

УДК 517.958:532.546

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ И РАЗЛОЖЕНИЯ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ**

М.Х. Хайруллин, М.Н. Шамсиев, П.Е. Морозов, А.И. Абдуллин

khairullin@mail.knc.ru

На основе численного моделирования двухфазной неизотермической фильтрации в пористой среде, насыщенной газом, водой и гидратом, проведен анализ депрессионного метода воздействия на газогидратную залежь.

### **Постановка задачи**

Газовые гидраты представляют собой твердые кристаллические соединения молекул газа и воды, устойчивые при определенных давлениях и температурах. При диссоциации одного кубического метра газового гидрата выделяется до  $180 \text{ м}^3$  газа и  $0,8 \text{ м}^3$  воды. Природные газовые гидраты, состоящие в основном из гидрата метана, рассматриваются как перспективные источники углеводородного сырья. По оценкам специалистов ресурсы природных газовых гидратов соизмеримы с суммарными ресурсами всех горючих ископаемых. Поэтому актуальным является вопрос о поиске рентабельной технологии разработки залежей газовых гидратов [1-3]. В настоящее время рассматривается три основных метода добычи газа из гидратного пласта: понижение давления ниже равновесного, нагрев гидратосодержащих пород выше температуры разложения гидрата и их комбинация (рис.1). Другие методы воздействия на газогидратную залежь пока мало изучены.

Для моделирования процесса объемной диссоциации газовых гидратов в пористой среде было предложено две модели – равновесная и кинетическая. В основе первой модели лежит предположение о том, что в каждом элементарном объеме пористой среды выполняется условие термодинамического равновесия системы газ-вода-гидрат [4-9]. Кинетическая модель основана на экспериментальной зависимости скорости диссоциации газогидрата от давления, температуры и раз-

меров его частиц [10]. В работе [11] показано, что при моделировании процесса диссоциации в газогидратном пласте равновесная и кинетическая модели дают близкие результаты.

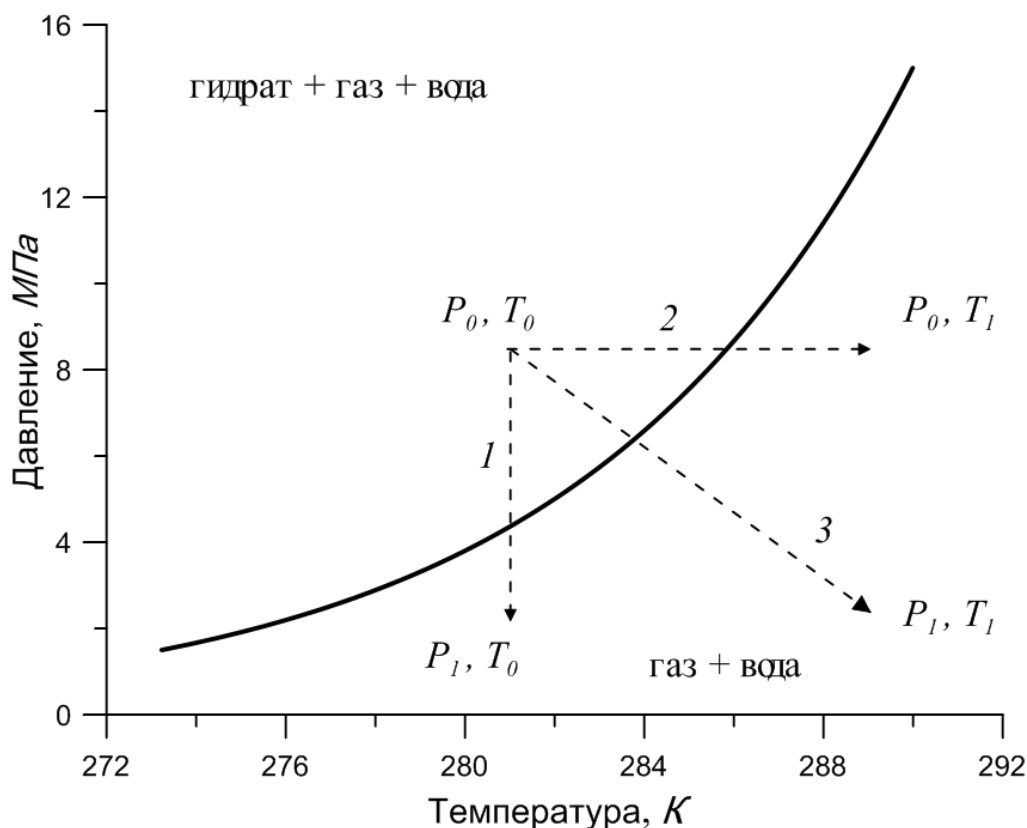


Рис. 1. Фазовая диаграмма системы газ-вода-гидрат и возможные методы добычи газа из гидратов. 1 – депрессионное воздействие, 2 – тепловое воздействие, 3 – комбинированное воздействие.

