

УДК 532.546:536.421

© 2005 г. Г. Г. ЦЫПКИН

ВЛИЯНИЕ РАЗЛОЖЕНИЯ ГАЗОВОГО ГИДРАТА НА ДОБЫЧУ ГАЗА ИЗ ПЛАСТА, СОДЕРЖАЩЕГО ГИДРАТ И ГАЗ В СВОБОДНОМ СОСТОЯНИИ

Рассматривается задача добычи газа при диссоциации гидрата метана в пласте, насыщенном смесью газа и гидрата. Математическая модель разложения гидрата на газ и воду обобщается на область отрицательных температур и учитывает образование льда. Представлено решение задач в автомодельном приближении. Показано, что существует переходный режим разложения гидрата, при котором одновременно образуются вода и лед. На основе выведенных соотношений для масс извлеченного газа проводится сравнительный анализ объемов добычи для различных режимов диссоциации гидрата. Показано, что в переходном режиме диссоциации гидрата наблюдается аномальный рост объемов добываемого газа.

Ключевые слова: фильтрация, газовые месторождения, гидраты, диссоциация, режимы разложения, образование льда.

Интерес к газовым гидратам как к потенциальным источникам природного газа сохраняется уже три десятилетия. Хотя оценки объемов газа в гидратном состоянии, приводимые различными авторами, различаются на порядки, но результаты натуральных исследований свидетельствуют, что эти объемы значительно превосходят ресурсы газа в свободном состоянии [1]. Как правило, скопления природных газовых гидратов связаны либо с месторождениями углеводородов [2], либо расположены в морских (океанических) осадочных породах [3]. В настоящее время не существует каких-либо схем утилизации гидратов находящихся в придонных морских осадках, так как гидраты в этом случае играют роль цементирующего материала, и при их разложении донные породы теряют устойчивость и приходят в движение. Гидраты, существующие в месторождениях углеводородов, не являются породобразующим минералом, и их разложение, вызванное добычей углеводородов, обычно не провоцирует разрушение структуры пласта.

Диссоциация и образование газовых гидратов может происходить в зависимости от термодинамических условий как с участием воды, так и льда [4]. Диссоциация гидратов в пластах при разработке газовых месторождений инициируется падением давления в пласте. Очевидно, что если гидратсодержащий пласт имеет отрицательную температуру, то процесс разложения гидратов будет проходить в области отрицательных температур, так как разложение гидратов идет с поглощением тепла. Такой случай может реализоваться при разработке месторождений газа в районах распространения вечной мерзлоты.

Результаты математического моделирования процесса разложения гидрата метана показали [5, 6] что для пластов, имеющих начальную положительную температуру, поглощение энергии может быть значительным и приводить к формированию зоны отрицательных температур в окрестности фронта диссоциации. В этом случае естественно считать, что при разложении гидрата образуются газ и лед. Реализация того или иного режима разложения определяется физическими параметрами пласта, начальными и граничными условиями. В предельном случае, когда гидрат полностью насыщает поровое пространство, было показано [5], что существуют два фронтальных режима раз-

ложения, соответственно на газ и воду и на газ и лед. В наиболее распространенных случаях гидрат в начальном состоянии сосуществует с газом, и в высокопроницаемых пластах формируются протяженные области диссоциации, требующие более сложного математического описания. Задача разложения гидрата, сосуществующего с газом в пластах, исследовалась в [6, 7] во фронтальной постановке, где была представлена критическая диаграмма существования четырех режимов разложения.

С практической точки зрения представляет интерес исследовать взаимосвязь объемов добычи газа с режимами разложения гидрата в пласте. Режимы разложения определяются давлением в добывающей скважине. Если при добыче газа из газового месторождения давление в скважине остается больше давления диссоциации гидрата, определяемого локальной температурой пласта, то реализуется режим извлечения газа без разложения гидрата. Снижение давления в пласте ниже давления диссоциации вызывает разложение гидрата в режиме образования воды. Если падение давления велико, то в результате интенсивного процесса диссоциации происходит значительное поглощение энергии, что приводит к формированию льда при разложении.

В настоящей работе показано, что между режимами диссоциации с образованием соответственно жидкой и твердой фазы H_2O существует переходный режим, который характеризуется образованием газа и гетерогенной смеси воды и льда. Сравнительный анализ объемов извлекаемого газа показал аномальный рост добычи в переходном режиме.

