

УДК 532.546:536.421

© 1996 г. Ф.Ф. НАЗМУТДИНОВ, И.Л. ХАБИБУЛЛИН

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕСОРБЦИИ ГАЗА ИЗ ГАЗОВОГО ГИДРАТА

В газ-газогидратных пластах газ находится в свободном и в связанном состояниях. Количество связанного в гидрате газа зависит от термодинамических условий. Поэтому при изменении этих условий возможно выделение газа из гидрата в режиме десорбции до полной диссоциации гидрата на газ и воду. В работе рассматривается задача об отборе свободного и связанного в гидрате газа в режиме десорбции.

Первые математические модели, описывающие процессы диссоциации газовых гидратов в пластах, были предложены в [1, 2]. В этих работах не учитывалось движение выделяющейся из гидрата воды. В [3, 4] реализованы математические модели диссоциации газовых гидратов, сосуществующих в пластах с газом и водой, с учетом подвижности жидкой фазы. При этом показано, что фронтальные модели на основе стефановской концепции не всегда удовлетворительно описывают изучаемые процессы с точки зрения термодинамической корректности, и предложено ввести области объемной диссоциации газогидратов.

В настоящей работе предлагается дальнейшее развитие теории диссоциации газовых гидратов в природных пластах, рассматривается процесс десорбции газа из гидрата, который предшествует полной диссоциации гидрата на газ и воду.

**1. Постановка задачи и основные уравнения.** Газовые гидраты являются клатратными нестехиометрическими соединениями с общей формулой  $G_nH_2O$ , где  $n$  – число молекул воды, приходящихся на одну молекулу газа гидратообразователя  $G$ . Ввиду нестехиометричности для данного газа величина  $n$  является функцией давления  $p$  и температуры  $T$ . Молекулы воды, образующие кристаллическую решетку, связаны между собой водородными связями, в то же время молекулы газа связаны с молекулами воды относительно слабыми ван-дер-ваальсовскими силами. Первоначально метастабильная («пустая») кристаллическая решетка состоит из молекул воды, по мере включения молекул газа в полости кристаллическая решетка газогидрата становится стабильной. Таким образом, с термодинамической точки зрения гидратообразование рассматривается как объемная сорбция газа полостями кристаллической решетки. При разложении газогидрата вначале имеет место десорбция газа из гидрата, в последующем происходит полная диссоциация гидрата на газ и воду. Десорбция газа из гидрата при сохранении стабильности кристаллической решетки наблюдалась в целом ряде экспериментов, например при фазовых переходах гидрат – лед – вода [5], при экспериментах по определению теплофизических свойств газогидратов [6] и др.

В системе газ – газогидрат количество сорбированного в гидрате газа зависит от термодинамических условий ( $p$ ,  $T$ ) этой системы. При изменении давления и температуры изменяется количество связанного в гидрате газа. Поэтому в рамках определенных термодинамических условий в такой системе можно осуществлять отбор свободного газа и газа из гидрата до диссоциации гидрата на газ и воду. В [7] получены некоторые интегральные характеристики этого процесса. В данной работе задача об

отборе свободного газа и связанного в гидрате газа в режиме десорбции рассматривается в полной постановке.

Система уравнений рассматриваемой задачи имеет вид

$$m(1-v) \frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \nabla(\rho_g \mathbf{v}_g) = M_g, \quad M_g = -m v \frac{\partial \rho_h}{\partial t} \quad (1.1)$$

$$\mathbf{v}_g = -\frac{k}{\mu_g} \nabla p \quad (1.2)$$

$$c_m \frac{\partial T}{\partial t} = m(1-v) \rho_g c_g \eta \frac{\partial p}{\partial t} + \rho_g \mathbf{v}_g c_g (\nabla T - \xi \nabla p) + \nabla(\lambda_m \nabla T) + L M_g \quad (1.3)$$

$$\rho_g = \frac{P}{ZRT}, \quad \rho_h = \rho_h^0 + \alpha \theta, \quad \theta = \theta_1 + 3\theta_2 \quad (1.4)$$

$$\theta_i = \frac{c_i p_i}{1 + c_i p_i}, \quad c_i = \exp(A_i - B_i T) \cdot 10^{-5} \quad (i = 1, 2) \quad (1.5)$$

