

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЛОСКОГО ГОРЯЧЕГО ПРЕССОВАНИЯ БУМАЖНО-ПОЛИМЕРНЫХ ПЛИТ

А.Ю. Гранкин¹✉, В.В. Никитин¹, И.Д. Сидельников²

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5

grankin@bmsu.ru

Рассмотрена динамика изменений внутренних напряжений в композиционных материалах в процессе плоского горячего прессования. Описаны ключевые факторы, влияющие на прочностные характеристики пресскомпозиции, в частности температура, влажность, давление парогазовой смеси и степень отверждения связующего. Приведен подробный анализ послойного формирования брикета, с учетом для каждого слоя упругого сопротивления, давления парогазовой смеси и степени отверждения связующего. Установлено, что предел прочности при растяжении перпендикулярно пласти является функцией температуры, влагосодержания, плотности и степени отверждения связующего, а также зависит от координат слоя и времени. Охарактеризовано влияние давления прессования на процесс плоского горячего прессования, включая риски, связанные с превышением допустимого давления парогазовой смеси, что может привести к износу дистанционных прокладок и ухудшению условий выхода образовавшейся парогазовой смеси образующийся в процессе плоского горячего прессования. Выявлена зависимость на времени прессования в зависимости от исходной влажности брикета. Предложена математическая модель процессов, протекающих при горячем прессовании композиционных материалов, с конкретными краевыми условиями. Представлено понимание процессов тепло- и массопереноса в капиллярно-пористых материалах при плоском горячем прессовании и их влияния на механические и теплофизические свойства готового материала, что важно для улучшения качества изделий из него. Рекомендуется использование данной математической модели для получения материалов с заранее заданными свойствами при различных начальных и краевых условиях.

Ключевые слова: математическая модель, модель тепломассопереноса, реологическая модель, бумажные отходы, терморезактивное связующее, композиционные материалы, плоское прессование

Ссылка для цитирования: Гранкин А.Ю., Никитин В.В., Сидельников И.Д. Математическая модель плоского горячего прессования бумажно-полимерных плит // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 2. С. 147–158. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-2-147-158

Процесс изготовления композиционных материалов с использованием метода плоского горячего прессования широко распространен в настоящее время. При этом именно горячее прессование является основным этапом, на котором закладывается большинство свойств композиционного материала. В зависимости от типа создаваемых композиционных материалов технология их изготовления может существенно различаться. Поэтому важно разобраться в процессах, происходящих во время прессования.

Среди ключевых процессов, протекающих при прессовании, можно выделить тепломассоперенос, отверждение связующего, деформацию и формирование послойной плотности материала. Эти процессы зависят от множества факторов, включая тип и фракционный состав компонентов, плотность и влажность пресскомпозиции, а также температуру и давление во

время прессования. Все эти параметры влияют на распределение внутренних напряжений в готовом материале.

Для адекватного описания указанных процессов и проведения расчетов, направленных на оптимизацию технологии, необходимо разработать математическую модель прессования, учитывающую все основные физические явления, происходящие в процессе плоского горячего прессования. Также важно создать замыкающие соотношения и при необходимости определить зависимости и коэффициенты через экспериментальные исследования.

В настоящее время наиболее распространены композиционные материалы на терморезактивных связующих, и формирование таких материалов проходит при высоких температуре и давлении, изменяющихся в достаточно широком диапазоне в процессе горячего прессования, что связано со сложными физико-химическими процессами. Неоднородности

температуры и давления, возникающие вследствие нестационарных процессов тепло- и массопереноса, влияют на скорость формирования структуры материала. Для композитов на термопластах формирование также осуществляется при повышенном давлении и температуре, однако в данном случае обычно отсутствуют химические реакции.

При производстве композиционных материалов из бумаги на основе термопластичного связующего процесс прессования включает стадии горячего и холодного прессования. Значительное влияние на продолжительность прессования оказывает начальная влажность пресскомпозиции, поскольку температура плавления термопластов (таких как полиэтилен и полипропилен) значительно выше, чем температура, необходимая для прессования композиционных материалов на терморезактивных связующих [1]. Эти аспекты, а также другие вопросы, связанные с технологией производства композиционных материалов из бумажных отходов с использованием термопластичного связующего, накладывают определенные ограничения на технологический процесс и требуют дополнительного изучения.

Целью холодного прессования при прессовании на термопластичном связующем является окончательное закрепление полученной при горячем прессовании формы и размеров готового изделия. Для этого полученная плита охлаждается до температуры в центре ниже $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ для того, чтобы придать ей необходимую формоустойчивость и дать возможность проведения с ней дальнейших операций (снятие с поддона, перекладка и т. п.).

Цель работы

Цель работы — разработка математической модели плоского горячего прессования бумажно-полимерных плит при разных краевых условиях.

Материалы и методы

Процесс плоского горячего прессования является основной стадией процесса изготовления композиционных материалов, при котором происходит непрерывное изменение температуры и влажности брикета, давления парогазовой смеси и упругих напряжений внутри него, а также степени отверждения связующего и формирование профиля плотности, что, в конечном счете, и формирует свойства композиционного

материала на выходе из него. При исследовании процесса горячего прессования использовались математические методы описания протекающих при этом процессов, что позволило разработать математическую модель процесса прессования, а также экспериментальные методы определения необходимых замыкающих соотношений для использования данной модели на практике.

В качестве наполнителя использовалась макулатура офисная, прошедшая шреддирование, и измельченные отходы полипропилена.

Изучим, как изменяются напряжение внутри композиционного материала в процессе прессования.

Если рассматривать послойное формирование брикета пресскомпозиции, то при расчете напряжения внутри материала $\sigma_{\text{вн}}(x, \tau)$ для каждого слоя в произвольный момент времени необходимо учитывать упругое сопротивление брикета $\sigma_y(\tau)$, действующее в скелете пресскомпозиции, давление парогазовой смеси $p_{\text{пр}}(x, \tau)$, действующее в порах, и прочность склеивания (предел прочности при растяжении перпендикулярно пласти) $\sigma_p(x, \tau)$ в этом слое [2]

$$\sigma_{\text{вн}}(x, \tau) = \sigma_y(\tau)(1 - \Pi(x)) + p_{\text{пр}}(x, \tau)\Pi(x) - \sigma_p(x, \tau).$$

Предел прочности при растяжении перпендикулярно пласти в соответствующем слое брикета $\sigma_p(x)$ является функцией температуры $T(x)$, влагосодержания $W(x)$, плотности $\rho(x)$ брикета и степени отверждения связующего $\theta(x)$ и формируется в соответствии с их изменением в процессе прессования. В свою очередь, эти показатели взаимосвязаны между собой и зависят как от координат слоя, так и от времени τ

$$\sigma_p(x, \tau) = \sigma_p [T(x, \tau); W(x, \tau); \theta(x, \tau); \rho(x, \tau)].$$

Наиболее слабый слой по толщине брикета пресскомпозиции в любой момент времени соответствует слою, для которого

$$\left\{ \sigma_p(x, \tau) - \sigma_y(\tau)(1 - \Pi(x)) - p_{\text{пр}}(x, \tau)\Pi(x) \right\}_{\min}.$$

Смещение этого слоя по толщине брикета во времени совпадает с продвижением области интенсивного испарения влаги, в которой давление парогазовой смеси максимально для данного момента времени.

