

УДК 674.812

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ДРЕВЕСНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ПОРОШКОВОГО СВЯЗУЮЩЕГО

Гороховский А.Г., Чернышев Д.О., Шишкина Е.Е.

*ФГБОУ ВПО «Уральский государственный лесотехнический университет», Екатеринбург, Россия (620100, Екатеринбург, ул. Сибирский тракт 37), e-mail: [den\\_is-best@mail.ru](mailto:den_is-best@mail.ru)*

В статье рассматриваются теоретические исследования формирования древесного композиционного материала на основе порошкового связующего. Процесс горячего прессования композиционного древесного материала представляет собой контактный нагрев влажного пористого тела, где перенос тепла внутри пакета происходит теплопроводностью и конвекцией вследствие движения парогазовой смеси. Явления переноса энергии вещества подчиняются общим закономерностям термодинамики. Описана система уравнений, отражающая характерные особенности процессов тепло- и массообмена во влажном пористом теле. Рассмотрен режим прессования композиционного материала. По анализу результатов решения системы дифференциальных уравнений в частных производных теплообмена сделаны выводы, что можно прогнозировать существенное сокращение цикла прессования. Это позволит увеличить производительность прессового оборудования.

Ключевые слова: композиционный материал, древесина, теоретические исследования, термодинамические характеристики.

## THEORETICAL RESEARCHES OF FORMATION OF THE WOOD COMPOSITE MATERIAL ON THE BASIS OF THE POWDER BINDING

Gorohovskij A.G., Chernyshev D.O., Shishkina E.E.

*Urals state forestry engineering university, Yekaterinburg, Russia (620100, Yekaterinburg, Sibirsky trakt St. 37), e-mail: [den\\_is-best@mail.ru](mailto:den_is-best@mail.ru)*

In article theoretical researches of formation of a wood composite material on the basis of the powder binding are considered. Process of hot pressing of a composite wood material represents contact heating of a damp porous body where carrying over of heat in a package occurs heat conductivity and convection owing to movement mixes steam and gas. The phenomena of carrying over of energy of substance submit to the general laws of thermodynamics. The system of the equations reflecting prominent features of processes warm - and exchange of weights in a damp porous body is described. The mode of pressing of a composite material is considered. Under the analysis of results of the decision of system of the differential equations in private derivatives of heat exchange conclusions that it is possible to predict essential reduction of a cycle of pressing are drawn. It will allow to increase productivity press the equipment.

Keywords: composite material, wood, theoretical researches, thermodynamic characteristics.

Процесс горячего прессования композиционного древесного материала представляет собой контактный нагрев влажного пористого тела. Перенос тепла внутри пакета происходит теплопроводностью и конвекцией вследствие движения парогазовой смеси. Кроме того, значительное влияние на процессы переноса оказывают фазовые переходы (кипение – конденсация), именно это налагает дополнительные большие трудности на расчёт тепло- и массопереноса внутри прессуемого пакета.

Явления переноса энергии и вещества при нагреве влажных пористых тел подчиняются общим закономерностям термодинамики необратимых процессов [2].

В случае использования потенциала влагопереноса  $\theta$  закон переноса массы имеет вид:

$$\vec{J}_i = -\lambda_m \nabla \theta - \lambda_m \delta_0 \delta \nabla t - \lambda_p \nabla p. \quad (1)$$

Используя выражение (1) и уравнения сохранения энергии и массы веществ, а также полагая коэффициенты переноса и термодинамические характеристики процесса постоянными и считая равными температуру скелета тела и связанного вещества, А.В. Лыков и Ю.А. Михайлов сформулировали систему дифференциальных уравнений тепломассопереноса [3].

Данная система может быть решена для граничных условий I, II и III рода, например, методами конечных разностей или сеточными методами [4 – 8]. Важно отметить, что численные методы решения систем дифференциальных уравнений в частных производных (ДУЧП) теплообмена (ТМО) при всей их глубокой проработанности и достаточной простоте реализации, имеют два существенных недостатка:

- отсутствие общего вида решения, а значит, и отсутствие в решении задачи физического смысла, что не позволяет к тому же проверить правильность решения;
- наличие явления неустойчивости решения, связанного с ошибками округления и являющегося свойством самой системы конечно-разностных уравнений.