1. Разложение гидрата с образованием воды. Пусть гидратсодержащий пласт в начальный момент времени представляет собой пористую среду, насыщенную газом и гидратом с давлением P_0 , температурой T_0 и гидратонасыщенностью v_0 . Если работа добывающей скважины понижает давление в пласте ниже давления диссоциации, то формируется фронт разложения гидрата, разделяющий области, насыщенные смесью газа и гидрата (область 1) и смесью газа и воды (область 2). Для описания процесса фильтрации газа воспользуемся уравнениями сохранения масс газа и воды, законом сохранения энергии, законом Дарси и уравнением состояния Клапейрона. Система основных уравнений имеет вид:

в области газ–гидрат

$$m \frac{\partial}{\partial t} (1 - v) \rho_g + \operatorname{div} v_g \rho_g = 0, \quad v_g = -\frac{k}{\mu_g} f_g(v) \operatorname{grad} P, \quad P = \rho_g R T$$

$$(\rho C)_1 \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_g C_v v_g \operatorname{grad} T = \operatorname{div} (\lambda_1 \operatorname{grad} T) \quad (1.1)$$

$$\lambda_1 = m(1 - v) \lambda_g + m v \lambda_h + (1 - m) \lambda_s$$

$$(\rho C)_1 = m(1 - v) \rho_g C_p + m v \rho_h C_h + (1 - m) \rho_s C_s$$

в области газ–вода

$$m \frac{\partial}{\partial t} (1 - S_w) \rho_g + \operatorname{div} v_g \rho_g = 0, \quad m \frac{\partial}{\partial t} S_w + \operatorname{div} v_g = 0 \quad (1.2)$$

$$v_g = -\frac{k}{\mu_j} f_j(S_j) \operatorname{grad} P, \quad j = g, w, \quad P = \rho_g R T$$

Здесь v – скорость фильтрации, m – пористость, k – проницаемость, μ – вязкость, P – давление, v – гидратонасыщенность (объемная доля порового пространства, занимаемая гидратом), S – водонасыщенность, ρ – плотность, f_{gh} – фазовая проницаемость газа в области газ–гидрат, f_w, f_g – фазовые проницаемости воды и газа в области газ–вода, T – температура, R – газовая постоянная, C – удельная теплоемкость,

λ – теплопроводность. Индексы: w, h, g и s – вода, гидрат, газ и скелет пористой среды соответственно.

Предполагается, что подток тепла к гидратсодержащему проницаемому пласту от окружающих непроницаемых пород отсутствует, что является хорошим приближением в случае пласта значительной толщины. Тогда падение температуры на фронте диссоциации вызывает подток тепла из области перед фронтом. За фронтом разложения в области 2 сохраняется постоянная температура, равная температуре на фронте $T_2 = T_* = \text{const}$, поэтому уравнение энергии в области газ–вода не рассматривается.

Условия на фронте следуют из законов сохранения масс газа и H_2O , а также закона сохранения энергии при термодинамически равновесном фазовом переходе

$$\begin{aligned} -m \left[v_+ \frac{\rho_{0g}}{\rho_g} + S_{w-} - v_+ \right] V_n &= \frac{k}{\mu_g} f_g(v_+) (\text{grad} P)_{n+} - \frac{k}{\mu_g} f_g(S_{w-}) (\text{grad} P)_{n-} \\ m \left[v_+ \frac{\rho_{0w}}{\rho_w} - S_{w-} \right] V_n &= \frac{k}{\mu_w} f_w(S_{w-}) (\text{grad} P)_{n-} \\ m q_{hw} v_+ \rho_h V_n &= \lambda_+ (\text{grad} T)_{n+} \end{aligned} \quad (1.3)$$

$$T_+ = T_- = T_*, \quad P_+ = P_- = P_*, \quad \ln \frac{P_*}{P_a} = A_w + \frac{B_w}{T_*}$$

$$A_w = 49.32, \quad B_w = -9459, \quad P_a = 10^5 \text{ Pa}$$

Здесь V – скорость межфазной поверхности, q_{hw} – удельная теплота диссоциации гидрата в режиме образования воды, ρ_{0w} – эффективная плотность H_2O в объеме, занимаемым гидратом, ρ_{0g} – эффективная плотность газа в объеме, занимаемым гидратом. Индексы: n – нормаль, плюс и минус – величины, относящиеся к областям перед и за фронтом соответственно, * – значения величин на фронте. Из предположения, что разложение гидрата происходит только на фронте диссоциации, следует $v_+ = v_0$.

