

УДК 532.542

ОБ ОДНОМ РЕЖИМЕ ОБРАЗОВАНИЯ ГИДРАТНОЙ ПРИ ВСПЛЫТИИ ГАЗОВОГО ПУЗЫРЬКА

О.Р. Нурисламов

В работе представлена модель образования пористой гидратной частицы при всплытии газового пузырька. Установлен критерий, разделяющий два режима, образования гидратной корки. Принято, что интенсивность образования гидрата определяется конвективным теплообменом с окружающей частицу водой.

Ключевые слова: всплытие гидратной частицы, образование газогидратов, пористая гидратная частица.

Введение

Газовые гидраты – это клатратные соединения (соединения включения), образующиеся при определенных термобарических условиях из воды и газа. В природе самым распространенным гидратом является гидрат метана. Интерес к газовым гидратам в настоящее время преимущественно проявляется как к энергетическим ресурсам, запасы газа в которых по некоторым оценкам в несколько раз превышают разведанные и неразведанные запасы углеводородного сырья (угля, нефти, газа). Газовые гидраты часто являются причинами многих аварийных ситуаций и экологических катастроф при добыче углеводородного сырья на шельфе и его транспортировке по трубопроводам.

В данной работе предложена модель образования пористой гидратной частицы при всплытии одиночного газового пузырька. Поток газовых пузырей может образоваться при возникновении на дне морей или океанов трещин в породах, покрывающих газовые пустоты, при авариях на нефтегазодобывающих скважинах, а также при разгерметизации газопроводов, расположенных на дне морей.

Постановка задачи

Предполагается, что в зависимости от начальной глубины всплытия пузырька возможны различные режимы образования гидратной корки [1]–[3]. Критерием, разделяющим эти режимы является глубина h^* , на которой плотность газового пузырька равна средней плотности газового включения в образующейся гидратной частице, т.е.:

$$\rho_g = G\rho_h.$$

Для газа примем модель калорически совершенного газа:

$$p = \rho_g R_g T.$$

Давление на глубине h будет определяться согласно гидростатическому закону:

$$p = p_0 + \rho_w g h.$$

Тогда глубина h^* будет определяться формулой:

$$h^* = \frac{G \rho_h R_g T - p_0}{\rho_w g},$$

где G – массовая доля газа в гидрате, ρ_h – плотность гидрата, R_g – газовая постоянная, p_0 – атмосферное давление, ρ_w – плотность воды, g – ускорение свободного падения. В частности, для газа метана $G = 0.12$, $\rho_h = 910$ кг/м³, $R_g = 519.6$ Дж/(кг·К). Полагая, что температура окружающей воды $T = 277$ К (т.е. 4°C), получим $h^* \approx 1594$ м.

Если всплытие пузырька начинается с глубины $h > h^*$, уменьшение объема газовой части пузырька происходит медленнее увеличения объема образующегося при этом гидрата. Поэтому рост гидрата будет происходить на внешней поверхности пузырька, образуя непроницаемую гидратную структуру, только за счет диффузии газа через гидратную корку.

Если всплытие пузырька начинается с глубины $h < h^*$, вследствие расхода газа на образование гидратной корки, уменьшение объема газовой части пузырька происходит быстрее увеличения объема образующегося при этом гидрата. Это указывает на пористую структуру образующейся гидратной корки. Гидратная корка при этом растет внутрь за счет воды, просачивающейся через пористую структуру.

Полагая, что за время полного образования гидратной частицы глубина всплытия изменится незначительно, пористость образующейся гидратной корки будет постоянна и определяться по формуле:

$$m = 1 - \frac{p_0 + \rho_w g h}{G \rho_h R_g T}.$$

Для образования гидрата на границе контакта газа и воды необходимо реализовать определенные термобарические условия, при которых температура среды должна быть ниже температуры фазового равновесия гидрата, газа и воды, определяемая условием:

$$T_s(p) = T_{s0} + T_* \ln\left(\frac{p}{p_{s0}}\right),$$

где T_s и T_{s0} – равновесные температуры при давлениях p и p_{s0} соответственно, T_* – эмпирический параметр, зависящий от газа и исследуемого интервала температур. Область, для которой температура среды T ниже температуры фазового равновесия $T_s(p)$, называется зоной стабильности гидратов (ЗСГ).

