

УДК 550.31

АККУМУЛЯЦИЯ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ В ПОРАХ В ПРОЦЕССЕ УПЛОТНЕНИЯ НАРАЩИВАЕМОЙ РЕОЛОГИЧЕСКИ СЛОЙСТО-НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЫ ОСАДКОВ

© 2013 г. Е.И. Суетнова

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

Проведено моделирование процесса накопления газовых гидратов из растворенного в насыщающем флюиде газа при накоплении и уплотнении осадков вязкоупругой реологии. Показано, что если накапливаются менее вязкие осадки поверх более вязких, финальная гидратонасыщенность оказывается больше, чем при однородном осадконакоплении, когда в ходе седиментации накапливались либо только более вязкие осадки, либо только менее вязкие. Результаты модельных расчетов при различных условиях седиментации демонстрируют, как накопление менее вязких осадков поверх более вязких убыстряет процесс уплотнения по сравнению с накоплением только более вязких осадков и увеличивает скорость гидратонакопления в зоне стабильности гидратов метана в земной коре в течение такого же периода времени. Превышение гидратонасыщенности по сравнению с вариантом однородного осадконакопления зависит от времени, в течение которого происходит понижение вязкости осадков, поступающих на дно.

Ключевые слова: седиментация, газовые гидраты, уплотнение, реология, численное моделирование.

Введение

В геологической истории аккумуляция газовых гидратов в морском дне происходит в процессе накопления, погружения и уплотнения осадков [Гинсбург, Соловьев, 1994]. Газовые гидраты в естественных условиях встречаются как кристаллические образования из газа (главным образом, метана) и воды, подобные льду, стабильные в определенном диапазоне давления и температуры [Sloan, 1998]. Благоприятные для образования и стабильности газовых гидратов давления и температуры широко распространены в приповерхностных структурах морского дна и в областях вечной мерзлоты. Для накопления газовых гидратов в пористой среде осадков в естественных условиях необходим поток воды и газа к поверхности – к зоне стабильности газовых гидратов. Такой поток обеспечивается как диффузией, так и происходящей в процессе уплотнения осадков фильтрацией поровых флюидов к поверхности. Накопление газовых гидратов в осадочной толще зависит от течения базовых процессов тепломассопереноса, формирующих *PT*-условия стабильности гидратов, и от течения процессов, обеспечивающих поступление газа в зону стабильности гидратов. Проведенные к настоящему времени исследования поддерживают гипотезу, что гидраты образуются из биогенного и термогенного газов, которые транспортируются в зону стабильности гидратов коровым флюидом [Hyndman, Davis, 1992; BenClennel et al., 1999; Zatsepina, Buffett, 1997]. Показано, что фильтрация к поверхности порового флюида, содержащего растворенный газ, является наиболее мощным механизмом поставки газа в зону стабильности газовых гидратов в истории осадконакопления [Davie, Buffett, 2003]. Для адекватной интерпретации данных аппаратурных геофизических измерений в акваториях и прогноза наличия и объема газовых гидратов в осадках, а также их устойчивости необходимо разви-

тие моделей образования и эволюции гидратных проявлений в естественных условиях. В предыдущие годы был создан ряд моделей, описывающих аккумуляцию газовых гидратов в субаквальных условиях [Rempel, Buffet, 1997; BenClennell et al., 1999; Xu, Ruppel, 1999; Davie, Buffet, 2001]. В названных работах было показано, что локализация газовых гидратов и гидратонасыщенность зависят от потоков флюида и газа, а также от теплового режима осадков. Анализ образования газовых гидратов в рамках более полной модели, учитывающей то, что потоки флюида в пористой среде осадков контролируются процессом накопления и уплотнения осадков, количественно показал зависимость эволюции гидратонасыщенности от реологических и гидродинамических свойств осадков и от скорости их накопления [Суетнова, 2007, 2008, 2009].