В данной работе рассматривается осесимметричная задача об отборе газа из пласта, насыщенного термодинамически равновесной смесью газа, воды и гидрата. Предполагается, что скелет пористой среды и газовый гидрат несжимаемы и неподвижны, вода несжимаема, движение газа и воды подчиняется закону Дарси, кровля и подошва пласта теплоизолированы. Капиллярные эффекты не учитываются.

Основные уравнения, описывающие динамику равновесной смеси газа, воды и гидрата в пористой среде, выводятся из законов сохранения массы и энергии [5-8]. В радиальных координатах система уравнений имеет следующий вид [7]:

$$(\rho C)_e \frac{\partial T}{\partial t} - m q \rho_h \frac{\partial S_h}{\partial t} - m(1 - S_w)(1 - S_h) \rho_g c_g \eta \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda \frac{\partial T}{\partial t} \right) +$$

$$+ k(S_h) \rho_g c_g \frac{f_g}{\mu_g} K_{JT} \left( \frac{\partial p}{\partial r} \right)^2 - k(S_h) \left( \rho_g c_g \frac{f_g}{\mu_g} + \rho_w c_w \frac{f_w}{\mu_w} \right) \frac{\partial p}{\partial r} \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad (1)$$

$$m \frac{\partial}{\partial t} \left( (1 - S_w)(1 - S_h) \frac{p}{zRT} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{k(S_h) f_g}{\mu_g} \frac{p}{zRT} \frac{\partial p}{\partial r} \right) - m \rho_h \varepsilon \frac{\partial S_h}{\partial t}, \quad (2)$$

$$m \frac{\partial}{\partial t} (S_w(1 - S_h)) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{k(S_h) f_w}{\mu_w} \frac{\partial p}{\partial r} \right) - m(1 - \varepsilon) \frac{\rho_h}{\rho_w} \frac{\partial S_h}{\partial t}, \quad (3)$$

где  $p$  – давление,  $T$  – температура,  $m$  – пористость,  $\mu_g$ ,  $\mu_w$  – вязкость газа и воды,  $S_w$  – водонасыщенность,  $S_h$  – гидратонасыщенность,  $f_g$ ,  $f_w$  – функции относительных фазовых проницаемостей для газа и воды,  $\rho_g$ ,  $\rho_w$ ,  $\rho_h$  – плотность газа, воды и гидрата,  $\varepsilon$  – массовое содержание газа в гидрате,  $z$  – коэффициент сверхсжимаемости газа,  $(\rho C)_e$  – объёмная теплоемкость скелета и вмещающих флюидов,  $c_g$ ,  $c_w$  – теплоемкость газа и воды,  $q$  – теплота фазового перехода гидрата,  $\eta$  – коэффициент адиабатического расширения,  $K_{JT}$  – коэффициент Джоуля-Томсона,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности скелета и вмещающих флюидов.

Условие термодинамического равновесия смеси газ-вода-гидрат описывается эмпирическим уравнением [4]:

$$T = a \ln p + b, \quad (4)$$

где  $a$  и  $b$  константы, определяемые экспериментально.

Предполагается, что в начальный момент времени пласт имеет гидратонасыщенность  $S_h^0$ , водонасыщенность  $S_w^0$ , равновесное давление  $p_0$  и температуру  $T_0 = a \ln p_0 + b$ . На контуре питания пласта поддерживается постоянное давление  $p_0$  и температура  $T_0$ . На забое скважины задается постоянное давление (депрессионный метод воздействия):

$$p(r_c, t) = p_c. \quad (5)$$

Из решения системы нелинейных уравнений (1)-(4) находятся неизвестные значения функций  $p$ ,  $T$ ,  $S_h$  и  $S_w$ . Массовый дебит газа и воды в пластовых условиях определяется в виде:

$$Q_g = 2\pi Hk(S_h)\rho_g \frac{f_g}{\mu_g} r \frac{\partial p}{\partial r} \Big|_{r=r_c},$$

$$Q_w = 2\pi Hk(S_h)\rho_w \frac{f_w}{\mu_w} r \frac{\partial p}{\partial r} \Big|_{r=r_c},$$

где  $r_c$  – радиус скважины,  $H$  – толщина пласта.