Оценки показали [7], что понижение температуры пласта при разложении гидрата невелико $\delta T < 30 \text{ K}$. Это объясняется тем, что частицы горных пород, составляющие проницаемый пласт, занимают большую часть объема и содержат значительное количество тепла, которое компенсирует тепло, затрачиваемое на фазовый переход. Поэтому при депрессионном воздействии на пласт изменения температуры много меньше абсолютного значения, и процедура линеаризации для функции температуры может быть применена без каких-либо дополнительных предположений. Предполагая, что отклонения давления и водонасыщенности невелики по сравнению с абсолютными значениями, получаем в линейном приближении для возмущений давления, температуры и водонасыщенности

$$\begin{aligned} \frac{\partial S_w}{\partial t} &= \kappa_w \Delta P, \quad \frac{\partial P}{\partial t} = \kappa_j \Delta P, \quad \frac{\partial T}{\partial t} = a_1 \Delta T, \quad j = 1, 2 \\ \kappa_w &= \frac{k f_w(S_w^0)}{m \mu_w}, \quad \kappa_1 = \frac{k P_0}{m \mu_g}, \quad \kappa_2 = \frac{k P^0}{m(1 - S_w^0)} \left[\frac{S_w^0}{\mu_w} + \frac{1 - S_w^0}{\mu_g} \right] \end{aligned} \quad (1.4)$$

$$a_1 = \frac{m(1 - v_0)\lambda_g + m v_0 \lambda_h + (1 - m)\lambda_s}{m(1 - v_0)\rho_g C_p + m v_0 \rho_h C_h + (1 - m)\rho_s C_s}, \quad S_w^0 = \frac{v_0 \rho_{0w}}{\rho_w}$$

Здесь S_w^0 – невозмущенное значение водонасыщенности в области 2.

Рассмотрим одномерную задачу извлечения газа из пласта, занимающего полупространство $x > 0$. Положим, что начальные функции давления, температуры и гидратонасыщенности, а также давление P^0 в добывающей скважине являются постоянными величинами. Тогда задача имеет автомодельное решение

$$0 < x < X(t): P(\xi) = P^0 + (P_* - P^0) \frac{\operatorname{erf}(\xi/2\sqrt{\kappa_2})}{\operatorname{erf}(\beta/2\sqrt{\kappa_2})}$$

$$X(t) < x < \infty: P(\xi) = P_0 + (P_* - P_0) \frac{\operatorname{erfc}(\xi/2\sqrt{\kappa_1})}{\operatorname{erfc}(\beta/2\sqrt{\kappa_1})} \quad (1.5)$$

$$T(\xi) = T_0 + (T_* - T_0) \frac{\operatorname{erfc}(\xi/2\sqrt{a_1})}{\operatorname{erfc}(\beta/2\sqrt{a_1})}$$

Подстановка решений (1.5) в систему граничных условий (1.3) сводит задачу к нахождению положения подвижной границы диссоциации $x = X(t) = \beta\sqrt{t}$, давления P_* , температуры T_* и водонасыщенности S_{w*} на этой границе из системы трансцендентных уравнений

$$\sqrt{\frac{\pi a_1}{\kappa_1}} \left[v_0 \left(\frac{\rho_{0g}}{\rho_{g*}} - 1 \right) + S_{w*} \right] \gamma + (1 - v_0) \left(\frac{P_*}{P_0} - 1 \right) \frac{\exp(-\gamma^2 a_1 / \kappa_1)}{\operatorname{erfc}(\gamma\sqrt{a_1 / \kappa_1})} -$$

$$- (1 - S_{w*}) \sqrt{\frac{\kappa_1}{\kappa_2}} \left(\frac{P_*}{P_0} - \frac{P^0}{P_0} \right) \frac{\exp(-\gamma^2 a_1 / \kappa_2)}{\operatorname{erf}(\gamma\sqrt{a_1 / \kappa_2})} = 0$$

$$\sqrt{\pi} \left(v_0 \frac{\rho_{0w}}{\rho_w} - S_{w*} \right) \gamma - \frac{\kappa_w}{\sqrt{a_1 \kappa_2}} S_{w*} \left(\frac{P_*}{P_0} - \frac{P^0}{P_0} \right) \frac{\exp(-\gamma^2 a_1 / \kappa_2)}{\operatorname{erf}(\gamma\sqrt{a_1 / \kappa_2})} = 0 \quad (1.6)$$

$$\frac{\sqrt{\pi a_1 \kappa_1} m v_0 q_{hw} \rho_h}{\lambda_1 T_0} \gamma + \left(\frac{T_*}{T_0} - 1 \right) \frac{\exp(-\gamma^2)}{\operatorname{erfc}(\gamma)} = 0$$

$$\ln \frac{P_*}{P_0} = A_w + \frac{B_w}{T_*}, \quad \gamma = \frac{\beta}{2\sqrt{a_1}}$$