Однако справедливости ради следует отметить, что системы ДУЧП ТМО с переменными теплофизическими характеристиками не имеют аналитического решения. В этой связи были предложены несколько другие модели процесса тепло- и массопереноса в пористых телах при высокотемпературном контактном нагреве.

Так в 70-е – 80-е годы была достаточно проработана теория прессования древесностружечных плит, разработанная А.Н. Обливиным и его учениками [1,9,10]. При некоторой корректировке данная теория может быть эффективно использована для анализа процесса горячего прессования широкого круга композиционных материалов, в том числе и на порошковых связующих. При этом необходимо учитывать, что количество влаги, вносимое со связующим в прессуемый пакет очень невелико. Следовательно, можно ожидать, что давление парогазовой смеси будет ощутимо меньше, чем при прессовании древесностружечных плит. Очевидно, что это приведёт к некоторому снижению интенсивности процессов тепломассопереноса в пакете и, как следствие, к снижению интенсивности отверждения связующего.

В порах пакета перенос энергии определяется механизмом конвекции, причем также с учётом тепловых эффектов, сопровождающих процессы испарения и конденсации на поверхности пор. Уравнение переноса энергии для паровоздушной смеси можно записать в следующем виде:

$$c\Pi \left( \frac{\partial(\rho t)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho t u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho t v)}{\partial y} \right) = \lambda \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) + q_v^{\Pi}, \quad (2)$$

где  $q_v^{\Pi} = q_1^{\Pi} + q_2^{\Pi}$ ;  $q_1^{\Pi} = -q_1^{CK}$ ;  $q_2^{\Pi} = -q_2^{CK}$ ;

$\lambda$  - коэффициент теплопроводности паровоздушной смеси, Вт/м·°С.

Окончательно система может быть записана в следующем виде:

1. Уравнения фильтрации:

$$\rho u = -k_x \frac{\partial p}{\partial x}; \quad (3)$$

$$\rho v = -k_y \frac{\partial p}{\partial y}; \quad (4)$$

2. Уравнение переноса паровоздушной смеси:

$$\Pi \left( \frac{\partial \rho_{\Pi}}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_{\Pi} u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_{\Pi} v)}{\partial y} \right) = \begin{cases} \beta_{v_1} (p_{\Pi.H} - p_{\Pi}), & p_{\Pi} \geq p_{\Pi.H}; \\ 0 & p_{\Pi} < p_{\Pi.H}; \quad W=0 \\ \beta_{v_2} (p_{\Pi.H} - p_{\Pi}), & p_{\Pi.H} \geq p_{\Pi}; \quad W \neq 0 \end{cases} \quad (5)$$

3. Уравнение влагосодержания:

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = \begin{cases} \beta_{v_1} (p_{\Pi} - p_{\Pi.H}), & p_{\Pi} \geq p_{\Pi.H}; \\ 0 & p_{\Pi.H} < p_{\Pi}; \quad W=0 \\ \beta_{v_2} (p_{\Pi} - p_{\Pi.H}), & p_{\Pi.H} \geq p_{\Pi}; \quad W \neq 0 \end{cases} \quad (6)$$

4. Уравнение теплопроводности в скелете пористого тела:

$$[(1 - \Pi)c_{ск}\rho_{ск} + c_B W] \frac{\partial t_{ск}}{\partial \tau} = (1 - \Pi) \left( \lambda_x \frac{\partial^2 t_{ск}}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 t_{ск}}{\partial y^2} \right) + \alpha_v (t - t_{ск}) + r \frac{\partial W}{\partial \tau}. \quad (7)$$

5. Уравнение переноса энергии паровоздушной смесью:

$$c\Pi \left( \frac{\partial(\rho t)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho t u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho t v)}{\partial y} \right) = \lambda \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) + \alpha_v (t_{ск} - t) \quad (8)$$

и алгебраические соотношения

$$p = \rho R(t + 273); \quad p_{\Pi} = \rho_{\Pi} R_{\Pi}(t + 273); \quad p = p_{\Pi} + p_{\Gamma}. \quad (9)$$

Приведённая выше система уравнений описывает характерные особенности процессов тепло- и массообмена во влажном пористом теле для широкого класса режимов. Каждый конкретный режим задаётся определёнными краевыми условиями, а следовательно, решение системы (3) – (9) для конкретного режима – единственное.

