

УДК 622.279

В.Ш. Шагапов, О.Р. Нурисламов, А.Р. Хабибуллина

**ОТБОР ГАЗА ИЗ ГИДРАТОСОДЕРЖАЩЕГО ПЛАСТА
ДЕПРЕССИОННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ**

В плоскоодномерной и радиальной автомодельной постановках изучен процесс разложения газогидратов, частично насыщающих пористую среду, при депрессионном воздействии. Показано, что в зависимости от состояния пористой среды и граничного давления отбор газа из гидратосодержащего пласта может происходить в трех режимах, с качественно различающимися структурами образующихся зон. Выявлены критерии, разделяющие эти режимы.

Ключевые слова: гидраты, отбор газа, пористая среда, депрессионный метод.

Проблема энергетических ресурсов существовала во все времена. Человечество за время своего существования освоило большое количество разновидностей природных ресурсов, большинство которых невозобновляемы или возобновляются медленно. Поэтому приходится осваивать все новые виды энергетических ресурсов. В настоящее время одним из таких новых перспективных энергетических ресурсов являются газовые гидраты. Мировые запасы углеводородов в гидратах по сегодняшним оценкам в несколько раз превышают запасы обычного природного газа, основная часть которых (около 98 %) сосредоточена в акватории Мирового океана и только около 2 % – на суше в зонах вечной мерзлоты [1,2].

Целью настоящей работы является изучение, в рамках автомодельной плоскоодномерной и радиальной постановок, количественных и качественных особенностей разложения гидрата, частично насыщающего пористую среду, при депрессионном воздействии.

Постановка задачи и основные уравнения

Пусть в исходном состоянии пористая среда насыщена газом в свободном состоянии и гидратом при температуре T_0 и давлении p_0 и пусть равновесное давление, соответствующее температуре T_0 , – $p_s(T_0)$:

$$t = 0: \quad S_h = S_{h(0)}, \quad S_g = 1 - S_{h(0)}, \quad p = p_0, \quad T = T_0 \quad (r \geq 0), \quad (1)$$

где $S_{h(0)}$, p_0 , T_0 – исходные гидратонасыщенность, давление и температура пористой среды.

Для плоскоодномерного случая пусть в момент времени $t = 0$ по границе $r = 0$ происходит вскрытие пласта и установление на границе давления $p_{(e)}$:

$$r = 0: \quad p = p_{(e)} \quad (t > 0). \quad (2)$$

Для радиального случая пусть в момент времени $t = 0$ на границе скважины $r = r_{(w)}$ устанавливается постоянный массовый расход газа $q^{(m)}$, отнесенный к

единице длины скважины:

$$r = r_{(w)} : -2\pi r_{(w)}(mS_g \rho_g v_g)_{(w)} = q^{(m)} \quad (t > 0). \quad (3)$$

В общем случае возможны следующие режимы: 1) если $p_{(e)} \geq p_s(T_0)$, то будет происходить фильтрация газа, а гидрат, содержащийся в пористой среде, будет сохранять стабильное состояние; 2) если $p_{(e)} < p_s(T_0)$, то будет происходить фильтрация газа, сопровождаемая разложением гидрата.

Примем следующие допущения. Гидрат является двухкомпонентной системой с массовой концентрацией газа G . Материал скелета пористой среды, гидрат и воду, образующуюся при разложении гидрата, будем считать несжимаемыми. Кроме того, будем полагать, что в фильтрации участвует только газ и температуры скелета, гидрата и воды в любой точке пористой среды совпадают. Допущение неподвижности воды при фильтрации газа обосновывается тем, что, во-первых, вязкость воды значительно больше вязкости газа и, во-вторых, на воду в пористой среде действуют капиллярные силы.

Математическая модель основывается на уравнениях неразрывности газа и воды и уравнении баланса тепла [3]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(m\rho_g S_g) + \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r}(r^n m\rho_g S_g v_g) &= -mG\rho_h \frac{\partial S_h}{\partial t}, \\ \frac{\partial}{\partial t}(m\rho_l S_l) &= -m(1-G)\rho_h \frac{\partial S_h}{\partial t}, \\ \rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_g c_g m S_g v_g \frac{\partial T}{\partial r} &= \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^n \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + m\rho_h L_h \frac{\partial S_h}{\partial t} \\ (\rho c &= (1-m)\rho_{sk} c_{sk} + mS_l \rho_l c_l + mS_h \rho_h c_h + mS_g \rho_g c_g, \\ \lambda &= (1-m)\lambda_{sk} + mS_l \lambda_l + mS_h \lambda_h + mS_g \lambda_g, S_l + S_h + S_g = 1), \end{aligned} \quad (4)$$

где m , S_i ($i = l, h, g$) – пористость и насыщенность пор i -й фазой; ρ_i , c_i , λ_i ($i = sk, l, h, g$) – плотность, теплоемкость и теплопроводность; индексы sk, l, h, g соответствуют скелету, воде, гидрату и газу; v_g – скорость газа; L_h – удельная теплота фазового перехода гидрата; значения $n = 0$ и $n = 1$ соответствуют плоскоодномерной и радиальной постановкам. Теплоемкость и теплопроводность p_{s0} рассматриваемой системы в основном определяется скелетом пористой среды, поэтому будем полагать, что $\rho c = const$ и $\lambda = const$.