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

$$c_m = m v \rho_h c_h + m(1-v) \rho_g c_g + (1-m) \rho_s c_s \quad (1.6)$$

Здесь (1.1)–(1.2) представляют уравнения неразрывности и движения для газа, (1.3) – уравнение энергии, (1.4) – уравнения состояния для газа и гидрата, (1.5) – изотерма Ленгмюра и уравнение Нагата – Кобаяши, определяющие количество газа в гидрате в зависимости от давления и температуры, (1.6) – осредненные по объему теплопроводность и теплоемкость.

В отличие от известных моделей [3, 4] в системе (1.1)–(1.6) плотность гидрата зависит от давления и температуры, в соответствии с этим вводится выражение для интенсивности десорбции газа из гидрата  $M_g$ . Предложенная модель действует при  $p > p_f(T_f)$ ,  $T > T_f$ , где  $p_f = p_f(T_f)$  – уравнение кривой фазового равновесия гидрат – газ.

В (1.1)–(1.6)  $\rho$  – плотность,  $\mathbf{v}$  – скорость,  $v$  – гидратонасыщенность,  $k$  – проницаемость,  $\mu$  – вязкость,  $R$  – газовая постоянная,  $\lambda$  – теплопроводность,  $c$  – теплоемкость,  $\eta$  – коэффициент адиабатического расширения,  $\xi$  – дроссельный коэффициент,  $L$  – теплота сублимации газа из гидрата,  $\rho_h$  – плотность «пустой» гидратной решетки,  $\alpha$  – постоянная,  $\theta_i$  – степени заполнения полостей решетки,  $z$  – коэффициент сжимаемости газа,  $c_i$  – константы Ленгмюра,  $A_i, B_i$  – эмпирические коэффициенты. Индексы:  $g$  – газ,  $h$  – гидрат,  $S$  – скелет пористой среды,  $m$  – смесь.

Коэффициент Джоуля – Томсона определяется из выражения

$$\xi = \frac{RT^2}{c_g p} \frac{\partial Z}{\partial T} \quad (1.7)$$

в этом выражении и в уравнении состояния для коэффициента сжимаемости газа  $Z$  можно выбрать уравнение Латонова – Гуревича [8]

$$Z = 0,17376 \left( \ln \frac{T}{T^*} + 0,73 \right)^{p/p^*} + 0,1 \frac{p}{p^*} \quad (1.8)$$

Здесь  $p^*$  и  $T^*$  – критическое давление и температура газа.

Рассмотрим граничные и начальные условия. Температура и давление в начальный момент времени постоянны вдоль всего пласта

$$p(r, 0) = p_0, \quad T(r, 0) = T_0, \quad r \in [r_c, R_k] \quad (1.9)$$

где  $r_c$  и  $R_k$  – радиусы скважины и контура питания.

На контуре питания  $r = R_k$  поставим граничные условия

$$T(R_k, t) = T_0, \quad \frac{\partial p(R_k, t)}{\partial r} = 0 \quad (1.10)$$

Через скважину производится отбор газа с постоянным объемным расходом

$$Q = 2\pi r_0 h \frac{k}{\mu_g} \frac{\partial p(r_c, t)}{\partial r} \quad (1.11)$$

где  $h$  – толщина пласта.

