



УДК 532.546; 536.421.

ИНЖЕКЦИЯ ПАРА В ПОРИСТУЮ СРЕДУ, НАСЫЩЕННУЮ ГАЗОМ И ПАРАФИНОМ

Ф. И. Шагиева, В. Ш. Шагапов

Бирская государственная социально-педагогическая академия, Бирск

Аннотация. Рассматривается задача о нагнетании пара в пористую среду, насыщенную газом. Полагается, что скелет пористой среды состоит из двух составляющих, для одной из которых температура плавления ниже, чем температура закачиваемого пара. Поэтому эта составляющая будет претерпевать фазовый переход с дополнительным потреблением тепла. Такого типа задачи возникают в процессах, связанных с очисткой пористой среды от склеротических бляшек, добычей битумных нефтей, регенеризацией пористых катализаторов.

Ключевые слова: пористая среда, фильтрация, битум, фазовые переходы

1. Введение

В качестве модельного примера составляющего, претерпевающего фазовый переход, примем парафин. При инъекции влажного пара в пористую среду, насыщенную в исходном состоянии газом и парафином, будем полагать, что скелет пористой среды несжимаем и неподвижен. При этом в пористой среде образуется три характерные зоны: ближняя, примыкающая к границе пористой среды, в которой фильтруется закачиваемый влажный пар; вторая, промежуточная зона водонасыщения; дальняя, соответствующая исходному состоянию пористой среды, заполненная газом и парафином (Рис. 1). Будем полагать, что в промежуточной водонасыщенной зоне возникает еще одна граница, где твердый парафин переходит в расплавленное состояние.

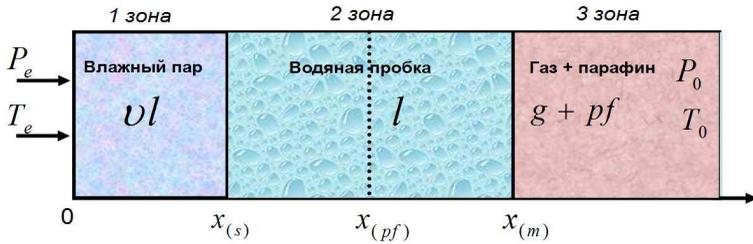


Рис. 1. Образование характерных зон в пористой среде

2. Математическая модель

В рамках принятых допущений запишем уравнение сохранения масс (уравнение неразрывности):

$$\frac{\partial(m\rho_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(m\rho_i v_i) = 0 \quad (i = lv, l, g, p), \quad (1)$$

где ρ_i и v_i — плотность и скорость фаз. Здесь и в дальнейшем нижние индексы $i = lv, l, g, s, p$ будут относиться соответственно к влажному пару, воде, газу, пористому скелету и парафину.

Процессы фильтрации влажного пара, воды и газа описываются законом Дарси

$$mv_i = -\frac{k}{\mu_i} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \quad (i = lv, l, g), \quad (2)$$

где p , k и μ_i — давление, коэффициент абсолютной проницаемости и динамическая вязкость фаз. Уравнение притока тепла в однотемпературном приближении, пренебрегая связанными с баротермическим эффектом слагаемыми, запишем в зоне фильтрации влажного пара в виде:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_{lv} c_{lv} m v_{lv} \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + m \rho_{lv} l \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} + v_{lv} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right), \quad (3)$$

$$\rho c = m \rho_{lv} c_{lv} + (1 - m_s)(1 - \nu) \rho_{SCS} + \nu \rho_p c_p;$$

$$\lambda = m \lambda_{lv} + (1 - m) \lambda_S; \quad m = m'(1 - \nu)$$

и в зоне фильтрации воды и газа

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_j c_j m v_j \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (4)$$

$$\rho c = m \rho_j c_j + (1 - m_s)(1 - \nu) \rho_{SCS} + \nu$$

$$\rho_p c_p; \lambda = m\lambda_j + (1 - m)\lambda_S \quad (j = l, g).$$

Здесь T , ρ_{lv} , φ — температура, средняя плотность влажного пара, массовое содержание воды в паре; ρc — удельно-объемная теплоемкость системы «пористая среда–пар, вода или газ»; λ — коэффициент теплопроводности системы «пористая среда–пар, вода или газ»; c_i , λ_i ($i = lv, l, g$) — удельная теплоемкость фаз и коэффициент теплопроводности фаз; l_w — удельная теплота фазового перехода воды. Поскольку на значения ρc и λ основной вклад вносят параметры скелета пористой среды, то во всей области фильтрации (в области фильтрации пара, воды и газа) будем полагать их значения постоянными ($\rho c \approx \rho_s c_s = \text{const}$, $\lambda \approx \lambda_s = \text{const}$).