Для определения минимально допустимого давления прессования $P_{\text{пр}}^{\min}$ необходимо пользоваться минимально необходимой нагрузкой в наиболее слабом слое брикета

$$P_{\text{пр}}^{\text{min}}(\tau) = \left\{ \sigma_p(x, \tau) - \sigma_y(\tau)(1 - \Pi(x)) - p_{\text{пр}}(x, \tau)\Pi(x) \right\}_{\text{max}}.$$

Слишком высокое давление прессования, превышающее минимально допустимое, может привести к быстрому износу дистанционных прокладок, поскольку на них ложится основная нагрузка. Это также вызывает прогиб плит пресса во время прессования, что ухудшает условия выхода парогазовой смеси в центральной части брикета. В результате может произойти чрезмерный рост давления парогазовой смеси и, как следствие, расслоение брикета при размыкании плит пресса. В связи с этим давление прессования должно на протяжении всего процесса оставаться равным или немного превышать минимально допустимое, во избежание ненужной распрессовки брикета. В начале процесса допускается значительное превышение давления, что способствует быстрому прогреву брикета. Однако после прогрева превышение давления должно стать минимальным в целях облегчения выхода парогазовой смеси.

Завершение процесса прессования определяется моментом, когда прочность клеевого шва становится равной или превышает напряжения внутри брикета, вызванные упругим сопротивлением и давлением парогазовой смеси в самом слабом сечении

$$\left\{ \sigma_p(x, \tau) \geq \sigma_y(\tau)(1 - \Pi(x)) - p_{\text{пр}}(x, \tau)\Pi(x) \right\}_{\text{min}}.$$

Прерывание процесса раньше этого времени может привести к распрессовке или расслоению композиционного материала при раскрытии плит пресса.

Таким образом, для описания динамики изменения прочностных свойств композиционных материалов в процессе их прессования важно знать следующее:

- закон нагружения (диаграмму прессования) $\sigma(\tau)$, температуру прессования $T_n(\tau)$, начальные и граничные условия;

- поля давления парогазовой смеси $p(x, \tau)$, температуры $T(x, \tau)$, влагосодержания $W(x, \tau)$ и степени отверждения связующего $\theta(x, \tau)$ в брикете;

- распределение плотности $\rho(x, \tau)$, а следовательно, и пористости $\Pi(x, \tau)$ в брикете.

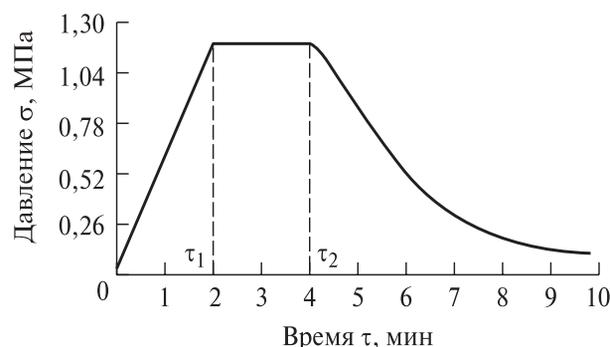
При моделировании процесса прессования композитных материалов следует учитывать протекающие при прессовании процессы:

- процесс нагружения — формирование диаграммы прессования $\sigma(\tau)$ с учетом протекания процессов;

- процесс теплопереноса — изменение давления парогазовой смеси $p(x, \tau)$, температуры $T(x, \tau)$, влагосодержания $W(x, \tau)$, теплофизических и фильтрационных характеристик;

- процесс реологии — формирование полойной плотности $\rho(x, \tau)$, а значит, и пористости $\Pi(x, \tau)$;

- процесс отверждения связующего и расчет прочностных показателей — изменение степени отверждения связующего $\theta(x, \tau)$, прочностных характеристик.



Пример диаграммы прессования: τ_1 — время смыкания плит пресса; $\tau_2 - \tau_1$ — время выдержки, под постоянным давлением; σ — давление; τ — продолжительность прессования

Example of pressing diagram: τ_1 — clamping time of press plates; $\tau_2 - \tau_1$ — curing time, under constant pressure; σ — pressure; τ — duration of pressing

Зададим некоторый эмпирический закон нагружения (рисунок), подлежащий уточнению на последующих шагах моделирования [3].

Диаграмму прессования (см. рисунок) можно описать математически

$$\sigma(\tau) = \begin{cases} a\tau, & \text{при } \tau \leq \tau_1; \\ a\tau_1, & \text{при } \tau_1 < \tau \leq \tau_2; \\ \sigma_0 e^{-(t/c)^k} + \sigma_\infty, & \text{при } \tau_1 > \tau > \tau_2, \end{cases}$$

где σ_∞ — равновесное напряжение в брикете после окончания процесса релаксации, МПа;

a, σ_0, k, c — коэффициенты, определяемые технологией прессования, которые могут быть приняты за компоненты вектора управляющих параметров [3].

Поскольку горячее прессование является высокотемпературным процессом (процессом теплопереноса), естественно предположить, что перенос влаги в брикете осуществляется в основном парогазовой смесью и термодиффузией влаги [3–11].

При нагревании брикета во время перехода температуры через точку кипения будет происходить фазовое превращение влаги. Температура на поверхности фазового перехода сохранится постоянной.

На основе закона сохранения массы вещества локальная производная объемной концентрации парогазовой смеси по времени равна сумме дивергенции потока этой смеси, а также источников и стоков парогазовой смеси.

Этот закон позволяет записать уравнение неразрывности для парогазового потока

$$\Pi(x, \tau) \frac{\partial \rho_{\text{пр}}}{\partial \tau} = - \sum_{i=1}^3 \frac{\partial q_{n_i}(x, \tau)}{\partial x_i} + I_{\text{ф.п}}(x, \tau) + I_{\text{конд}}(x, \tau),$$

где $\partial q_{n_i}(x, \tau) = -K_i \frac{\partial p_{\text{пр}_i}(x, \tau)}{\partial x_i}$, $i = 1, 2, 3$.

Здесь K_i — коэффициенты проницаемости брикета вдоль соответствующих координат;

$p_{\text{пр}}(x, \tau)$ — парогазовое давление в брикете, Па;

$I_{\text{ф.п}}(x, \tau)$ — источник пара, обусловленный фазовым переходом кипения;

$I_{\text{конд}}(x, \tau)$ — сток пара, обусловленный конденсацией.