Для описания процесса фильтрации газа примем закон Дарси:

$$mS_g v_g = -\frac{k_g}{\mu_g} \frac{\partial p}{\partial r}, \quad (5)$$

где μ_g , k_g – динамическая вязкость и фазовая проницаемость газа.

Зависимость коэффициента проницаемости для газа k_g будем задавать на основе формулы Козени [4]:

$$k_g = k_* \frac{(mS_g)^3}{(1-mS_g)^2} \approx k_0 S_g^3 \quad (k_0 = k_* m^3), \quad (6)$$

где k_0 – коэффициент проницаемости скелета пористой среды.

Для газа примем модель калорически совершенного газа:

$$p = \rho_g R_g T. \quad (7)$$

Для области, где одновременно присутствуют газ, вода и гидрат, температура и давление связаны условием фазового равновесия [5]:

$$T = T_{s0} + T_* \ln \left(\frac{p}{p_{s0}} \right), \quad (8)$$

где T_{s0} – равновесные температура и давление, T_* – эмпирический параметр, зависящий от вида газогидрата.

При поставленных начальных и граничных условиях, в общем случае, возможно формирование трех, качественно различающихся, областей. В ближней и дальней областях, насыщенных газом и водой, газом и гидратом соответственно, будет иметь место только фильтрация газа. Промежуточная область, насыщенная газом, гидратом и водой, будет представлять зону разложения гидрата.

На границах этих областей должно выполняться условие баланса массы газа и воды:

$$\begin{aligned} [m(S_h \rho_h (1-G) + S_l \rho_l) \dot{r}_{(i)}] &= 0, \\ [m(\rho_g S_g (v_g - \dot{r}_{(i)}) - \rho_h S_h G \dot{r}_{(i)})] &= 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Граничные условия (9) с учетом закона Дарси (5) и непрерывности фазовой проницаемости газа на этих границах примет вид

$$-\left(\frac{\partial p}{\partial r} \right)_{(i)}^- + \left(\frac{\partial p}{\partial r} \right)_{(i)}^+ = 0 \quad (i = n, d), \quad (10)$$

где $i = n$ – относится к границе между ближней и промежуточной областями, $i = d$ – относится к границе между промежуточной и дальней областями.

Упрощение уравнений для ближней и дальней областей

Примем допущение об изотермичности процесса фильтрации газа в дальней и ближней областях. Такое допущение оправдано тем, что теплоемкость газа мала по сравнению с общей теплоемкостью пористой среды и изменение температуры газа даже на несколько градусов за счет расширения при фильтрации приводит к незначительным изменениям температуры пористой среды. Таким образом,

$$\text{при } 0 \leq r \leq r_{(n)} : T = T_{(n)}, S_h = 0, S_g = 1 - S_{l(n)} \quad \left(S_{l(n)} = \frac{\rho_h (1-G)}{\rho_l} S_{h(0)} \right); \quad (11)$$

$$\text{при } r \geq r_{(d)} : T = T_0, S_h = S_{h(0)}, S_g = 1 - S_{h(0)}. \quad (12)$$

Здесь значение водонасыщенности $S_{l(n)}$ на ближней границе получено интегрированием второго уравнения из (4) с учетом начального условия из (1) и граничного условия (2) для S_h . Выражение для $T_{(n)}$ будет приведено ниже.

Принимая вышесказанное допущение, первое уравнение из (4) с учетом закона Дарси (5) и уравнения состояния газа (7) после преобразований примет вид

$$\frac{\partial p^2}{\partial t} = \aleph^{(p)} S_{g(i)}^2 \frac{p}{p_0} \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^n \frac{\partial p^2}{\partial r} \right) \quad (i = n, 0), \quad (13)$$

где $\aleph^{(p)} = k_0 p_0 / (m \mu_g)$ – коэффициент пьезопроводности.