Масса газа, извлеченного из пласта, может быть вычислена по формуле

$$M'_w = m(1 - v_0) \int_0^\infty \rho_g dx + m v_0 \int_0^\infty \rho_{0g} dx - m(1 - v_0) \int_{X(t)}^\infty \rho_g dx -$$

$$- m v_0 \int_{X(t)}^\infty \rho_{0g} dx - m(1 - S_w) \int_0^{X(t)} \rho_g dx$$

После преобразований получаем для безразмерной массы

$$\frac{M'_w}{2m\rho_{0g}\sqrt{a_1}} = M_w = v_0 \frac{\rho_{0g}}{\rho_{g0}} \gamma + (1 - v_0) \gamma + (1 - v_0) \left(1 - \frac{P_*}{P_0} \right) \times$$

$$\times \left[\frac{\sqrt{\kappa_1} \exp(-\gamma^2 \sqrt{a_1/\kappa_1})}{\sqrt{a_1 \pi} \operatorname{erfc}(\gamma \sqrt{a_1/\kappa_1})} - \gamma \right] - (1 - S_{w*}) \times \quad (1.7)$$

$$\times \left[\frac{P^0}{P_0} \gamma + \left(\frac{P_*}{P_0} - \frac{P^0}{P_0} \right) \left(\frac{\sqrt{\kappa_2}}{\sqrt{a_1 \pi} \operatorname{erf}(\gamma \sqrt{a_1/\kappa_2})} \left(\exp\left(-\gamma^2 \frac{a_1}{\sqrt{\kappa_2}}\right) - 1 \right) - \gamma \right) \right]$$

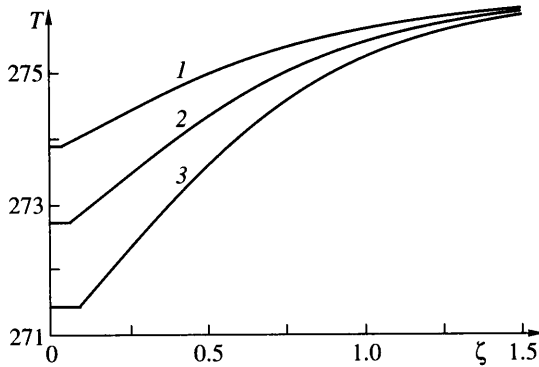
Система трансцендентных уравнений решалась при следующих значениях параметров: $m = 0.25$, $q_{hw} = 5 \cdot 10^5$ кг/м³, $R = 520$ Дж/(кг · К), $\rho_w = 10^3$ кг/м³, $\rho_h = 9 \cdot 10^2$ кг/м³, $\rho_s = 2 \cdot 10^3$ кг/м³, $\rho_{ow} = 0.784 \cdot 10^3$ кг/м³, $\rho_{og} = 0.116 \cdot 10^3$ кг/м³, $\mu_w = 1.8 \cdot 10^{-3}$ Па · с, $\mu_w = 1.8 \cdot 10^{-5}$ Па · с, $\lambda_w = 0.58$ Вт/(м · К), $\lambda_s = 2$ Вт/(м · К), $\lambda_g = 0.034$ Вт/(м · К), $\lambda_h = 2.11$ Вт/(м · К), $C_w = 4.2 \cdot 10^3$ Дж/(кг · К), $C_s = 10^3$ Дж/(кг · К), $C_h = 2.5 \cdot 10^3$ Дж/(кг · К), $C_p = 2 \cdot 10^3$ Дж/(кг · К).

На фиг. 1 представлены распределения температуры при трех различных давлениях в скважине. Изломы кривых соответствуют положению границы диссоциации гидрата. Падение давления в скважине интенсифицирует процесс разложения, что выражается в увеличении скорости фронта и падении температуры диссоциации. Для достаточно низких значений давления в скважине температура может опуститься ниже точки замерзания воды (кривые 2 и 3), хотя формулировка задачи предполагает, что разложение происходит в положительном диапазоне температур, когда гидрат разлагается на газ и воду. Существенное снижение температуры можно объяснить тем, что при интенсификации разложения гидрата поглощение тепла увеличивается и энергии пород уже недостаточно, чтобы удерживать температуру пласта положительной. Поэтому результаты расчетов не соответствуют предположению о разложении гидрата на газ и воду, которое лежит в основе математической модели.

Естественно предположить, что в этом случае режим разложения трансформируется, и вместо воды образуется твердая фаза – лед, который, как и гидрат, остается неподвижным относительно скелета пористой среды. Добыча газа сопровождается извлечением значительных объемов воды [5], что соответствует уменьшению значения искомой функции S_w по сравнению с невозмущенным значением S_w^0 . Так, для решенных соответствующих кривым 1–3 функция S_w принимает значения 0.31, 0.32 и 0.33 соответственно, а $S_w^0 = 0.39$. В нелинейном случае различие для функции водонасыщенности между нулевыми значениями и искомым может быть более существенным. Уменьшение водонасыщенности S_w в области газ–вода приводит к увеличению относительной проницаемости по газу и соответственно потока газа. Если же при разложении гидрата образуется лед, то он заполняет поровое пространство пласта и препятствует оттоку газа. Для того чтобы произвести сравнительный анализ объемов добычи газа при различных режимах разложения гидрата, необходимо обобщить модель разложения на случай отрицательных температур.