Рассмотрим всплытие одиночного газового пузырька в ЗСГ, сопровождаемое образованием пористой гидратной частицы. Для теоретического описания процесса ось координат z направим вертикально вверх с началом отсчета, совпадающим с начальным положением пузырька.

Для распределения давления по координате z примем гидростатический закон:

$$p = p_0 + \rho_w g(h - z),$$

где p_0 - атмосферное давление, h - начальная глубина, с которой начинается всплытие, z - текущая координата положения частицы.

Будем полагать, что интенсивность образования гидрата лимитируется интенсивностью отвода тепла от границы образования гидрата в окружающую воду. Условие теплового баланса на фазовой границе будет иметь вид:

$$j_h l_h = q,$$

где $j_h = (1 - m)\rho_h \frac{da_g}{dt}$ - интенсивность образования гидрата, отнесенная на единицу площади поверхности фазового перехода, q - интенсивность теплового потока от поверхности фазового перехода, l_h - теплота образования гидрата.

Пренебрегая теплоемкостью гидратной частицы по сравнению с теплотой, выделяющейся при гидратообразовании, можно полагать, что интенсивности тепловых потоков от поверхности фазового перехода и от внешней поверхности гидратной частицы одинаковы и равны q .

Интенсивность теплопередачи зависит от разности температур между поверхностью частицы и водой, а также от скорости движения пузырька и определяется по формуле:

$$q = k(T_h - T_w), \quad k = \frac{Nu_w \lambda_w}{2a_{hg}},$$

где T_h - температура на поверхности гидратной частицы, T_w - температура воды, k - коэффициент теплопередачи, λ_w - теплопроводность воды, Nu_w - число Нуссельта, a_{hg} - радиус гидратной частицы. Число Нуссельта зададим в виде:

$$Nu_w = 2 + 0.46 Re^{0.55} Pr^{0.33}, \quad Re = \frac{2a_{hg} \rho_w w}{\mu_w}, \quad Pr = \frac{\nu_w}{\chi_w}$$

где Re - число Рейнольдса, Pr - число Прандтля, w - скорость всплытия частицы, $\mu_w = \rho_w \nu_w$ - динамическая вязкость воды, ν_w - кинематическая вязкость воды, $\chi_w = \lambda_w / \rho_w c_w$ - коэффициент температуропроводности воды.

Уравнение для изменения массы частицы, с учетом пористости образующейся гидратной оболочки, имеет вид:

$$\frac{dm_{hg}}{dt} = 4\pi a_g^2 (\rho_g - m\rho_w - (1-m)\rho_h) \frac{da_g}{dt},$$

где m_{hg} , a_g – масса и радиус газового пузырька.

Уравнение импульсов для гидратной частицы примем в виде:

$$\frac{d}{dt}(w(m_{hg} + \mu_{hg})) = f_A - f_T - f_c,$$

$$f_A = \frac{4}{3}\pi a_{hg}^3 \rho_w g, f_T = m_{hg} g, f_c = \xi \pi a_{hg}^2 \frac{\rho_w w^2}{2},$$

где f_A, f_T, f_c – силы Архимеда, тяжести, гидродинамического сопротивления, для которых масса газогидратной частицы и присоединенной массы определяются соответственно по формулам:

$$m_{hg} = \frac{4}{3}\pi(a_{hg}^3 - a_g^3)((1-m)\rho_h + m\rho_w) + \frac{4}{3}\pi a_g^3 \rho_g, \mu_{hg} = \frac{2}{3}\pi a_{hg}^3 \rho_w$$