С помощью тождественных подстановок система уравнений (1.1)–(1.8) в случае плоскорadiaльной геометрии приводится к виду

$$\begin{aligned} \gamma_1 \frac{\partial p}{\partial t} &= \gamma_2 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \gamma_3 r \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \gamma_4 \frac{\partial T}{\partial t} \\ \gamma_5 \frac{\partial p}{\partial t} + \gamma_6 \frac{\partial T}{\partial t} + \gamma_7 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \gamma_8 \frac{\partial p}{\partial r} \frac{\partial T}{\partial r} + \gamma_9 \left( \frac{\partial p^2}{\partial r} \right) &= 0 \end{aligned} \quad (1.12)$$

$$\gamma_1 = \frac{m(1-\nu)}{RTZ} \left( 1 - \frac{p \partial Z}{Z \partial p} \right) - \alpha m \nu \delta_1, \quad \gamma_2 = \frac{k}{\mu_g R}$$

$$\gamma_3 = \frac{p}{TZ}, \quad \gamma_4 = \frac{m(1-\nu)}{ZTR} \left( \frac{p}{T} + \frac{p}{Z} \frac{\partial Z}{\partial T} \right) - \alpha m \nu \delta_2 p$$

$$\gamma_5 = m \frac{p}{ZRT} c_g (1-\nu) \eta + m \nu L \alpha \delta_1, \quad \gamma_6 = -c_m - m \nu L \alpha \delta_2 p$$

$$\gamma_7 = \lambda_m, \quad \gamma_8 = \frac{k}{\mu} c_g \frac{p}{ZRT}, \quad \gamma_9 = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial Z}{\partial T} \frac{T}{Z}$$

$$\delta_1 = \frac{c_1}{(1+c_1 p)^2} + \frac{3c_2}{(1+c_2 p)^2}, \quad \delta_2 = \frac{B_1 c_1}{(1+c_1 p)^2} + \frac{3B_2 c_2}{(1+c_2 p)^2}$$

Уравнения (1.12) относятся к классу квазилинейных параболических уравнений. Аналитическое решение уравнений такого типа возможно только при сильных упрощениях. Поэтому задача решалась численно, неявным конечно-разностным методом.

Поскольку вблизи скважины термодинамические характеристики изменяются сильнее, вводилась неравномерная сетка по координате, шаги которой составляют геометрическую прогрессию с показателем  $b > 1$ , временная сетка принималась равномерной.

Полученные системы нелинейных разностных уравнений для давления и температуры на каждом временном слое решаются с помощью метода итераций. При этом переход на следующий временной слой проводится вначале для давления, используя при расчетах температуру на данном слое. Затем вычисляется новое значение температуры, используя новое значение давления. Порядок вычисления выбран из тех

соображений, что температура в данном процессе изменяется на меньшую величину по сравнению с давлением.

**2. Результаты численных расчетов.** При расчетах были введены следующие безразмерные величины:  $p' = p/p_0$ ;  $T' = T/T_0$ ;  $t' = t/t_0$ ;  $r' = r/r_0$ .

Расчеты проводились в предположении, что газ – метан и соответствующие параметры базового варианта расчетов равны следующим значениям:  $A_1 = 6,9153$ ,  $B_1 = 0,03155$ ,  $A_2 = 6,0966$ ,  $B_2 = 0,02792$ ,  $\alpha = 30,735$  кг/м<sup>3</sup>,  $m = 0,3$ ,  $\nu = 0,6$ ,  $k = 1 \cdot 10^{-14}$  м<sup>2</sup>,  $\mu_g = 2 \cdot 10^5$  Па·с,  $L = 150$  кДж/кг,  $c_m = 2,7 \cdot 10^6$  Дж/м<sup>3</sup>·К,  $c_g = 2093$  Дж/кг·К,  $\lambda_m = 1,163$  Вт/м·К,  $p_0 = 100 \cdot 10^5$  Па,  $T_0 = 278$  К,  $r_0 = 0,1$  м,  $t_0 = 60$  с,  $N = 75$ ,  $R_k = 504,4$  м,  $h = 10$  м,  $T^* = 190,5$  К,  $p^* = 45,8 \cdot 10^5$  Па,  $q = 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/с.

Результаты численных расчетов показали, что при учете десорбции газа из гидрата давление в пласте больше, чем при обычном режиме фильтрации, причем эта разница увеличивается с ростом гидратонасыщенности пласта и достигает значения около 15% начального давления при  $\nu = 0,8$ . Влияние десорбции на изменение температуры незначительно (порядка 0,02% начального значения).