Упрощение уравнений для промежуточной области

В работе [6] показано, что при проницаемостях $k_g \gg 10^{-18} \text{ м}^2$ теплопроводностью и конвективным переносом тепла можно пренебречь по сравнению с тепловой фазового перехода. Тогда третье уравнение из (1) для промежуточной области примет вид

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = m \rho_h L_h \frac{\partial S_h}{\partial t}. \quad (14)$$

Интегрируя уравнение (14) в промежуточной области, получим выражение для температуры:

$$T = T_0 + \frac{m \rho_h L_h}{\rho c} (S_h - S_{h(0)}). \quad (15)$$

На ближней и дальней границах температура и давление, согласно (15) и условию фазового равновесия (8), определяются по формулам

$$T_{(n)} = T_0 - \frac{m \rho_h L_h}{\rho c} S_{h(0)}, \quad p_{(n)} = p_{(d)} \exp\left(-\frac{m \rho_h L_h S_{h(0)}}{\rho c T_*}\right), \quad (16)$$

$$T_{(d)} = T_0, \quad p_{(d)} = p_{s0} \exp\left(\frac{T_0 - T_{s0}}{T_*}\right).$$

Первое уравнение из (4) в пренебрежении первым слагаемым в левой части по сравнению со слагаемым в правой части, как это показано в работе [6], примет вид

$$m G \rho_h \frac{\partial S_h}{\partial t} + \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r} (r^n m S_g \rho_g v_g) = 0. \quad (17)$$

После преобразований уравнения (17) с учетом уравнений (5) – (8), (14) примет вид

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{m L_h}{\rho c T_* G R_g} \mathfrak{N}^{(p)} \frac{p}{p_0} \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^n \frac{p S_g^3}{T} \frac{\partial p}{\partial r} \right). \quad (18)$$

Уравнения в автомодельной переменной

Поставленная задача имеет автомодельное решение. Введем автомодельную переменную $\xi = r / \sqrt{\mathfrak{N}^{(p)} t}$ и безразмерные переменные для давления $P = p / p_0$ и температуры $\theta = T / T_0$.

Уравнение (13) для ближней и дальней областей и (18) для промежуточной области в автомодельных координатах и безразмерных переменных будут соответственно иметь вид

$$-\frac{\xi}{2} \frac{dP^2}{d\xi} = S_{g(i)}^2 P \frac{1}{\xi^n} \frac{d}{d\xi} \left(\xi^n \frac{dP^2}{d\xi} \right) \quad (i = n, 0); \quad (19)$$

$$-\frac{\xi}{2} \frac{dP}{d\xi} = \eta_{(m)} P \frac{1}{\xi^n} \frac{d}{d\xi} \left(\xi^n \frac{P S_g^3}{\theta} \frac{dP}{d\xi} \right) \quad \left(\eta_{(m)} = \frac{\mathfrak{N}_{(m)}}{\mathfrak{N}^{(p)}}, \mathfrak{N}_{(m)} = \frac{k_0 \rho_{g0} P_0 L_h}{\rho c T_* G \mu_g} \right). \quad (20)$$

Начальные и граничные условия (1) – (3) в автомодельных и безразмерных переменных запишутся в виде

$$P = 1 \text{ при } \xi = \infty \quad (n = 0, 1), \quad P = P_{(e)} \text{ при } \xi = 0 \quad (n = 0), \quad (21)$$

$$\left(\xi \frac{dP^2}{d\xi} \right)_{\xi=\xi_{(w)}} = Q^{(m)} \text{ при } \xi_{(w)} \rightarrow 0 \quad (n = 1),$$

$$\text{где } P_{(e)} = \frac{P_{(e)}}{P_0}, \quad Q^{(m)} = \frac{q^{(m)} \mu_g R_g T_{(n)}}{\pi k_0 S_{g(n)}^2 P_0^2}, \quad S_{g(n)} = 1 - S_{l(n)}.$$

На ближней и дальней границах граничные условия (10) примут вид

$$P = P_{(i)}, \quad \left(\frac{dP}{d\xi} \right)_{(i)}^{(-)} = \left(\frac{dP}{d\xi} \right)_{(i)}^{(+)} \text{ при } \xi = \xi_{(i)}, \quad (i = n, 0) \quad (22)$$

$$\left(P_{(n)} = P_{(d)} \exp \left(-\frac{m \rho_h L_h S_{h(0)}}{\rho c T_*} \right), \quad P_{(d)} = P_{s0} \exp \left(\frac{1 - \theta_{s0}}{\theta_*} \right) \right).$$

Аналитические решения

Применяя метод линеаризации Лейбензона [7] к уравнению (19), его можно свести к виду

$$-\frac{\xi}{2} \frac{dP^2}{d\xi} = S_{g(i)}^2 \tilde{P} \frac{1}{\xi^n} \frac{d}{d\xi} \left(\xi^n \frac{dP^2}{d\xi} \right) \quad (i = n, 0), \quad (23)$$

где \tilde{P} – значение безразмерного давления, возле которого производится линеаризация.

