

УДК 66-911.6:62-405.8

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНДЕНСАЦИОННОЙ ПРОПИТКИ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ ТЕЛ

М.А. Гамов<sup>1</sup>, В.М. Задорский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>аспирант, кафедры оборудование химических производств, Государственное высшее учебное заведение «Украинский химико-технологический университет», г. Днепропетровск, Украина, e-mail: [nokassss@hotmail.com](mailto:nokassss@hotmail.com)

<sup>2</sup>доктор технических наук, профессор Государственное высшее учебное заведение «Украинский химико-технологический университет», г. Днепропетровск, Украина, e-mail: [ecofond@gmail.com](mailto:ecofond@gmail.com)

**Аннотация.** Проведена работа теоретического исследования конденсационной пропитки капиллярно-пористых материалов с возможностью использования математической модели для расчета.

**Ключевые слова:** пропитка, капиллярно-пористые материалы, коэффициент диффузии, пар.

## MATHEMATICAL MODELING OF CONDENSING TREATMENT CAPILLARY- POROUS MATERIALS

Michael Gamov<sup>1</sup>, William Zadorskiy<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Postgraduate student, chair of chemical production equipment, State Higher Educational Institution "Ukrainian University of Chemical Technology", Dnepropetrovsk, Ukraine, e-mail: [nokassss@hotmail.com](mailto:nokassss@hotmail.com)

<sup>1</sup>Ph.D., Professor of the State Higher Educational Institution "Ukrainian University of Chemical Technology", Dnepropetrovsk, Ukraine, e-mail: [ecofond@gmail.com](mailto:ecofond@gmail.com)

**Abstract** The work carried out theoretical research condensation infiltration of capillary-porous materials with the ability to use a mathematical model to calculate.

**Keywords:** impregnation, capillary-porous materials, vapor diffusion coefficient.

**Введение.** В статье показаны преимущества использования перегретого водяного пара (далее “пара”) для интенсификации конденсационной пропитки; показана возможность использования для проведения расчетов математической модели Аксельруда Г. А. и Альтшулера М. А.[1] при изменении начальных и граничных условий процесса для учета использования при пропитке пара в качестве рабочего агента.

Во многих отраслях промышленности интенсификация пропитки капиллярно-пористых материалов на заданную глубину имеет большое значение, однако использование для этой цели вакуумного оборудования и (или) аппаратов, работающих под избыточным давлением, значительно удорожает

процесс пропитки. В [1] отмечено, что исключительно перспективный метод интенсификации процесса пропитки без применения вышеуказанного оборудования основан на конденсации водяных (или других паров). Этот метод особенно уместен, когда в технологических операциях присутствует полное или частичное заполнение парами порового пространства.

Известно также [2], что в пропиточной технологии древесины и других материалов первоначальный вакуум используют для удаления из порового пространства воздуха, который препятствует проникновению пропиточного раствора. В то же время, частичное удаление воздуха их возможно путем нагрева. Вследствие чего атмосферное давление жидкости в ванной становится избыточным по отношению к давлению в поровом пространстве. Под действием образовавшегося перепада давления (атмосферное давление жидкости - вакуум в порах и капиллярах) происходит заполнение части капиллярно-порового пространства пропитывающей жидкостью.

**Цель работы.** Ранее нами был предложен [3] эффективный метод интенсификации способа «прогрев-холодная ванна» — пропитка в условиях создания вакуума в порах при конденсации не насыщенных, а перегретых паров [4], позволяющий управлять скоростью и глубиной пропитки. Использование перегретого пара продиктовано следующими обстоятельствами: при продувке капиллярно-пористого пространства паром обеспечивается более полное удаление (практически полное) удаление воздуха за счет процесса его десорбции в пар, выполняющий роль десорбирующего агента, после конденсации перегретых паров глубина вакуума в капиллярах будет выше, чем в случае конденсации насыщенных паров, поскольку удален практически весь воздух и при конденсации перегретых паров образуется меньше конденсата, приводящего к нежелательному разбавлению пропиточной. Кроме того, во многих практически важных случаях необходимо использовать обработку тела перегретыми парами растворителя как важную промежуточную технологическую стадию процесса, в некоторых случаях заполнение порового пространства насыщенными парами воды или другой жидкости является основной технологической стадией [5]. Эффект от конденсации перегретого пара увеличивает глубину пропитки. В связи с этим, становится необходимым математическое моделирование конденсационной пропитки, прежде всего, для использования математической модели в качестве имитационной с целью определения оптимальных условий протекания процесса и управления им на основе математической модели, а также для переноса результатов расчетов на реальный объект.