Для средней плотности влажного пара можем записать

$$\frac{1}{\rho_{lv}} = \frac{\varphi}{\rho_l} + \frac{(1 - \varphi)}{\rho_v}, \quad (5)$$

где ρ_v и ρ_l — плотности пара и воды в капельках. Для пара и газа примем уравнение Менделеева-Клапейрона, а плотность воды — константой

$$\rho_j = \frac{p}{R_j T} \quad (j = v, g) \quad \rho_l = \text{const}, \quad (6)$$

где R_j — приведенная газовая постоянная. В зоне совместного присутствия пара и жидкости, температура и давление удовлетворяют уравнению Клапейрона-Клаузиуса

$$\frac{dp}{dT} = \frac{l}{T(\rho_v^{-1} - \rho_l^{-1})}. \quad (7)$$

Приведенные выше уравнения дополним соотношениями на границе фазового перехода ($x = x_{(s)}$) между областями фильтрации влажного пара и воды, следующими из закона сохранения массы и из условия теплового баланса:

$$m\rho_{lv}(v_{lv} - \dot{x}_{(s)}) = m\rho_l(v_l - \dot{x}_{(s)}), \quad (8)$$

$$\begin{aligned} - \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right)^+ + \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right)^- &= m\rho_l l (1 - \varphi_{w(s)})(v_l - \dot{x}_{w(s)}) \\ \left(\dot{x}_{w(s)} = \frac{dx_{w(s)}}{dt} \right). & \end{aligned} \quad (9)$$

Значки «+» и «-» соответствуют значению тепловых потоков перед и за границей фазового перехода. На этой поверхности температуру и давление полагаем непрерывными: $T^+ = T^- = T_{w(s)}$, $p^+ = p^- = p_{(s)}$. Здесь и в дальнейшем нижний индекс (s) соответствует значениям параметров на границе фазовых переходов.

В соответствии с вышесказанным, наряду с фронтом фазового перехода, введем еще контактную границу ($x = x_{(m)}$) между областями фильтрации воды и газа. Условия равенства скоростей движения воды, газа и самой границы имеют вид:

$$mv_l = mv_g = m\dot{x}_{(m)} \quad \left(\dot{x}_{(m)} = \frac{dx_{(m)}}{dt} \right), \quad (10)$$

а также условие равенства температур и тепловых потоков на этой границе:

$$T^+ = T^- = T_{(m)}, \quad \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right)^+ = \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right)^-. \quad (11)$$

Поскольку в зоне фильтрации воды ($x_{(s)} < x < x_{(m)}$) возникает еще одна граница ($x = x_{p(s)}$), где твердый парафин переходит в расплавленное состояние при температуре $T_{p(s)}$ с удельной теплотой l_p , то условия, выражающие баланс тепла и равенства температур на этой границе ($x = x_{p(s)}$), можно записать в виде:

$$\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right)^- - \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right)^+ = \rho_p m'_s \nu l_p \dot{x}_{p(s)}, \quad T^+ = T^- = T_{p(s)}. \quad (12)$$

Здесь и в дальнейшем нижний индекс p относится к параметрам парафина и значениям других величин на фронтальной границе ($x = x_{p(s)}$) плавления.

Рассмотрим плоскую одномерную задачу об инъекции влажного пара в пористую среду, насыщенную в исходном состоянии газом и парафином при давлении p_0 и температуре T_0 . Закачка влажного пара осуществляется с давлением p_e и при температуре T_e . Эти замечания позволяют записать начальные и граничные условия в виде:

$$p = p_0, \quad T = T_0 \quad \text{при} \quad x \geq 0, \quad t = 0,$$

$$p = p_{(s)} = p_e, \quad T = T_{(s)} = T_e, \quad \varphi = \varphi_{(s)} = \varphi_e \quad \text{при} \quad x = 0, \quad t \geq 0.$$

В рамках принятой выше системы уравнений эта задача автомодельна.

Введем безразмерные давление, температуру и автомодельную переменную:

$$P = \frac{p}{p_0}, \quad \theta = \frac{T}{T_0}, \quad \xi = \frac{x}{2\sqrt{k(T) \cdot t}}, \quad k(T) = \frac{\lambda}{\rho c}. \quad (13)$$

В автомодельных переменных решения в области фильтрации воды и газа могут быть представлены в аналитическом виде. При допущении

условия гомобаричности в области фильтрации влажного пара математическая задача полностью сводится к решению системы трансцендентных уравнений для неизвестных величин $\xi_{(s)}$, $\xi_{(m)}$, $\xi_{(pf)}$ и $\theta_{(m)}$:

$$\xi_{(s)} = \frac{1}{2} \left[2\xi_{(m)} + (\theta_{pf} - \theta_s) \frac{e^{-(\xi_{(s)} - \alpha\xi_{(m)})^2}}{\int_{\xi_{(s)}}^{\xi_{(pf)}} e^{-(\xi - \alpha\xi_{(m)})^2} d\xi} \cdot \frac{\text{Ja}}{m\tilde{\rho}_l(1 - \varphi)} \right]; \quad (14)$$

$$\xi_{(m)} = \frac{\xi_{(s)} + \sqrt{\xi_{(s)}^2 + 2\eta_l(P_{(s)} - 1)}}{2}; \quad (15)$$

