

УДК 550.3

АККУМУЛЯЦИЯ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ В СЛУЧАЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО НАКОПЛЕНИЯ ОСАДКОВ С РАЗЛИЧНЫМИ ТРАНСПОРТНЫМИ СВОЙСТВАМИ

© 2011 г.

Е.И. Суетнова

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва

elena_suetnova@mail.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

Представлена математическая модель эволюции скоплений газовых гидратов в морских осадках в процессе их накопления и уплотнения. Представлены результаты численного моделирования накопления газовых гидратов в пористой вязкоупругой среде осадков для случая перекрытия более проницаемых осадков относительно менее проницаемыми осадками с ростом мощности осадочного слоя.

Ключевые слова: газовые гидраты, пористые вязкоупругие осадки, проницаемость, растущие осадочные слои, уплотнение.

Аккумуляция газовых гидратов в пористой среде морских осадков происходит в процессе накопления, погружения и уплотнения осадков, и наиболее мощным механизмом поставки газа в зону стабильности газовых гидратов является фильтрация в осадочной среде [1]. Однако изменения режима осадконакопления, в частности при накоплении осадков различной проницаемости в различные периоды формирования осадочного слоя, потенциально приводят к изменениям скорости фильтрации порового флюида и могут влиять на процесс гидратонакопления в интервале глубин P – T -стабильности гидратов. В настоящей работе это влияние исследуется на основе математического моделирования накопления газовых гидратов в процессе роста мощности, уплотнения и прогрева морских осадков.

Математическая модель (система уравнений) описывает комплексный процесс, включающий накопление флюидонасыщенных пористых осадков (наращивание мощности слоя), их прогрев, уплотнение, фильтрацию насыщающего газосодержащего флюида к поверхности и осаждение газовых гидратов в порах в зоне реализации P – T -условий стабильности гидратов [2]. Рассматривается вязкоупругая реология осадочной структуры в рамках современных геофизических представлений [3]:

$$V_f - V_s = -\frac{k}{\mu(m-h)} \left(\frac{\partial p_f}{\partial z} + \rho_f g \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_f m(1-h)}{\partial t} + \frac{\partial \rho_f V_f m(1-h)}{\partial z} = -J_h \rho_f, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho_s(1-m)}{\partial t} + \frac{\partial \rho_s V_s(1-m)}{\partial z} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho_{gh} m h}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{gh} V_s m h}{\partial z} = J_h \rho_h, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_f m(1-h)c}{\partial t} + \frac{\partial \rho_f V_f m(1-h)c}{\partial z} = \\ = -\rho_h(c_h - c)m \frac{\partial h}{\partial t}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\frac{dm}{(1-m)dt} = -\frac{m}{\eta} p_e - \frac{m}{K_p} \frac{dp_e}{dt}, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial t} + A_1 \frac{\partial m(1-h)V_f f}{\partial z} + A_2 \frac{\partial (1-m)V_s f}{\partial z} = \kappa \frac{\partial^2 f}{\partial z^2}, \\ A_1 = \frac{\rho_f C_f}{\rho C}, \quad A_2 = \frac{\rho_s C_s}{\rho C}. \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь использованы обозначения: p_f – давление флюида; V_f , V_s – скорости порового флюида и матрицы осадков; t – время, z – пространственная координата; m – пористость; ρ_f , ρ_s , ρ_h – плотности; k – проницаемость, $k = k_0 m^3$; μ – вязкость флюида; g – ускорение силы тяжести; p_e – эффективное давление, $p_e = p_{tot} - p_f$; p_{tot} – полное давление; η – эффективная вязкость среды; K_p – объемный модуль пороупругости; f – температура, κ – температуропроводность осадков; C_f , C_s и C – теплоемкости флюида, матрицы осадков и среды; h – гидратонасыщенность пор; c , c_h – концентрация метана в поровом флюиде и в гидрате; J_h – объемная скорость поглощения флюида и приращения образования гидрата в предположении локального термодинамического равновесия и от-

сутствия дефицита газа (согласно [1], где можно найти детальное описание).

Граничные условия: на нижней непроницаемой границе осадков $z = b(t)$, скорости твердой V_s и жидкой V_f фаз равны V_1 (скорости погружения основания бассейна). Пористость на верхней дренажной границе принимается постоянной $m(z = 0, t) = m_0$; температура на верхней границе поддерживается равной 0; на нижней границе задается постоянный градиент температуры. Без потери общности рассматривается скомпенсированное осадконакопление [3]. Для локализации зоны стабильности гидратов и для расчета $c_{eq}(T) = c_{eq}(T_3(P)) \exp((T - T_3(P))/\tau)$, где $\tau \sim 10^\circ\text{C}$, также должно быть задано давление на поверхности осадочного бассейна; $T_3(P)$ – положение фазовой границы равновесия рассчитано из уравнений термодинамики [4]. В [1] показано, что накопление гидратов в порах не вносит значимых возмущений в профиль температуры в осадках, поэтому в уравнении (7) отсутствует член, описывающий источник, обусловленный образованием гидратов, $h = 0$ вне границ стабильности гидратов.