Из уравнения (23), с учетом условий (21) и (22), можно получить следующие аналитические решения:

$$0 \leq \xi \leq \xi_{(n)} :$$

$$P^2 = P_{(n)}^2 + (P_{(e)}^2 - P_{(n)}^2) \frac{\int_{\xi}^{\xi_{(n)}} \exp \left(-\frac{\xi^2}{4S_{g(n)}^2 \tilde{P}} \right) d\xi}{\int_0^{\xi_{(n)}} \exp \left(-\frac{\xi^2}{4S_{g(n)}^2 \tilde{P}} \right) d\xi} \quad (P_{(e)} < \tilde{P} < P_{(n)}) \text{ при } n = 0; \quad (24)$$

$$\xi_{(w)} \leq \xi \leq \xi_{(n)} :$$

$$P^2 = P_{(n)}^2 - Q^{(m)} \int_{\xi}^{\xi_{(n)}} \frac{1}{\xi} \exp \left(-\frac{\xi^2}{4S_{g(n)}^2 \tilde{P}} \right) d\xi \quad (P_{(w)} < \tilde{P} < P_{(n)}) \text{ при } n = 1; \quad (25)$$

$$\xi \geq \xi_{(d)} :$$

$$P^2 = 1 + (P_{(d)}^2 - 1) \frac{\int_{\xi}^{\infty} \frac{1}{\xi} \exp \left(-\frac{\xi^2}{4S_{g(0)}^2 \tilde{P}} \right) d\xi}{\int_{\xi_{(d)}}^{\infty} \frac{1}{\xi} \exp \left(-\frac{\xi^2}{4S_{g(0)}^2 \tilde{P}} \right) d\xi} \quad (P_{(d)} < \tilde{P} < 1) \text{ при } n = 0, 1. \quad (26)$$

Численный анализ

Численные расчеты были проведены при следующих значениях параметров, определяющих свойства, а также исходное состояние пористой среды и насыщающих ее компонентов:

$$m = 0,1, k_0 = 10^{-13} \text{ м}^2, T_* = 10 \text{ К}, T_{s,0} = 280 \text{ К}, p_{s,0} = 5,5 \text{ МПа},$$

$$\rho c = 2,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \text{ К}), R_g = 519,4 \text{ Дж}/(\text{кг К}), \mu_g = 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с},$$

$$\rho_l = 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3, \rho_h = 900 \text{ кг}/\text{м}^3, G = 0,12, L_h = 5 \cdot 10^5 \text{ Дж}/\text{кг}.$$

На рис. 1 приведена фазовая диаграмма с иллюстрацией режимов отбора газа. В плоскоодномерной постановке в зависимости от значений граничного давления $p_{(e)}$ возможны три режима отбора газа из гидратосодержащего пласта.

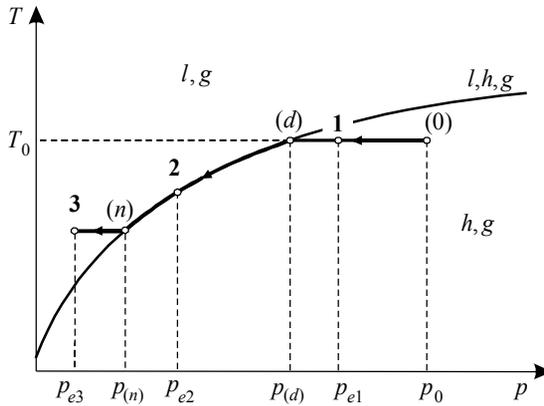


Рис. 1. Иллюстрация режимов отбора газа в зависимости от граничного давления (1 – первый режим; 2 – второй режим; 3 – третий режим)

Первый режим, когда $p_{(d)} \leq p_e < p_0$, сопровождается только фильтрацией газа без разложения гидрата, так как при этом сохраняются термодинамические условия существования гидрата.

Второй и третий режимы сопровождаются разложением гидрата в объемной области. Для второго режима ($p_{(n)} \leq p_e < p_{(d)}$) образуются две области: ближняя область, насыщенная газом, гидратом и водой, и дальняя область, насыщенная газом и гидратом.

Третий режим ($p_e < p_{(n)}$) характеризуется образованием трех областей: ближняя область, насыщенная газом и водой, образована в результате разложения гидрата, дальняя область – газом и гидратом, промежуточная – газом, гидратом и водой.

Влияние граничного давления на гидродинамическую картину в пористой среде представлено на рис. 2. Графиком на рисунке соответствуют три режима отбора газа из пласта. При реализации первого режима (кривая 1) гидрат не разлагается, а следовательно, температура выхода газа будет равна исходной температуре

пористой среды. При реализации второго режима (кривая 2) гидрат, частично насыщающий пористую среду, частично разлагается, что сопровождается понижением температуры пористой среды и отбираемого газа. При реализации третьего режима (кривая 3) гидрат в пористой среде полностью разлагается, что сопровождается соответствующим максимальным понижением температуры пористой среды и отбираемого газа. Понижение температуры пористой среды связано с затратами тепла на разложение гидрата. Кроме того, можно заметить, что чем ниже граничное давление, тем интенсивней происходит разложение гидрата в пористой среде.