Скорость фильтрации поровых флюидов, содержащих растворенный газ, определяется режимом накопления и уплотнения осадков, т.е. скоростью осадконакопления и физическими, реологическими и гидродинамическими свойствами осадков, поступающих на дно водоема [Suetnova, Vasseur, 2000]. Однако, изменение физико-химических свойств среды в ходе седиментации, например при трансгрессии моря, приводит по мере перекрытия мелководных осадков глубоководными к последовательному формированию слоев с разными механическими и гидродинамическими свойствами. Такие изменения режима осадконакопления должны приводить в процессе уплотнения осадков к изменениям режима уплотнения и скорости фильтрации к поверхности насыщающего флюида по сравнению с однородным осадконакоплением [Суетнова, 2003], и тем самым влиять на процесс гидратонакопления. В упомянутой работе представлены результаты математического и численного моделирования эволюции гидратонасыщенности в морских осадках в течение истории осадконакопления, в которой происходило последовательное накопление осадков с различными гидродинамическими свойствами (с различной проницаемостью). Было показано, что различия проницаемости слоев осадков, поступавших в различные периоды осадконакопления, существенно влияют на эволюцию скорости гидратонакопления в течение истории седиментации. Однако при накоплении осадков различного вещественного состава различаются не только значения их проницаемости, но и значения эффективной вязкости и пороупругости. Ранее [Суетнова, 2009] было показано, что эти параметры существенно влияют на скорость уплотнения осадков и скорость фильтрации к поверхности насыщающих их флюидов и, следовательно, должны оказывать влияние и на процесс гидратонакопления.

Данная работа посвящена исследованию влияния на эволюцию гидратонасыщенности осадков различий эффективной вязкости осадков, поступавших в разные периоды седиментации. Количественная оценка этого влияния получена на основании математического моделирования накопления газовых гидратов в процессе роста мощности морских осадков, при котором в разные периоды накапливались осадки с различными значениями эффективной вязкости.

Математическая модель

Математическая модель описывает комплексный процесс, включающий накопление флюидонасыщенных осадков, их прогрев и уплотнение, а также обусловленную этим уплотнением фильтрацию насыщающего газосодержащего флюида и осаждение газовых гидратов из флюида в порах в зоне реализации PT -условий стабильности гидратов.

В качестве процесса, обеспечивающего поступление газа в зону стабильности газовых гидратов, автором рассматривается фильтрация к поверхности осадков содержащего растворенный газ порового флюида, которая обусловлена уплотнением осадков в процессе их накопления. В рамках современных представлений принимается поро-

вязкоупругая реология многокомпонентной осадочной структуры [Suetnova, Vasseur, 2000]. Эволюция распределения скорости насыщающего флюида, пористости и накопления газовых гидратов из растворенного в поровом флюиде газа будет получена как решение системы уравнений в частных производных, связывающих пористость, давление, скорости порового флюида и среды осадков и накопление гидратов, зависящее от температуры и давления, при различных условиях накопления поро-вязкоупругих осадков [Суетнова, 2007]. Принципиальная схема моделируемых процессов показана на рис. 1.



Рис. 1. Принципиальная схема модели. Стрелками показано направление фильтрации (V_f) и движения матрицы осадков (V_s) в процессе осадконакопления и уплотнения

Система дифференциальных уравнений, описывающая процесс аккумуляции газовых гидратов в естественных условиях в накапливающихся и уплотняющихся осадках вязкоупругой реологии, состоит из семи уравнений в частных производных [Суетнова, 2007]:

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

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

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

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

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

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

$$\frac{\partial f}{\partial t} + A_1 \frac{\partial m(1-h)V_f f}{\partial z} + A_2 \frac{\partial (1-m)V_s f}{\partial z} = \kappa \frac{\partial^2 f}{\partial z^2}, \quad (7)$$

$$A_1 = \frac{\rho_f C_f}{\rho C}, \quad A_2 = \frac{\rho_s C_s}{\rho C}.$$

В выражениях (1)–(7) m – пористость; $p = p_e$ – эффективное давление; $p_e = p_{tot} - p_f$, где p_{tot} – полное давление, с точностью до константы равно $p_{tot} = p_s - \rho_s g y$ (здесь мы принимаем, что внешнее давление равно константе); p_s – давление твердой фазы; p_f – дав-