Рассмотрим решение системы (3) – (9) для следующего режима прессования (табл. 1).

Таблица 1

Режим прессования композиционного материала

№ п/п	Наименование параметра	Размерность	Значение
1.	Температура плит	°С	170
2.	Давление прессования	МПа	2,0

3.	Толщина плиты	мм	16
4.	Тип прессования	-	Плоское, с поддонами на дистанционных планках
5.	Влажность стружки	%	7,0
6.	Количество связующего, м.ч. на 100 м.ч. древесных частиц	-	15
7.	Тип связующего	-	порошковое

Решение системы ДУЧП проведено при следующих значениях параметров [1] (табл. 2).

Таблица 2

Исходные данные для решения задачи тепломассопереноса

№ п/п	Наименование параметра	Размерность	Значение параметра
1.	Коэффициент теплопроводности ( $\lambda$ )	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$
2.	Коэффициент диффузии (D)	$\text{м}^2/\text{с}$	$1,2 \cdot 10^{-9}$
3.	Плотность древесинного вещества ( $\rho_{\text{ср}}$ )	$\text{кг}/\text{м}^3$	1,54
4.	Атмосферное давление ( $p_r$ )	МПа	0,1
5.	Теплоемкость ковра ( $c_{\text{ск}}$ )	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$	1,98
6.	Коэффициент фильтрации (k)	с	$10^{-8}$
7.	Теплота фазового перехода (r)	$\text{кДж}/\text{кг}$	2250
8.	Плотность воды ( $\rho_{\text{в}}$ )	$\text{г}/\text{см}^3$	1,0
9.	Пористость ковра (П)	-	0,7

Результаты решения приведены на рис. 1 – 4.

