

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Ф. И. Шагиева, Г. Я. Галеева, Об инъекции влажного пара в пористую среду, частично насыщенную парафином, *ТВТ*, 2010, том 48, выпуск 2, 257–261

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.9.172

21 января 2025 г., 04:38:56



УДК 532.546; 536.421

ОБ ИНЖЕКЦИИ ВЛАЖНОГО ПАРА В ПОРИСТУЮ СРЕДУ, ЧАСТИЧНО НАСЫЩЕННУЮ ПАРАФИНОМ

© 2010 г. Ф. И. Шагиева*, Г. Я. Галеева**

*Бирская государственная социально-педагогическая академия

**Башкирский государственный университет, г. Уфа

Поступила в редакцию 20.03.2008 г.

Рассмотрена задача о нагнетании влажного пара в пористую среду, насыщенную в исходном состоянии газом и парафином. Полагая, что интенсивность инъекции лимитируется гидравлическим сопротивлением водяной пробки, образовавшейся за счет конденсации пара, построены авторские решения, описывающие гидродинамические и температурные поля. Проведен анализ влияния тепловых затрат на процесс развития нагретых зон при плавлении парафина.

ВВЕДЕНИЕ

Представляется, что один из возможных способов добычи высоковязких нефтей основан на их предварительном разжижении посредством закачки экологически чистого теплоносителя – водяного пара. Перегрев инжектируемого пара ΔT по отношению к температуре насыщения, соответствующей значению давления, при котором нагнетается пар, особой роли не играет. Это обусловлено тем, что энтальпия пара зависит от удельной теплоты фазовых переходов [1–3], поскольку обычно всегда выполняется условие $c_v \Delta T \ll l_w$ (c_v и l_w – теплоемкость пара и удельная теплота парообразования воды). Поэтому будем считать, что инжектируемый пар является насыщенным (его температура равна равновесному значению для давления нагнетания). При этом пар может содержать и влагу в виде мелких капелек (тумана). Для понимания детальной картины процессов в пористой среде при инъекции пара, когда составляющая скелета пористой среды может переходить в другое агрегатное состояние с дополнительными затратами тепла на фазовые переходы, здесь рассмотрена модельная задача. В качестве составляющей скелета, претерпевающей расплавление, примем парафин.

Отметим также, что такого типа задачи возникают в процессе, связанном с очисткой пористых материалов от загрязняющих отложений, регенерации пористых катализаторов и т.д.

ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

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 образуются три характерные зоны:

ближняя ($0 < x < x_{(n)}$), примыкающая к границе пористой среды, в которой фильтруется закачиваемый влажный пар; вторая, промежуточная зона ($x_{(n)} < x < x_{(d)}$) водонасыщения; дальняя ($x_{(d)} < x < \infty$), соответствующая исходному состоянию пористой среды, заполненная газом и парафином. Промежуточную зону, где происходит фильтрация воды, будем называть водяной пробкой. Будем полагать, что в промежуточной водонасыщенной зоне возникает еще одна граница $x = x_{(m)}$, где твердый парафин переходит в расплавленное состояние. Вязкость расплавленного парафина значительно выше вязкости воды, поэтому его подвижностью будем пренебрегать. Пусть исходная объемная доля парафина в поровых каналах составляет v . Объемным расширением парафина при расплавлении также будем пренебрегать, тогда “живая” пористость $m = m_s(1 - v)$ во всей зоне фильтрации будет постоянна (m_s – пористость чистого скелета, когда $v = 0$).

Как показано в [1, 2], в ряде случаев, представляющих наибольший практический интерес, гидравлическим сопротивлением в дальней и ближней зонах можно пренебречь; тем самым интенсивность закачки влажного пара будет лимитироваться гидравлическим сопротивлением образовавшейся водяной пробки. Поэтому в дальней и ближней зонах примем гипотезу гомобаричности. Кроме того, в дальней зоне можно пренебречь изменением температуры.