ление флюида; V_f – скорость порового флюида; V_s – скорость матрицы осадков; t – время; z – пространственная координата; ρ_f – плотность флюида; ρ_s – плотность осадков; ρ_h – плотность гидрата; ρ – плотность среды; $k=k_0m^l$ – проницаемость осадков (принимается, что $l=3$); μ – вязкость флюида; g – ускорение силы тяжести; η – эффективная вязкость среды; h – гидратонасыщенность; C – теплоемкость; f – температура; $\beta = -(\partial m/\partial p_e)/m$ – пороупругость; J_h – объемная скорость поглощения флюида и приращения образования гидрата; c – концентрация растворенного газа в поровом флюиде; c_h – концентрация газа в гидрате. Следуя работе [Davie, Buffett, 2001], уравнения (2), (4) записаны в предположении отсутствия дефицита газа.

В уравнении (7) отсутствует член, описывающий источник, обусловленный образованием гидратов, так как в работе [Davie, Buffet, 2001] показано, что накопление гидратов из газа, растворенного в поровом флюиде, не вносит значимых возмущений в профиль температуры в осадках. Система (1)–(7) становится полной и замкнутой после формулировки следующих граничных условий. На нижней непроницаемой границе осадков скорости твердой V_s и жидкой V_f фаз равны скорости погружения основания бассейна V_1 . На верхней (дренажной) границе пористость и проницаемость принимаются постоянными – $m((z=0),t)=m_0$ и $k=k_0m_0^l$, температура поддерживается постоянной и равной 0. На нижней границе задается постоянный градиент температуры. Следуя [Davie, Zatsepina, Buffet, 2004], принимается условие локального термодинамического равновесия между гидратом и флюидом в области стабильности газовых гидратов. Для локализации зоны стабильности гидратов и расчета равновесной концентрации газа в поровом флюиде $c_{eq}(T)$ в зависимости от температуры и давления используется уравнение $c_{eq}(f)=c_{eq}(f_3(P))\exp((f-f_3(P))/\tau)$, где $\tau \sim 10^\circ\text{C}$ [Davie, Zatsepina, Buffet, 2004]; $f_3(P)$ – температура на фазовой границе равновесия гидрата в зависимости от давления рассчитывается из уравнений термодинамики [Zatsepina, Buffett, 1997; Davie, Zatsepina, Buffet, 2004]. Также должно быть задано давление на поверхности бассейна, отражающее его глубину. Для газового гидрата ставится естественное условие равенства нулю его содержания в порах вне границ стабильности. Сформулированные уравнения (1)–(7) отражают не только влияние процесса осадконакопления и уплотнения осадков на аккумуляцию газовых гидратов, но и влияние накопления газовых гидратов в поровом пространстве на течение этих базовых процессов.

Решение и обсуждение полученных результатов

Для численного решения система приводилась к безразмерному виду. Эта процедура приводит к выявлению характеристических для рассматриваемой задачи масштабов длины и времени, определяемых уплотнением осадков [Suetnova, Vasseur, 2000]. После ряда преобразований с учетом граничных условий в системе координат, движущейся со скоростью погружения основания осадков, система уравнений модели записывается в безразмерном виде:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = (\alpha - m(1-h)) \frac{\partial v}{\partial y}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial v}{\partial y} = -mp - mD \frac{\partial p}{\partial t}, \quad (9)$$

$$v = -(m(1-h))^3 \left(\frac{\partial p}{\partial y} + 1 \right), \quad (10)$$

$$v_f = (\alpha - m(1-h))v/(m(1-h)), \quad (11)$$

$$\frac{\partial m(1-h)c}{\partial t} + \frac{\partial v_f m(1-h)c}{\partial y} = -(c_h - c)m \frac{\partial h}{\partial t}, \quad (12)$$

$$V = V_o / (L / T) = V_o \mu / \Delta \rho g k_o m_o^3, \quad (13)$$

где V – безразмерная скорость движения границы (флюидодинамический параметр подобия – отношение скорости наращивания пористого слоя к скорости флюидизации); $V_o = -V_1$; v – скорость матрицы среды; v_f – скорость флюида; $\alpha = 1/m_o$; m_o , η_o , k_o – масштабы пористости, вязкости и коэффициента проницаемости. Шкалы длины L и времени T равны соответственно $L = \sqrt{\frac{\eta_o k_o m_o^{(l-1)}}{\mu}}$; $T = \frac{(\eta_o \mu)^{1/2}}{\Delta \rho g m_o^2 (k_o)^{1/2}}$; $D = \beta \eta_o / T$ – реологический параметр (критерий) подобия.