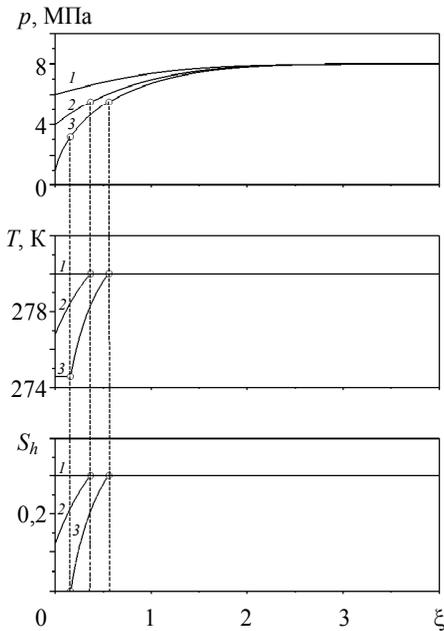


Рис. 2. Влияние граничного давления p_e на режимы отбора газа (1 – 6 МПа, 2 – 4 МПа, 3 – 1 МПа)

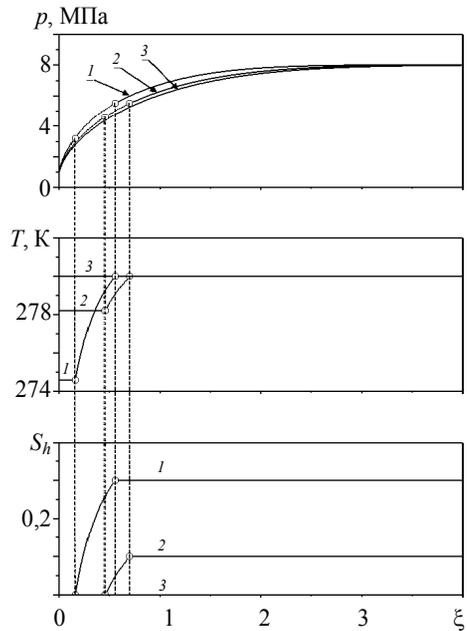


Рис. 3. Влияние исходной гидратонасыщенности $S_{h(0)}$ на гидродинамическую картину (1 – 0,3, 2 – 0,1, 3 – 0)

Влияние исходной гидратонасыщенности на процесс отбора газа из гидратосодержащего пласта проиллюстрировано на рис. 3. Как следует из графиков, чем выше исходная гидратонасыщенность, тем, во-первых, ниже минимальная температура пористой среды, реализуемая при полном разложении гидрата в пористой среде, которая определяется по формуле (16) для $T_{(n)}$; во-вторых, ниже фазовая проницаемость газа и, следовательно, меньше скорости фильтрации газа и движения границ $r_{(n)}$ и $r_{(d)}$, что и наблюдается на рисунке.

На рис. 4 показано влияние исходного давления пористой среды на гидродинамическую картину. С одной стороны, согласно графикам, с увеличением исходного давления протяженность областей и скорость движения границ уменьшаются, что говорит об уменьшении интенсивности разложения гидратов. С другой

стороны, с увеличением исходного давления увеличивается величина депрессии, что сопровождается увеличением интенсивности отбора газа. Эти факты говорят о том, что в основном отбор газа реализуется за счет фильтрации изначально свободного газа. Из рис. 5 видно, что чем больше исходная температура пористой среды, тем больше скорость движения границ и больше протяженность областей.

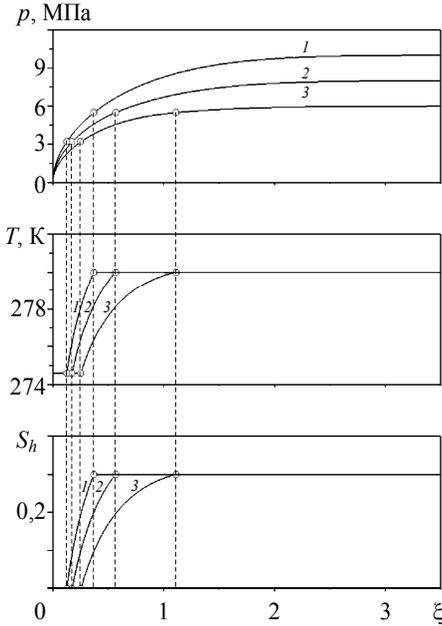


Рис. 4. Влияние исходного давления p_0 пористой среды на гидродинамическую картину (1 – 10 МПа, 2 – 8 МПа, 3 – 6 МПа)