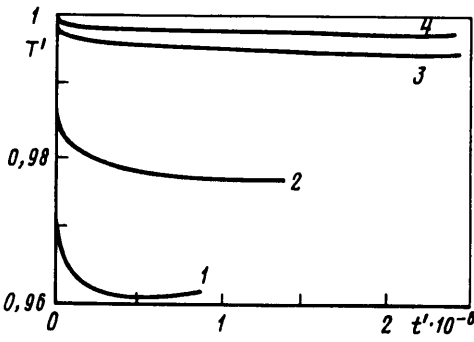
В целом распределение давления и температуры имеют классический вид: в призабойной зоне скважины наблюдается воронка депрессии, здесь же наблюдается заметное снижение температуры, что в первую очередь обусловлено дроссельным эффектом. На скважине, как и во всем пласте, давление и температура со временем уменьшаются: так, через 838 сут давление на скважине понижается на 40 атм, температура на 1,5 К.

Расчеты при различных значениях проницаемости пласта показали, что при больших проницаемостях давление в пласте снижается более равномерно, чем для пластов с меньшими значениями проницаемости, где наблюдается резкое снижение давления вблизи скважины. Это вполне объяснимо, поскольку при малой проницаемости газ не успевает профильтроваться через пласт и давление в пласте снижается медленно. Например, через 417 сут при  $k = 10^{-13}$  м<sup>2</sup> давление на скважине равняется 92 атм, а при  $k = 10^{-15}$  м<sup>2</sup> давление составляет 60 атм.

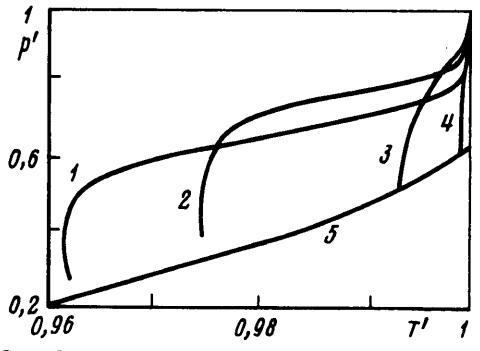
Влияние дебита на распределение температуры в пласте значительно. При превышении дебита определенного критического значения возможно увеличение температуры в пласте. Это заметно на фиг. 1, на которой изображено изменение со временем температуры на скважине при различных значениях дебита. Кривые 1–4 соответствуют величине дебита  $10^{-2}$ ,  $5 \cdot 10^{-3}$ ,  $10^{-3}$ ,  $5 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с в пластовых условиях. Кривые заканчиваются в моменты времени, соответствующие окончанию процесса режима десорбции, т.е. когда фазовая траектория в какой-либо точке пласта (зависимость давления от температуры  $T(t) = \varphi[p(t)]$  при  $r = \text{const}$  на фиг. 1 – на скважине) доходит до кривой фазового равновесия. При расчетах уравнение фазового равновесия бралось в виде  $T_f = B + A \ln p_f$ , где  $A = 10,42$ ,  $B = 239,069$ . В последующие моменты времени система газ – гидрат находится на кривой фазового равновесия и происходит диссоциация гидрата на газ и воду. При этом рассматриваемую в данной работе модель необходимо заменить известными термогидродинамическими моделями разложения газогидрата [3, 4].

При расчетах учет реальных свойств газа производится через введение коэффициента сверхсжимаемости  $z$ . Учет реальных свойств газа приводит к значительным уточнениям параметров процесса добычи газа. В начальный момент времени скорость изменения давления для реального газа выше, чем для идеального. Однако со временем давление в реальном газе уменьшается медленнее.