Пусть в исходном состоянии ($t = 0$) в полубесконечной пористой среде температура T_0 и давление p_0 однородны и при $t > 0$ через границу $x = 0$ производится закачка влажного пара с температурой T_e и массовым содержанием воды φ при постоянном давлении p_e ($p_e > p_0$). Поскольку пар влажный, температура T_e и давление p_e должны быть связаны условием фазового равновесия

$T_e = T_s(p_e)$, где $T_s(p_e)$ – температура насыщения, соответствующая значению давления p_e . При описании процессов течения будем полагать, что вода несжимаема, а пар и газ удовлетворяют уравнению калорически совершенного газа:

$$p = \rho_i R_i T \quad (i = v, g), \quad \rho_w = \text{const},$$

где ρ_i – плотность, R_i – приведенная газовая постоянная, здесь и в дальнейшем индексы $i = v, g, w$ и w относятся к параметрам пара, газа, воды и влажного пара.

Для средней плотности влажного пара ρ_{wv} можем записать

$$\frac{1}{\rho_{wv}} = \frac{\varphi}{\rho_w} + \frac{(1-\varphi)}{\rho_v}$$

Согласно вышепринятому допущению о пренебрежении гидравлическим сопротивлением в ближней зоне для влажного пара температура T , давление p , массовое содержание влаги, а также средняя плотность ρ_{wv} будут постоянны и при этом

$$T = T_e, \quad p = p_e, \quad \rho_{wv} = \text{const}.$$

Кроме того, в этой зоне скорость фильтрации влажного пара $m v_w$, являющаяся заранее неизвестной, также будет однородной.

В промежуточной зоне уравнение неразрывности для воды с учетом ее несжимаемости запишется как

$$\frac{\partial}{\partial x}(m \rho_w v_w) = 0. \quad (1)$$

Процесс фильтрации воды описывается законом Дарси [4]

$$m v_w = -\frac{k}{\mu_w} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (2)$$

где k и μ_w – коэффициент проницаемости пористой среды и динамическая вязкость воды.

Запишем уравнение теплопроводности в зоне фильтрации воды в одностепенном приближении

$$\begin{aligned} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_w c_w m v_w \frac{\partial T}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right), \\ \rho &= m_s(1-v)\rho_w + (1-m_s)\rho_s + m_s v \rho_p, \\ \rho c &= m_s(1-v)\rho_w c_w + (1-m_s)\rho_s c_s + m_s v \rho_p c_p, \\ \lambda &= m_s(1-v)\lambda_w + m_s v \lambda_p + (1-m)\lambda_s. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь c_i и λ_i – удельная теплоемкость и теплопроводность для скелета ($i = s$), парафина ($i = p$) и воды ($i = w$); ρ , ρc и λ – средняя плотность, удельно-объемная теплоемкость и теплопроводность системы “пористая среда–вода”.

Приведенные уравнения (1)–(3) дополним соотношениями на границе $x = x_{(n)}$ между зонами фильтрации влажного пара и воды, следующими из закона сохранения массы и из условия теплового баланса:

$$m \rho_{wv}(v_{wv} - \dot{x}_{w(n)}) = m \rho_w(v_w - \dot{x}_{w(n)}), \quad (4)$$

$$-\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) = m \rho_w l_w (1-\varphi)(v_w - \dot{x}_{(n)}), \quad \left(\dot{x}_{(n)} = \frac{dx_{(n)}}{dt} \right), \quad (5)$$

где l_w – удельная теплота парообразования воды. На этой границе температура и давление непрерывны и равны соответственно $T_{(n)} = T_e$ и $p_{(n)} = p_e$.