Основным источником парогазовой смеси является испаряющаяся влага, масса которой будет пропорциональна давлению насыщенного пара $p_{\text{п.н}}$. Кроме того, испарение относится к числу фазовых переходов первого рода, протекающих при постоянной температуре. Следовательно, концентрация генерируемого пара связана однозначно с температурой кипения по уравнению кривой насыщения

$$I_{\text{ф.п}} = I_{\text{ф.п}}(x, T_{\text{ф.п}}).$$

Конденсация пара (сток) возможна лишь в тех точках брикета, где температура будет равна точке росы для данного парциального давления пара и данного влагосодержания парогазовой смеси.

Изменение влагосодержания плиты за счет переноса влаги в виде жидкой фазы, учитывающее термодиффузию, запишем как

$$\rho_0 \frac{\partial W_{\text{в}}}{\partial \tau} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \left(a_m \rho_0 \delta \frac{\partial T}{\partial x_i} \right), i = 1, 2, 3,$$

где a_m — коэффициент влагопроводности;

δ — термоградиентный коэффициент.

Результатирующее изменение влагосодержания в брикете при прессовании можно определить из выражения

$$\rho_0 \frac{\partial W}{\partial \tau} = \rho_0 \frac{\partial W_{\text{в}}}{\partial \tau} + \Pi(x, \tau) \frac{\partial \rho_{\text{пр}}}{\partial \tau} + I_{\text{ф.п}}(x, \tau) + I_{\text{конд}}(x, \tau).$$

Дифференциальное уравнение переноса тепловой энергии имеет вид

$$c(W, T) \rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda_i(W, T) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \sum_{i=1}^3 c_{\text{пр}} \left(K_i \frac{\partial p_{\text{пр}}}{\partial x_i} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} + \Delta H \frac{\partial \Theta}{\partial \tau} + \Delta H_{\text{ф}} \frac{\partial W}{\partial \tau}, \quad (1)$$

где $c(W, T)$ — удельная теплоемкость брикета, Дж/кг·К;

ρ — плотность брикета, кг/м³;

λ_i — теплопроводность брикета по координате x_i , Вт/м·К;

$c_{\text{пр}}$ — удельная теплоемкость парогазовой смеси, Дж/кг·К;

ΔH — тепловой эффект химической реакции отверждения;

Θ — степень отверждения связующего;

$\Delta H_{\text{ф}}$ — тепловой эффект фазового перехода.

В уравнении (1) выражение

$$\left(\lambda_i(W, T) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right)$$

определяет перенос энергии теплопроводностью по координате x_i , а выражение

$$c_{\text{пр}} \left(K_i \frac{\partial p_{\text{пр}}}{\partial x_i} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i}$$

характеризует конвективный перенос энергии парогазовой смесью по координате x_i .

Источники энергии определяются фазовыми переходами и химической реакцией отверждения связующего. При движении поверхности фазового перехода происходит выделение (поглощение) скрытой теплоты кипения (конденсации).

Сформулируем дополнительные условия, которые должны выполняться на поверхности кипения (конденсации).

Пусть поверхностью раздела фаз является функция $\xi(\tau)$. За время $\Delta\tau$ граница фазового перехода ξ переместится от точки $\xi = x^*$ до точки $\xi = x^* + \Delta\xi$. При этом испаряется либо конденсируется масса $\rho_{\text{в}} \Delta\xi$ (где $\rho_{\text{в}}$ — плотность испаряющейся (конденсирующейся) жидкости) и поглощается либо выделяется соответствующее количество теплоты $r \Delta\xi$ (где r — скрытая теплота фазового перехода).

На основе теплового баланса для точек границы фазового перехода x^* и $x^* + \Delta\xi$ должно выполняться условие

$$\left[\lambda_1(W, T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x^*} - \lambda_2(W, T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x^* + \Delta \xi} \right] \Delta \tau = r \rho_b \Delta \xi, \quad \Pi(x) = 1 - \frac{\rho_0(x)[1 + \varepsilon(x)]}{\rho_{д.в}}, \quad (2)$$

Здесь λ_1 и λ_2 — коэффициенты теплопроводности первой и второй фаз.

Переходя к пределу при $\Delta \tau = 0$, получаем дополнительное условие на границе раздела фаз

$$\lambda_1(W, T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{\xi=0} - \lambda_2(W, T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{\xi+\Delta \xi} = r \rho_b \frac{d\xi}{d\tau}.$$

На этой границе температура постоянна и равна температуре фазового перехода $T(x, \tau) = T_\phi$. Тепловые потоки разрывны и их разность равна $r \rho_b d\xi / d\tau$, где величина $d\xi / d\tau$ представляет собой скорость движения фронта границы фазового перехода. В каждой из фаз температура $T(x, \tau)$ должна удовлетворять уравнению теплопроводности (1).

Кроме того, в состав модели должны войти следующие уравнения:

– давления насыщенного пара

$$p_{п.н}(T) = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 + a_4 T^4,$$

где a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 , — известные аппроксимационные коэффициенты;

– состояния парогазовой смеси

$$\rho_{пг}(T) = \frac{p_{пг}}{R_{пг} T},$$

где $R_{пг}$ — универсальная газовая постоянная для парогазовой смеси;

– степени отверждения связующего

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = (1 - \theta) f(T_{см}, c_c),$$

где θ — степень отверждения связующего;

$f(T_{см}, c_c)$ — функция, задающая скорость отверждения в зависимости от температуры $T_{см}$ и концентрации связующего c_c ;

– изменения концентрации связующего

$$\frac{\partial c_c}{\partial \tau} = \begin{cases} \frac{-c_c^2 \rho_b}{\rho_{см} \bar{m} (1 - \Pi(x))} \cdot \frac{\partial W}{\partial \tau}, & \text{если } \frac{\partial W}{\partial \tau} < 0 \\ 0, & \text{если } \frac{\partial W}{\partial \tau} \geq 0 \end{cases},$$

где \bar{m} — отношение массы связующего в абсолютно сухом состоянии к исходной массе абсолютно сухой стружки;

$\rho_{см}$ — плотность связующего, кг/м³.

Пористость брикета пресскомпозиции в слое x определяется по выражению

где $\rho_0(x)$ — начальная плотность брикета в слое x , кг/м³;

$\rho_{д.в}$ — плотность древесного вещества, кг/м³;

$\varepsilon(x)$ — деформация брикета в слое x .

Бумага и материалы на ее основе не обладают свойством линейности реологического характера и поэтому для них не выполняется принцип суперпозиции напряжений вследствие необратимого изменения внутренней структуры материала в процессе деформирования.