Для численного решения данной задачи используется метод конечных разностей со сгущающейся в окрестности скважины сеткой узлов. Построение такой сетки осуществляется с помощью преобразования координат  $u = \ln r$  [12]. Конечно-разностные аналоги уравнений (1)-(3) имеют вид:

$$\begin{aligned} & (\rho C)_e \frac{T_i^n - T_i^{n-1}}{\Delta t_n} - m\eta c_g (1 - S_{wi}^n)(1 - S_{hi}^n) \rho_{gi} \frac{p_i^n - p_i^{n-1}}{\Delta t_n} - \\ & - \lambda e^{-2u_i} \frac{T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n}{h^2} + k(S_{hi}^n) \rho_{gi} c_g \frac{f_{gi}^n}{\mu_g} K_{JT} e^{-2u_i} \frac{(p_i^n - p_{i-1}^n)^2}{h^2} - \\ & - k(S_{hi}^n) \left( \rho_{gi} c_g \frac{f_{gi}^n}{\mu_g} + \rho_w c_{wi} \frac{f_{wi}^n}{\mu_w} \right) e^{-2u_i} \frac{p_i^n - p_{i-1}^n}{h} \frac{T_i^n - T_{i-1}^n}{h} = \\ & m q \rho_h \frac{S_{hi}^n - S_{hi}^{n-1}}{\Delta t_n}, \quad i = \overline{1, M}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \frac{m}{\Delta t_n} \left( (1 - S_{wi}^n)(1 - S_{hi}^n) \frac{p_i^n}{zRT_i^n} - (1 - S_{wi}^{n-1})(1 - S_{hi}^{n-1}) \frac{p_i^{n-1}}{zRT_i^{n-1}} \right) = \\ & m \rho_h \varepsilon \frac{S_{hi}^n - S_{hi}^{n-1}}{\Delta t_n}, \quad i = \overline{1, M}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\frac{m}{\Delta t_n} \left( S_{wi}^n (1 - S_{hi}^n) - S_{wi}^{n-1} (1 - S_{hi}^{n-1}) \right) + m(1 - \varepsilon) \frac{\rho_h}{\rho_w} \frac{S_{hi}^n - S_{hi}^{n-1}}{\Delta t_n} =$$

$$e^{-2u_i} \left( r \frac{k(S_h) f_w}{\mu_w} \right)_{i+1/2} \frac{P_{i+1}^n - P_i^n}{h^2} - e^{-2u_i} \left( r \frac{k(S_h) f_w}{\mu_w} \right)_{i-1/2} \frac{P_i^n - P_{i-1}^n}{h^2}. \quad (8)$$

Система нелинейных уравнений (6)-(8) решается итерационно. Вычислительный алгоритм заключается в следующем:

1. Из системы уравнений (7) методом потоковой прогонки находится распределение давления  $p$ .
2. Из решения системы уравнений (8) определяется водонасыщенность  $S_w$ .
3. Если  $S_{hi}^{n-1} > 0$ , то с учетом условия термодинамического равновесия (4) из уравнений (6) определяется гидратонасыщенность на новом временном слое. В случае  $S_{hi}^{n-1} = 0$  из уравнений (6) находится распределение температуры.

### Результаты расчетов

Расчеты проводились при следующих значениях параметров:  $p_0=10$  МПа,  $p_c=5$  МПа,  $S_h^0=0,39$ ,  $S_w^0=0,21$ ,  $r_c=0,1$  м,  $R_k=500$  м,  $H=10$  м,  $\rho_w=1000$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_h=920$  кг/м<sup>3</sup>,  $m=0,2$ ,  $k_0=0,01$  мкм<sup>2</sup>,  $N=2$ ,  $\mu_w=1$  мПа/сек,  $\mu_g=0,013$  мПа/сек,  $\varepsilon=0,147$ ,  $a=7,28$ ,  $b=169,7$  К,  $(\rho C)_e=1,48$  Дж/(м<sup>3</sup>·К),  $\lambda=1,71$  Вт/(м·К),  $c_g=2093$  Дж/(кг·К),  $c_w=4200$  Дж/(кг·К),  $c_h=3210$  Дж/(кг·К),  $K_{JT}=0,4$  К/МПа,  $\eta=0,14$  К/МПа,  $q=5,1 \cdot 10^5$  Дж/кг. Значения параметров для газа соответствуют чистому метану. В расчетах использовалась пространственная сетка при  $M=300$ , а шаг по времени составил 200 сек.