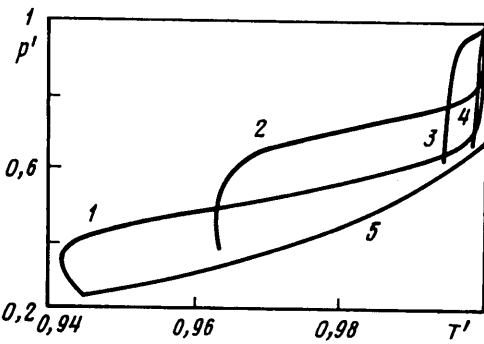
Фазовые траектории системы газ – гидрат приведены на фиг. 2–4, фиг. 2 и 3 соответствуют скважине, фиг. 4 – разным точкам пласта. Кривые 5 на этих фигурах обозначают линию фазового равновесия гидрат – газ – вода. Кривые 1–4 на фиг. 2 соответствуют разным значениям расхода газа через скважину, как на фиг. 1. Корреляция между соответствующими кривыми фиг. 1 и 2 очевидна, в частности немонотонный характер изменения температуры со временем при расходе  $10^{-2}$  м<sup>3</sup>/с



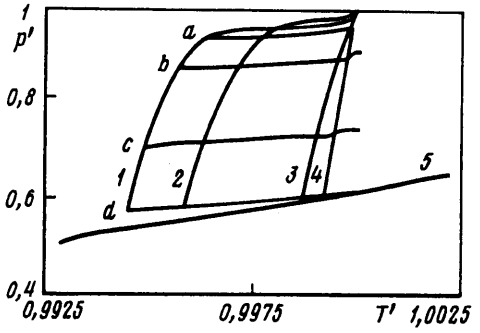
Фиг. 1. Зависимость температуры на скважине от времени при значениях дебита:  $10^{-2}$ ,  $5 \cdot 10^{-3}$ ,  $10^{-3}$ ,  $5 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с (кривые 1-4)



Фиг. 2. Фазовые траектории на скважине при значениях дебита:  $10^{-2}$ ,  $5 \cdot 10^{-3}$ ,  $10^{-3}$ ,  $5 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с (кривые 1-4), 5 – кривая фазового равновесия газ – газогидрат



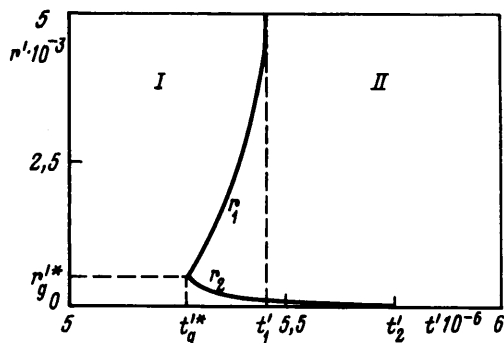
Фиг. 3. Фазовые траектории на скважине при значениях проницаемости:  $5 \cdot 10^{-16}$ ,  $10^{-15}$ ,  $10^{-14}$ ,  $10^{-14}$  м<sup>2</sup> (кривые 1-4), 5 – кривая фазового равновесия газ – газогидрат



Фиг. 4. Фазовые траектории для различных точек пласта;  $r = 1, 10, 15, 154, 1369$  (кривые 1-4), 5 – кривая фазового равновесия газ – газогидрат

(кривая 1 на фиг. 4) определяет немонотонный вид соответствующей кривой 1 на фиг. 2. Из фиг. 1 и 2 следует, что при больших значениях расхода газа процесс благоприятнее для режима десорбции газа в двух аспектах. Во-первых, процесс добычи заканчивается быстрее, во-вторых, из-за заметного снижения температуры состояние пласта дольше остается в гидратной области и удается больше истощить пласт до появления воды. При расходе, равном  $0,01$  м<sup>3</sup>/с, процесс десорбции заканчивается через 544 сут, давление на скважине  $p' = 0,25$ , а при расходе  $0,001$  м<sup>3</sup>/с время равно 3599 сут и  $p' = 0,5$ .

