

УДК 548.562

DOI 10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art68

**ЭВОЛЮЦИЯ СКОПЛЕНИЙ ПОДДОННЫХ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ,
ОБУСЛОВЛЕННАЯ НЕКОТОРЫМИ ОСОБЕННОСТЯМИ
ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ГЛУБИННЫХ СТРУКТУРАХ
ПОДВОДНЫХ ГРЯЗЕВЫХ ВУЛКАНОВ**

Суетнова Е.И., Собисевич А.Л., Жостков Р.А., ИФЗ РАН
E-mail: elena_suetnova@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрены процессы эволюции газогидратных скоплений приуроченных к глубоководным грязевым вулканам. Представлены результаты численного моделирования аккумуляции газовых гидратов в морском дне с учетом особенностей фильтрационных процессов в глубинных структурах подводных грязевых вулканов. Количественно показана ключевая роль проницаемости слоя перекрывающего питающий резервуар грязевого вулкана.

Ключевые слова: газовые гидраты, грязевые вулканы, математическое моделирование.

**THE SUB-BOTTOM GAS HYDRATE ACCUMULATIONS EVOLUTION AS A
RESULT OF SOME PECULIARITIES OF FILTRATION PROCESSES IN DEEP
STRUCTURES OF MUD VOLCANOS**

Suetnova E.I., Sobisevich A.L., Zhostkov R.A., EPI of RAS
E-mail: elena_suetnova@mail.ru

Abstract. The article describes the evolution of gas hydrate accumulations confined to deep-sea mud volcanoes. The results of numerical modeling of gas hydrate accumulation in the seabed are presented taking into account the peculiarities of filtration processes in the underwater mud volcanoes deep structures. The key role of the overlying the mud volcano feeding reservoir permeability is shown quantitatively.

Keywords: gas hydrates, mud volcanos, mathematical modeling.

Изучение скоплений газовых гидратов в субаквальных осадках необходимо как в фундаментальных (проблема дегазации Земли, тепломассоперенос в земной коре и др.), так и в прикладных аспектах геофизических исследований, включая экологию. Газовые гидраты в естественных условиях представляют собой кристаллические образования из газа (главным образом метана) и воды, подобные льду, которые формируются и

стабильны в определенном диапазоне давления и температуры [1]. Также очень важным условием стабильности газовых гидратов является наличие в вмещающей среде газа и водного флюида для обеспечения термодинамического равновесия гидрата с окружающей средой. К настоящему времени в окраинных бассейнах и в зонах грязевых вулканов геофизическими наблюдениями в морском дне обнаружено значительное количество проявлений газовых гидратов как в виде гидратных включений в поднятых со дна образцах, так и по косвенным признакам, в результате исследований изотопного состава придонных поровых флюидов и обнаружения BSR при сейсмических исследованиях [1,2]. Геофизическими наблюдениями последних лет в ряде зон подводных грязевых вулканов были обнаружены признаки значительных скоплений газовых гидратов в окрестностях жерла вулканов, а также геофизические признаки фильтрации газонасыщенных флюидов к поверхности дна [2]. Площадь связанной с подводным грязевым вулканом области разгрузки газов и флюидов может занимать до нескольких десятков квадратных километров дна акватории а скорость разгрузки (высачивания) коровых флюидов по разным оценкам может достигать метров в год в окрестностях грязевых вулканов. Фильтрации к поверхности дна в окрестностях грязевых вулканов обусловлена гидродинамическими условиями определяемыми процессами грязевого вулканизма и наиболее вероятно, фильтрацией газонасыщенного флюида над питающим резервуаром грязевого вулкана в окрестности грязевого канала в области низких температур. Однако результаты наблюдений не дают количественную оценку объёма гидратов без проведения дополнительных и в настоящее время не возможных и дорогостоящих исследований в морском дне. В данной работе мы приводим результаты математического моделирования процессов накопления газовых гидратов, приуроченных к глубоководным грязевым вулканам, с использованием имеющихся к настоящему времени опубликованных данных геофизических исследований.

Разработанная математическая модель описывает фильтрацию газонасыщенного флюида от резервуара питания грязевого вулкана в толще осадков к поверхности дна и осаждение газовых гидратов в зоне их термобарической стабильности под поверхностью дна в области грязевого вулкана в окрестности жерла [3].

