

У. Р. ИЛЬЯСОВ

## ОСОБЕННОСТИ ФИЛЬТРАЦИИ ПРИ РАВНОМЕРНОМ ОБЪЕМНОМ НАГРЕВЕ ВЛАЖНОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ

Рассмотрены процессы тепломассопереноса с учетом фазовых превращений в пористых средах под воздействием равномерного распределенных объемных источников тепла. *Фазовый переход, водонасыщенность, сушка, пористая среда*

### ВВЕДЕНИЕ

Наиболее перспективным способом интенсификации процессов переноса в пористых средах является микроволновый или сверхвысокочастотный (СВЧ) нагрев. В ряде случаев он обеспечивает более равномерное распределение температурного поля и, как следствие, уменьшение механических нагрузок на материал [1, 2, 3].

### 1. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Для описания процессов тепломассопереноса при равномерном объемном нагреве влажной пористой среды примем следующие допущения. Скелет пористой среды несжимаем и неподвижен ( $\rho_s = \text{const}$ ), пористость постоянна ( $m = \text{const}$ ). Температуры пористой среды и насыщающих фаз совпадают. Удаление влаги происходит в газофазном режиме, а жидкость неподвижна ( $v_l = 0$ ).

В рамках принятых допущений уравнение сохранения массы примет вид

$$m \frac{\partial}{\partial t} (\rho_l S_l + \rho_v S_v) + r^{-n} \frac{\partial}{\partial r} (r^n m S_v \rho_v v_v) = 0, \quad (1)$$

$$S_l + S_v = 1,$$

где  $\rho_i$ ,  $S_i$  и  $v_i$  – плотность, объемное содержание фаз в порах и скорость фаз. Значения  $n = 0, 1$  и  $2$  соответствуют плоской, радиальной и сферической симметрии. Индексы  $l, v$  относятся к жидкости и пару.

Для фильтрации примем закон Дарси

$$m S_v \rho_v v_v = - \frac{k_v}{\mu_v} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (2)$$

где  $k_v$  и  $\mu_v$  – коэффициент фазовой проницаемости и динамической вязкости фаз.

Уравнение притока тепла запишем в виде

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + m \rho_v S_v c_v v_v \frac{\partial T}{\partial r} = r^{-n} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^n \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) +$$

$$+ m S_v \left( \frac{\partial p}{\partial t} + v_v \frac{\partial p}{\partial r} \right) + m l \rho_l \frac{\partial S_l}{\partial t} + Q,$$

$$\rho c = (1 - m) \rho_s c_s + m (\rho_v c_v S_v + \rho_l c_l S_l),$$

здесь  $\rho c$  – удельнообъемная теплоемкость системы,  $c_i, \lambda_i$ , ( $i = l, v$ ) – удельная теплоемкость фаз и коэффициент теплопроводности фаз,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности системы,  $l$  – теплота фазового перехода,  $Q$  – плотность мощности объемных тепловых источников.

Для пара примем уравнение Менделеева – Клапейрона, а воду будем считать несжимаемой:

$$\rho_v = \frac{p}{R_v T}, \quad \rho_l = \text{const}, \quad (4)$$

где  $R_v$  – приведенная газовая постоянная. В области совместного присутствия пара и жидкости выполняется уравнение Клапейрона – Клаузиуса, из которого следует следующее условие:

$$T_s(p) = T \ln^{-1}(p^*/p), \quad (5)$$

где  $T, p^*$  – эмпирические параметры, определяемые на основе табличных данных для зависимости температуры насыщения от давления.

Для задания фазовой проницаемости пара при условии неподвижности жидкости используем формулы Козейни – Кармана

$$k_v = k K_v = k \frac{m^{13}}{(1 - m')^2}, \quad (6)$$

$$m' = m S_v, \quad k = k_0 / m^3,$$

здесь  $m'$  – «живая» пористость.