Для зависимости коэффициента гидродинамического сопротивления ξ от числа Рейнольдса Re используем следующее выражение [4]:

$$\xi = \frac{12}{Re} (1 + 0.241 Re^{0.687}) + 0.42(1 + 1.902 \cdot 10^4 Re^{-1.16})^{-1}.$$

Анализ численного решения

Численные расчеты проведены при следующих значениях теплофизических параметров: $\rho_h = 910$ кг/м³, $l_h = 5 \cdot 10^5$ Дж/кг, $\lambda_h = 0.6$ Вт/(м·К), $T_{s0} = 280$ К, $p_{s0} = 5.5$ МПа, $T_* = 10$ К, $v_w = 10^{-6}$ м²/с, $\rho_w = 1000$ кг/м³, $c_w = 4200$ Дж/(кг·К), $\lambda_w = 0.556$ Вт/(м·К), $R_g = 519$ Дж/(кг·К), $g = 9.81$ м/с², $G = 0.12$, $p_0 = 0.1$ МПа.

На рис. 1 представлена динамика изменения радиуса газового ядра a_g , толщины гидратной оболочки δ , скорости всплытия пузырька w и массы гидратной частицы m_{hg} при всплытии с начальной глубины $h = 1000$ м при различных значениях начального радиуса газового пузырька $a_{g0} = 1, 1.5$ и 2 мм, соответствующих на рисунке цифрам 1, 2 и 3. Вследствие большой начальной положительной плавучести пузырек газа вначале всплытия резко увеличивает скорость до максимально возможного значения, а в процессе образования гидратной оболочки, вследствие увеличения массы, скорость постепенно уменьшается и начинает стабилизироваться к концу процесса образования гидратной частицы. Согласно рис. 1 (е), скорость синтеза гидрата сильно зависит от исходного радиуса пузырька. Так, например, время полного образования гидратной частицы для газового пузырька с начальным радиусом 1 мм составляет около 200 секунд, а для 2 мм – 1000 секунд. Массы образующихся гидратных частиц при этом соответственно равны 4 и 32 мг. Это говорит о том, что средние скорости образования гидрата отличаются примерно в 1,6 раза. Объясняется это тем,

что с увеличением исходного радиуса пузырька увеличивается и средняя скорость всплытия, что напрямую влияет на интенсивность теплопередачи и, как следствие, на интенсивность гидратообразования.