Система решалась численно в безразмерном виде в растущей области. Проверка устойчивости осуществлялась по двум критериям. Значения входящих параметров среды осадков и скорости осадконакопления соответствуют параметрам, типичным для гидратосодержащих регионов [Xu, Ruppel, 1999; Rempel, Buffett, 1997]. Для расчетов брались значения, известные по геофизическим данным и соответствующие репрезентативным значениям характеристик осадков и скорости их накопления: плотность флюида $\rho_f = 1 \cdot 10^3$ кг/м³, плотность вещества осадков $\rho_s = 2.6 \cdot 10^3$ кг/м³, проницаемость поступающих осадков $k_o = 10^{-13}$ м², вязкость флюида $\mu = 2.5 \cdot 10^{-3}$ Па·с, вязкость поступающих осадков $\eta_o = 5 \cdot 10^{20}$ Па·с, скорость осадконакопления $V_1 = 10^{-10}$ м/с.

Внешнее давление (глубина акватории) и тепловой градиент выбирались согласно работе [Zatsepina, Buffett, 1997], так что мощность зоны стабильности газовых гидратов составляет около 700 м. Соответствующая кривая растворимости газа в поровом флюиде рассчитывалась согласно работе [Davie, Zatsepina, Buffett, 2004].

Финальная мощность осадков в процессе скомпенсированного осадконакопления принималась равной 6 000 м. Для принятых значений параметров безразмерное время t накопления 6 000 м осадков составляет 24.6. (Безразмерное время $t = t_r / T$, где t_r – реальное размерное время.) Для анализа закономерностей влияния на аккумуляцию газовых гидратов изменений реологических характеристик осадков, поступающих в разные периоды осадконакопления, численно исследовался случай, когда после осадков с базовым значением эффективной вязкости η_o накапливались менее вязкие осадки.

Результаты расчетов эволюции скорости фильтрации газонасыщенного порового флюида и гидратонасыщенности пор на нижней границе зоны гидратов для случая осадконакопления, при котором относительно менее вязкие осадки накапливались в интервале безразмерного времени процесса 12.1–24.6, представлены на рис. 2 (кривая 3).

Для сравнения приведены результаты аналогичных расчетов для однородного осадконакопления при $\eta = \eta_o = 5 \cdot 10^{20}$ Па·с (кривая 1) и $\eta = 0.5 \eta_o = 2.5 \cdot 10^{20}$ Па·с (кривая 2). Тепловой режим и скорость осадконакопления, как и остальные входящие параметры модели, принимались одинаковыми для трех представленных на рисунке вариантов расчетов. Приведенные результаты расчетов тех же параметров при изменении в определенный момент вязкости поступающих осадков (кривая 3) показывают, что скорость фильтрации и гидратонасыщенность сначала растут со временем так же, как и при однородном осадконакоплении с базовым значением эффективной вязкости η_o , а затем при поступлении менее вязких осадков скорость существенно возрастает.

Более быстрый рост гидратонасыщенности соответствует скорости роста гидратонасыщенности при накоплении и уплотнении осадков с меньшим значением

