

Моделирование объемного нагрева влажной среды с учетом подвижности жидкости

Ильясов У.Р.*, Долгушев А.В.**

*Филиал Уфимского государственного авиационного технического университета, Ишимбай

**Стерлитамакская государственная педагогическая академия им. З. Бишовой, Стерлитамак

Рассмотрена задача объемного теплового воздействия на влажную пористую среду. Получены численные решения, проанализировано влияние подвижности жидкости на динамику процесса тепломассопереноса. Установлено, что подвижность жидкости приводит к более мягкому режиму сушки. Показано, что в низкопроницаемых средах жидкость можно считать неподвижной.

1. Введение

Использование микроволновой энергии позволяет значительно оптимизировать процессы сушки. В [1] рассмотрена задача сушки пористой среды объемными тепловыми источниками для случая малой влажности так, что можно пренебречь подвижностью жидкости. Определенный интерес представляет оценка влияния подвижности жидкости на процесс фильтрации. Отметим, что в ряде случаев интенсивность источников тепла можно считать равномерной по объему [2, 3].

2. 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. Система уравнений, описывающая процесс сушки, включает уравнения баланса массы, энергии и закон Дарси:

$$\begin{aligned} & m \frac{\partial}{\partial t} (\rho_l S_l + r \rho_v S_v) + \\ & r^{-n} \frac{\partial}{\partial r} (r^n m (S_v \rho_v v_v + S_l \rho_l v_l)) = 0, \\ & \rho c \frac{\partial T}{\partial t} + m (\rho_l S_l c_l v_l + \rho_v S_v c_v v_v) \frac{\partial T}{\partial x} = \\ & = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + m S_v \left(\frac{\partial p}{\partial t} + v_v \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \\ & + m l \rho_l \left(\frac{\partial S_l}{\partial t} + v_l \frac{\partial S_l}{\partial x} \right) + Q, \\ & m S_i \rho_i = - \frac{k_i}{\mu_i} \frac{\partial p}{\partial r}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} m \rho c &= (1 - m) \rho_s c_s + m (\rho_v c_v S_v + \rho_l c_l S_l), \\ m S_l + S_v &= 1. \end{aligned}$$

где ρ_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 симметриям. Индексы l, v относятся к жидкости и пару (*liquid, vapor*); k_i и μ_i — коэффициенты фазовой проницаемости и динамической вязкости фаз; ρc — удельнообъемная теплоемкость системы; $c_i, \lambda_i, (i = l, v)$ — удельная теплоемкость фаз и коэффициент теплопроводности фаз; λ — коэффициент теплопроводности системы; l — теплота фазового перехода; Q — плотность мощности объемных тепловых источников.

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

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

где R_v — приведенная газовая постоянная. В области совместного присутствия пара и жидкости примем условие

$$T_s(p) = T_* \ln^{-1}(p_*/p).$$

Для фазовых проницаемостей были использованы следующие выражения [4]:

$$\begin{aligned} k_i &= k_0 K_i, \\ K_v &= \begin{cases} (1 + 3S_l) \left(1 - \frac{S_l}{0,9}\right)^{3,5}, & 0 \leq S_l < 0,9, \\ 0, & 0,9 \leq S_l \leq 1. \end{cases}, \\ K_l &= \begin{cases} \left(\frac{S_l - 0,2}{0,8}\right)^{3,5}, & 0,2 < S_l \leq 1, \\ 0, & 0 \leq S_l \leq 0,2. \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

3. Постановка задачи

Рассмотрим задачу объемного теплового воздействия на влажную пористую среду. В исходном состоянии пористый образец толщиной $2R$ ($R \ll 10^{-1}$ м) содержит воду с объемным влагосодержанием S_{l0} , кроме того, будем полагать, что в порах находится насыщенный пар при давлении p_0 и соответствующей этому давлению равновесной температуре $T = T_s(p)$.