Будем полагать, что на передней границе водяной пробки $x = x_{(d)}$ фазовые переходы отсутствуют. Условие равенства скоростей течения воды и самой границы, а также условие непрерывности температуры и давления на этой границе имеют вид

$$m v_w = m \dot{x}_{(d)}, \quad T_{(d)} = T_0, \quad p_{(d)} = p_0. \quad (6)$$

Поскольку в зоне фильтрации воды ($x_{(n)} < x < x_{(d)}$) возникает еще одна граница $x = x_{(m)}$, где твердый парафин переходит в расплавленное состояние при температуре T_p , то условие, выражающее баланс тепла на этой границе (температура на этой границе непрерывна), можно записать в виде

$$-\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right)^- + \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right)^+ = \rho_p m_s v l_p \dot{x}_{(m)}, \quad (7)$$

где l_p – удельная теплота плавления парафина. Значки “+” и “-” соответствуют значению тепловых потоков перед и за границей плавления.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ

Из (1) и (2) следует уравнение для давления в зоне фильтрации воды

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = 0.$$

Это уравнение при граничных условиях

$p = p_{(n)} = p_e$, ($x = x_{(n)}$) и $p = p_{(d)} = p_0$, ($x = x_{(d)}$) имеет решение

$$p = p_e + (p_0 - p_e) \frac{x - x_{(n)}}{x_{(d)} - x_{(n)}}. \quad (8)$$

С учетом этого решения и закона Дарси (2) уравнение теплопроводности (3) можно привести к виду

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\rho_w c_w}{\rho c} \frac{k \Delta p}{\mu_w (x_{(d)} - x_{(n)})} \frac{\partial T}{\partial x} &= k^{(T)} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \\ \Delta p = p_e - p_0, \quad k^{(T)} &= \frac{\lambda}{\rho c}. \end{aligned} \quad (9)$$

Данная задача для определения полей давления и температур имеет автомодельное решение. Введем безразмерные давление, температуру и автомодельную переменную

$$P = \frac{p - p_0}{p_e - p_0}, \quad \theta = \frac{T - T_0}{T_e - T_0}, \quad \xi = \frac{x}{2\sqrt{k^{(T)} t}}$$

Тогда для распределения давления и температур перед и за водяной пробкой можем записать

$$P = \theta = 0, \quad \xi_{(d)} < \xi < \infty \quad \text{и} \quad P = \theta = 1, \quad 0 < \xi < \xi_{(n)}$$

где $\xi_{(j)}$ ($j = n$ и d) – автомодельные координаты ближней и дальней границ, определяемые выражением

$$\xi_i = \frac{x_{(i)}}{2\sqrt{k^{(T)}t}}, \quad i = n, d.$$

Уравнение (9) в автомодельных и безразмерных переменных примет вид

$$\left(-2\xi + \frac{\eta}{\xi_{(d)} - \xi_{(n)}}\right) \frac{d\theta}{d\xi} = \frac{d^2\theta}{d\xi^2},$$

$$\eta = \alpha Pe, \quad \alpha = m \frac{\rho_w c_w}{\rho c}, \quad Pe = \frac{k\Delta p}{m\mu_w k^{(T)}}.$$

При этом решение (8) для распределения давления в зоне фильтрации воды $\xi_{(n)} < \xi < \xi_{(d)}$ запишется как

$$P = \frac{\xi_{(d)} - \xi}{\xi_{(d)} - \xi_{(n)}}. \quad (10)$$

Из граничных условий (4) и (5) следует

$$q_{wv} = m \left(\frac{\rho_w}{2} \frac{Pe}{\xi_{(d)} - \xi_{(n)}} + (\rho_{wv} - \rho_w) \xi_{(n)} \right) \sqrt{\frac{k^{(T)}}{t}}, \quad (11)$$

$$\frac{d\theta}{d\xi} = \frac{m\tilde{\rho}_w}{Ja_w} (1 - \varphi) \left(2\xi_{(n)} - \frac{Pe}{\xi_{(d)} - \xi_{(n)}} \right), \quad \xi = \xi_{(n)}; \quad (12)$$

$$\tilde{\rho}_w = \frac{\rho_w}{\rho}, \quad Ja_w = \frac{c(T_e - T_0)}{l_w}.$$

Из первого условия (6) с учетом решения (10) можем получить

$$\frac{Pe}{\xi_{(d)} - \xi_{(n)}} = 2\xi_{(d)}. \quad (13)$$

Запишем также условия теплового баланса (7) на границе плавления парафина $\xi = \xi_{(m)}$ ($\xi_{(m)} = x_m / 2\sqrt{k^{(T)}t}$):

$$-\left(\frac{d\theta}{d\xi}\right)^- + \left(\frac{d\theta}{d\xi}\right)^+ = 2 \frac{mv\tilde{\rho}_p \xi_{(m)}}{Ja_p}, \quad Ja_p = \frac{c(T_e - T_0)}{l_p}. \quad (14)$$