В любой момент времени деформация является суммой упругой $\varepsilon_{упр}(x)$, вязкоэластической (вязкой, вязкоупругой, упругозапаздывающей) $\varepsilon_{вз}(x)$, и остаточной (пластической) $\varepsilon_{ост}(x)$ составляющих, т. е.

$$\varepsilon(x) = \varepsilon_{упр}(x) + \varepsilon_{вз}(x) + \varepsilon_{ост}(x).$$

При длительном воздействии постоянной нагрузки упругая деформация со временем уменьшается. Предполагается, что длительный модуль упругости увеличивается с ростом остаточной деформации, что указывает на упрочнение материала. При снятии нагрузки упругая часть деформации восстанавливается мгновенно, а вязкоэластическая часть возвращается в течение бесконечного времени.

Дальнейший рост остаточной деформации не происходит, т. е. при $\sigma(\tau) = 0$

$$\frac{\partial \varepsilon(x)}{\partial \tau} = 0. \quad (3)$$

Остаточная деформация имеет ограниченный рост, определяемый в основном фракционным составом, температурой, влажностью и количеством связующего в брикете, т. е.

$$\varepsilon_{ост}(x) = \xi \varepsilon(x), \quad (4)$$

где ξ — некоторый коэффициент, зависящий от перечисленных свойств.

Таким образом, количественная характеристика реологических свойств композиционных материалов может быть получена из решения следующей системы уравнений:

$$\varepsilon(x) = \frac{1}{H} \sigma(\tau) + \varepsilon_{вз}(x) + \varepsilon_{ост}(x); \quad (5)$$

$$H = H_0 + \gamma \varepsilon_{ост}(x); \quad (6)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_{вз}(x)}{\partial \tau} = \begin{cases} K_1 \sigma(\tau) - \mu \varepsilon_{вз}, & \text{при } \varepsilon_{вз} < \frac{K_1 \sigma(\tau)}{\mu} \\ 0, & \text{при } \varepsilon_{вз} = \frac{K_1 \sigma(\tau)}{\mu} \end{cases};$$

$$\frac{\partial \varepsilon_{\text{ост}}(x)}{\partial \tau} = \begin{cases} K_2 \sigma(\tau) [\xi \varepsilon(x) - \varepsilon_{\text{ост}}(x)], & \text{при } \varepsilon_{\text{ост}}(x) < \xi \varepsilon(x) \\ 0, & \text{при } \varepsilon_{\text{ост}}(x) = \xi \varepsilon(x), \end{cases} \quad (8)$$

где $H_0, K_1, K_2, \mu, \xi, \gamma$ — коэффициенты, значения которых являются решениями обратной задачи параметрической идентификации, получаемыми на основе экспериментальных данных.

При конкретных начальных условиях система уравнений (5) — (8) может быть решена, если заданы законы деформирования ($\varepsilon(x, \tau) = \varepsilon(\tau)$) или нагружения $\sigma(\tau)$.

Существенным моментом в реологии композиционного материала является и то, что толщина H и деформация ε древесины существенно зависят от температуры и влажности:

$$H(x) = H_0 + \gamma \varepsilon_{\text{ост}}(x) + AW + BT + CWT, \quad (9)$$

$$\varepsilon(x) = \frac{1}{H} \sigma(\tau) + \varepsilon_{\text{вс}}(x) + \varepsilon_{\text{ост}}(x) + \alpha W + \beta T + \delta WT, \quad (10)$$

где $W = W(x, \tau)$ — влагосодержание материала; $T = T(x, \tau)$ — температура брикета; $A, B, C, \alpha, \beta, \delta$ — коэффициенты, полученные в результате обработки экспериментальных данных усушки и разбухания.

Таким образом, в результате решения системы уравнений (2), (3) — (10) можно определить пористость композиционного материала в каждой точке прессуемой плиты для любого момента времени.

Для термореактивных связующих скорость химической реакции отверждения зависит от температуры и концентрации реакционноспособных групп в олигомере и описывается уравнением

$$-\frac{dC}{dt} = k(T)C^n,$$

а степень отверждения связующего — выражением

$$\theta = \frac{C - C_0}{C_0},$$

где C_0 и C — соответственно начальная и текущая концентрации реакционноспособных групп, кг/кг.

Учитывая, что вследствие стерических затруднений степень отверждения не достигает единицы, а стремится к некоторому конечному значению θ_k , уравнение кинетики процесса отверждения записывается в виде

$$\frac{d\theta}{dt} = (\theta_k - \theta)^n k(T)C_0^{n-1}.$$

Температурная зависимость скорости процесса отверждения для термореактивных смол описывается уравнением Аррениуса

$$k(T) = k_0 \exp\left(-\frac{U}{RT}\right),$$

где k_0 — константа скорости реакции, 1/с.

Подставляя выражение (6) в (5), получаем окончательное уравнение кинетики образования полимерной матрицы

$$\frac{d\theta}{dt} = (\theta_k - \theta)^n k_0 C_0^{n-1} \exp\left(-\frac{U}{RT}\right). \quad (11)$$

В уравнении (11) параметры n, k_0, U подлежат экспериментальному определению для каждого типа полимерной матрицы.

Обычно реакции поликонденсации сопровождаются выделением (поглощением) теплоты. Тепловой эффект реакции, обусловленный перераспределением химических связей и изменением межмолекулярных взаимодействий, также может служить показателем степени отверждения реактопластов. Конечная степень отверждения в этом случае определяется из уравнения

$$\theta_k = Q_{\text{отв}} \frac{M}{(\pm \Delta H C_0)},$$

где M — молярная масса реагирующих веществ, кг/моль.

В работе [12] для практических расчетов рекомендуется использовать уравнение кинетики образования полимерной матрицы в виде

$$\frac{d\theta}{dt} = (1 - \theta)^n k_0^* \exp\left(-\frac{U}{RT}\right).$$

Объемный источник энергии, обусловленный тепловым эффектом реакции отверждения, можно описать уравнением

$$I_{VT} = \frac{\pm \Delta H}{M} a_{2m} \rho \frac{\partial \theta}{\partial t}, \quad (12)$$

где ρ — плотность реагирующих веществ, кг/м³, a_{2m} — массовая доля полимерной матрицы в композиционном материале, кг/кг.

В процессе реакции поликонденсации реактопластов на основе фенолоформальдегидных смол (КФ-МТ, ЛБС-4, ФФС и др.) выделяются вода, этиловый спирт и другие соединения. Для описания объемного источника продуктов

поликонденсации можно использовать уравнение [2]

$$I_{v_m} = \frac{J_m}{M} a_{2m} \rho \frac{\partial \theta}{\partial t},$$

где J_m — количество воды, выделившейся в результате образования полимерной матрицы, кг/моль.

Экспериментальные исследования показали [15], что при отверждении связующего на примере ЛБС-4 выделилось следующее количество продуктов: воды — 0,09...0,1 кг/кг смолы; этилового спирта — 0,008...0,04 кг/кг смолы. Эти продукты возникают в результате химической реакции поликонденсации, для поддержания которой требуется определенная энергия, учитываемая в уравнении кинетики образования полимерной матрицы. Выделяющиеся продукты поликонденсации при образовании полимерной матрицы и летучие компоненты частично накапливаются в порах, а частично адсорбируются. В дальнейшем эти продукты могут выделяться из готового материала в результате диффузионных процессов.