2. Разложение гидрата с образованием льда. Сравнительный анализ двух режимов разложения. Если диссоциация гидрата происходит при отрицательных температурах, то за поверхностью разложения формируется область $0 < x < X(t)$, насыщенная льдом и газом. В области 1 система основных уравнений (1.1) сохраняет свой вид. В системе (1.2), соответствующей области 2, следует индекс w заменить на i и положить $v_i = 0$ (условие неподвижности льда). Тогда первое уравнение (1.2) останется без изменений, а из второго уравнение следует $S_i = \text{const}$.

Граничные условия на фронте разложения гидрата на газ и лед по форме аналогичны условиям (1.3). Учитывая образование льда за фронтом и его неподвижность,



Фиг. 1. Распределение температур при разложении гидрата на газ и воду. $v_0 = 0.5$, $k = 10^{-17} \text{ м}^2$, $T_0 = 276 \text{ К}$, $P_0 = 6 \cdot 10^6 \text{ Па}$; $P^0 = 2.6 \cdot 10^6$, $P^0 = 2.2 \cdot 10^6$, $P^0 = 1.8 \cdot 10^6 \text{ Па}$ (кривые 1–3)

а также изменение удельной теплоты диссоциации и констант в уравнении Клапейрона-Клаузиуса, получаем

$$-m \left[v_+ \frac{\rho_0 g}{\rho_g} + S_i - v_+ \right] V_n = \frac{k}{\mu_g} f_g(v_+) (\text{grad} P)_{n+} - \frac{k}{\mu_g} f_g(S_i) (\text{grad} P)_{n-}$$

$$v_+ \frac{\rho_{0w}}{\rho_w} - S_i = 0$$

$$mq_{hi} v_+ \rho_h V_n = \lambda_+ (\text{grad} T)_{n+} \tag{2.1}$$

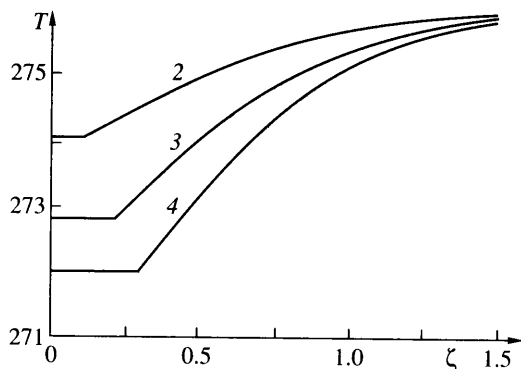
$$T_+ = T_- = T_*, \quad P_+ = P_- = P_*, \quad \ln \frac{P_*}{P_a} = A_i + \frac{B_i}{T_*}$$

$$A_i = 24.38, \quad B_i = -2655.6, \quad P_a = 10^5 \text{ Па}$$

Аналогичным образом изменяются эффективные коэффициенты теплопроводности и теплоемкости, входящие в коэффициенты системы уравнений (1.4) для области газ–лед, а также выражение для массы извлеченного газа, где индекс w должен быть заменен индексом i . Значение функции льдонасыщенности S_i , которая постоянна в области 2, непосредственно определяется из второго уравнения системы (2.1) и зависит только от значения гидратонасыщенности v_0 , в то время как для режима образования воды значение функции водонасыщенности на границе S_{w*} сильно зависит от давления в скважине [5].

Задача разложения гидрата на газ и лед допускает автомодельное решение и сводится к решению системы трансцендентных уравнений аналогичных (1.6). Система трансцендентных уравнений для задачи разложения гидрата на газ и лед решалась при значениях параметров предыдущего параграфа, а также $q_{hi} = 1.66 \cdot 10^5 \text{ кг/м}^3$, $\rho_i = 0.9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Результаты расчетов режимов в рамках второй модели (модели образования льда), соответствующих кривым 2 и 3 (фиг. 1) приведены на фиг. 2. Видно, что температура на фронте диссоциации третьего режима опустилась ниже точки замерзания и при использовании модели разложения гидрата на газ и лед (кривая 3, фиг. 2). Однако для