Уравнение (9) с учетом (12) можно привести к виду

$$-2(\xi - \alpha\xi_{(d)}) \frac{d\theta}{d\xi} = \frac{d^2\theta}{d\xi^2}.$$

Решение этого уравнения, удовлетворяющее на границе плавления парафина $\xi = \xi_{(m)}$ условию

$$\theta = \theta_p, \quad \theta_p = \frac{T_p - T_0}{T_e - T_0},$$

можно записать как

$$\theta = 1 + (\theta_p - 1) \frac{\int_{\xi_{(n)}}^{\xi} E d\xi}{\int_{\xi_{(n)}}^{\xi_{(m)}} E d\xi}, \quad \xi_{(n)} \leq \xi \leq \xi_{(m)}; \quad (15)$$

$$\theta = \theta_p \left[1 - \frac{\int_{\xi_{(m)}}^{\xi} E d\xi}{\int_{\xi_{(m)}}^{\xi_{(d)}} E d\xi} \right], \quad \xi_{(m)} \leq \xi \leq \xi_{(d)}, \quad (16)$$

где $E(\xi) = e^{-(\xi - \alpha\xi_{(d)})^2}$.

Подставляя эти решения в условие (14), будем иметь

$$(1 - \theta_p) \frac{E(\xi_m)}{\int_{\xi_{(n)}}^{\xi_{(m)}} E(\xi) d\xi} - \theta_p \frac{E(\xi_m)}{\int_{\xi_{(m)}}^{\xi_{(d)}} E(\xi) d\xi} = 2 \frac{mv\tilde{\rho}_p \xi_{(m)}}{Ja_p} \quad (17)$$

Кроме того, на основе условия (12) с учетом (13) и (15) получаем

$$-(1 - \theta_p) \frac{E(\xi_m)}{\int_{\xi_{(n)}}^{\xi_{(m)}} E(\xi) d\xi} = 2 \frac{m\tilde{\rho}_w (1 - \varphi)}{Ja_w} (\xi_{(n)} - \xi_{(d)}). \quad (18)$$

Таким образом, задача свелась к решению системы промежуточных уравнений (13), (17) и (18) для трех автомодельных координат границ $\xi_{(n)}$, $\xi_{(m)}$ и $\xi_{(d)}$, по значениям которых согласно аналитическим решениям (10), (15) и (16) полностью определяются поля давления и температур. При этом выражение (11) дает массовый расход влажного пара через границу $x = 0$ ($\xi = 0$) пористой среды.

Вышеприведенные аналитические построения получены с использованием гипотезы о гомобаричности в зоне фильтрации влажного пара. Поэтому на фоне численных решений для реальных систем величина перепада Δp_{wv} в этой зоне должна быть значительно ниже общего перепада Δp ($\Delta p_{wv} \ll \Delta p$). Для перепада давления в зоне фильтрации влажного пара с учетом закона Дарси можем записать оценку

$$\Delta p_{wv} = \mu_{wv} m v_{wv} x_{(n)} / k.$$

Отсюда, используя выражения (11) и (13), имеем

$$\frac{\Delta p_{wv}}{\Delta p} = \frac{\rho_w \mu_{wv} \xi_{(n)}}{\rho_{wv} \mu_w \xi_{(d)}}. \quad (19)$$

Отношение динамических вязкостей для воды составляет обычно $\mu_{wv} / \mu_w \approx 10^{-2}$. Тогда из (19) видно, что для правомерности гипотезы гомобаричности достаточно выполнение неравенства $\mu_{wv} / \mu_w \gg 10^{-2}$. Это неравенство может выполняться при достаточно высокой влажности пара, определяемой значением φ .