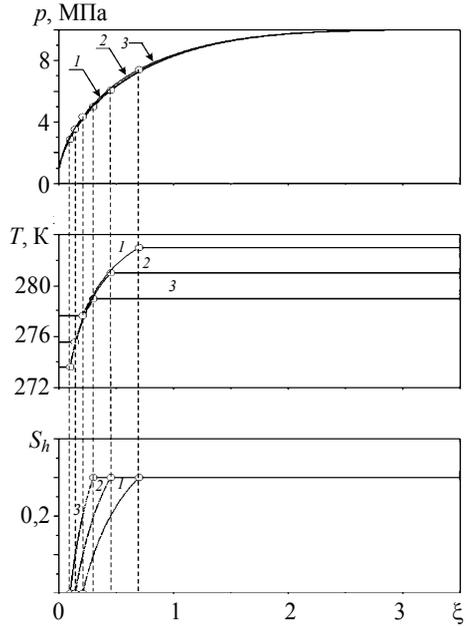


Рис. 5. Влияние исходной температуры T_0 пористой среды на распределения давления, температуры и гидратонасыщенности (1 – 283 К, 2 – 281 К, 3 – 279 К)

Зависимости автомодельных координат границ от граничного давления представлены на рис. 6. Графики зависимости получены для пористой среды с исходной гидратонасыщенностью $S_{h(0)} = 0,3$ и исходной температурой $T_0 = 280$ К.

Влияние граничного давления $p_{(e)}$ на величину массового расхода $q^{(m)}$ газа иллюстрируется на рис. 7. Расход с уменьшением граничного давления увеличивается, что является очевидным. Кроме того, присутствие газогидрата в пористой среде снижает массовый расход. Казалось бы, что разложение гидратов в пористой среде должно увеличивать массовый расход, однако присутствие газогидратов снижает фазовую проницаемость газа, что и является причиной снижения расхода газа.

В радиальной постановке всегда образуются все три характерные области, описанные выше. На рис. 8 представлены поля давления, температур и гидратонасыщенности в зависимости от темпа отбора газа. Следствием автомодельности постановки задачи является то, что при $\xi \rightarrow 0$ значение давления $p \rightarrow -\infty$.

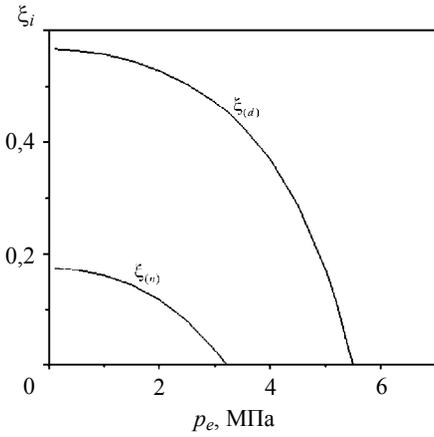


Рис. 6. Зависимость значений автомодельных координат границ от граничного давления

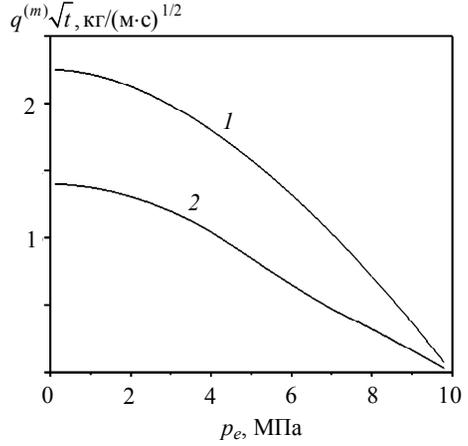


Рис. 7. Зависимость массового расхода $q^{(m)}$ газа от граничного давления p_e ($1 - S_{h(0)} = 0, 2 - S_{h(0)} = 0,3$)

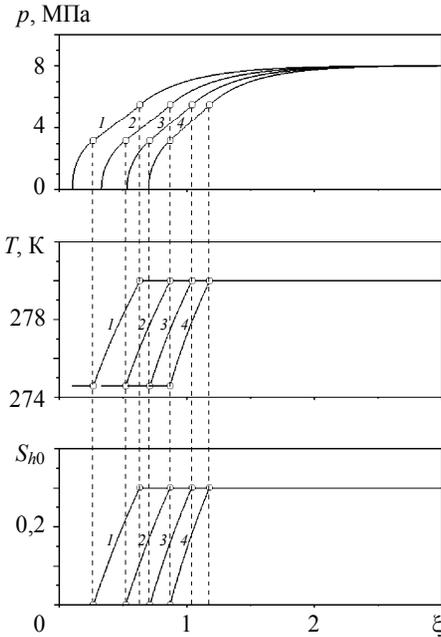


Рис. 8. Влияние массового расхода $q^{(m)}$ газа на распределение давления, температуры и гидратонасыщенности ($1 - 1 \text{ кг}/(\text{м}\cdot\text{с}), 2 - 2 \text{ кг}/(\text{м}\cdot\text{с}), 3 - 3 \text{ кг}/(\text{м}\cdot\text{с}), 4 - 4 \text{ кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$)