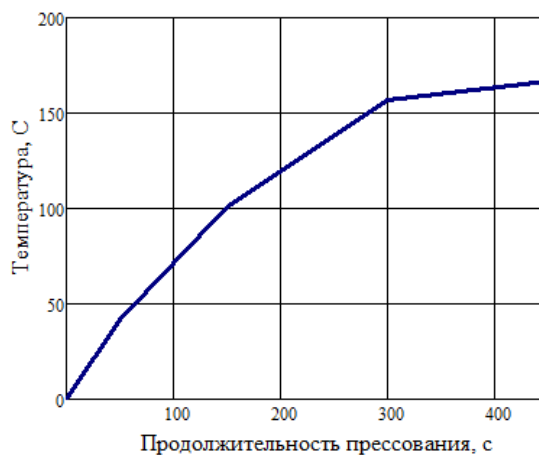


Рис. 1. Изменение температуры во времени в центре прессуемого пакета

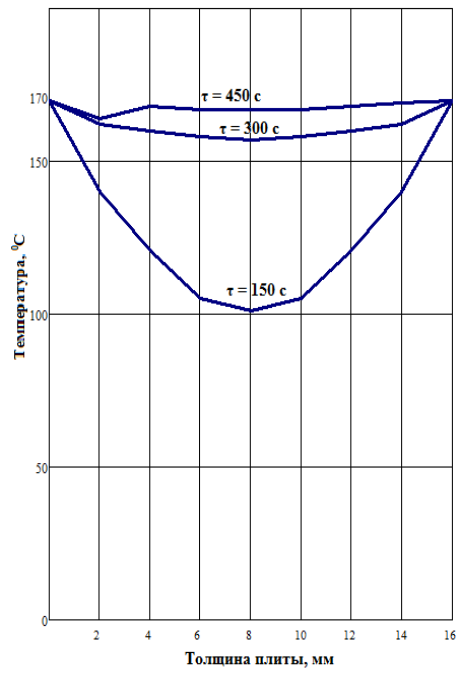


Рис. 2. Распределение температуры по сечению пакета в различные моменты времени



Рис. 3. Изменение давления во времени в центре прессуемого пакета

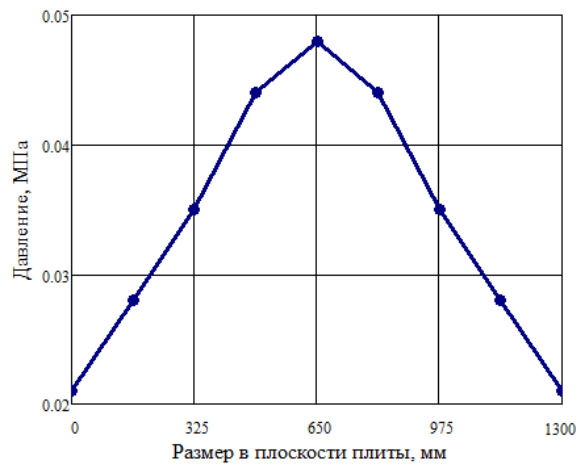


Рис. 4. Распределение давления в плоскости плиты

Анализ результатов решения системы ДУЧП тепломассопереноса позволяет заключить следующее:

1. Давление парогазовой смеси в прессуемом пакете достигает примерно вдвое меньшей величины, чем его аналогичные значения при прессовании древесностружечных плит [10] (см. рис. 3 – 4). На наш взгляд, это обусловлено тем, что имеющееся в прессуемом пакете количество влаги также примерно вдвое меньше.

2. Ожидаемое время достижения максимальных величин давления парогазовой смеси в центре пакета также существенно (примерно втрое) больше, чем при прессовании древесностружечных плит в аналогичных условиях [10] (см. рис. 3).

3. Градиент давления в плоскости плиты также не значителен по сравнению с прессованием древесностружечных плит ( $P_{\max}/P_{\min} = 2,3$ ) (см. рис. 4).

4. Всё, сказанное выше, позволяет заключить, что малые величины давления парогазовой смеси и его градиента обуславливают незначительный перенос тепла в плоскости плиты за счёт конденсации и конвекции, что приводит к довольно существенному увеличению времени прогрева прессуемого пакета (см. рис. 1 и 2). Поэтому, с одной стороны, можно прогнозировать существенное уменьшение такой составляющей цикла прессования, как продолжительность снижения давления, вплоть до практически полного его исключения. В свою очередь при прочих равных условиях это позволит увеличить производительность прессового оборудования.

С другой стороны, снижение интенсивности прогрева пакета приведёт к соответствующему снижению скорости отверждения связующего, что потребует увеличения времени выдержки прессуемого пакета под давлением.

5. Для детального решения описанных проблем необходимо провести экспериментальные исследования.

### Список литературы

1. Андерсон Д. Вычислительная гидромеханика и теплообмен / Д. Андерсон, Дж. Таннехилл, Р. Плетчер. / М.: Мир, 1990.
2. Волынский В.Ю. Ячеечная модель процесса обжига материала в вертикальной печи / В.Ю. Волынский // Химия и химическая технология. 2005. – Т. 48. - № 11. – С. 90 – 93.
3. Леонтьев А.И. Теория тепломассообмена / А.И. Леонтьев – М.: Высшая школа, 1979.
4. Лыков А.В. Теория тепло- и массопереноса / А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов. – М., 1963. – 536 с.

5. Никитенко Н.И. Исследование нестационарных процессов тепло- и массообмена методом сеток / Н.И. Никитенко – Киев: Наукова думка, 1971.
6. Обливин А.Н. Тепло- и массоперенос в производстве древесностружечных плит / А.Н. Обливин, А.К. Воскресенский, Ю.П. Семёнов. – М.: Лесн. пром-сть, 1978. – 192 с.
7. Обливин А.Н. Исследование термических свойств древесностружечных плит в зависимости от плотности, влажности, температуры в гигроскопической области / А.Н.
8. Обливин Б.А. Крылов // Производство древесных пластиков и плит. – Балабаново, 1975. – Вып. 9. – С. 37 – 40.
9. Пасконов В.М. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена / В.М. Пасконов, В.И. Полежаев, Л.А. Чудов. – М.: Наука, 1984.
10. Цой П.В. Методы расчета задач тепломассопереноса / П.В. Цой – М.: Энергоатомиздат, 1984.

**Рецензенты:**

Черемных Н.Н., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой Начертательной геометрии и машиностроительного черчения «Уральский государственный лесотехнический университет», г. Екатеринбург.

Уласовец В.Г., д.т.н., профессор кафедры механической обработки древесины ФГБОУ ВПО «Уральский государственный лесотехнический университет», г. Екатеринбург.