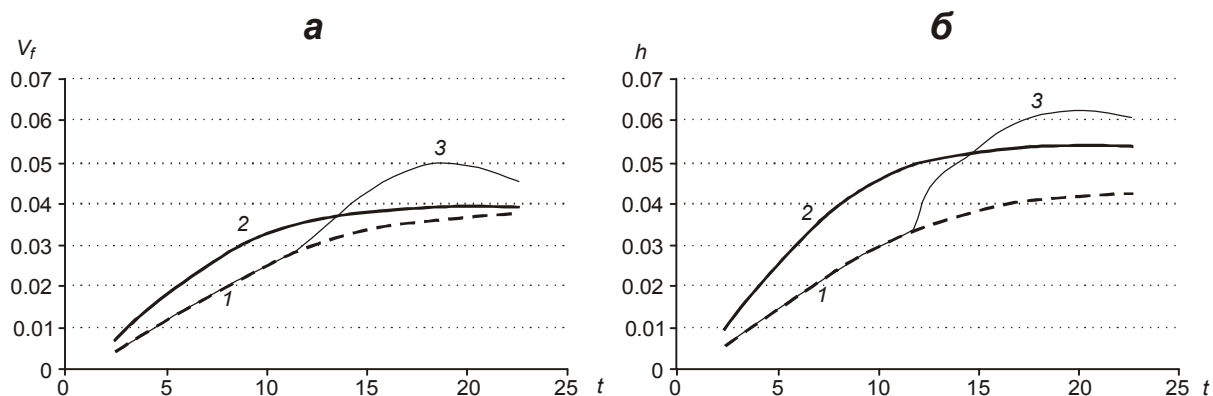


Рис. 2. Эволюция скорости фильтрации к поверхности порового флюида в процессе накопления и уплотнения осадков (а) и эволюция гидратонасыщенности на нижней границе стабильности газовых гидратов (б). 1, 2 – в условиях постоянной эффективной вязкости поступающих на дно осадков при $\eta=5 \cdot 10^{20}$ Па·с (1) и $\eta=2.5 \cdot 10^{20}$ Па·с (2); 3 – при уменьшении вязкости поступающих на поверхность осадков в период от 12.1 до 24.6

эффективной вязкости. При этом гидратонасыщенность оказывается больше, чем для случаев однородного осадконакопления, так как большая скорость роста гидратонасыщенности “включается”, когда определенный объем гидратов в порах уже накоплен. Из этого следует, что результирующее превышение накопленного объема газовых гидратов относительно варианта однородного осадконакопления с пониженной вязкостью зависит от времени, в течение которого произошло уменьшение вязкости поступавших осадков.

Результаты математического моделирования аккумуляции газовых гидратов для исследованной модели осадконакопления показывают, что приповерхностная гидратонасыщенность зависит не только от наблюдаемых значений свойств осадков и скорости роста их мощности в зоне стабильности газовых гидратов, но и от реологических свойств осадков, накапливавшихся на более ранних этапах формирования осадочной структуры. Ранее в работе [Суетнова, 2011] было показано, что различия проницаемости последовательно накапливавшихся слоев осадков также влияют на эволюцию гидратонасыщенности осадков в ходе формирования гидратосодержащих осадочных структур морского дна. Таким образом, использования наблюдаемых приповерхностных параметров осадков и оценок скорости их накопления [Davie, Buffett, 2001; Liu, Flemings, 2007] не достаточно для оценки эволюции гидратонасыщенности в ходе формирования гидратосодержащих осадочных структур морского дна. Учет изменений условий седиментации при трансгрессиях и регрессиях, происходивших при развитии акваторий, по-видимому, должен быть необходимым элементом как в палеорекострукциях гидратонасыщенности морских осадков, так и в актуальных прогнозах возможных изменений их гидратонасыщенности в результате трансгрессий.

Выводы

Результаты моделирования показывают, что аккумуляция газовых гидратов в морских осадках зависит не только от реологических свойств осадков в современной зоне стабильности *PT*-условий газовых гидратов, но и от реологических свойств, подстилающих их осадков, которые накапливались на ранних этапах формирования осадочного чехла. Результаты модельных расчетов для разных условий седиментации показывают, что накопление менее вязких осадков поверх более вязких убыстряет процесс уплотнения по сравнению с накоплением только более вязких осадков и увеличивает

скорость гидратонакопления в зоне стабильности гидратов метана в земной коре. В результате этого гидратонасыщенность пор становится больше, чем для процесса однородного осадконакопления менее вязких осадков. Таким образом, показано, что аккумуляция газовых гидратов в осадках закономерно претерпевает изменения в зависимости от истории седиментации, в частности от изменения реологических свойств поступающих на дно осадков.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 10-05-01094-а).