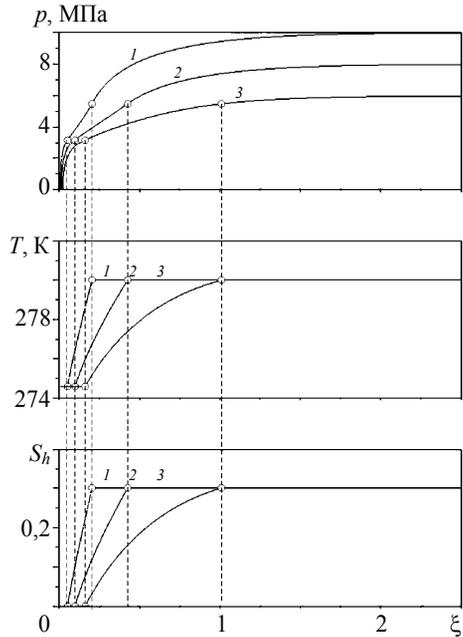


Рис. 9. Влияние исходного давления p_0 пористой среды на распределение давления, температуры и гидратонасыщенности ($1 - 10 \text{ МПа}, 2 - 8 \text{ МПа}, 3 - 6 \text{ МПа}$)

Участок с отрицательным давлением не имеет физического смысла. Решение будет иметь физический смысл только в том случае, если участок с отрицательным давлением будет находиться в пределах радиуса скважины $r_{(w)}$. С другой

стороны, граница полного разложения гидрата $r_{(n)}$ должна оставаться вне скважины. Следовательно, автомодельное решение может быть применимо для анализа реальных ситуаций только в случае выполнения следующего неравенства: $r_{(w)}^2 / (\mathcal{N}^{(p)} \xi_{(n)}^2) < t < r_{(w)}^2 / (\mathcal{N}^{(p)} \xi_{(0)}^2)$, где $\xi_{(0)}$ – автомодельная координата границы с нулевым значением давления.

На рис. 9 представлено влияние исходного давления на гидродинамическую картину. С увеличением исходного давления увеличивается и депрессия и, следовательно, увеличиваются скорость фильтрации и интенсивность отбора газа. Реализация интенсивности отбора, в данном случае равного $q^{(m)} = 0,5$ кг/(м·с), при меньшем значении исходного давления требует менее интенсивного разложения гидратов в пористой среде, что и наблюдается на рисунке.

Из рис. 10 видно, что с увеличением исходной гидратонасыщенности уменьшается фазовая проницаемость газа и, следовательно, уменьшаются скорость фильтрации и интенсивность отбора газа. Поддержание интенсивности отбора $q^{(m)} = 0,5$ кг/(м·с) при больших значениях исходных гидратонасыщенностей требует более интенсивного разложения гидратов в пористой среде, что и наблюдается на рисунке.

Согласно рис. 11 реализация отбора газа с одинаковой интенсивностью при более высоких исходных температурах пористой среды осуществляется с увеличением протяженности области разложения гидрата.

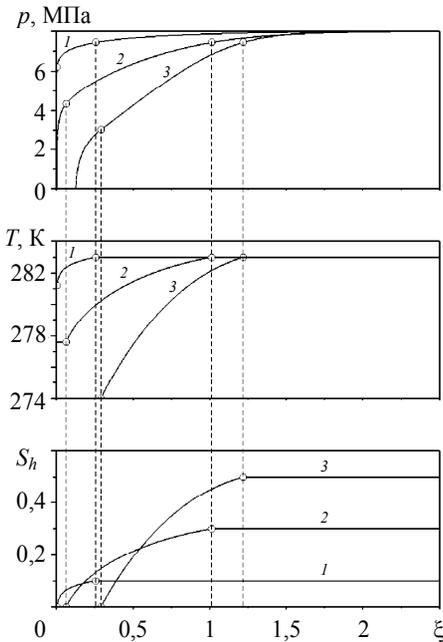


Рис. 10. Влияние исходной гидратонасыщенности $S_{h(0)}$ на распределения давления, температуры и гидратонасыщенности (1 – 0,1, 2 – 0,3, 3 – 0,5)