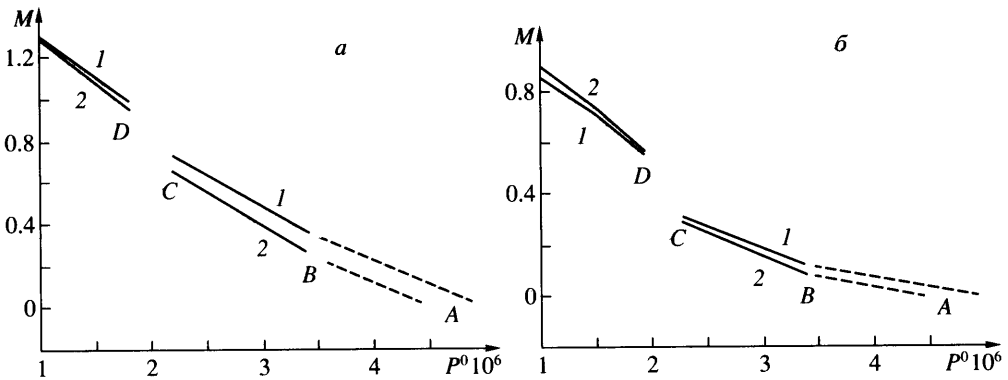
Фиг. 2. Распределение температур при разложении гидрата на газ и лед. $v_0 = 0.5$, $k = 10^{-17} \text{ м}^2$, $T_0 = 276 \text{ К}$, $P_0 = 6 \cdot 10^6 \text{ Па}$; $P^0 = 2.2 \cdot 10^6$, $P^0 = 1.8 \cdot 10^6$, $P^0 = 1.4 \cdot 10^6 \text{ Па}$ (кривые 2–4)

второго режима вычисления на основе модели гидрат–лед дают положительную температуру диссоциации (кривая 2, фиг. 2). Таким образом, для режима 2 предположение об образовании воды приводит к отрицательной температуре на фронте, а предположение об образовании льда – к положительной. Следовательно, имеется диапазон параметров, когда решение задачи не описывается ни одной из представленных моделей, так как обе модели разложения гидрата содержат противоречие термодинамического характера.

Полученные результаты дают основания считать, что при падении давления в скважине происходит постепенный переход от режима гидрат–вода к режиму гидрат–лед. Это означает, что при понижении давления разложение гидрата приводит к возникновению льда, сосуществующего с водой на фронте диссоциации. По мере падения давления в скважине доля льда увеличивается, а доля воды уменьшается, пока не достигается режим формирования только твердой фазы H_2O . Соответственно за фронтом разложения гидрата формируется трехфазная область, насыщенная газом, водой и льдом и для описания состояния этой области необходимо вводить уже три искомые функции насыщенностей. Границы применимости уже построенных моделей можно оценить из анализа объемов добычи газа.

На фиг. 3 представлены результаты вычислений безразмерной массы газа, извлекаемой из гидратсодержащего пласта, как функции давления в скважине. Когда давление в скважине меньше давления разложения гидрата, отбор газа происходит только за счет газа в свободном состоянии (отрезки AB). В точке B давление достигает значения давления диссоциации, и формируется фронт разложения. В результате объемы добываемого газа увеличиваются, но незначительно, что соответствует малому изменению наклона при переходе через точку B . При дальнейшем падении давления вклад от разложения гидрата растет, и расхождение отрезка BC с продолжением отрезка AB достигает 25% для $v_0 = 0.4$ и 30% для $v_0 = 0.8$ в точке C . Для большей гидратонасыщенности (фиг. 3, б) вклад от разложения гидрата более заметен, что соответствует большему наклону графика функции M .

В точках C температура диссоциации, рассчитанная в рамках модели образования воды, становится равной температуре кристаллизации воды, поэтому эта модель левее точек C неприменима. Левее точек D работает модель разложения гидрата с образованием льда. Область CD соответствует переходному режиму разложения, когда одновременно образуются лед и вода. Этот переходный режим ни одной из представленных моделей не описывается. Естественно предположить из соображений непре-



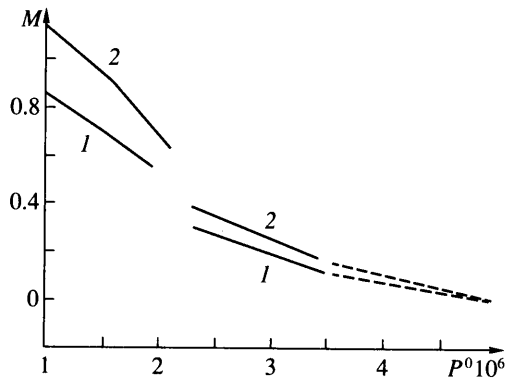
Фиг. 3. Зависимость безразмерной массы добываемого газа от давления в скважине при различных проницаемостях и начальных давлениях в пласте: $V_0 = 0.4$, $T_0 = 276$ К; $P_0 = 5 \cdot 10^6$, $P_0 = 4.5 \cdot 10^6$ Па (кривые 1, 2); $k = 10^{-17}$ м² (а), $k = 2 \cdot 10^{-17}$ м² (б)

рывности, что расчеты по трехфазной модели должны дать кривую, соединяющую точки *C* и *D*. Из представленных графиков видно, что скорость роста объемов добычи газа при понижении давления в скважине максимальна именно в переходном режиме, когда возрастает доля образующегося льда, однако вопрос о характере кривой может быть решен только при моделировании переходного режима.