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ

Для параметров, определяющих начальные условия, а также свойства системы, приняты следующие значения [5]: $p_0 = 0.1$ МПа, $T_0 = 300$ К, $\varphi = 0.75$, $\rho_w =$

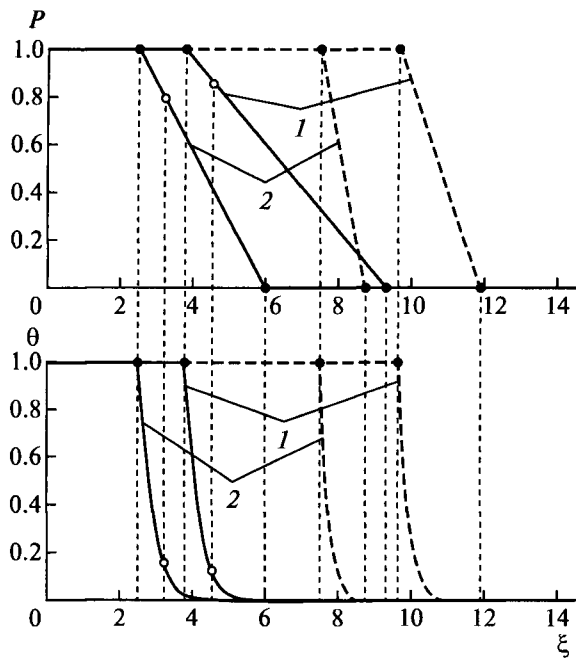


Рис. 1. Распределения давления и температуры от автомодельной координаты при различных значениях давления и температуры при наличии и отсутствии парафина: 1 – $p_e = 2.3$ МПа, $T_e = 493$ К, 2 – $p_e = 1$ МПа, $T_e = 451$ К, сплошные линии – с парафином, пунктирные – без парафина; $k = 10^{-14}$ м².

$= 10^3$ кг/м³, $\rho_g = 0.64$ кг/м³, $\rho_s = 2 \times 10^3$ кг/м³, $\rho_p = 930$ кг/м³, $c_w = 4200$ Дж/(кг К), $c_s = 900$ Дж/(кг К), $c_p = 2150$ Дж/(кг К), $\mu_w = 1.27 \times 10^{-3}$ Па с, $m = 0.3$, $\lambda_s = 2$ Вт/(м К), $\lambda_w = 0.6$ Вт/(м К), $\lambda_p = 0.4$ Вт/(м К), $l_w = 1.86 \times 10^6$ Дж/кг, $l_p = 1.5 \times 10^5$ Дж/кг, $T_p = 323$ К.

На рис. 1 сплошными линиями представлены распределения давления и температуры от автомодельной координаты при объемной парафинонасыщенности $v = 0.5$ для различных значений давления на границе $x = 0$, определяющих интенсивность закачки. Линии 1 и 2 соответствуют значениям $p_e = 2.3$ и 1.0 МПа ($T_e = 493$ и 451 К). Штриховые получены без учета тепловых затрат на расплавление парафина. Для коэффициента проницаемости среды принято значение $k = 10^{-14}$ м².

Из представленных графиков видно, что с ростом давления на границе растут температура и протяженность прогретой зоны. Причем содержание парафина приводит к снижению протяженности этой зоны (значение автомодельной координаты $\xi_{(n)}$, определяющей протяженность прогретой зоны, уменьшается от значений $\xi_{(n)} = 9.6$ и 3.7 до $\xi_{(n)} = 7.5$ и 2.5).

Из графиков также следует, что перепад температуры реализуется в тонком слое в зоне фильтрации жидкости, вблизи границы $x = x_{(d)}$ фазовых