$$\xi_{(pf)} = -\frac{1}{K} \cdot \left[\frac{\theta_{pf} - \theta_s}{\int_{\xi_{(s)}}^{\xi_{(pf)}} e^{(\xi_{(pf)} - \alpha\xi_{(m)})^2 - (\xi - \alpha\xi_{(m)})^2} d\xi} - \right. \quad (16)$$

$$\left. - \frac{\theta_m - \theta_{pf}}{\int_{\xi_{(pf)}}^{\xi_{(m)}} e^{(\xi_{(pf)} - \alpha\xi_{(m)})^2 - (\xi - \alpha\xi_{(m)})^2} d\xi} \right];$$

$$\theta_{(m)} = 1 +$$

$$+ \frac{(\theta_{(s)} - 1)F(\xi_{(m)})e^{-(\xi_{(m)} - \alpha\xi_{(m)})^2}}{F(\xi_{(m)})e^{-(\xi_{(m)} - \alpha\xi_{(m)})^2} + U(\xi_{(s)}, \xi_{(m)})e^{-(\xi_{(m)} - \beta\xi_{(m)})^2}}, \quad (17)$$

где $U(\xi) = \int_{\xi_{(s)}}^{\xi_{(m)}} e^{-(\xi - \alpha\xi_{(m)})^2} d\xi$ и $F(\xi_{(m)}) = \int_{\xi_{(m)}}^{\infty} e^{-(\xi - \beta\xi_{(m)})^2} d\xi$.

Задача об определении температурных и гидродинамических полей в зоне фильтрации насыщенного пара сводится к решению системы уравнений (14)–(17), удовлетворяющих граничным условиям при $\xi = 0$. Численное решение этой системы, при допущении условия гомобаричности, осуществлялось методом итерации.

Получены следующие результаты: на Рис. 2 приведены распределения давления и температуры от автомодельной координаты при значениях закачиваемого давления: 1.5 атм, 2 атм и 10 атм, и при нулевой теплоте плавления парафина. Линии 1 и 2 соответствуют следующим значениям $l_p = 1.5 \cdot 10^5$ и 0 удельной теплоты плавления парафина. Основная часть перепада давления между пластовым и граничным значениями тратится на проталкивание водяной пробки, образовавшейся за

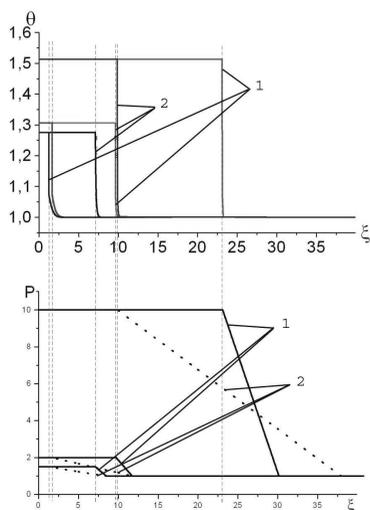


Рис. 2. Профили температуры (а) и давления (б) при различных значениях закачиваемого давления и при теплоте плавления парафина: 1 — $l_p = 1.5 \cdot 10^5$ и 2 — $l_p = 0$

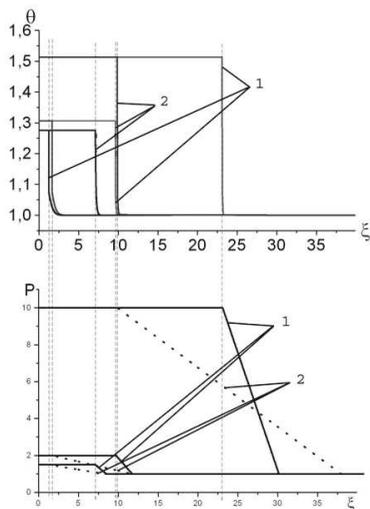


Рис. 3. Распределения температуры (а) и давления (б) при значениях парафинонасыщенности: 1 — $\nu = 0.5$ и 2 — $\nu = 0.9$

счет конденсации пара, и на плавление парафина. С введением парафина снижается темп проникания теплоносителя в пористую среду. Перепад температуры реализуется в тонком слое в зоне фильтрации жидкости. Рис. 3 иллюстрирует зависимости давления и температуры от автономной координаты при различных значениях парафинонасыщенности ν . Линии 1 и 2 соответствуют значениям парафинонасыщенности $\nu = 0.5$ и 0.9 . Видно, что с увеличением парафинонасыщенности повышается и интенсивность проникновения теплоносителя. При уменьшении парафинонасыщенности пористой среды увеличивается перепад давлений.

3. Заключение

В данной работе показано, что при инъекции пара в пористую среду, насыщенную газом и парафином, образуются 3 характерные зоны: зона фильтрации закачиваемого влажного пара; вторая, промежуточная зона водонасыщения; дальняя, заполненная газом и парафином. И показано, что в промежуточной водонасыщенной зоне возникает граница плавления парафина.

Список литературы

- [1] В. Ш. Шагапов, И. Р. Рахматуллин, Л.А. Насырова. К теории инъекции влажного пара в пористую среду // Теплофизика высоких температур. 2004. Т. 42, № 6. С. 938–946.