**Материал и результаты исследований.** Анализ литературных источников [1,2,6-15] показывает, что только в [1] встречается попытка математического описания конденсационной, а не капиллярной пропитки. В качестве

примера авторами работы [1] была рассмотрена пропитка прогретого при температуре кипения воды влажного бруска древесины, который затем помещался в пропиточную ванну с водой различной температуры. Предполагалось, что пары воды в древесине по мере охлаждения бруска до температуры воды в ванне конденсируются, их давление падает и становится равным парциальному давлению насыщенных паров при температуре пропитки. Поскольку вода для древесины является смачивающей жидкостью, движущая сила пропитки (перепад давления)

$$\Delta p = p_z + p_0 + p_k - p_n, \quad (1)$$

где  $p_z$  - гидростатическое давление жидкости, МПа;

$p_0$  - атмосферное давление, МПа;

$p_k$  - капиллярное давление для цилиндрического капилляра,

$$p_k = \frac{2\sigma \cos \theta}{r_k} \text{ МПа (рис.1);}$$

$\theta$  - краевой угол смачивания, °;

$\sigma$  - поверхностное натяжение жидкости на границе с воздухом,  $\frac{H}{m}$ ;

$p_n$  - парциальное давление насыщенных паров, МПа.

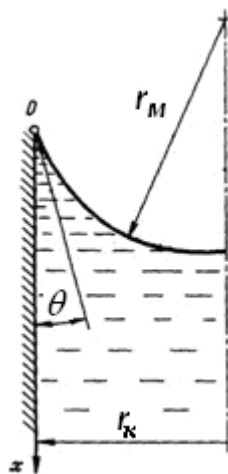


Рисунок.1. – Цилиндрический капилляр (радиус  $r$ ) с мениском (радиус  $r_M$ ) смачивающей жидкости

В случае пропитки древесины выполняется неравенство

$$p_z + p_k \ll p_0. \quad (2)$$

Поскольку фильтрация жидкости в древесине, капилляры которой можно представить как длинные цилиндры, подчиняется закону Пуазейля [1,2], то

$$\frac{dl}{dt} = \frac{r_{эф}^2 \Delta p}{8\eta l} = \frac{r_{эф}^2}{8\eta l} (p_z + p_0 + p_k - p_n), \quad (3)$$

где  $r_{эф}$  - эффективный радиус поры, м.

Для условия пропитки древесины (2), выразив давление пара через закон Клапейрона-Клаузиуса и, учитывая зависимость вязкости от температуры  $\ln \eta_T = A + B/T$ , Альтшулер получил следующее выражение для скорости пропитки

$$\frac{dl}{dt}_{\text{НП}} \approx \frac{r_{\text{эф}}^2 p_0}{8l} \frac{1 - \exp\left[\frac{\lambda}{R} \left(\frac{1}{373} - \frac{1}{T}\right)\right]}{\eta_{373} \exp\left[B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{373}\right)\right]} \quad (4)$$

где  $r_{\text{эф}}$  - эффективный радиус поры, м.

$\lambda$  - молярная или скрытая теплота перехода,  $\frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$  ;

$R$  - универсальная газовая постоянная,  $R = 8,314 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$  ;

373 - температура фазового перехода, К;

$p_0$  - давление фазового перехода, МПа;

$A$  и  $B$  - некоторые постоянные для вязкости жидкости.