Такой цикл фильтрации может существовать во время между извержениями грязевого вулкана. Система уравнений, описывающая этот процесс, состоит из уравнений в частных производных, описывающих процесс фильтрации поддонного газонасыщенного

флюида над питающим резервуаром (уравнение Дарси) (1), и уравнений неразрывности насыщающего флюида (2) и сохранения газа с условием локального термодинамического равновесия гидрат-газонасыщенный флюид (3). Система управляющих уравнений также включает замыкающее соотношение для зависимости пористости от давления (4), и уравнение теплопроводности (5). Для определения положения зоны стабильности газовых гидратов в осадках используются известные зависимости стабильности газовых гидратов от давления и температуры. Также принимается условие локального термодинамического равновесия гидрат-флюид в области стабильности газовых гидратов.

$$v(z,t) = -\frac{k}{\mu m} \left(\frac{\partial p_f(z,t)}{\partial z} - \rho_f g \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_f m}{\partial t} + \frac{\partial \rho_f v(z,t) m}{\partial z} = 0, \quad (2)$$

$$m \frac{\partial h(z,t)}{\partial t} = -\frac{\rho_f \nabla (m v(z,t) c_{eq})}{\rho_h c_h}, \quad (3)$$

$$\partial m / \partial t = m_0 (1/K) \partial p_f / \partial t, \quad (4)$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} + A_1 \frac{\partial m \cdot V_f \cdot f}{\partial z} = \kappa \frac{\partial^2 f}{\partial z^2}. \quad (5)$$

$$A_1 = \frac{\rho_f \cdot C_f}{\rho C}$$

Сформулированная система уравнений (1–5) решалась численно по разработанной оригинальной программе для ПК. Мы численно исследовали как влияет проницаемость среды осадков, являющаяся функцией пористости $k=k_0 m^3$ [4], на эволюцию гидратонасыщенности в промежутках между извержениями подводного грязевого вулкана. Для решения системы уравнений задаются давление в питающем резервуаре, глубина дна, проницаемость перекрывающего резервуар слоя, пористость, плотности входящих компонент, концентрация газа в гидрате и флюиде и градиент температуры. На рис. 1 представлены результаты модельного расчета эволюции гидратонасыщенности h в течение 1 года с начала процесса фильтрации для значения коэффициента проницаемости $k_0=10^{-14} \text{ м}^2$ и мощности слоя осадков над питающим слоем $L=500 \text{ м}$; остальные параметры: $m_0=0.3$, $\mu=2.6 \times 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{ с}$, $\rho_f=1.0 \times 10^3 \text{ кг} \cdot \text{ м}^{-3}$, $\rho_s=2.65 \times 10^3 \text{ кг} \cdot \text{ м}^{-3}$, $K=10^{10}$, $c_h=0.12$, фоновый

градиент температуры равен $0.05^{\circ}\text{K м}^{-1}$ и градиент концентрации метана в поровом флюиде в присутствии гидрата равен $5 \cdot 10^{-3} \text{ Моль}^{\circ}\text{K}^{-1}$ для внешнего давления 12 МПа (глубина моря около 1200 м), аппроксимация равновесной концентрации метана во флюиде $\nabla c_{eq} = \frac{\partial c_{eq}}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial z}$ [5], давление в резервуаре питания – литостатическое. Мощность зоны стабильности газовых гидратов оценивается как 350 м.

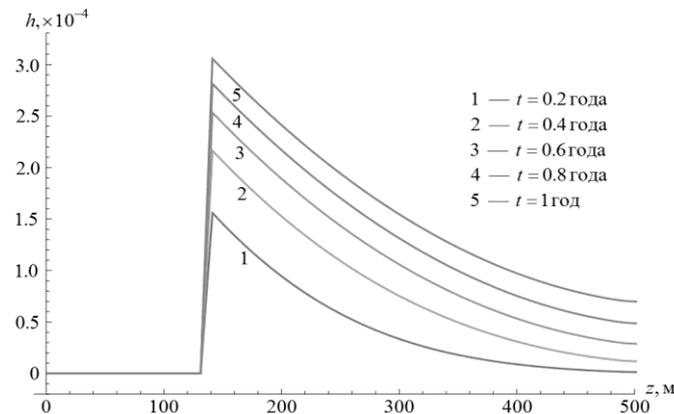


Рис. 1. Эволюция гидратонасыщенности h в течение 1 года с начала процесса фильтрации для значения коэффициента проницаемости $k_0 = 10^{-13} \text{ м}^2$, значения остальных параметров приведены в тексте

Приведённые результаты численного моделирования показывают, что интенсивность накопления газовых гидратов уменьшается со временем, в соответствии с эволюцией скорости фильтрации, то есть скорости подачи газонасыщенного флюида в интервал глубин термобарической стабильности газовых гидратов в морском дне.