### 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим плоско-одномерную ( $n = 0$ ), радиальную ( $n = 1$ ) и сферическую ( $n = 2$ ) задачи объемного теплового воздействия на влажную пористую среду. В исходном состоянии порис-

тый образец толщиной  $2R$  содержит воду с объемным влагосодержанием, кроме того, будем полагать, что в порах находится насыщенный пар при давлении  $p_0$  и соответствующей этому давлению равновесной температуре  $T = T_s(p)$ . Это позволяет исключить переходные процессы установления температуры и вытеснения воздуха. В момент времени  $t = 0$  в объеме возникают равномерно распределенные тепловые источники. Давление на внешней границе равно  $p_e$ . Принимая во внимание осевую симметрию, начально-граничные условия запишутся в виде:

$$\begin{aligned} t = 0, p = p_0, S_l = S_{l0}, \\ t > 0, r = 0, \frac{\partial p}{\partial r} = 0, \\ t > 0, r = R, p = p_e. \end{aligned} \quad (7)$$

Важной характеристикой СВЧ воздействия является глубина проникновения, на которой обеспечивается равномерность электромагнитного поля (ЭМП). В общем случае глубина проникновения ЭМП зависит от частоты поля, диэлектрической проницаемости, коэффициента потерь (водонасыщенности). В [2] показано, что для образцов толщиной  $d \leq 10^{-1}$  м интенсивность выделения тепла в объеме можно считать равномерной.

В случае высокоинтенсивного внешнего воздействия основное влияние на динамику температурного поля будет оказывать фазовый переход и подвод тепла в виде объемно-распределенных источников тепла. С учетом данного предположения можно получить аналитическое решение для водонасыщенности

$$\begin{aligned} S_l = S_{l0} + \frac{\rho c T'(p)}{ml\rho_l} (p - p_0) - \frac{Qt}{ml\rho_l}, \\ T'(p) = dT / dp. \end{aligned} \quad (8)$$

Для определения давления в пористой среде получено следующее уравнение:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{z} \left( \chi^{(p)} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^n \tilde{\rho}_v K_v \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{(\tilde{\rho}_l - \tilde{\rho}_v) Q}{ml\rho_l} \right), \quad (9)$$

$$z = (\tilde{\rho}_l - \tilde{\rho}_v) \frac{T'(p)\rho c}{ml\rho_l} + \frac{(1 - S_l)}{R_v T_s(p)} \left( 1 - \frac{1}{\ln(p/p_0)} \right),$$

здесь  $\chi^{(p)} = \frac{k p_0}{m\mu_v}$ ,  $\tilde{\rho}_i = \frac{\rho_i}{\rho_{v0}}$ .

Таким образом, решение задачи свелось к решению дифференциального уравнения в частных производных (9) с начально-граничными условиями (7).

### 3. АНАЛИЗ РЕШЕНИЙ

На рис. 1 приведены зависимости максимального давления (*a*) и водонасыщенности (*б*) в центре образца от времени при интенсивности внешнего воздействия  $q = 50$  кВт/м<sup>3</sup>. Исходная водонасыщенность  $S_{l0} = 0,5$ , размер образца  $R = 0,1$  м, проницаемость  $k = 10^{-13}$  м<sup>2</sup>, пористость  $m = 0,1$ . Как видно из рис. 1, давление в пористой среде повышается в 1,5–2 раза в зависимости от симметрии. Полное высушивание образца занимает порядка 60 мин., после чего наблюдается ускоренный сброс давления в образце (точки излома на рис. 1, *a*).

Заметим, что поровое давление начинает уменьшаться задолго до полного высушивания (20–30 мин.) по мере выкипания жидкости и увеличения «живой» пористости. При этом величина давления лимитируется оттоком пара.