На фиг. 3 показаны фазовые траектории точек, расположенных на скважине при различных значениях проницаемости. Кривые 1-4 соответствуют значениям проницаемости  $5 \cdot 10^{-16}$ ,  $10^{-15}$ ,  $10^{-14}$ ,  $10^{-13}$  м<sup>2</sup>. При больших значениях проницаемости фазовые траектории опускаются почти вертикально (кривые 3, 4), т.е. температура на протяжении всего процесса изменяется очень мало, а давление уменьшается значительно. По мере уменьшения проницаемости картина изменяется. Вначале температура меняется слабо, затем, если кривая фазового равновесия не достигнута (кривые 1 и 2), происходит отклонение фазовой траектории в сторону уменьшения температуры, причем основной вклад в уменьшение температуры вносит дроссельный эффект. Градиент давления вдоль пласта со временем уменьшается и соответственно уменьшается вклад дроссельного эффекта. Поэтому со временем температура за счет теплоприносящих эффектов начинает повышаться. При этом время безводного режима увеличивается при уменьшении проницаемости пласта и составляет для  $k =$



Фиг. 5. Движение границы диссоциации.  $r_g^*$  и  $t_g^*$  – местоположение и время начала диссоциации,  $r_1, r_2$  – поверхности диссоциации,  $t_1^*$  и  $t_2^*$  – время достижения поверхности диссоциации контура и скважины, I – область десорбции газа из гидрата, II – область диссоциации гидрата на газ и воду

$= 10^{-13}$  м<sup>2</sup> 3546 сут и для  $k = 5 \cdot 10^{-16}$  м<sup>2</sup> 6914 сут. Аналогичное поведение кривых наблюдается при изменении расхода газа: при малых расходах температура меняется слабо.

Фазовые траектории системы газ – гидрат для различных точек пласта ( $1 - r' = 1$ ,  $2 - r' = 10$ ,  $3 - r' = 154$ ,  $4 - r' = 1369$ ) представлены на фиг. 4. Линии  $a, b, c, d$  соответствуют разным моментам времени ( $t = 203$ ; 701; 2150 и 3665 сут). В рамках рассматриваемой модели процесс фильтрации газа в режиме с десорбцией газа из гидрата продолжается до достижения фазового состояния какой-либо точки пласта кривой фазового равновесия. Ситуация, изображенная на фиг. 4, соответствует базовому варианту параметров, при этом состояние фазового равновесия гидрат – вода достигается при  $r' = 473$  ( $r = 47,3$  м) за время  $t = 3599$  сут. Наиболее заметное изменение температуры происходит в начальные моменты времени и в ближайшей окрестности скважины. Такая же ситуация имеет место и для давления.

Расчеты при вариации основных параметров (проницаемости, гидратонасыщенности пласта, дебита скважины) показали, что в зависимости от набора значений этих параметров состояние фазового равновесия гидрат – вода может быть достигнута в произвольной точке пласта от скважины до контура питания. Общая тенденция этого процесса следующая. При увеличении расхода газа место начала диссоциации сдвигается в сторону скважины. При уменьшении проницаемости пласта место дохождения до кривой фазового равновесия сдвигается в сторону скважины и при проницаемости  $k = 5 \cdot 10^{-16}$  м<sup>2</sup> диссоциация начинается на самой скважине. Такая же картина наблюдается при увеличении гидратонасыщенности – с ростом гидратонасыщенности начало диссоциации сдвигается к скважине.

Общая картина дальнейшего поведения системы изображена на фиг. 5. Кривые  $r_1(t)$  и  $r_2(t)$  разделяют области десорбции газа из гидрата и диссоциации гидрата на газ и воду и представляют собой законы движения фронтов соответственно в глубь пласта и к скважине. При этом скорость движения фронта в глубь пласта больше, чем к скважине. Для базового варианта параметров имеем:  $t_g^* = 5230080$ ,  $r_g^* = 473$ ,  $t_1^* = 5448960$ ,  $t_2^* = 5732640$ .