Плотность воздуха в 3 раза меньше плотности прессуемого брикета, поэтому влияние массопереноса при фильтрации воздуха на температуру брикета в процессе прессования можно не учитывать.

В связи с этим в уравнении переноса энергии должен учитываться лишь объемный источник энергии, обусловленный тепловым эффектом реакции образования полимерной матрицы (12). Тогда уравнение переноса энергии может быть записано в виде

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} a \left(\lambda_0 \frac{\partial T}{\partial x} \right) \pm I_{vT}. \quad (13)$$

Для термореактивных связующих степень отверждения θ характеризуется температурой стеклования $T_{ст}$ и зависит от температуры соответствующего слоя брикета $T(x)$.

С учетом изложенного выше систему уравнений теплообмена, описывающую процесс горячего прессования бумажно-полимерных плит на связующем, можно записать в виде:

– уравнение фильтрационного переноса парогазовой смеси

$$(\rho_n + \rho_r)v = -K \frac{\partial}{\partial x} (p_n + p_r);$$

$$\frac{\partial W_{\phi_2}}{\partial \tau} = \begin{cases} \beta_1 [p_{п.н}(T_{ск}) - p_n], & p_n \geq p_{п.н}(T_{ск}) \\ -\beta_2 [p_{п.н}(T_{ск}) - p_r] \chi(W), & p_{п.н}(T_{ск}) - p_r < p_n < p_{п.н}(T_{ск}); \\ -\left\{ \beta_2 [p_{п.н}(T_{ск}) - p_n - p_r]^2 + \beta_2 p_r \right\} \chi(W), & p_n < p_{п.н}(T_{ск}) - p_r \end{cases}$$

– уравнение неразрывности для водяного пара

$$\Pi \frac{\partial p_n}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_n v - D_n \frac{\partial \rho_n}{\partial x} \right) + \rho_b \frac{\partial W}{\partial \tau} = M_n \bar{M} \rho_{ск} (1 - \Pi) \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \quad (14)$$

Методы определения параметров, входящих в уравнения (13) и (14) подробно изложены в работе [14]:

– уравнение неразрывности для неконденсирующихся газов

$$\Pi \frac{\partial p_r}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_r v - D_r \frac{\partial \rho_r}{\partial x} \right) = M_r \bar{M} \rho_{ск} (1 - \Pi) \frac{\partial \theta}{\partial \tau};$$

– уравнение переноса влаги в жидкой фазе

$$\rho_b v_b = -K_b W \frac{\partial}{\partial x} (p_n + p_r) - D_b \frac{\partial W}{\partial x};$$

– уравнение переноса энергии жидкой и твердой фазами

$$\left[c_{ск} \rho_{ск} (1 - \Pi) + c_b \rho_b W + c_r \bar{M} \rho_{ск} (1 - \Pi) \right] \frac{\partial T_{ск}}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_{ск}(T_{ск}, W, \Pi) \frac{\partial T_{ск}}{\partial x} \right] + c_b \rho_b v_b \frac{\partial T_{ск}}{\partial x} + \alpha_v (T - T_{ск}) + \rho_b E_{\phi} \frac{\partial W_{\phi_2}}{\partial \tau} + E_r \bar{M} \rho_{ск} (1 - \Pi) \frac{\partial \theta}{\partial \tau};$$

– уравнение переноса энергии парогазовой смеси

$$\Pi (c_n \rho_n + c_r \rho_r) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + r \rho_b \frac{\partial W_{\phi_1}}{\partial \tau} + v (c_n \rho_n + c_r \rho_r) \frac{\partial T}{\partial x} + \alpha_v (T_{ск} - T);$$

– уравнение фазовых переходов

$$\frac{\partial W_{\phi}}{\partial \tau} = \frac{\partial W_{\phi_1}}{\partial \tau} + \frac{\partial W_{\phi_2}}{\partial \tau},$$

где

$$\frac{\partial W_{\phi_1}}{\partial \tau} = \begin{cases} \beta_1 [p_{п.н}(T) - p_n]^2, & p_n > p_{п.н}(T); \\ 0, & p_n \leq p_{п.н}(T); \end{cases}$$

$$\chi(W) = \arctg\left(\frac{W}{W_\varepsilon}\right);$$

– уравнение изменения влажности

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = \frac{\partial(Wv_v)}{\partial x} + \frac{\partial W_\phi}{\partial \tau};$$

– уравнение отверждения связующего

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \begin{cases} 1, & T < T_{cm} \\ 0, & T \geq T_{cm} \end{cases};$$

– уравнения состояния

$$\rho_n = \frac{P_n}{R(p_n)T};$$

$$\rho_r = \frac{P_r}{R(p_r)T}.$$

Сформулированную систему уравнений не сложно обобщить для многомерного случая.

Для конкретных начальных и краевых условий необходимо сформулировать замыкающие соотношения и найти коэффициенты и зависимости, входящие в них. Большинство из входящих в замыкающие соотношения коэффициентов и зависимостей можно получить пока лишь эмпирическим путем. Поэтому для этого необходимо проведение ряда дополнительных экспериментальных исследований.

Определению теплофизических характеристик, коэффициентов проницаемости и некоторых других необходимых соотношений и коэффициентов посвящено достаточно много работ [16–28].

Тепло- и массоперенос в процессе горячего прессования во многом определяется интенсивностью баротермических воздействий на брикет, зависит от плотности, а следовательно, от относительных локальных деформаций материала. В свою очередь деформативные свойства брикета зависят от температуры, влажности и степени завершенности реакции отверждения связующего [29–32]. Все это говорит о наличии взаимосвязи процессов тепломассопереноса в капиллярнопористых композиционных материалах с их деформативностью и прочностью [33–37].

Использование исходного материала влажностью менее 8 % может значительно упростить данную модель плоского горячего прессования [1].

Выводы

Данная математическая модель протекающих при горячем прессовании композиционных материалов процессов, с конкретными краевыми условиями позволяет разработать на ее основе инженерные методы расчета и практические рекомендации по выбору рациональных технологических режимов и составов пресскомпозиции для получения материалов с заранее заданными свойствами и характеристиками.

На основании представленной математической модели рассчитаны оптимальные параметры процесса горячего прессования для производства плитных материалов на основе бумаги и термопластов в качестве связующего. При начальной влажности пресскомпозиции менее 8% возможно значительное упрощение данной модели, что делает ее использование более универсальным.