В момент времени $t = 0$ в объеме возникают равномерно распределенные тепловые источники. Давление на внешней границе равно p_e . Начально-граничные условия запишутся в виде:

$$\begin{aligned} t = 0, \quad p = p_0, \quad S_l = S_{l0}, \\ t > 0, \quad r = \pm R, \quad p = p_e. \end{aligned} \quad (3)$$

В случае высокоинтенсивного внешнего воздействия основной вклад на динамику температурного поля будет оказывать фазовый переход и подвод тепла в виде объемно-распределенных источников тепла. С учетом данного предположения уравнение притока тепла запишем в виде

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + m S_l \rho_l c_l v_l \frac{\partial T}{\partial r} = m l \rho_l \frac{\partial S_l}{\partial t} + Q.$$

Из системы уравнений получим систему уравнений для определения давления и водонасыщенности в пористой среде

$$\begin{aligned} z \frac{\partial P}{\partial t} = \kappa_v^{(p)} \frac{\partial}{\partial x} \left[(\rho_v K_v + \rho_l K_l \tilde{\mu}) \frac{\partial P}{\partial x} \right] + \frac{(\rho_l - \rho_v) q}{m l \rho_l} - \\ - (\rho_l - \rho_v) \kappa_v^{(p)} \tilde{\mu} \frac{K_l}{S_l} \frac{\partial P}{\partial x} \frac{\partial S_l}{\partial x} - \kappa_v^{(p)} \tilde{\mu} \frac{K_l}{S_l} \frac{\partial P}{\partial x} \frac{\partial S_l}{\partial x} + \\ + \frac{(\rho_l - \rho_v)}{m l \rho_l} [m T_0 \Theta'_p \kappa_v^{(p)} (\rho_v c_v K_v + \\ + \rho_l c_l K_l \tilde{\mu}) + m p_0 (1 - S_l) \kappa_v^{(p)} K_v / S_l] \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)^2, \\ z = \frac{(\rho_l - \rho_v) \rho c T_0 \Theta'_p}{m l \rho_l} + \rho_{v0} (1 - S_l) \left(\frac{1}{\Theta} - \frac{1}{\Theta_*} \right) - \\ - \frac{(\rho_l - \rho_v) m p_0 (1 - S_l)}{m l \rho_l}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Здесь } \chi = \frac{k_* p_0}{m \mu_v}; \quad \tilde{Q} = \frac{Q}{m l \rho_l}; \quad \tilde{Q}_l = \frac{c_l}{m l}; \quad \tilde{Q}_s = \frac{\rho_s c_s}{m l \rho_l}; \\ \tilde{\rho}_i = \frac{\rho_i}{\rho_{v0}}. \end{aligned}$$

Таким образом, решение задачи об объемном тепловом воздействии на влажную пористую среду равномерно распределенными источниками тепла свелось к решению системы дифференциальных уравнений в частных производных с начально-граничными условиями. Отметим, что в [1] удалось получить аналитическое решение для водонасыщенности S_{l0} .

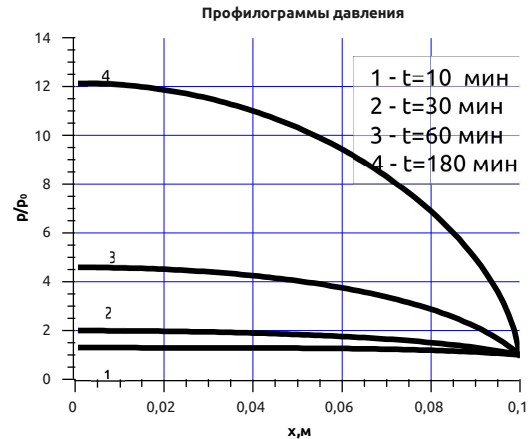


Рис. 1. Динамика изменения давления и водонасыщенности в центре образца ($r = 0$) при начальной водонасыщенности $S_{l0} = 0,5$

4. Анализ решений

На рис. 1 приведены зависимости максимального давления в высокопроницаемой среде ($k = 10^{-12}$ м²) для исходной водонасыщенности $S_{l0} = 0,5$. Мощность источников $Q = 30$ кВт/м³. Сплошная линия соответствует неподвижной жидкости, пунктирная — подвижной. Как видно из рис. 1 в случае подвижной жидкости внутрипоровое давление значительно ниже (пунктирная линия).

Для более влажных образцов ($S_l \geq 0,8$), влияние подвижности жидкости на максимальное поровое давление выражено еще сильнее (рис. 2). Это связано с тем, что подвижная жидкость перераспределяется в материале, увеличивая «живую» пористость в центре образца, тем самым давая возможность для оттока пара и сброса давления. Более наглядное представление о причине столь значительной разницы дает рис. 2.