Система (1)–(7) после приведения к безразмерному виду [2, 3] решалась численно по полунявной схеме с применением переменного шага по времени и пространственной координате и контролем устойчивости [3]. Для расчетов взяты характерные значения параметров осадконакопления: $\rho_f = 10^3 \text{ кг/м}^3$, $\rho_s = 2.6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, $k_0 = 10^{-13} \text{ м}^2$, $\mu = 2.5 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$, $\eta = 10^{20} \text{ Па}\cdot\text{с}$, $V_1 = 10^{-10} \text{ м/с}$, финальная мощность осадков принята равной 6000 м, что соответствует репрезентативным значениям параметров осадков и скорости их накопления, полученным по геофизическим данным [5]. Для таких значений параметров безразмерное время накопления 6000 м осадков составляет 24.6. Здесь $t = t_r/T$, где t_r – реальное размерное время, $T = (\eta/\Delta\rho gm)/(\eta k_0 m^2/\mu)^{1/2}$. Моделировался случай перекрытия в процессе осадконакопления более проницаемых осадков менее проницаемыми. На рис. 1 приведены результаты расчетов эволюции скорости фильтрации газонасыщенного порового флюида (рис. 1а) и гидратонасыщенности пор (рис. 1б) на нижней границе зоны гидратов для случая осадконакопления, при котором относительно менее проницаемые осадки перекрывали более проницаемые начиная с безразмерного времени процесса $t = 13.7$. Немаркированные кривые соответствуют случаю уменьшения значений проницаемости поступающих осадков в интервале безразмерного времени процесса 13.7–24.6, маркированные – однородное осадконакопление; $k = 0.01k_0$ – обозначение ромб; $k = 0.1k_0$ – квадрат; $k = k_0$ – треугольник.

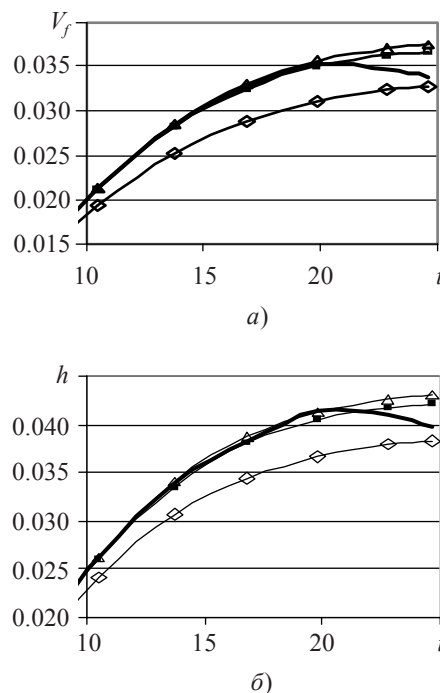


Рис. 1

Представленные на рис. 1 результаты расчетов гидратонасыщенности и скорости фильтрации на подошве гидратного слоя для такого сценария процесса осадконакопления (немаркированная кривая) показывают, что скорость фильтрации и гидратонасыщенность сначала растут со временем так же, как и при однородном осадконакоплении с базовым значением проницаемости $k_0 = 10^{-13} \text{ м}^2$, а с поступлением менее проницаемых осадков постепенно уменьшаются. Видно, что гидратонасыщенность на подошве гидратного слоя оказывается всегда выше, чем для осадконакопления с постоянной проницаемостью поступающих на поверхность осадков, равной $k_0 = 10^{-15} \text{ м}^2$.

Таким образом, модельные расчеты показали, что наращивание мощности осадков с изменением свойств осадков, поступающих на поверхность в различные периоды истории роста мощности слоя осадков, влияет на эволюцию скорости фильтрации и гидратонасыщенности на нижней границе области стабильности газовых гидратов в осадках; наблюдаемая гидратонасыщенность зависит не только от времени, значений свойств осадков и скорости роста их мощности в приповерхностном наблюдаемом интервале стабильности газовых гидратов, но и от предыдущей истории роста мощности и уплотнения пористых осадков вязкоупругой реологии.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант №10-05-01094-а.

Список литературы

1. Davie M.K., Buffett B.A. // J. Geophys. Res. 2001. V. 106, No B1. P. 497–514.
2. Суетнова Е. И. // Докл. РАН. 2007. Т. 415, №6. С. 818–822.
3. Suetnova E.I., Vasseur G. // Earth Planet. Sci. Letters. 2000. V. 178. P. 373–383.
4. Zatsepina O.Y., Buffett B.A. // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. P. 24127–24139.
5. Суетнова Е.И. // Физика Земли. 2010. №6. С. 72–79.

**ACCUMULATION OF GAS HYDRATES IN THE SEABED IN THE CASE
OF SEQUENTIAL ACCUMULATION OF SEDIMENTS WITH DIFFERENT TRANSPORT PROPERTIES**

E.I. Suetnova

A mathematical model has been developed to study the evolution of clusters of gas hydrates in marine sediments during the depositional and compaction history. The results of numerically simulating the accumulation of gas hydrates in porous visco-elastic sediments are presented for the case of more permeable sediments being overlapped by relatively less permeable sediments during the growth of sedimentary layers.

Keywords: gas hydrates, porous visco-elastic sediments, permeability, growing sedimentary layers, compaction.