Тогда продолжительность полной двухсторонней пропитки бруска

$$t_0 \approx \frac{l_0^2}{r_{\text{эф}}^2 P_0} \frac{\eta_{373} \exp\left[B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{373}\right)\right]}{\left[1 - \exp\left[\frac{\lambda}{R} \left(\frac{1}{373} - \frac{1}{T}\right)\right]\right]} \quad (5)$$

Соотношения (4,5) отражает двойное влияние температуры на конденсационную пропитку. С понижением температуры пропитывающего раствора парциальное давление паров уменьшается (что должно приводить к повышению скорости пропитки) и растет вязкость (что приводит к противоположному эффекту). Окончательный результат определяется значениями  $\lambda$  и  $B$  [16]. После вывода уравнения (5) Альтшулер приводит экспериментальные данные Оснача [16], однако не приводит результаты расчетов по предлагаемым уравнениям и сведения по их коррелируемости с цитируемыми экспериментальными данными.

Выполнить расчет времени полной пропитки бруска по уравнению (5) для экспериментальных данных на рис.2. не удастся, поскольку не указаны размеры бруска древесины.

Рассчитаем скорость пропитки водой при 20°C для сквозного стеклянного капилляра радиусом  $r = 52$  мкм и длиной  $l = 1$  м. Для стеклянного капилляра согласно [7] можно принять  $\cos \theta = 1$ ,

$$\text{Капиллярное давление: } p_k = \frac{2\sigma \cos \theta}{r_k} = \frac{2 \cdot 72,8 \cdot 10^{-3} \cdot 1}{52 \cdot 10^{-6}} = 2800 \text{ Па} .$$

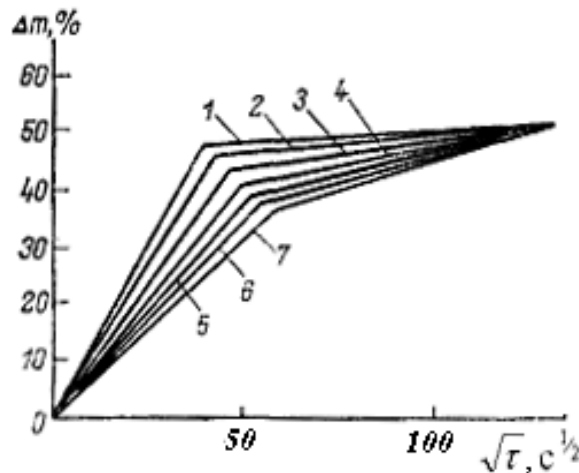


Рисунок. 2. – Влияние температуры на кинетику конденсационной пропитки древесины водой [16]:

1- при температуре пропитывающей жидкости (воды) 20 °С,  
2-40 °С, 3-60 °С, 4-70 °С, 5-80 °С, 6-90 °С, 7-100 °С.

Гидростатическое давление столба жидкости:  $p_z = \rho \cdot g \cdot l = 998 \cdot 9,81 \cdot 1 = 9790 \text{ Па}$ .

Проверим условие (2):  $p_z + p_k = 2800 + 9790 = 12590 \text{ Па} = 0,01259 \text{ МПа} \ll 0,1 \text{ МПа}$ , т.е. условие выполняется. Давление насыщения воды и вязкость при температуре 20 °С примем из таблиц [17]. Тогда скорость пропитки при 20 °С

$$\frac{dl}{dt} \approx \frac{r_{эф}^2 (p_0 - p_H)}{8 \cdot l \cdot \eta} = \frac{(52 \cdot 10^{-6})^2 (0,1 - 0,00238) \cdot 10^6}{8 \cdot 1 \cdot 0,001} = 0,032996 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

при 60 °С

$$\frac{dl}{dt} \approx \frac{r_{эф}^2 (p_0 - p_H)}{8 \cdot l \cdot \eta} = \frac{(52 \cdot 10^{-6})^2 (0,1 - 0,02031) \cdot 10^6}{8 \cdot 1 \cdot 0,0004688} = 0,0037504 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Рассчитаем максимальный объем поглощенной капилляром пропиточной жидкости.