На рис. 3 приведены распределения водонасыщенности в пористой среде в различные моменты времени. Сплошные линии — неподвижная жидкость, пунктирные — подвижная жидкость. Линии 1, 2 и 3 соответствуют моментам времени 20, 40 и 60 мин. Исходная водонасыщенность $S_l = 0,8$. В случае неподвижной жидкости (сплошные линии), первые 40 мин водонасыщенность в центре образца практически не изменяется (линии 1, 2, или см. рис. 2), что затрудняет отток пара и приводит к резкому возрастанию давления. Подвижная жидкость (пунктирные линии) за счет градиента давления и потока пара от центра материала к его внешним границам перераспределяется, позволяя сбросить поровое давление.

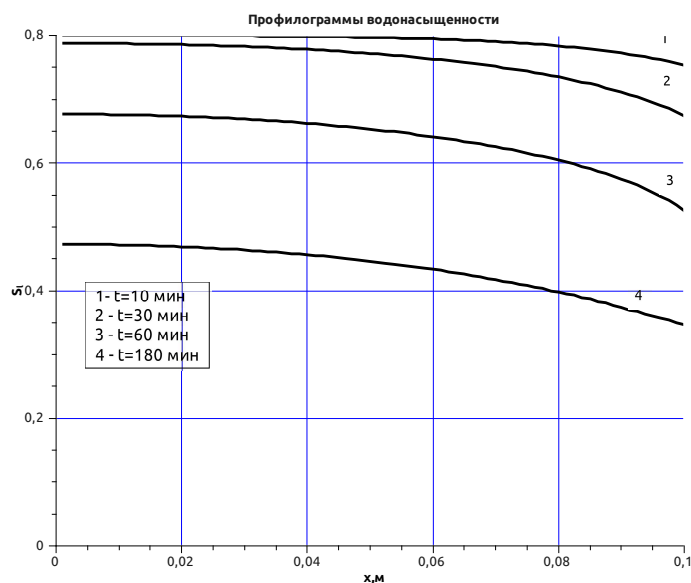


Рис. 2. Зависимости максимального давления и водонасыщенности при начальной водонасыщенности $S_{10} = 0,8$

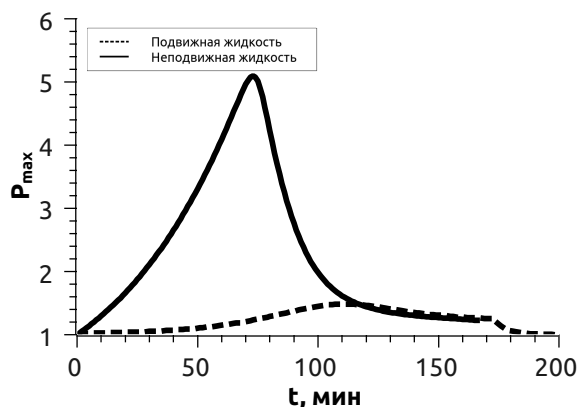


Рис. 3. Профилограммы водонасыщенности в различные моменты времени. Линии 1, 2 и 3 соответствуют моментам времени 20, 40 и 60 мин

5. Выводы

Установлено что подвижность жидкости при равномерном объемном нагреве влажной пористой среды приводит к гораздо более мягкому режиму сушки. Это связано с перераспределением жидкости в материале и увеличением «живой» пористо-

сти, способствующей оттоку пара и сбросу давления.

Список литературы

- [1] Ильясов У.Р. Особенности фильтрации при равномерном объемном нагреве пористой среды // Мавлютовские чтения: Российская научно-техническая конференция, посвященная 85-летию член-корр. РАН, д.т.н., профессора Р.Р. Мавлютова: сб. трудов в 5 т. Том 4. Механика жидкости и газа / Уфимск. гос. авиац. ун-т. Уфа: УГАТУ, 2011. С. 91–95
- [2] 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.
- [3] Галкин В.П. Древесиноведческие аспекты технологических режимов и оборудование для микроволновой сушки пиломатериалов: автореферат дис. д-ра тех. наук. М.: МГУЛ, 2009. 38 с.
- [4] Васильев В.И., Попов В.В., Тимофеева Т.С. Вычислительные методы в разработке месторождений нефти и газа. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2000. 126 с.