Список литературы

- [1] Черемисин Д.Г., Мкртчян В.Р., Иванкин А.Н., Устогов А.В., Маслов М.И., Никонорова А.А. Потенциальные возможности 3D-печати для получения композиционных материалов на основе синтетических и природных биополимеров (обзор) // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2021. Т. 25. № 5. С. 111–118.
DOI: 10.18698/2542-1468-2021-5-111-118
- [2] Шевляков А.А. Гидродинамика контактного слоя древесностружечного брикета в процессе прессования древесностружечных плит: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.05. Москва, 1994. 222 с.
- [3] Обливин А.Н. Моделирование свойств и процессов прессования реактопластов. М.: МГУЛ, 2005. 284 с.
- [4] Лыков А.В. Тепломассообмен. М.: Энергия, 1978. 479 с.
- [5] Bear J. Dynamics of Fluids in Porous Media. New York, USA: Elsevier, 1972, 764 p.
- [6] Whitaker S. Simultaneous Heat, Mass and Momentum Transfer in Porous Media. A Theory of Drying in Porous Media // Advances in Heat Transfer, vol. 13. New York, USA: Academic Press, 1977.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2717\(08\)70223-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2717(08)70223-5)
- [7] Bear J., Bachmat Y. Transport in Porous Media: Basic Equations. Corapcigli Editions, 1984, pp. 213–240.
- [8] Kaviany M. Principles of Heat Transfer in Porous Media. New York, USA: Springer, 1991, pp. 153–232.
- [9] De Vries D.A. The theory of heat and moisture transfer in porous media revisited // International J. of Heat and Mass Transfer, 1987, v. 7, pp. 1343–1350.
- [10] Fan J., Luo Z., Li Y. Heat and moisture transfer with sorption and condensation in porous clothing assemblies and numerical simulation // International J. of Heat and Mass Transfer, 2000, v. 43, no. 16, pp. 2989–3000.

- [11] Kulikovskii A.G. Evaporation and condensation fronts in porous media // *Fluid Dynamics*, 2002, v. 37, no. 5, pp. 740–746.
- [12] Larbi S. Some Aspects of Transport Phenomena Physics in the Capillary Porous Bodies // *Proceedings of the World Renewable Energy Congress 2005: Innovation In Europe: Renewable Energy, Technology, Innovation And The Environment*: Eds. M.S. Imbabi, C.P. Mitchell. University of Aberdeen, May 22–27, 2005. UK, Aberdeen: Elsevier Science, 2005, p. 193.
- [13] Малкин А.Я., Куличихин С.Г. Реология в процессах образования и превращения реактопластов. М.: Химия, 1981. 240 с.
- [14] Ставров В.П., Дедюхин В.Г., Соколов А.Д. Технологические испытания реактопластов. М.: Химия, 1981. 246 с.
- [15] Беликов В.В. Экструзионное формование реактопластов на основе измельченной древесины и фосфогипса: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.05. Москва, МЛТИ, 1992, 245 с.
- [16] Обливин А.Н. Теоретическое и экспериментальное исследование тепло- и массопереноса при контактом нагреве влажных пористых тел: дис. ... д-ра техн. наук 01.04.14. Москва, 1976. 204 с.
- [17] Пожиток А.И. Теоретическое и экспериментальное исследование интенсификации и оптимизации процесса прессования древесностружечных плит: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.05. Москва, МЛТИ, 1978. 293 с.
- [18] Темкин А.Г. Исследование нестационарного тепло- и массопереноса. Минск: Наука и техника, 1966. 250 с.
- [19] Щеглов П.П. Исследование термодинамических параметров и коэффициентов массопереноса в плитных материалах из измельченной древесины: автореферат дис. ... канд. техн. наук 05.21.05. Москва, МЛТИ, 1978. 20 с.
- [20] Luikov A.V. Systems of Differential Equations of Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies // *Review. International J. Heat Mass Transfer*, 1975, v. 18, no. 1, pp. 1–14.
- [21] Larbi S. Heat and mass transfer with interaction effects analysis between an external flow and a capillary porous body // *International Review of Mechanical Engineering*, 2008, v. 2, pp. 797–802.
- [22] Choudhary M.K., Karki, K.C., Patankar, S.V. Mathematical modeling of heat transfer, condensation, and capillary flow in porous insulation on a cold pipe // *International J. of Heat and Mass Transfer*, 2004, v. 47, no. 26, pp. 5629–5638.
- [23] Shapiro A.P., Motakef S. Unsteady heat and mass transfer with phase change in porous slabs: analytical solutions and experimental results // *International J. of Heat and Mass Transfer*, 1990, v. 33, no. 1, pp. 163–173.
- [24] Hanamura K., Kaviany M. Propagation of condensation front in steam injection into dry porous media // *International J. of Heat and Mass Transfer*, 1995, v. 38, no. 8, pp. 1377–1386.
- [25] Lenormand R., Zarcone C. Role of roughness and edges during imbibition in square capillaries // *Society of Petroleum Engineering*, 1984, v. 13, pp. 1–17.
- [26] Udell K.S. Heat transfer in porous media heated from above with evaporation, condensation, and capillary effects // *J. of Heat Transfer*, 1983, v. 105, no. 3, pp. 485–492.
- [27] Bridge L., Bradean R., Ward M.J., Wetton B.R. The analysis of a two-phase zone with condensation in a porous medium // *J. of Engineering Mathematics*, 2003, v. 45, no. 3–4, pp. 247–268.
- [28] Ogniewicz Y., Tien C.E. Analysis of condensation in porous insulation // *International J. of Heat and Mass Transfer*, 1986, v. 24, no. 3, pp. 421–429.
- [29] Обливин А.Н., Воскресенский А.К., Пожиток А.И. Теоретические основы расчета напряжений и деформаций в терморезистивных капиллярно-пористых телах // *Научные труды МЛТИ*, 1981. Вып. 138. С. 5–21.
- [30] Kar K.K. *Composite Materials: Processing, Applications, Characterizations*. Berlin: Springer-Verlag, 2017, p. 686.
- [31] Mallick P.K. *Composite Engineering Handbook*. New York, USA: Marcel Dekker, 1997, p. 616.
- [32] Тришин С.П., Никитин А.А. Изучение физико-механических и технологических свойств порошкообразных термопластичных связующих и плит // *Технология и оборудование для переработки древесины: науч. тр.*, 2015. Вып. 377. С. 114–119.
- [33] Пожиток А.И., Обливин А.Н. Теоретические основы тепло-массопереноса в капиллярно-пористых телах. М.: МЛТИ, 1984. 75 с.
- [34] Обливин А.Н., Воскресенский А.К., Пожиток А.И. Расчет процессов тепло-массопереноса при нагревании влажных пористых тел с учетом поверхностного испарения внутри макропор // *Научные труды МЛТИ. Вопросы теплопередачи*, 1977. Вып. 102. С. 5–31.
- [35] Trishin S.P., Nikitin A.A., Fedorenko D.V., Kireyeva A.F. Mining technology for producing wood chipboard with the use of thermoplastic binder // *Forest Complex Today: View of Young Researchers: Forest Industry and Engineering, Landscape Architecture, Woodworking Technology, Management and Economics: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*, vol. 1. St. Louis, Missouri, USA: S., 2017, pp. 228–233.
- [36] Тришин С.П., Никитин А.А. Изучение физико-механических и технологических свойств порошкообразных термопластичных связующих и плит // *Технология и оборудование для переработки древесины: науч. тр.*, 2015. Вып. 377. С. 114–119.
- [37] Ла Мантия Ф. *Вторичная переработка пластмасс*. СПб.: Профессия, 2006. 400 с.