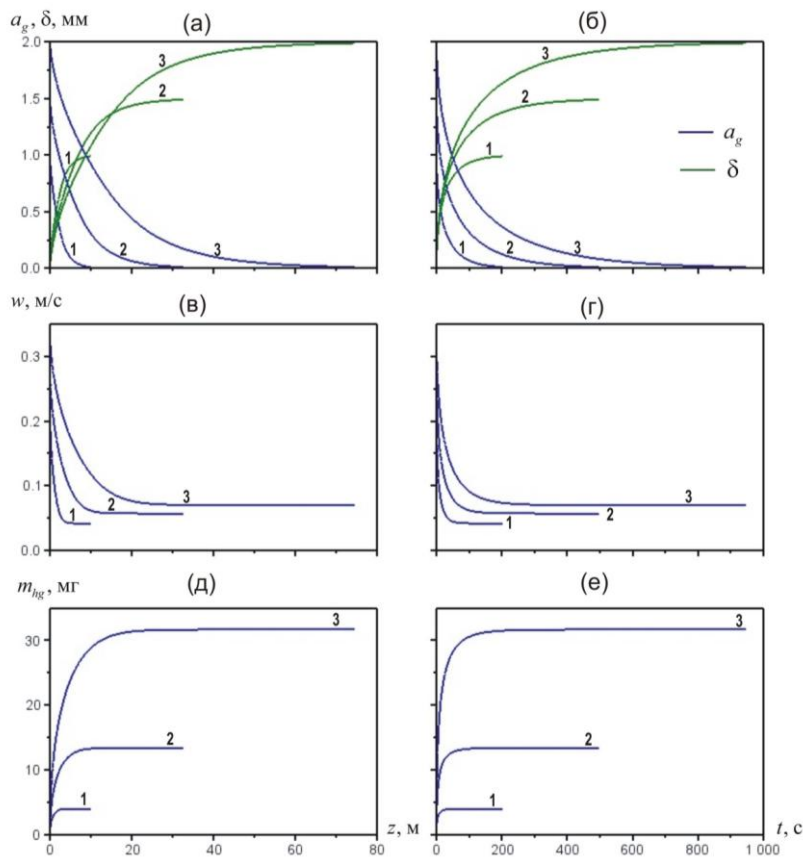


Рис. 1. Динамика изменения радиуса газового ядра a_g и толщины гидратной оболочки δ (а, б), скорости всплытия пузырька w (в, г) и массы гидратной частицы m_{hg} (д, е) при различных значениях начального радиуса газового пузырька a_{g0}

На рис. 2 представлена динамика изменения радиуса газового ядра a_g , толщины гидратной оболочки δ , скорости всплытия пузырька w и массы гидратной частицы m_{hg} при всплытии газового пузырька радиуса $a_{g0} = 1$ мм при различных значениях начальной глубины $h = 800, 1000$ и 1500 м, обозначенных на рисунках цифрами 1, 2 и 3 соответственно. Из рис. 2 (е) видно, что времена полного образования гидратной частицы слабо зависят от начальной глубины всплытия. Масса гидрата в гидратных частицах, вследствие различной пористости частиц, будет различной. Так для частицы всплывающей с глубины 1500 м величина пористости составляет 0,1, а для глубины 800 м – 0,5. Исходя из всего этого можно сделать вывод о том, что скорость образования гидрата в пузырьке, всплывающей с глубины 1500 м, примерно в 2 раза превышает скорость образования гидрата в пузырьке, всплывающей с глубины 800 м.