Объем капилляра

$$V_k = \pi r^2 l = 3,14 \cdot (52 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 1 = 8,49056 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3.$$

Масса насыщенного пара 100 °С (масса конденсата)

$$m_{\text{НП}} = m_{\text{КОН}}^{\text{НП}} = \rho_{\text{НП}} \cdot V_0 = 0,589 \cdot 8,49056 \cdot 10^{-9} = 5,00094 \cdot 10^{-9} \text{ кг}.$$

Масса перегретого пара при 140 °С (масса конденсата)

$$m_{\text{ПП}} = m_{\text{КОН}}^{\text{ПП}} = \rho_{\text{ПП}} \cdot V_0 = 0,529 \cdot 8,49056 \cdot 10^{-9} = 4,49151 \cdot 10^{-9} \text{ кг}.$$

Объем конденсата при конденсации насыщенного пара 100 °С

$$V_{\text{КОН}}^{\text{НП}} = \frac{m_{\text{КОН}}^{\text{НП}}}{\rho_{\text{КОН}}} = \frac{5,00094 \cdot 10^{-9}}{958} = 5,22019 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3.$$

Объем конденсата при конденсации перегретого пара 140 °С

$$V_{\text{кон}}^{\text{нп}} = \frac{m_{\text{кон}}^{\text{нп}}}{\rho_{\text{нп}}} = \frac{4,49151 \cdot 10^{-9}}{958} = 4,68842 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3.$$

Максимальный объем поглощенной пропиточной жидкости при конденсации насыщенного пара

$$V_{\text{max}} = V_{\text{к}} - V_{\text{кон}}^{\text{нп}} = 8,49056 \cdot 10^{-9} - 5,22019 \cdot 10^{-12} = 8,48534 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3$$

Максимальный объем поглощенной пропиточной жидкости, при конденсации перегретого пара

$$V_{\text{max}} = V_{\text{к}} - V_{\text{кон}}^{\text{нп}} = 8,49056 \cdot 10^{-9} - 4,68842 \cdot 10^{-12} = 8,48587 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3$$

Из сравнения последних величин видно, что максимальный объем поглощенной пропиточной жидкости мало отличается. В то же время, из результатов расчетов видно, что температура пропиточной жидкости сильно влияет на движущую силу пропитки и вязкость пропиточной жидкости. Для того, чтобы капилляр был заполнен перегретым паром и не происходила его преждевременная конденсация, стенки капилляра должны быть нагреты выше температуры конденсации пара. Это дополнительное тепло перегрева пара и стенок капилляра будет расходоваться на нагрев пропиточной жидкости в капилляре, что приведет к уменьшению вязкости (сил внутреннего трения слоев пропиточной жидкости) и уменьшению сил поверхностного натяжения. С учетом этого, можно ожидать, что скорость пропитки при конденсации перегретого пара будет выше, чем при конденсации насыщенного. Следовательно, скорость пропитки будет определяться временем остывания перегретого пара, конденсата и, и главным образом, стенки капилляра до температуры пропиточной жидкости, при которой сумма сил внутреннего трения о поверхность стенок капилляра, внутреннего трения слоев жидкости и сил поверхностного натяжения превысит движущую силу пропитки. Этому факта не учитывают уравнения (4,5), позволяющие находить скорость и время пропитки для отдельно взятого значения температуры, не связанного с теплообменом во всей системе. Таким образом, для нахождения скорости пропитки необходимо решение задачи нестационарного теплообмена, при котором тепловой баланс имеет вид

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = Q_5 + Q_6 \quad (6)$$

где  $Q_1$  - приход тепла за счет охлаждения неподвижного перегретого пара;

$Q_2$  - приход тепла за счет конденсации пара;

$Q_3$  - приход тепла за счет охлаждения конденсата;

$Q_4$  - приход тепла за счет охлаждения стенки капилляра;

$Q_5$  - расход тепла на нагрев неподвижной пропитывающей жидкости на внешней поверхности капилляра

$Q_6$  - расход тепла на нагрев поглощаемой пропиточной жидкости на



внутренней поверхности капилляра, скорость течения которой зависит от многих факторов (температуры, перепада давления, угла смачивания, поверхностного натяжения; влажности, шероховатости и химического состава стенок капилляра и др.[6-14]).