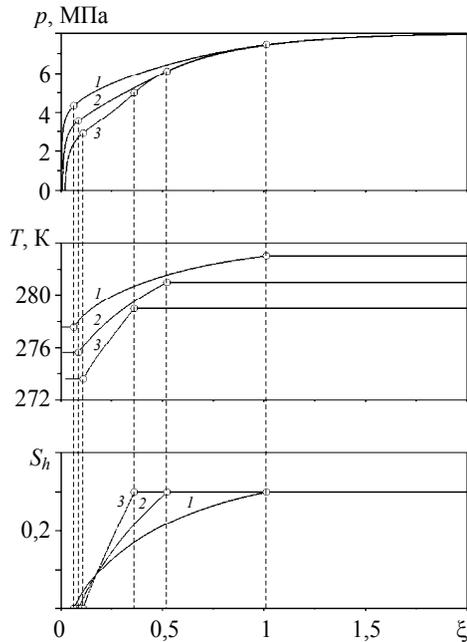


Рис. 11. Влияние исходной температуры T_0 пористой среды на распределения давления, температуры и гидратонасыщенности (1 – 283 К, 2 – 281 К, 3 – 279 К)

На рис. 12 показаны зависимости автомодельных координат границ нулевого значения давления $\xi_{(0)}$, полного разложения гидрата $\xi_{(n)}$ и дальней границы $\xi_{(d)}$ от массового расхода газа.

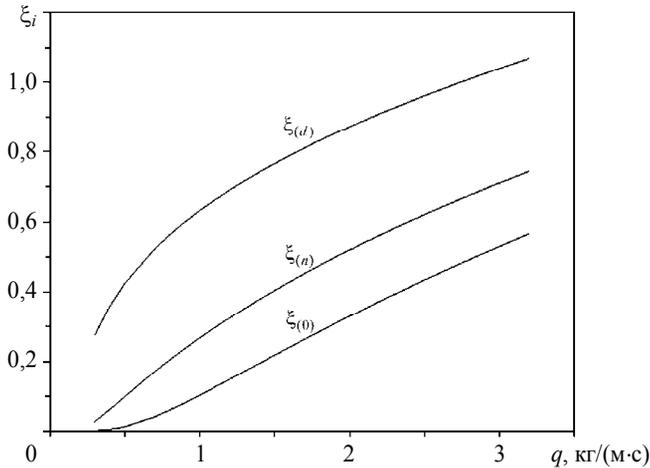


Рис. 12. Зависимости автомодельных координат границ от массового расхода газа

Заключение

Анализ результатов численных расчетов показывает, что в зависимости от значения граничного давления и значения исходной гидратонасыщенности, в случае плоскоодномерной постановки, возможны три режима отбора газа. Критериями, разделяющими режимы, являются давления $p_{(n)}$ и $p_{(d)}$, определяемые характеристиками исходного состояния пористой среды.

В радиальной постановке возможна реализация только одного режима, при котором образуются все три характерные области. Причем как показывает анализ результатов, автомодельное решение может быть применимо для анализа реальных ситуаций только в ограниченных временных интервалах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соловьев В.А. Природные газовые гидраты, как потенциальное полезное ископаемое // Российский химический журнал. 2003. № 3. С. 59–69.
2. Макогон Ю.Ф. Природные газовые гидраты: распространение, модели образования, ресурсы // Российский химический журнал. 2003. № 3. С. 70–79.
3. Нигматулин Р.И., Шагапов В.Ш., Сыртланов В.Р. Автомодельная задача о разложении газогидратов в пористой среде при депрессии и нагреве // ПМТФ. 1998. Т. 39. № 3. С. 111–118.
4. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Движение жидкостей и газов в пористых пластах. М.: Недра, 1984.
5. Бык С.Ш., Макогон Ю.Ф., Фомина В.И. Газовые гидраты. М.: Химия, 1980.
6. Шагапов В.Ш., Нурисламов О.Р. Некоторые особенности синтеза газогидратов нагнетанием газа во влажную пористую среду // ТОХТ. 2010. Т. 44. № 3. С. 275–285.
7. Лейбензон А.С. Движения природных и газов в пористой среде. М.: ОГИЗ, 1947.

Shagapov V.S., Nurislamov O.R., Khabibullina A.R. GAS EXTRACTION FROM POROUS MEDIUM CONTAINING HYDRATES BY MEANS OF DEPRESSION INFLUENCE. The decomposition of gas hydrates partially saturating a porous medium by means of depression influence is investigated in the plane one-dimensional and radial automodel formulations. It is shown that, depending on the state of the porous medium and boundary pressure, the gas can be extracted from a hydrate-containing stratum in three modes, with qualitatively differing structures of the formed zones. The criteria distinguishing these modes are revealed.

Key words: hydrates, gas extraction, porous medium, depression method.

SHAGAPOV Vladislav Shaikhulagzamovich (Institute of Mechanics of Ufa Branch, RAS)

E-mail: shagapov@rambler.ru

NURISLAMOV Oleg Robertovich (South-Ural State University, Nizhnevartovsk)

E-mail: nuris_o_r@mail.ru

KHABIBULLINA Aigul Rinatovna (Surgut Oil and Gas Institute Branch of Tyumen State Oil and Gas University)

E-mail: aigul1805@rambler.ru