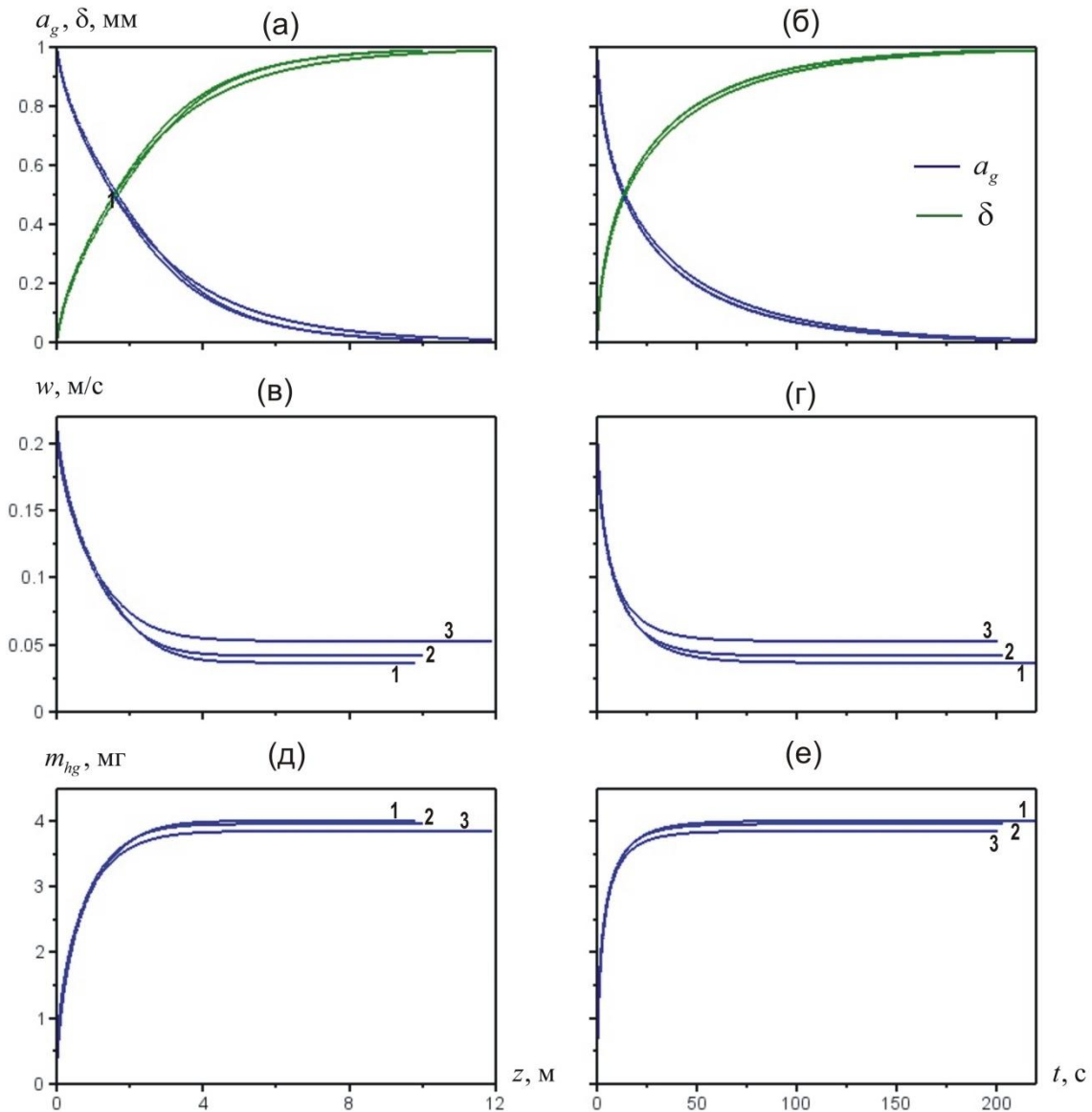


Рис. 2. Динамика изменения радиуса газового ядра a_g и толщины гидратной оболочки δ (а, б), скорости всплытия пузырька w (в, г) и массы гидратной частицы m_{hg} (д, е) при различных значениях начальной глубины h

Заклучение

Предполагается, что образование гидратной оболочки возможно в двух режимах: в диффузионном режиме, если начальная глубина всплытия больше $h^* \approx 1594$ м, и в режиме фильтрационного проникновения воды через пористую гидратную оболочку, если начальная глубина всплытия меньше h^* . Установлено, что скорость образования гидрата во втором режиме значительно зависит от начальной глубины всплытия и радиуса пузырька.

Библиографический список

1. Егоров, А.В. Тепловые эффекты при транспорте глубоководных гидратов метана в негерметичном контейнере / А.В. Егоров, Р.И. Нигматулин, А.Н. Рожков, Е.С. Черняев. – Препринт ИПМех РАН № 1009, 2012.
2. Егоров, А.В. О превращениях глубоководных метановых пузырей в гидратный порошок и гидратную пену / А.В. Егоров, Р.И. Нигматулин, А.Н. Рожков, А.М. Сагалевиц, Е.С. Черняев // Океанология. – 2012. – Т. 52. – № 2. – С. 1–13.
3. Егоров, А.В. Разрушение глубоководных метановых пузырей / А.В. Егоров, Р.И. Нигматулин, Н.А. Римский-Корсаков, А.Н. Рожков, А.М. Сагалевиц, Е.С. Черняев // Океанология. – 2010. – Т. 50. – № 4. – С. 505–514.
4. Кутепов, А.М. Химическая гидродинамика / А.М. Кутепов, А.Д. Полянин, З.Д. Запрянов, А.В. Вязьмин, Д.А. Казенин. – М.: Квантум, 1996. – 336 с.

[К содержанию](#)