

УДК 532.546:536.421

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВСПЛЫТИЯ ГИДРАТНЫХ ЧАСТИЦ В КУПОЛЕ

Кильдибаева С.Р.

Стерлитамакский филиал ФГБОУ ВПО «Башкирский государственный университет», Стерлитамак, Россия (453100, г. Стерлитамак, проспект Ленина, 37), e-mail: freya.13@mail.ru.

Газовые гидраты рассматриваются в качестве альтернативного источника энергии многими специалистами в области природопользования и энергетики. Компактность газогидратов, вмещающих большие объемы газа, особенно полезна при транспортировке и хранении газа. Учеными выявлено, что со дна всего Мирового океана в толще воды поднимаются газовые пузырьки. В работе рассматривается миграция метановых пузырьков внутри устройства, предназначенного для накопления и дальнейшей транспортировки газогидратов. При образовании гидратной корки на метановых пузырьках примем, что кинетика гидратообразования лимитируется теплоотводом. Таким образом, полагается, что гидрат образуется в том случае, когда температура окружающей воды не превосходит равновесную температуру гидратообразования при рассматриваемом давлении. Получена зависимость радиуса и плотности частицы и температуры воды внутри купола от вертикальной координаты.

Ключевые слова: газогидраты, образование гидратных частиц, добыча газогидратов, накопление гидратов в куполе.

MODELING OF THE PROCESS OF ASCENT HYDRATE PARTICLES IN THE DOME

Kildibaeva S.R.

Sterlitamak branch of Bashkir State University, Sterlitamak, Russia (453100, Sterlitamak, Prospekt Lenina, 37), e-mail: freya.13@mail.ru.

Gas hydrates are considered as an alternative source of energy and a lot of specialists in the area of environment and energy. Compactness of gas hydrates contain more gas volumes, particularly useful during transportation and storage of gas. Scientists found that from the bottom of the ocean in the water column rising gas bubbles. In the paper the migration of methane bubbles inside the device intended for accumulation and further transportation of gas hydrates. In the formation of hydrated peel methane bubbles will accept that the kinetics of hydrate formation is limited by the heat sink. Thus, it is believed that the hydrate is formed, in the case when the temperature of the water does not exceed the equilibrium temperature of hydrate formation in the given pressure. The obtained dependence of the radius and the density of particles and temperature of water inside the dome from the vertical coordinate. This information can serve as a basis in the study of temperature and velocity in modeling the process of accumulation of hydrate particles in the tank.

Keywords: gas hydrates, formation of hydrate particles, extraction of gas hydrates, hydrates accumulation in the dome.

Введение

Исследования дна Мирового океана, проведенные в начале XXI века [5; 6], свидетельствуют о непрерывных выбросах метана в виде газовых пузырьков. Единичный объем газового гидрата, содержащий в 160 м³ раз больше газа, чем в свободном состоянии [1], позволяет рассматривать гидрат как один из наиболее перспективных источников углеводородного сырья. Добыча гидрата может происходить как в недрах материка [2], так и на дне водоемов. Нередко газовые гидраты создают трудности при добыче углеводородов, и используются специальные средства для предупреждения их образования [3]. Особый интерес для исследователей представляет процесс покрытия газовых пузырьков гидратной коркой, образование которой характерно для всплытия метановых пузырьков.

Термобарические условия, соответствующие дну Мирового океана, идеально подходят для процесса гидратообразования, фазовая диаграмма представлена на рис. 1.

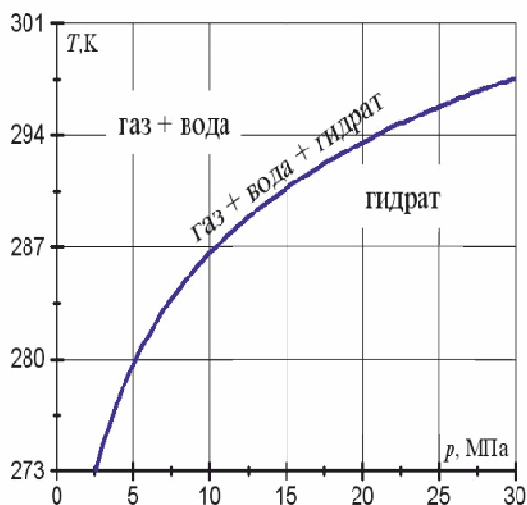


Рис. 1. Диаграмма фазового равновесия метана

Схема процесса накопления гидратных частиц внутри купола представлена на рис. 2. Согласно предлагаемой схеме на дне водоема имеется источник всплытия метановых пузырьков с известным массовым расходом M_g и купол цилиндрической формы, зафиксированный на некоторой высоте h . Верхняя крышка купола закрыта, нижняя открыта. Таким образом, внутрь купола могут проникать пузырьки метана.