На рис. 2 представлены результаты модельных расчетов эволюции гидратонасыщенности h в течение 1 года с начала процесса фильтрации для различных значений коэффициента проницаемости перекрывающего слоя осадков. Значения остальных входящих параметров задачи одинаковы и такие же, как на рис. 1.

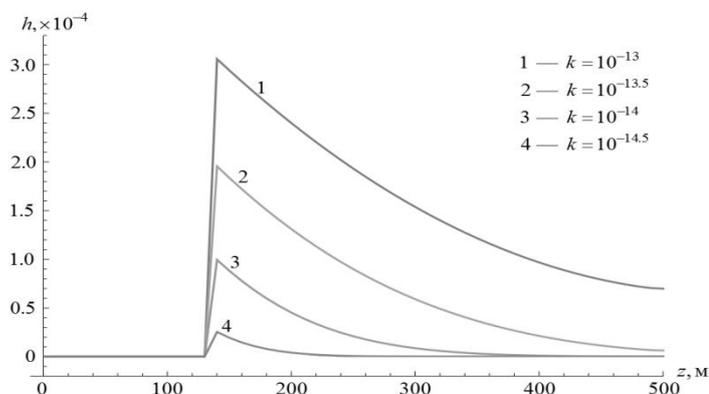


Рис. 2. Сравнение гидратонасыщенности h в течение 1 года с начала процесса фильтрации для различных значений коэффициента проницаемости k_0 , значения остальных параметров приведены в тексте

Сравнение результатов численного моделирования эволюции гидратонасыщенности для различных значений проницаемости осадков над резервуаром питания показывает, что для случаев меньшей проницаемости гидратонасыщенность оказывается существенно меньше за тот же интервал времени процесса гидратонакопления. Однако следует отметить, что численное моделирование показало, что для всего диапазона использованных параметров скорость накопления гидратов в промежутках между извержениями грязевых вулканов составляет порядка процентов в 100 лет, что на порядки превышает скорость накопления гидратов в рассеянных скоплениях континентальных окраин [6]. Таким образом, представленная модель обосновывает с помощью математического моделирования процесс формирования локальных, значительных (более первых процентов) скоплений газовых гидратов, приуроченных к подводным грязевым вулканам и зависимость гидратонасыщенности от времени и от проницаемости осадков, определяющей процесс транспорта газа и газонасыщенного флюида в зону термобарической стабильности газовых гидратов. Полученные результаты математического моделирования могут быть использованы для уточнения оценок запасов газовых гидратов в регионах распространения грязевых вулканов и оценок возможной дегазации земной коры этих регионов.

Работа выполнена в рамках выполнения государственного задания (тема: «Исследование вещественного состава и процессов теплопереноса в литосфере и мантии Земли», № 0144-2014-0086).

ЛИТЕРАТУРА

1. Sloan E.D. Clathrate hydrates of natural gases. N.Y.: Marcel Dekker, 1998. 705 p. 2ed.
2. Mazzini A. Mud volcanism: Processes and implications // Marine and Petroleum Geology. 2009. 26. P.1677–1680.
3. Жостков Р.А., Собисевич А.Л., Суетнова Е.И. Математическая модель аккумуляции газовых гидратов приуроченных к глубоководным грязевым вулканам // Докл. РАН, 2017. Т. 474, №1. С. 361–365.
4. Басниев К.С., Кочина И.Н., Максимов В.М. Подземная гидромеханика. М.: Недра. 1993. 416 с.
5. Davie M.K., Zatsepina O.Ye., Buffet B.A. Methane solubility in marine hydrate environments // Marine Geology. 2004. V. 203. P.177–184.

6. *Суетнова Е.И.* Аккумуляция газовых гидратов в морском дне при последовательном накоплении осадков с различными транспортными свойствами // Докл. РАН. 2011. Т. 438, № 6. С.813–816.