С учетом последнего, можно попытаться использовать вышеприведенное математическое описание пропитки древесины (1-4) за счет конденсации насыщенного пара при атмосферном давлении для описания процесса пропитки, основанного на использовании перегретого пара, если внести следующие изменения в граничные условия (7-16):

Весь воздух из капилляров вытеснен и замещен на перегретый пар.

Выполняется условие

$$p_z + p_k \ll p_0. \quad (7)$$

Температура фазового перехода воды (парообразования)

$$T_0 = 373 K \text{ при } p_0 = 0,1 \text{ МПа}. \quad (8)$$

Температура пропитываемой жидкости меньше температуры парообразования воды

$$T < T_0. \quad (9)$$

Пар перегретый (граница повышения температуры перегрева пара – целостность материала и оборудования) при

$$\Delta T > 0 \quad (10)$$

Пар насыщенный при

$$\Delta T = 0 \quad (11)$$

Максимальная движущая сила

$$\Delta p = p_0 - p_n = p_0 = 0,1 \text{ МПа} \text{ при } p_n \approx 0. \quad (12)$$

Перед началом пропитки давление внутри капилляра равно атмосферному

$$p(x,0) = p_0. \quad (13)$$

Первоначальное давление на поверхности капилляра постоянно и равно атмосферному

$$p(0,t) = p_0. \quad (14)$$

В начальной момент глубина пропитки

$$t = 0, l = 0. \quad (15)$$

Глубина конденсационной пропитки будет равна предельной глубине пропитки  $l = l_\infty$ , при которой сумма сил внутреннего трения о поверхность стенок капилляра, внутреннего трения слоев жидкости и сил поверхностного натяжения будет равна движущей силе пропитки.

Общеизвестно, что применение вакуумирования, избыточного давления, а также комбинации одновременного воздействия вакуумирования капилляров и избыточного давления на жидкость позволяет увеличить скорости пропитки. С уменьшением вязкости пропитываемой жидкости скорость

пропитки возрастает. Поэтому для интенсификации пропитки практикуют подогрев пропитываемых жидкостей, например, в производствах кровельных материалов, шпал и т. д. [1,2,12]. Также используется предварительное нагревание пористых тел перед пропиткой жидкостями, которые в результате полимеризации или кристаллизации переходят в твердое состояние [15]. При этом жидкость находится при высокой температуре сравнительно недолго, и опасность ее термического разложения исключается [15].

**Вывод.** Предлагаемый метод интенсификации пропитки за счет конденсации перегретого пара совмещает в себе:

1. Конденсацию перегретого пара, при которой конденсат смачивает стенки капилляра, и дальнейшее проникновение пропиточной жидкости идет по смоченной поверхности капилляра, что уменьшает силы трения пропиточной жидкости о стенки капилляра.
2. Конденсацию перегретого пара в капилляре, что приводит к образованию вакуума, и пропиточная жидкость будет проникать в капилляр под атмосферным давлением, которое становится избыточным по отношению к давлению в капилляре.
3. Дополнительный нагрев пропиточной жидкости как на внешней, так и на внутренней поверхностях капилляра за счет теплоты стенок капилляра тем больше, чем выше температура стенки.