Коэффициент сверхсжимаемости газа вычисляется по формуле Латонова-Гуревича [7]:

$$z(p, T) = \left( 0,17376 \ln \left( \frac{T}{T_{кр}} \right) + 0,73 \right)^{\frac{p}{P_{кр}}} + 0,1 \frac{p}{P_{кр}}.$$

Для вычисления относительных фазовых проницаемостей газа и воды используются зависимости [5]:

$$f_g(S_w) = \begin{cases} (1 - S_w / 0,9)^{3,5} (1 + 3S_w), & 0 < S_w \leq 0,9, \\ 0, & S_w \geq 0,9, \end{cases}$$

$$f_w(S_w) = \begin{cases} ((S_w - 0,2) / 0,8)^{3,5}, & 0,2 < S_w \leq 1, \\ 0, & 0 \leq S_w \leq 0,2 \end{cases}$$

Зависимость проницаемости от гидратонасыщенности принимается в виде [3,8]:

$$k(S_h) = k_0(1 - S_h)^N,$$

где  $k_0$  – абсолютная проницаемость породы (в отсутствии гидрата).

На рис.2 представлены графики распределения гидрато- и водонасыщенности в различные моменты времени. В результате разложения гидрата со временем водонасыщенность увеличивается по всему пласту, принимая максимальное значение за фронтом диссоциации.

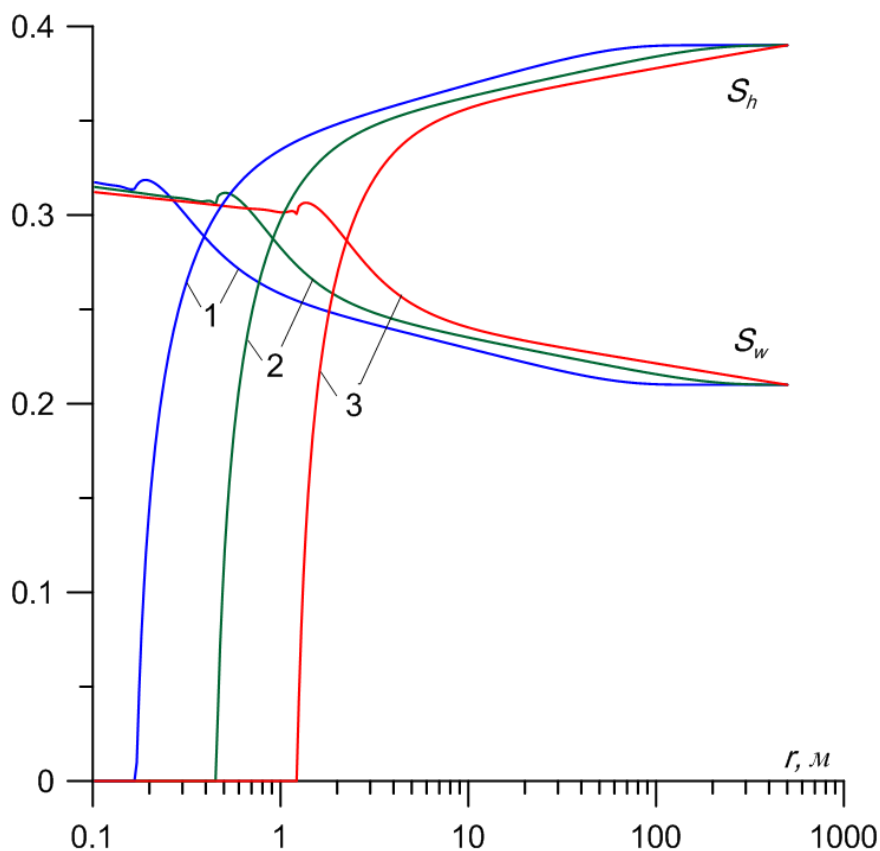


Рис. 2. Распределение гидрато- и водонасыщенности на моменты времени: 1 – 1 сут, 2 – 10 сут, 3 – 100 сут.