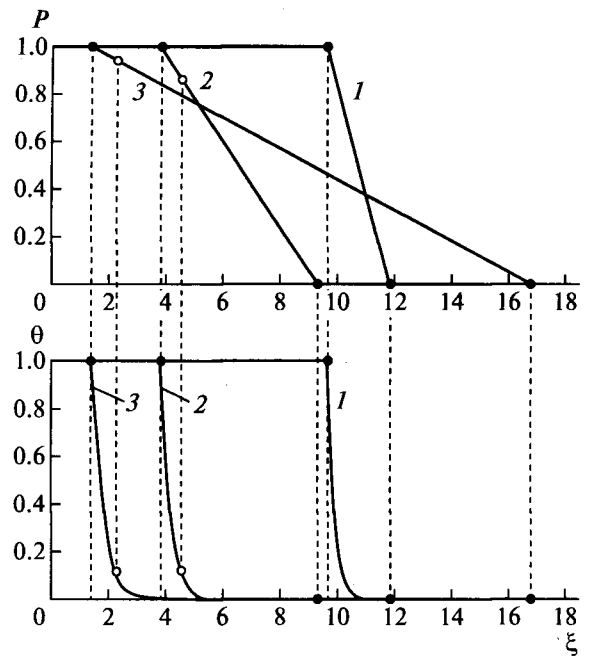


Рис. 2. Профили давления и температуры при различных значениях парафинонасыщенности: 1 – $v = 0$, 2 – 0.5 , 3 – 0.9 .

переходов. Для представленных примеров на фоне реализуемого линейного распределения давления в зоне фильтрации жидкости происходит практически скачкообразное изменение температуры. Наличие парафина в пористой среде несколько искажает картину распределения температур. Вследствие того, что некоторая часть тепла тратится на плавление парафина, появляются изломы на кривых для безразмерной температуры.

На фоне представленных распределений давлений и температур имеем $\Delta p_{wv}/\Delta p = 0.25$. Следовательно, условие гомобаричности правомерно.

На рис. 2 иллюстрируется влияние объемного содержания парафина на распределения давления и температуры от автомодельной координаты. Закачка пара осуществляется при $p_e = 2.3$ МПа ($T_e = 493$ К). Линии 1, 2 и 3 соответствуют значениям $v = 0, 0.5$ и 0.9 . Значения автомодельных координат, определяющие глубину прогретой зоны, составляют $\xi_{(n)} = 9.6, 3.8$ и 1.3 . Видно, что с увеличением парафинонасыщенности v , вследствие повышения тепловых затрат на расплавление парафина, значение $\xi_{(n)}$ снижается и тем самым протяженность прогретой зоны уменьшается.

На рис. 3 показано влияние изменения проницаемости пористой среды на гидродинамические и температурные поля при наличии ($v = 0.5$) и отсутствии парафина (штриховые линии). Линии 1 и 2 соответствуют значениям коэффициента проницаемости $k = 10^{-14}, 10^{-15}$ м². Видно, что с уменьшением коэффициента проницаемости характерная толщи-

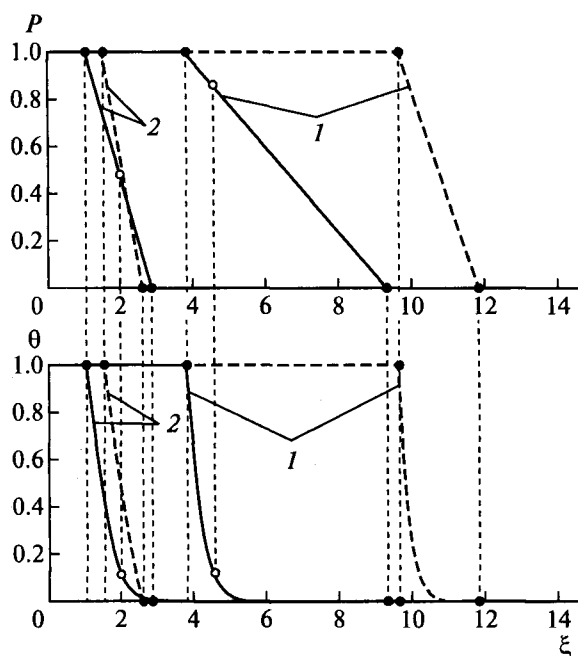


Рис. 3. Зависимости давления и температуры от авто-модельной координаты при различных значениях коэффициента проницаемости пористой среды k с учетом и без учета парафина: 1 – $k = 10^{-14}$, 2 – $k = 10^{-15}$; сплошные линии – с парафином, пунктирные – без парафина.