Для объяснения поведения функции *M* в переходном режиме рассмотрим основные физические механизмы, влияющие на добычу газа. Очевидно, что уменьшение водонасыщенности S_w в области газ–вода увеличивает поток газа и тем самым стимулирует его отбор, тогда как неподвижный лед в области за фронтом препятствует этому процессу. С другой стороны, для диссоциации гидрата в режиме образования льда требуется в три раза меньше энергии ($q_{hi} < q_{hw}$), что приводит к существенному повышению скорости фронта разложения. Как показывают расчеты, последний фактор оказывается более значимым, а режим разложения с образованием льда более выгодным с точки зрения объемов добычи газа. Поэтому увеличение скорости роста объемов извлекаемого газа объясняется аномальным возрастанием скорости фронта разложения гидрата при замещении режима гидрат–вода на режим гидрат–лед. Расчеты показывают, что вклад от разложения гидрата в области положительных температур (отрезки *BC* на фиг. 3) на порядок меньше извлеченных объемов газа, а в области отрицательных температур эти величины одного порядка, что также можно объяснить существенным ростом скорости диссоциации для случая образования льда.

Взаимное расположение кривых на фиг. 3 показывает, что при уменьшении начального давления в пласте вклад от разложения гидрата возрастает. Это объясняется меньшим количеством газа в свободном состоянии и тем, что разница между начальным давлением и давлением диссоциации уменьшается, что способствует диссоциации гидрата. Также видно различие между кривыми на фиг. 3, *а* и *б* в области образования льда (левее точки *D*). На фиг. 3, *б* объемы добычи газа выше для пласта, имеющего меньшее начальное давление, так как здесь определяющую роль играет процесс разложения гидрата.

На фиг. 4 проиллюстрировано влияние проницаемости на объемы добываемого газа. Видно, что при большем значении проницаемости (кривая 2) скорость роста объемов добычи газа в зависимости от падения давления в скважине выше. Это особенно заметно в области образования льда, так как падение давления в скважине интенсифицирует процесс разложения гидрата, и этот фактор является определяющим.



Фиг. 4. Зависимость безразмерной массы добываемого газа от давления в скважине $v_0 = 0.8$, $T_0 = 276$ К, $P_0 = 4.5 \cdot 10^6$ Па; $k = 10^{-17}$, $k = 2 \cdot 10^{-17}$ м² (кривые 1, 2)

Применимость полученных результатов ограничена малыми значениями проницаемости, так как при больших проницаемостях разложение гидрата идет в протяженной области, и использованные здесь фронтовые модели приводят к термодинамическому противоречию, которое выражается в перегреве гидрата перед фронтом диссоциации. Для анализа процессов в высокопроницаемом пласте воспользуемся предельным случаем, когда пласт полностью насыщен гидратом и фронтовая модель диссоциации непротиворечива.

3. Случай гидратонасыщенного пласта. Рассмотрим предельный случай пласта, когда гидрат в начальный момент времени полностью заполняет поровое пространство. Для формулировки математической модели в этом случае надо формально положить $v_0 = 1$ в основных уравнениях и в условиях на подвижной границе. Соответственно будут существовать режимы с образованием воды и льда. В обоих случаях соотношения на поверхности диссоциации могут быть записаны в виде

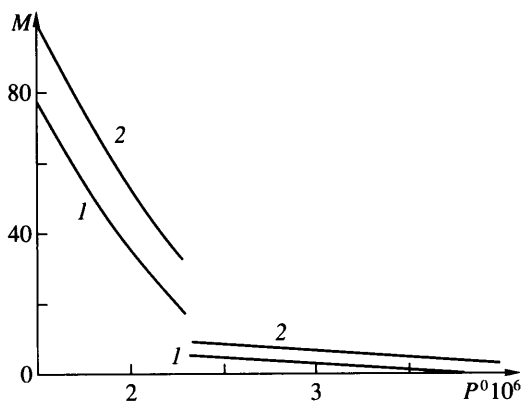
$$m \left[\frac{\rho_{0g}}{\rho_g} + S_{j-} - 1 \right] V_n = \frac{k}{\mu_g} f_g(S_g)(\text{grad}P)_{n-}$$

$$m \left[\frac{\rho_{0w}}{\rho_j} - S_{j-} \right] V_n = \frac{k}{\mu_w} f_w(S_{w-})(\text{grad}P)_{n-} \quad (3.1)$$

$$mq_{hj}\rho_h V_n = \lambda_+(\text{grad}T)_{n+}$$

$$T_+ = T_- = T_*, \quad P_+ = P_- = P_*, \quad \ln \frac{P_*}{P_a} = A_j + \frac{B_j}{T_*}, \quad j = w, i$$