Литература

- Гинсбург Г.Д., Соловьев В.А. Субмаринные газовые гидраты. ВНИИОкеангеология, 1994. 199 с.
- Суетнова Е.И. Уплотнение неоднородных осадков вязкоупругой реологии // Физика Земли. 2003. № 1. С.77–83.
- Суетнова Е.И. Накопление газгидратов и уплотнение накапливающихся осадков: проблема взаимовлияния процессов // Докл. РАН. 2007. Т. 415, № 6. С.818–822.
- Суетнова Е.И. Влияние режима осадконакопления и уплотнения осадков в субаквальных условиях на аккумуляцию газгидратов в зоне их стабильности // Физика Земли. 2008. № 9. С.65–70.
- Суетнова Е.И. Влияние реологических и гидродинамических свойств накапливающихся осадков на процессы уплотнения и гидратонакопления (по результатам математического моделирования) // Изв. вузов. Сер. Геология и разведка. 2009. № 1. С.52–55.
- 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.
- BenClennell M., Hovland M., Booth J.S., Henry P., Winters W.J. Formation of natural gas hydrates in marine sediments. 1. Conceptual model // J. Geophys. Res. 1999. V. 104, N B10. P.22985–23003.
- Davie M.K., Buffett B.A. A numerical model for the formation of gas hydrate below the seafloor // J. Geophys. Res. 2001. V. 106, N B1. P. 497–514.
- Davie M.K., Buffett B.A. Sources of methane for marine gas hydrate: inferences from a comparison of observations and numerical models // Earth Planet. Sci. Lett. 2003. V. 206, N 1/2. P.51–63.
- Davie M.K., Zatsepina O.Ye., Buffet B.A. Methane solubility in marine hydrate environments // Marine Geology. 2004. V. 203. P.177–184.
- Hyndman R.D., Davis E.E. A mechanism for the formation of methane hydrate and seafloor bottom simulating reflectors by vertical expulsion // J. Geophys. Res. 1992. V. 97. P.7025–7041.
- Liu X., Flemings P.B. Dynamic multiphase flow model of hydrate formation in marine Sediments // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. N B03.101. Doi:10.1029/2005JB004227.
- Rempel A.W., Buffet B.A. Formation and accumulation of gas hydrates in porous media // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. N B5. P.10151–10164.
- Sloan E.D. Clathrate Hydrates of Natural Gases. N.Y.: Marcel Dekker, 1998. 705 p.
- Suetnova E.I., Vasseur G. 1-D Modelling rock compaction in sedimentary basin using visco-elastic rheology // Earth Planet. Sci. Lett. 2000. V. 178. P.373–383.
- Xu W., Ruppel B.A. Predicting the occurrence, distribution, and evolution of methane gas hydrate in porous marine sediments // J. Geophys. Res. 1999. V. 104, N B3. P.5081–5095.
- Zatsepina O.Ye., Buffett B.A. Phase equilibrium of gas hydrate: implication for the formation of hydrate in the deep sea floor // Geophys. Res. Lett. 1997. V. 24, N 13. P.1567–1570.

Сведения об авторе

СУЕТНОВА Елена Ивановна – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: 254-9295. E-mail: Elena_suetnova@mail.ru

GAS HYDRATE ACCUMULATION IN PORES DURING COMPACTION OF GROWING SEDIMENTS IN THE CONDITION OF RHEOLOGICAL LAYERED NON-UNIFORM SEDIMENTATION

E.I. Suetnova

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. Peculiarity of the evolution of gas hydrate accumulation in ocean floor was investigated by the numerical modeling for the case of sequential deposition of sediment material with different effective viscosity. Model calculations show that the decreasing of viscosity of sediments which precipitates on to sea floor after certain time essentially increases the rate of gas hydrate accumulation from dissolved gas. This value increases nonlinearly with respect to decreasing of effective viscosity and time.

Keywords: sedimentation, gas hydrate, compaction, rheology, numerical modeling.