Итак, процесс добычи газа из газ-газогидратного пласта разделяется на три этапа. На первом этапе при  $t' < t_g^*$  во всем пласте происходит фильтрация газа и десорбция газа из гидрата. В некоторый момент времени  $t_g^*$  в определенной точке пласта  $r_g^*$  фазовая траектория доходит до кривой фазового равновесия. В этой точке начинается

$t'$	$\delta_h$		
	$v = 0,2$	0,6	0,8
1	0,035	0,196	0,448
60	0,034	0,194	0,444
6000	0,035	0,193	0,456
225 000	0,038	0,212	0,493
326 000	0,045	0,276	0,684

диссоциация гидрата на газ и воду и происходит совместная фильтрация газа и воды, в дальнейшем эта область расширяется. К моменту времени  $t'_1$  эта область доходит до контура питания и к  $t'_2$  – до скважины. На третьем этапе, при  $t' > t'_2$ , во всем пласте происходит диссоциация гидрата на газ и воду.

Рассмотрим такую важную характеристику разработки гидратной залежи, как доля десорбированного из гидрата газа  $M_h$  по отношению к добытому газу  $M$

$$\delta_h = M_h / M, \quad M = \int_0^t q \rho_g(t) dt$$

$$M_h = \left( \rho_h(p_0, T_0) \pi h (R_k^2 - r_c^2) - \int_{r_c}^{R_k} \rho_h(r, t) 2\pi r h dr \right) m v$$

Зависимость  $\delta_h$  от гидратонасыщенности приведена в таблице.

Количество десорбированного газа увеличивается с ростом  $v$ , достигая 68% при  $v = 0,8$ , и от времени зависит немонотонно. Это связано с тем, что по мере уменьшения давления уменьшается плотность газа и уменьшается масса газа, отбираемая в единицу времени через скважину, а количество десорбированного из гидрата газа монотонно возрастает.

По мере отбора газа из пласта до начала диссоциации гидрата на газ и воду степени заполнения полостей гидратной решетки изменяются от 0,9399 до 0,9034 для малых полостей и от 0,9498 до 0,9184 для больших полостей.

**Заключение.** Предложенная модель фильтрации, учитывающая десорбцию газа из полостей газового гидрата, позволяет уточнить характеристики термогидродинамического режима газ-газогидратных пластов при отборе газа.

В общем случае рассмотренный процесс делится на три этапа. Вначале в пласте происходит десорбция газа из гидрата. Второй этап характеризуется тем, что в пласте сосуществуют области десорбции газа из гидрата и диссоциации гидрата на газ и воду. Размеры области диссоциации со временем увеличиваются и в итоге этот процесс охватывает весь пласт.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черский Н.В., Бондарев Э.А. О тепловом методе разработки газогидратных залежей // Докл. АН СССР. 1972. Т. 203. № 3. С. 550–552.
2. Веригин Н.Н., Хабибуллин И.Л., Халиков Г.А. Линейная задача о разложении гидратов газа в пористой среде // Изв. АН СССР. МЖГ. 1980. № 1. С. 174–177.
3. Бондарев Э.А., Максимов А.М., Цыпкин Г.Г. К математическому моделированию диссоциации газовых гидратов // Докл. АН СССР. 1989. Т. 308. № 3. С. 575–577.
4. Цыпкин Г.Г. О влиянии подвижности жидкой фазы на диссоциацию газовых гидратов в пластах // Изв. АН СССР. МЖГ. 1991. № 4. С. 105–114.

5. Булейко В.М., Макогон Ю.Ф. Фазовые переходы гидрат – лед – вода и их особенности // Междунар. конф. «Разработка газоконденсатных месторождений». Сек. 6. Краснодар, 1990. С. 128–130.
6. Гройсман А.Г. Теплофизические свойства газовых гидратов. Новосибирск: Наука, 1985. 94 с.
7. Иванов Б.Д., Попов В.В., Хабибуллин И.Л. Десорбция газа из газогидратов при изменении равновесных условий // Ресурсы нетрадиционного газового сырья и проблемы его освоения. Л.: ВНИГРИ, 1990. С. 195–201.
8. Бондарев Э.А., Васильев В.И., Воеводин А.Ф. и др. Термогидродинамика систем добычи и транспорта газа. Новосибирск: Наука, 1988. 272 с.

Уфа

Поступила в редакцию  
21.VII.1995