Сведения об авторах

Гранкин Александр Юрьевич [✉] — ведущий программист отдела образовательных технологий, ассистент, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), grankin@bmstu.ru

Никитин Владимир Валентинович — д-р техн. наук, профессор, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), nikitinvv@bmstu.ru

Сидельников Иван Дмитриевич — канд. техн. наук, доцент, МГТУ им. Н.Э. Баумана, sid@bmstu.ru

Поступила в редакцию 12.12.2024.

Одобрено после рецензирования 20.12.2024.

Принята к публикации 06.02.2025.

MATHEMATICAL MODEL OF PAPER-POLYMER BOARD HOT PLATE PRESSING

A.Y. Grankin^{1✉}, V.V. Nikitin¹, I.D. Sidelnikov²

¹BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

²BMSTU, 5, 2nd Baumanskaya st., 105005, Moscow, Russia

grankin@bmstu.ru

The article considers the dynamics of changes in internal stresses in composite materials during the process of flat hot pressing, and describes the key factors affecting the strength characteristics of the press composite, such as temperature, humidity, vapor-gas mixture pressure and the degree of curing of the binder. A detailed analysis of layer-by-layer briquette formation is presented, taking into account for each layer the elastic resistance, vapour-gas mixture pressure and degree of binder curing. It is established that the tensile strength perpendicular to the plate is a function of temperature, moisture content, density and degree of curing, and also depends on the layer coordinates and time. The effect of pressing pressure on the process is studied, including the risks associated with exceeding the permissible pressure, which can lead to wear of the spacers and deterioration of the conditions for the release of the formed vapor-gas mixture. Completion of the pressing process is determined by the moment when the strength of the adhesive joint in the weakest section becomes equal to or exceeds the internal stresses. For successful modeling of the process, it is necessary to take into account the law of loading, pressure and temperature fields, as well as the density (porosity) distribution in the briquette. The proposed mathematical model of the processes occurring during hot pressing of composite materials with specific boundary conditions allows one to develop, on its basis, engineering calculation methods and practical recommendations for the selection of rational technological pressing modes and press compositions for obtaining materials with predetermined properties. However, further experimental studies are necessary to clarify the coefficients and dependencies included in the closing relations. This work contributes to a better understanding of the processes of heat and mass transfer occurring during pressing in capillary-porous composite materials and their relationship with mechanical properties, which is important for optimizing hot pressing technologies and improving the quality of final products.

Keywords: mathematical model, heat and mass transfer model, rheological model, paper waste, thermosetting binder, composite materials, flat pressing

Suggested citation: Grankin A.Y., Nikitin V.V., Sidelnikov I.D. *Matematicheskaya model' ploskogo goryachego pressovaniya bumazhno-polimernykh plit* [Mathematical model of paper-polymer board hot plate pressing]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 2, pp. 147–158.

DOI: 10.18698/2542-1468-2025-2-147-158

References

- [1] Cheremisin D.G., Mkrтчan V.R., Ivankin A.N., Ustyugov A.V., Maslov M.I., Nikonorova A.A. *Potentsial'nye vozmozhnosti 3D-pechati dlya polucheniya kompozitsionnykh materialov na osnove prirodnykh bioi sinteticheskikh polimeroev (obzor)* [Potential possibilities of 3D-printing for producing composite materials based on natural bioand synthetic polymers (a review)]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 5, pp. 111–118. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-5-111-118
- [2] Shevlyakov A.A. *Gidrodinamika kontaktного sloya drevesnostruzhechnogo briketa v protsesse pressovaniya drevesnostruzhechnykh plit* [Hydrodynamics of the contact layer of a wood chip briquette during the pressing of chipboards]. Dis. Cand. Sci (Tech.) 05.21.05. Moscow, 1994, 222 p.