В случае образования льда во втором уравнении системы (3.1) правую часть следует положить тождественно равной нулю. Процесс разложения гидрата однозначно определяет объемы газа, добываемого из пласта, так как в начальный момент времени пласт не содержит газа в свободном состоянии. Расчеты показывают, что для высоких проницаемостей ситуация качественно аналогична рассмотренной ранее (фиг. 5). При падении давления в скважине количество добываемого газа растет быстрее при разложении гидрата в режиме формирования льда. Также существует диапазон параметров, в котором решение задачи с образованием воды дает отрицательную температуру диссоциации, а решение задачи с образованием льда – положительную. Следова-



Фиг. 5. Зависимость безразмерной массы добываемого газа от давления в скважине для полностью гидратонасыщенного пласта; $k = 10^{-15} \text{ м}^2$; $T_0 = 277$, $T_0 = 280 \text{ К}$ (кривые 1, 2)

тельно и в этом случае существует переходный режим, при котором одновременно образуются вода и лед. Сравнительный анализ фигур 3–5 показывает, что чем больше начальная гидратонасыщенность пласта, тем меньший диапазон изменения давления в скважине занимает переходный режим. Так, в случае полного насыщения пласта (фиг. 5) переходный режим существует, когда давление в скважине изменяется от 2.3 до 2.33 МПа для $T_0 = 277 \text{ К}$ и от 2.28 до 2.33 МПа для $T_0 = 280 \text{ К}$, а количество извлекаемого газа при этом возрастает больше, чем в три раза. Как видно из фигур 3–5, уменьшение начальной гидратонасыщенности приводит к увеличению диапазона давлений, в котором существует переходный режим. Соответственно уменьшается скорость роста добычи газа в переходном режиме от почти скачкообразного увеличения в случае полной гидратонасыщенности (фиг. 5) до достаточно плавного при изменении давления в скважине от 1.8 до 2.3 МПа (фиг. 3).

Заключение. Математическая модель разложения гидрата в пласте обобщена на случай формирования льда. Расчеты показали, что существует переходный режим разложения гидрата, когда одновременно образуются вода и лед. Переходный режим характеризуется резким увеличением роста объемов добычи газа при понижении давления в скважине. В режиме образования льда зависимость объемов добываемого газа от давления в скважине сильнее, чем для режима образования воды, хотя проницаемость пласта по газу уменьшается. Это объясняется интенсификацией процесса разложения гидрата, так как удельная теплота диссоциации при образовании льда более чем в три раза меньше удельной теплоты в режиме образования воды. Если в начальном состоянии доля гидрата невелика, то влияние разложения гидрата на объемы добываемого газа незначительно. В этом случае вклад от разложения гидрата становится существенным, когда пластовое давление приближается к давлению диссоциации.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (№ 03-01-00068) и Президентской программы поддержки ведущих научных школ 1697.2003.1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sloan E.D. Clathrate Hydrates of Natural Gases. N.Y.: Dekker, 1998. P. 705.
2. Макогон Ю.Ф. Газовые гидраты, предупреждение их образования и использование. М.: Недра, 1985. 232 с.
3. Egorov A.V., Crane K., Vogt P., Rozhkov A.N., Shirshov P.P. Gas hydrates that outcrop on the sea floor: stability models // Geo-Marine Letters. 1999. V. 19. № 1/2. P. 68–75.

4. Sloan E.D., Jr., Fleyfel F. A molecular mechanism for gas hydrate nucleation from ice // *AIChE J.* 1991. V. 37. № 9. P. 1281–1292.
5. Цыпкин Г. Г. О режимах диссоциации газовых гидратов в высокопроницаемых пластах // *Инж.-физ. журн.* 1992. Т. 63. № 6. С. 714–721.
6. Цыпкин Г.Г. Математическая модель диссоциации газовых гидратов, сосуществующих с газом в пластах // *Докл. РАН.* 2001. Т. 381. № 1. С. 56–59.
7. Цыпкин Г.Г. О режимах диссоциации газовых гидратов, сосуществующих с газом в природных пластах // *Инж.-физ. жур.* 2001. Т. 74. № 5. С. 24–28.

Москва

Поступила в редакцию
20.II.2004