Графики изменения массового дебита газа с учетом (сплошная линия) и без учета разложения газогидрата в пласте (пунктирная линия) представлены на рис. 3. Видно, что в результате диссоциации газогидрата в окрестности скважины зависимость массового расхода газа от времени имеет немонотонный характер.

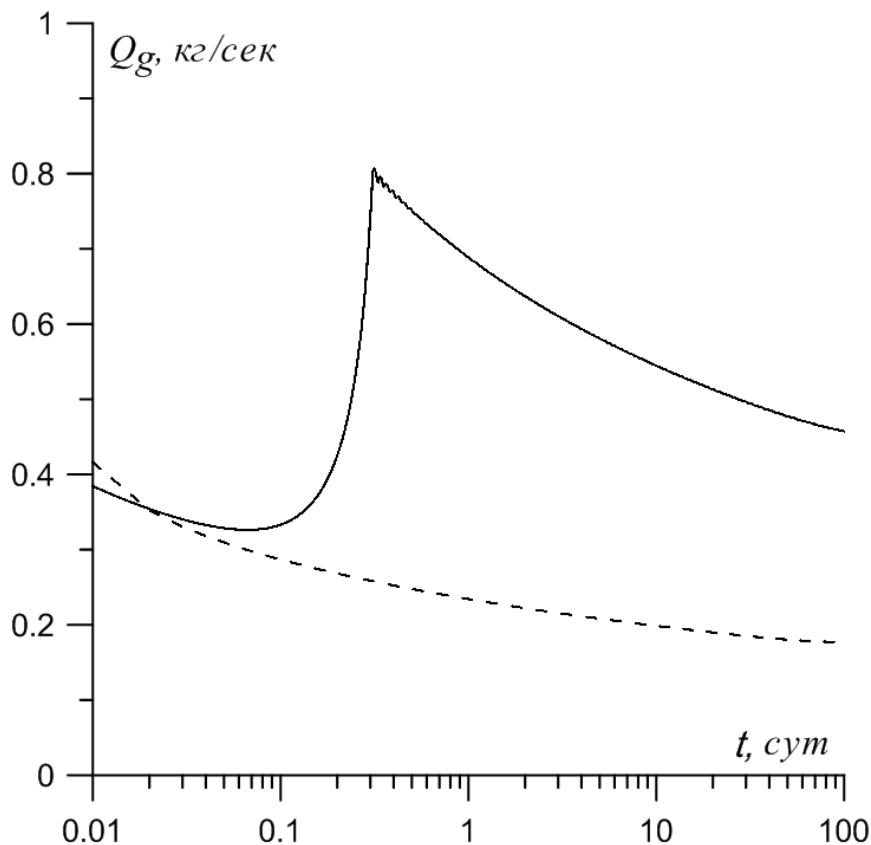


Рис. 3. Массовый расход газа.

Общий объем разложившегося гидрата в круговом пласте при депрессионном воздействии определяется по формуле:

$$V_h = 2\pi H m \int_{r_c}^{R_k} r (S_h^0 - S_h(r)) dr. \quad (6)$$

В результате диссоциации газового гидрата за расчетный период времени из пласта дополнительно добыто порядка  $10^6 \text{ м}^3$  газа.

В процессе добычи газа при определенных термобарических условиях возможно образование газовых гидратов в окрестности скважины [7]. На рис. 4 представлены графики распределения гидрато- и водонасыщенности в случае начального пластового давления

$p_0=20$  МПа и забойного давления  $p_c=15$  МПа. После начала отбора из-за охлаждения газа вблизи скважины свободная вода начинает переходить в гидрат. С ростом гидратонасыщенности в окрестности скважины происходит падение массового расхода газа.