- [3] Oblivin A.N. *Modelirovaniye svoystv i protsessov pressovaniya reaktoplastov* [Modeling of Properties and Pressing Processes of Thermosets]. Moscow: MSFU, 2005, 284 p.
- [4] Lykov A.V. *Teplomassoobmen* [Heat and Mass Transfer]. Moscow: Energiya, 1978, 479 p.
- [5] Bear J. Dynamics of Fluids in Porous Media. New York, USA: Elsevier, 1972, 764 p.
- [6] Whitaker S. Simultaneous Heat, Mass and Momentum Transfer in Porous Media. A Theory of Drying in Porous Media. *Advances in Heat Transfer*, vol. 13. New York, USA: Academic Press, 1977.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2717\(08\)70223-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2717(08)70223-5)
- [7] Bear J., Bachmat Y. *Transport in Porous Media: Basic Equations*. Corapcigli Editions, 1984, pp. 213–240.
- [8] Kaviany M. *Principles of Heat Transfer in Porous Media*. New York, USA: Springer, 1991, pp. 153–232.
- [9] De Vries D.A. The theory of heat and moisture transfer in porous media revisited. *International J. of Heat and Mass Transfer*, 1987, v. 7, pp. 1343–1350.
- [10] Fan J., Luo Z., Li Y. Heat and moisture transfer with sorption and condensation in porous clothing assemblies and numerical simulation. *International J. of Heat and Mass Transfer*, 2000, v. 43, no. 16, pp. 2989–3000.
- [11] Kulikovskii A.G. Evaporation and condensation fronts in porous media. *Fluid Dynamics*, 2002, v. 37, no. 5, pp. 740–746.
- [12] Larbi S. Some Aspects of Transport Phenomena Physics in the Capillary Porous Bodies. *Proceedings of the World Renewable Energy Congress 2005: Innovation In Europe: Renewable Energy, Technology, Innovation and The Environment*. Eds. M.S. Imbabi, C.P. Mitchell. University of Aberdeen, May 22–27, 2005. UK, Aberdeen: Elsevier Science, 2005, p. 193.
- [13] Malkin A.Ya., Kulichikhin, S.G. *Reologiya v protsessakh obrazovaniya i prevrashcheniya reaktoplastov* [Rheology in the Processes of Formation and Transformation of Thermosets]. Moscow: Khimiya [Chemistry], 1981, 240 p.
- [14] Stavrov V.P., Dedyukhin V.G., Sokolov A.D. *Tekhnologicheskie ispytaniya reaktoplastov* [Technological Testing of Thermosets]. Moscow: Khimiya [Chemistry], 1981, 246 p.
- [15] Belikov V.V. *Ekstruzionnoe formovanie reaktoplastov na osnove izmel'chennoy drevesiny i fosfogipsa* [Extrusion Molding of Thermosets Based on Crushed Wood and Phosphogypsum]. Dis. Cand. Sci (Tech.) 05.21.05. Moscow, MLTI, 1992, 245 p.
- [16] Oblivin A.N. *Teoreticheskoe i eksperimental'noe issledovanie teplo- i massoperenosa pri kontaktnom nagreve vlazhnykh poristykh tel* [Theoretical and experimental study of heat and mass transfer during contact heating of wet porous bodies]. Dis. Dr. Sci (Tech.) 01.04.14. Moscow, 1976, 204 p.
- [17] Pozhitok A.I. *Teoreticheskoe i eksperimental'noe issledovanie intensifikatsii i optimizatsii protsessa pressovaniya drevesnostruzhechnykh plit* [Theoretical and experimental study of intensification and optimization of the pressing process of particle boards]. Dis. Cand. Sci (Tech.) 05.21.05. Moscow, MLTI, 1978, 293 p.
- [18] Temkin A.G. *Issledovanie nestatsionarnogo teplo- i massoperenosa* [Study of non-stationary heat and mass transfer]. Minsk: Nauka i tekhnika [Science and Technology], 1966, 250 p.
- [19] Shcheglov P.P. *Issledovanie termodinamicheskikh parametrov i koeffitsientov massoperenosa v plitnykh materialakh iz izmel'chennoy drevesiny* [Study of thermodynamic parameters and mass transfer coefficients in board materials from crushed wood]. Dis. Cand. Sci (Tech.) 05.21.05. Moscow, MLTI, 1978, 20 p.
- [20] Luikov A.V. Systems of Differential Equations of Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies. Review. *International J. Heat Mass Transfer*, 1975, v. 18, no. 1, pp. 1–14.
- [21] Larbi S. Heat and mass transfer with interaction effects analysis between an external flow and a capillary porous body. *International Review of Mechanical Engineering*, 2008, v. 2, pp. 797–802.
- [22] Choudhary M.K., Karki, K.C., Patankar, S.V. Mathematical modeling of heat transfer, condensation, and capillary flow in porous insulation on a cold pipe. *International J. of Heat and Mass Transfer*, 2004, v. 47, no. 26, pp. 5629–5638.
- [23] Shapiro A.P., Motakef S. Unsteady heat and mass transfer with phase change in porous slabs: analytical solutions and experimental results. *International J. of Heat and Mass Transfer*, 1990, v. 33, no. 1, pp. 163–173.
- [24] Hanamura K., Kaviany M. Propagation of condensation front in steam injection into dry porous media. *International J. of Heat and Mass Transfer*, 1995, v. 38, no. 8, pp. 1377–1386.
- [25] Lenormand R., Zarcone C. Role of roughness and edges during imbibition in square capillaries. *Society of Petroleum Engineering*, 1984, v. 13, pp. 1–17.
- [26] Udell K.S. Heat transfer in porous media heated from above with evaporation, condensation, and capillary effects. *J. of Heat Transfer*, 1983, v. 105, no. 3, pp. 485–492.
- [27] Bridge L., Bradean R., Ward M.J., Wetton B.R. The analysis of a two-phase zone with condensation in a porous medium. *J. of Engineering Mathematics*, 2003, v. 45, no. 3–4, pp. 247–268.
- [28] Ogniewicz Y., Tien C.E. Analysis of condensation in porous insulation. *International J. of Heat and Mass Transfer*, 1986, v. 24, no. 3, pp. 421–429.
- [29] Oblivin A.N., Voskresenskiy A.K., Pozhitok A.I. *Teoreticheskie osnovy rascheta napryazheniy i deformatsiy v termoreaktivnykh kapillyarno-poristykh telakh* [Theoretical foundations for calculating stresses and strains in thermosetting capillary-porous bodies]. Nauchnye trudy MLTI [Scientific works of MLTI], 1981, iss. 138, pp. 5–21.
- [30] Kar K.K. *Composite Materials: Processing, Applications, Characterizations*. Berlin: Springer-Verlag, 2017, p. 686.
- [31] Mallick P.K. *Composite Engineering Handbook*. New York, USA: Marcel Dekker, 1997, p. 616.
- [32] Trishin S.P., Nikitin, A.A. *Izuchenie fiziko-mekhanicheskikh i tekhnologicheskikh svoystv poroshkoobraznykh termoplastichnykh svyazuyushchikh i plit* [Study of physicommechanical and technological properties of powdered thermoplastic binders and boards]. *Tekhnologiya i oborudovanie dlya pererabotki drevesiny: nauchnye trudy* [Technology and equipment for wood processing: scientific works], 2015, iss. 377, pp. 114–119.
- [33] Pozhitok A.I., Oblivin, A.N. *Teoreticheskie osnovy teplomassoperenosa v kapillyarno-poristykh telakh* [Theoretical Foundations of Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies]. Moscow: MLTI, 1984, 75 p.

- [34] Oblivin A.N., Voskresenskiy, A.K., Pozhitok, A.I. *Raschet protsessov teplomassoperenosa pri nagrevanii vlazhnykh poristykh tel s uchetom poverkhnostnogo ispareniya vnutri makropor* [Calculation of Heat and Mass Transfer Processes During Heating of Wet Porous Bodies Taking into Account Surface Evaporation Inside Macropores]. *Nauchnye trudy MLTI. Voprosy teploperedachi* [Scientific Works of MLTI. Heat Transfer Issues], 1977, iss 102, pp. 5–31.
- [35] Trishin S.P., Nikitin A.A., Fedorenko D.V., Kireyeva A.F. Mining technology for producing wood chipboard with the use of thermoplastic binder. *Forest Complex Today: View of Young Researchers: Forest Industry and Engineering, Landscape Architecture, Woodworking Technology, Management and Economics: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*, vol. 1. St. Louis, Missouri, USA: S., 2017, pp. 228–233.
- [36] Trishin S.P., Nikitin A.A. *Izuchenie fiziko-mekhanicheskikh i tekhnologicheskikh svoystv poroshkoobraznykh termoplastichnykh svyazuyushchikh i plit* [Study of Physical, Mechanical and Technological Properties of Powdered Thermoplastic Binders and Boards]. *Tekhnologiya i oborudovanie dlya pererabotki drevesiny: Nauchnye trudy* [Technology and Equipment for Wood Processing: Scientific Works], 2015, iss 377, pp. 114–119.

Authors' information

Grankin Aleksandr Yur'evich✉ — Lead Programmer of the BMSTU (Mytishchi branch),
grankin@bmstu.ru

Nikitin Vladimir Valentinovich — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch),
nikitinvv@bmstu.ru

Sidelnikov Ivan Dmitrievich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the BMSTU, sid@bmstu.ru

Received 12.12.2024.

Approved after review 20.12.2024.

Accepted for publication 06.02.2025.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

The authors declare that there is no conflict of interest