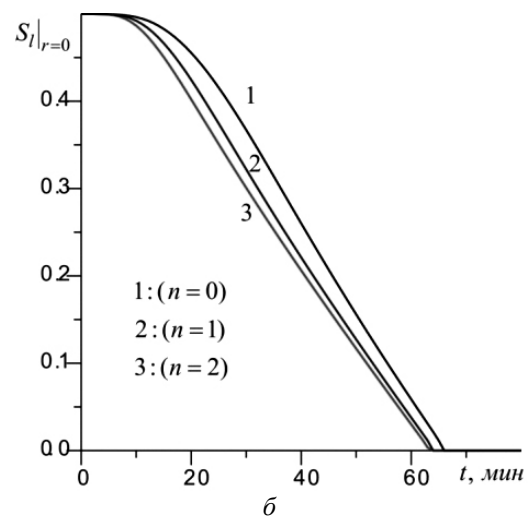
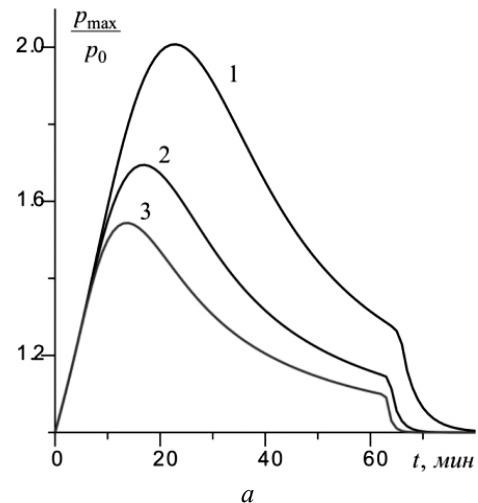
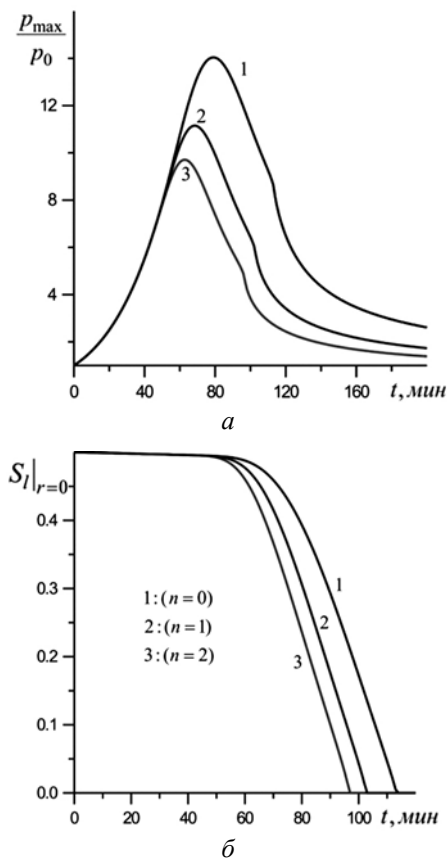


Рис. 1. Динамика изменения давления и водонасыщенности в центре образца ( $r = 0$ ): *a* – максимальное давление, *б* – водонасыщенность

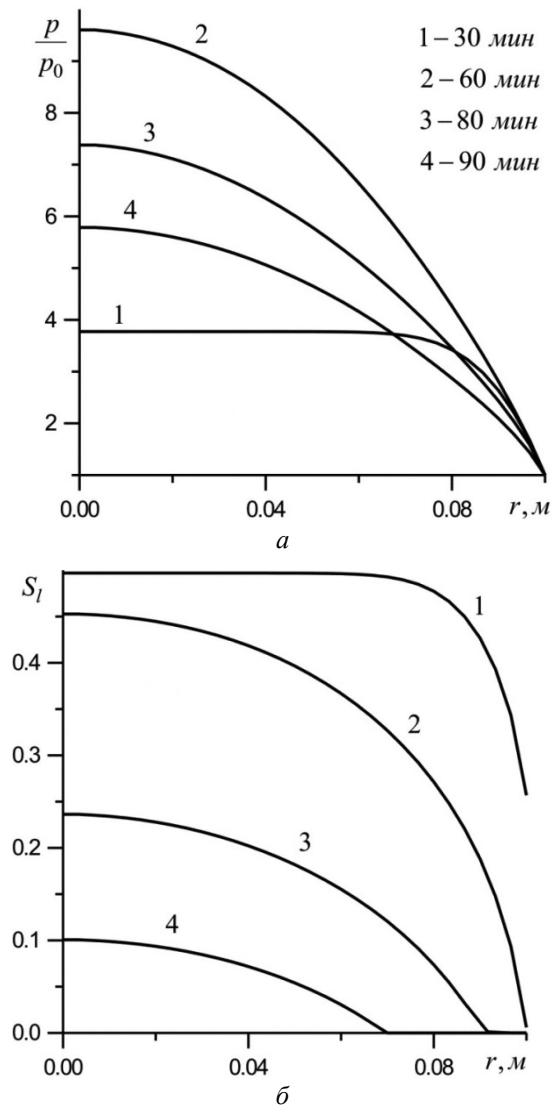
Зависимости максимального давления ( $a$ ) и водонасыщенности ( $\bar{b}$ ) от времени в низкопроницаемой среде ( $k = 10^{-15} \text{ м}^2$ ) представлены на рис. 2. Для исходных параметров, характеризующих пористую среду и интенсивность внешнего воздействия, приняты те же значения, что и для рис.1. На основе анализа рис. 1 и 2 можно выделить три характерных периода процесса:

- первый, когда давление в пористой среде повышается в основном за счет изменения условия равновесия. Геометрия задачи на величину давления в этом случае не влияет;
- второй, когда начинается объемное кипение воды, увеличивающее «живую» пористость и начинается сброс давления. В зависимости от геометрии задачи (плоская, радиальная или сферическая) наблюдается значительная интенсификация массопереноса и уменьшение максимального порового давления вследствие увеличения площади поверхности;
- третий период начинается, когда вся вода выкипела и происходит релаксация давления, которая в высокопроницаемых средах определяется геометрией задачи (рис.1), а в низкопроницаемых – проницаемостью (рис.2).



**Рис. 2.** Динамика процесса в низкопроницаемой среде ( $k = 10^{-15} \text{ м}^2$ ):  $a$  – максимальное давление,  $\bar{b}$  – водонасыщенность

На рис. 3 приведены распределения давления ( $a$ ) и водонасыщенности ( $\bar{b}$ ), соответствующие рис.2 для различных моментов времени. Как видно, в низкопроницаемой среде на начальном этапе реализуется схема выкипания, близкая к фронтальной (линии 1 и 2 на правом рисунке). В дальнейшем возникает сухая зона (линия 3), которая углубляется по мере высушивания.



**Рис. 3.** Профилограммы в различные моменты времени для случая сферической симметрии в низкопроницаемой среде:  $a$  – давления и  $\bar{b}$  – водонасыщенности

### ВЫВОДЫ

Показано существование трех характерных этапов процесса высушивания: 1 – интенсивный рост величины давления, зависящий в основном от изменения условий фазового перехода; 2 – сброс давления, вызванный выкипанием воды и увеличением «живой» пористости и оттоком

пара; 3 – остаточная релаксация давления, которая в высокопроницаемых средах определяется геометрией задачи, а в низкопроницаемых – величиной проницаемости.

Установлено, что в низкопроницаемых средах реализуется схема выкипания, близкая к фронтальной, а также возникает подвижная граница, разделяющая сухую и влажную зоны.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Афанасьев А. М., Сипливый Б. Н.** Зависимость качества сушки СВЧ-излучением от глубины проникновения электромагнитной волны // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2008. Т. 11. № 1. С. 95–99.
2. **Галкин В. П.** Дровесиноведческие аспекты технологических режимов и оборудование для микроволновой сушки пиломатериалов: автореф. дис. д-ра техн. наук. М.: МГУЛ, 2009. 38 с.
3. **Костомаров Ю. В.** Фильтрация кипящей жидкости в пористой среде при объемном тепловом воздействии // Резонансные и нелинейные явления в конденсированных средах: сб. науч. тр. Уфа: БГУ, 1999. Т.2. С. 77–80.

#### ОБ АВТОРАХ

**Ильясов Урал Рафкатович**, доц. каф. физики и математики филиала УГАТУ в г. Ишимбае. Дипл. преп. физики и математики (СГПИ, 1999). Кандидат физ.-мат. наук (2003). Исслед. в области теплопереноса в пористых средах с фазовыми переходами.