
9. Лыков А.В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 472 с.
10. Оргинская Г.Е., Бехта П.А., Бакалец А.В. Математическая модель процесса изготовления фанеры из шпона повышенной влажности // Научный вестник НЛТУ Украины: сб. науч.-техн. тр. Львов, 2010. Вып. 20. С. 308-312.
11. Озаркив И.М., Сорока Л.Я., Грицюк Ю.И. Основы аэродинамики и тепломассообмена. Киев: ИЗМН, 1997. 280 с.
12. Озаркив И.М., Белей П.В., Соколовский И.А., Сорока Л.Я., Ацбергер И.Л. Тепловые процессы деревообработки. Львов: РВВ НЛТУ Украины, 2008. 264 с.
13. Билей П.В. Теоретические основы тепловой обработки и сушки древесины. Киев: Коломыя, 2005. 364 с.
14. Шубин Г.С. Сушка и тепловая обработка древесины. М.: Лесная промышленность, 1990. 207 с.

#### References

1. Plotnikov N.P., Denisov S.V. Optimization of technological modes of bonding of plywood adhesive compositions modified // The Bulletin of KrasGAU. Krasnojarsk, 2010. Vyp. 5. P. 143-148.
2. Plotnikov N.P., Plotnikova G.P. Improvement of production technology of wood plate materials. Novosibirsk: NP «SibAK», 2013. 112 p.
3. Artemova V.P., Ganzha L., Zhuravskij G.Y. On the heating of the glued laminated wood when you want to change the thickness of the process Pres-popping // Mehanicheskaja tehnologija drevesiny: sb. nauch. st. Minsk, 1976. Vyp. 6. P. 96-101.
4. Artemova V.P., Ganzha L., Zhuravskij G.Y. On the calculation of the temperature fields in the process of molding laminated wood // Mehanicheskaja tehnologija drevesiny: sb. nauch. st. Minsk, 1978. Vyp. 8. P. 47-50.
5. Buikis A., Cepitis J., Kostjukova S. The mathematical model of the plywood production // Proceedings of the 13th WSEAS International Conference on Applied Mathematics. Spain, 2008.

6. Denisov S.V. Study of the bonding process of veneer humidity: dis. ... kand. tehn. nauk. L., 1980. 183 p.

7. Izraelit A.B., Denisov S.V. Theoretical study of the stress-strain state of the plywood after gluing humid veneer vacuum presses // Tehnologija i oborudovanie derevoobrabatyvajushih proizvodstv. 1982. № 11. P. 37-41.

8. Chubinskij A.N. Formirovanie adhesive compounds wood. SPb.: Izd-vo S.-Peterb. un-ta, 1992. 164 p.

9. Lykov A.V. Theory of drying Teorija sushki. M.: Jenergiya, 1968. 472 p.

10. Ortinskaja G.E., Behta P.A., Bakalec A.V. Mathematical model of the process of manufacturing plywood from veneer

high humidity // Nauchnyj vestnik NLTU Ukrainy: sb. nauch.-tehn. tr. L'vov, 2010. Vyp. 20. P. 308-312.

11. Ozarkiv I.M., Soroka L.Ja., Gricjuk Ju.I. Fundamentals of aerodynamics and heat and mass transfer. Kiev: IZMN, 1997. 280 p.

12. Ozarkiv I.M., Belej P.V., Sokolovskij I.A., Soroka L.Ja., Acberger I.L. Thermal processes of woodworking. L'vov: RVV NLTU Ukrainy, 2008. 264 p.

13. Bilej P.V. Theoretical bases of heat treatment and drying of wood. Kiev: Kolomyja, 2005. 364 p.

14. Shubin G.S. Drying and heat treatment of the wood. M.: Lesnaja promyshlennost', 1990. 207 p.

УДК 630\*36:621.785.5-5

DOI: 10.18324/2077-5415-2016-3-167-172

## Методика повышения коррозионной стойкости деталей лесных машин путем поверхностного упрочнения

О.М. Тимохова<sup>a</sup>, О.Н. Бурмистрова<sup>b</sup>

Ухтинский государственный технический университет, ул. Первомайская 13, Ухта, Республика Коми, Россия

<sup>a</sup>otimohova@ugtu.net, <sup>b</sup>oburmistrova@ugtu.net

Статья получена 18.05.2016, принята 24.07.2016

*Рассмотрены вопросы разработки ресурсосберегающих технологий упрочнения поверхностей при ремонте, эксплуатации и техническом обслуживании лесных машин. В процессе эксплуатации, наряду с механическим износом узлов и механизмов лесных машин, происходит коррозионный износ. Главной целью и задачей данной работы является разработка мероприятий по снижению интенсивности коррозионных процессов в структуре конструкций машин и агрегатов лесных машин, а также повышению их долговечности, надежности и коррозионной стойкости. Для повышения коррозионной стойкости деталей лесных машин предлагается применение комплексной технологии обработки, которая включает в себя химико-термическую обработку с последующим газотермическим напылением. Для проведения соответствующих исследований были выбраны следующие технологии восстановления: классическая термообработка с последующим газотермическим напылением; исследуемая термообработка с последующим газотермическим напылением исследуемым порошком; газотермическое напыление без термообработки; газотермическое напыление с исследуемым порошком. Для эксперимента использовались образцы, прошедшие термическую и химико-термическую обработку, а также подвергшиеся только газотермическому напылению. Были изучены составы стандартных порошков и исследуемого порошка, в который включены наночастицы отходов целлюлозного производства. Результаты исследования позволяют считать, что описываемый метод упрочнения и восстановления, при всем многообразии современных технологических процессов, является одним из перспективных в области изготовления и ремонта деталей лесных машин.*

**Ключевые слова:** поверхностное упрочнение; коррозия; газотермическое напыление; химико-термическая обработка.

## Technique for increasing corrosion resistance of parts in forestry machinery by surface hardening

О.М. Timokhova<sup>a</sup>, О.Н. Burmistrova<sup>b</sup>

Ukhta State Technical University; 13, Pervomayskaya St., Ukhta, Republic of Komi, Russia

<sup>a</sup>otimohova@ugtu.net, <sup>b</sup>oburmistrova@ugtu.net

Received 18.05.2016, accepted 24.07.2016

*The issues on the development of the resource-saving surface hardening technologies have been studied for forestry machinery when repaired, exploited and serviced. When exploiting, along with the mechanical wear of machine components and mechanisms, the machine forestry machinery also have the corrosion wear. The main aim of this work is to develop the measures to reduce the intensity of corrosion processes in the structure of forestry machinery and equipment, as well as to increase their durability, reliability and corrosion resistance. To improve the corrosion resistance for the parts of forestry equipment, complex treatment technology has been proposed. Complex treatment technology includes chemical-thermal treatment with subsequent gas-thermal spraying. To conduct relevant studies following restoration technologies have been selected: classical thermal treatment with subsequent gas-thermal spraying; analyzed thermal treatment with subsequent gas-thermal spraying of the analyzed powder; gas-thermal spraying without thermal treatment;*