В последующих сообщениях (после получения экспериментальных данных о глубине пропитки в условиях конденсации насыщенного пара) будет выполнено сравнение скорости и глубины пропитки при использовании насыщенного и перегретого пара, а также приведены результаты факторного эксперимента, которые позволят определить оптимальные параметры процесса.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Аксельруд Г. А., Альтшулер М. А. Введение в капиллярно-химическую технологию. — Химия, 1983. — 264 с.
2. Серговский П. С., Расев А. И. Гидротермическая обработка и консервирование древесины: Учебник для вузов.—4-е изд., перераб. и доп.— М.: Лесн. пром-сть, 1987.— 360с.
3. Гамов М.А., Задорский В.М. Синергетические основы средств и методов управления технологическими процессами в капиллярно-пористых телах//Scientific World. — 2015. — Выпуск №4(41), Том 5,. Стр.32-36
4. Пат. 67662 Украина. МКИ В 05 D1/18; B05D3/00; B29B15/10. Method for impregnation of capillary porous material / Zadorskyi Viliam Mykhailovych (UA): Ukrainian State Chemical Techn (UA). Оpubл. 15.06.2004 .
5. Михайлов Ю. М. Сушка перегретым паром. — М., 1967. —198 с.



6. Хейфец Л. И., Неймарк А.В. Многофазные процессы в пористых средах. — М.: Химия, 1982. — 320 с.
7. Воюцкий С. С. Физико-химические основы пропитывания и импрегнирования волокнистых материалов дисперсиями полимеров. — Л.: Химия, 1969. — 336 с.
8. Порхаев А. П. Кинетика впитывания жидкости элементарными капиллярами и пористыми материалами. — Колл. журн., 1949, т. 11, № 5, с. 346—353.
9. Березкин В. В., Чураев Н. В. Изменение краевых углов в ходе капиллярного поднятия. — Колл. журн., 1982, т. 44, № 3, с. 417—423.
10. Грибанова Е. В., Молчанова А. И. Исследование зависимости угла смачивания от скорости движения мениска. — Колл. журн., 1978, т. 40, № 2, с. 217—223.
11. Мартынов Р. А., Малев В. В., Грибанова Е. В. Кинетика капиллярного поднятия жидкости. — Колл. журн., 1983, т. 45, № 2, с. 245—250.
12. Сумм Б. д., Рауд Э. А., Горюнов Ю. В. Начальная стадия капиллярного впитывания. — Колл. журн., 1979, т. 41, № 3, с. 601—604.
13. Касимов И.К., Федотов Е.Д. Пропитка цементного камня органическими вяжущими. — Л.: Стройиздат, 1981. — 168 с.
14. Гидродинамика пористых графитов. Костиков В.И., Белов Г.В. — М.: Metallurgy, 1988. — 208 с.
15. Косачевский Л.Я., Косачевская Е.А., Сюи Л.С. О пропитке нагретого наполнителя неньютоновской жидкостью // ИФЖ.1991.Т.61, №4. С.613-620.
16. Оснач Н. А. Проницаемость и проводимость древесины. — М.: Лесн. пром-сть, 1964. — 181 с.
17. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологи. Учебное пособие для вузов/Под. ред. чл.-кор. АН СССР П.Г. Романкова. —10-е изд., перераб. и доп. — Л.: Химия, 1987. —576 с.

УДК 622. 23: 05459

## ІННОВАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ДЕЗІНТЕГРАЦІЇ РУДИ В КУЛЬОВИХ БАРАБАННИХ МЛИНАХ ПЕРШОЇ СТАДІЇ ПОДРІБНЕННЯ

**Є.В. Калганков**

аспірант відділу механіки еластомірних конструкцій гірничих машин, інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України, м. Дніпропетровськ, Україна, e-mail: [kalhankov.ye.v@dsau.dp.ua](mailto:kalhankov.ye.v@dsau.dp.ua)

**Анотація.** В статті розглянуто питання ресурсо- та енергозбереження при дезінтеграції руди в барабанних кульових млинах, встановлених на різних стадіях подрібнення. Розглядаються інноваційні технології подрібнення та можливі шляхи інтенсифікації процесу дезінтеграції за рахунок зміни геометричних параметрів млинів, профілю та форми футеровки барабанів, а також її матеріалу. Наведено результати промислових випробувань металевої, гумово-металевої та гумової футеровок на першій стадії подрібнення руди.

**Ключові слова:** футеровка, гумова футеровка, метало-гумова футеровка, стадія подрібнення, млин, барабанний млин, рудопідготовка, подрібнення, втомний знос, напружено-деформований стан.