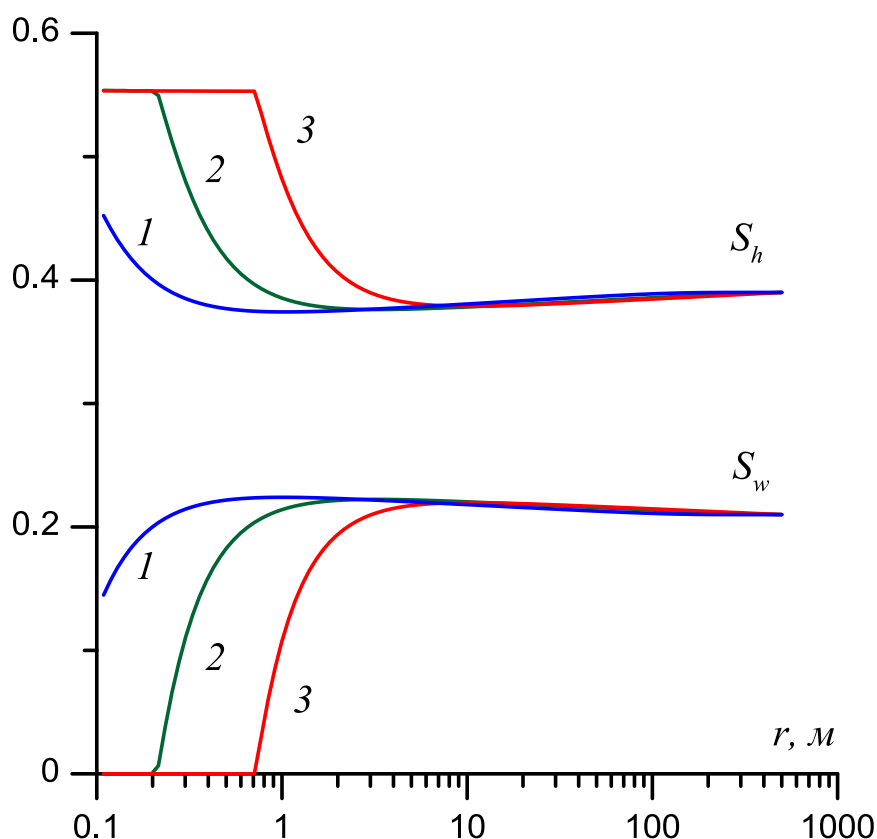


Рис. 4. Распределение гидрато- и водонасыщенности на моменты времени: 1 – 1 сут, 2 – 10 сут, 3 – 100 сут.

### Заключение

В работе показано, что при депрессионном воздействии объём разложившегося гидрата незначителен по сравнению с общим объёмом гидрата в пласте. Поэтому для разработки газогидратной залежи необходимо использовать депрессионный метод в сочетании с другими методами воздействия. Установлено, что при пуске скважины в газогидратном пласте зависимость массового расхода газа и воды от времени имеет немонотонный характер. Немонотонность кривых изменения массового расхода газа при пуске скважины может служить одним из диагностических признаков диссоциации газовых гидратов в пласте.



## ЛИТЕРАТУРА

1. *Makogon Y.F.* Natural gas hydrates – a promising source of energy // *J. Natural Gas Science and Eng.* 2010. № 2. p. 49–59.
2. *Birchwood R., Dai J., Shelander D. et al.* Developments in gas hydrate // *Oilfield review.* 2010. Spring. P.18–33.
3. *Щебетов А.* Месторождения газовых гидратов: ресурсы и возможные методы разработки // *Нефть и Капитал, Технологии ТЭК.* Апрель 2006 г. 5 с.
4. *Бондарев Э.А., Бабэ Г.Д., Гройсман А.Г., Каниболотский М.А.* Механика образования гидратов в газовых потоках. Новосибирск: Наука, 1976. 157 с.
5. *Максимов А.М., Цыпкин Г.Г.* О разложении газовых гидратов, существующих с газом в природных пластах // *Изв. АН СССР. МЖГ.* 1990, № 5. С. 84 – 87.
6. *Максимов А.М.* Математическая модель объемной диссоциации газовых гидратов в пористой среде: учет подвижности водной фазы // *ИФЖ.* 1992. Т.62. № 1. С. 76 – 81.
7. *Бондарев Э.А., Попов В.В.* Динамика образования гидратов при добыче природного газа // *Выч. технологии.* 2002. Т.7. № 5. С.28–33.
8. *Нигматуллин 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.
9. *Цыпкин Г.Г.* Течения с фазовыми переходами в пористых средах. М.: Физматлит, 2009. 232 с.
10. *Kim H.C., Bishnoi P.R., Heidemann R.A., Rizvi S.S.H.* Kinetics of methane hydrate decomposition // *Chem. Eng. Science.* 1987. Vol. 42. №7. p. 1645-1653.
11. *Kowalsky M.B., Moridis G.J.* Comparison of kinetic and equilibrium reaction models in simulating gas hydrate behavior in porous media // *Energy Conversion and Management.* 2007. № 48. p. 1850–1863.
12. *Азиз Х., Сеттари Э.* Математическое моделирование пластовых систем. М.: Недра, 1982. 407 с.