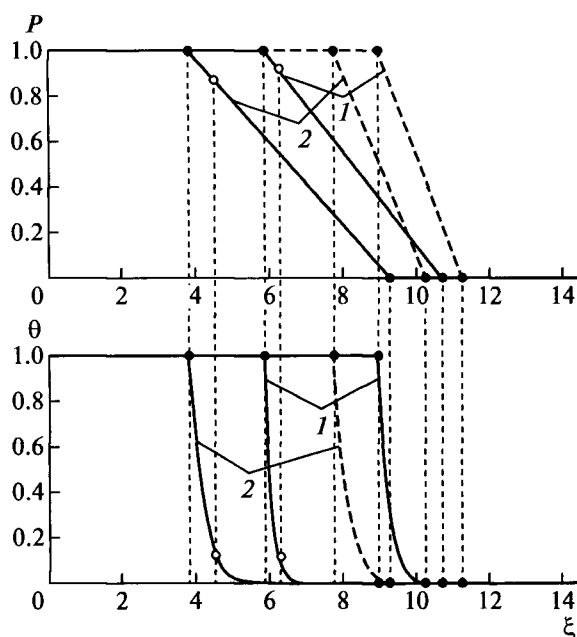


Рис. 4. Профили давления и температуры от авто-модельной координаты при различных массовых содержаниях жидкости в закачиваемом паре с учетом и без учета парафина: 1 – $\phi = 0.5$, 2 – 0.75 ; сплошные линии – с парафином, пунктирные – без парафина.

на слоя, в котором реализуется температурный перепад, растет и постепенно приближается к толщине зоны фильтрации воды. Абсолютная толщина слоя жидкостной пробки, образующейся за счет конденсации влажного пара, с увеличением коэффициента проницаемости пористой среды также растет. Дальше отодвигается и зона образования водяной пробки. Но при этом относительная протяженность этого слоя по отношению к глубине прогретой области (или толщине области фильтрации влажного пара) примерно одинакова.

На рис. 4 представлены распределения давления и температуры от авто-модельной координаты при различных значениях влажности закачиваемого пара. Для коэффициента проницаемости среды принято значение $k = 10^{-14} \text{ м}^2$. Линии 1 и 2 соответствуют влажности пара $\phi = 0.5, 0.75$. С ростом влагосодержания закачиваемого пара при фиксированном значении граничного давления снижается темп проникания теплоносителя в пористую среду. Значения авто-модельных координат, определяющие фактически глубину прогретой зоны для $\phi = 0.5$ и 0.75 составляют $\xi_{(n)} = 5.8$ и 3.7 . Следовательно, в случае инъекции пара с влажностью $\phi = 0.75$ глубина прогретой зоны за один и тот же промежуток времени будет меньше, чем при инъекции пара с влажностью $\phi = 0.5$. Это обстоятельство связано с существенным утолщением водяной пробки при закачке влажного пара,

что приводит в свою очередь к росту гидравлического сопротивления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Процесс расплавления парафина, находящегося в пористой среде, представляет задачу Стефана с тремя неизвестными координатами фронтальных границ. Анализ расчетов температурных и гидродинамических полей показывает, что наличие парафина несколько снижает темп нагрева вследствие дополнительных тепловых потерь на расплавление парафина.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шагапов В.Ш., Рахматуллин И.Р., Насырова Л.А. К теории инъекции влажного пара в пористую среду // ТВТ. 2004. Т. 42. № 6. С. 938.
2. Шагапов В.Ш., Рахматуллин И.Р., Насырова Л.А. Распределение тепловых и гидродинамических полей в пористой среде при инъекции перегретого пара // МЖГ. 2005. № 4. С. 114.
3. Бармин А.А., Цыпкин Г.Г. Математическая модель инъекции воды в геотермальный пласт, насыщенный паром // МЖГ. 1996. № 6. С. 92.
4. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Движение жидкостей и газов в природных пластах. М.: Недра, 1984. 211 с.
5. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 720 с.