Будем полагать, что нижнее основание купола зафиксировано на такой высоте h , что температура окружающей воды T_l ниже равновесной температуры гидратообразования T_s :

$$T_l \leq T_s(p), T_s(p) = T_{(h_0)} + T_* \ln(p/p_{(h_0)}). \quad (1)$$

При этом примем, что при выполнении условия (1) пузырьки газа начинают покрываться газогидратной коркой. Пусть n – число пузырьков в единице объема. Пусть w – скорость миграции гидратной частицы, v_l – скорость воды, вымещающейся из купола за счет поступающих частиц. Тогда скорость поднятия частиц: $v_{gh} = w - v_l$.

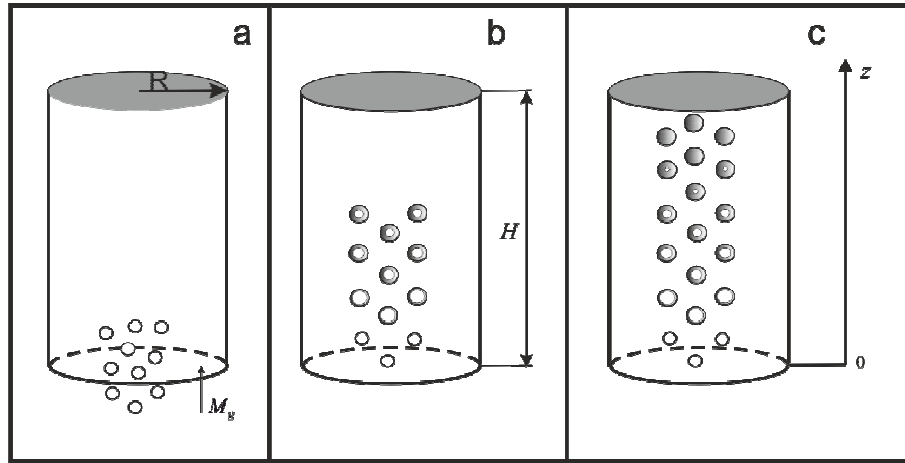


Рис. 2. Схема процесса всплытия метановых пузырьков в куполе-сепараторе. H и R – высота и радиус основания купола, белыми кружками обозначены пузырьки газа, серыми – частицы гидрата, частично серыми – пузырьки, покрытые гидратной коркой.

Уравнение сохранения числа пузырьков запишется в виде:

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial n v_{gh}}{\partial z} = 0. \quad (2)$$

Уравнения сохранения масс для пузырьков и воды [4]:

$$\frac{\partial \alpha \rho_{gh}^0}{\partial t} + \frac{\partial \alpha \rho_{gh}^0 v_{gh}}{\partial z} = n J_l, \quad (3)$$

$$\frac{\partial (1 - \alpha) \rho_l^0}{\partial t} - \frac{\partial (1 - \alpha) v_l \rho_l^0}{\partial z} = -n J_l, \quad (4)$$

где J_h и J_l – интенсивности образования гидрата и расхода воды, идущей на его образование; α – объемное содержание пузырьков; ρ_{gh}^0 – средняя плотность газогидратного пузырька, определяемая как отношение всей массы пузырька на его общий объем.

Гидрат является клатратным соединением с массовым содержанием газа G , поэтому интенсивность образования гидрата и расхода воды связаны как:

$$J_l = (1 - G) J_h. \quad (5)$$

Приведенные уравнения необходимо дополнить следующим кинематическим соотношением:

$$\alpha = \frac{4}{3} \pi a^3 n, \quad (6)$$

где a – радиус газогидратного пузырька.

Уравнения импульсов для газогидратных пузырьков и для жидкости в безынерционном приближении соответственно могут быть записаны в виде [4]:

$$-\alpha \frac{\partial p}{\partial z} - nf - \alpha \rho_{gh}^0 g = 0 \quad (7)$$

$$-(1-\alpha) \frac{\partial p}{\partial z} + nf - (1-\alpha) \rho_l^0 g = 0 \quad (8)$$

$$f = C_w \frac{\rho_l^0 w^2 \pi a^2}{2}, \quad C_w = C_w(\text{Re}), \quad \text{Re} = \frac{2a \rho_l^0 w}{\mu_l},$$

где f – сила трения между пузырьком и водой.

Запишем уравнение для изменения температуры жидкости за счет температурного следа пузырьков, возникающего вследствие гидратообразования:

$$\rho_l^0 c_l (1-\alpha) \left(\frac{\partial T_l}{\partial t} - v_l \frac{\partial T_l}{\partial z} \right) = nQ, \quad Q = 4\pi a^2 q, \quad (9)$$

где T_l и c_l – температура и теплоемкость воды; Q и q – интенсивности источника тепла из-за гидратообразования, отнесенные на единицу объема и однородного пузырькового включения. Здесь и далее нижние индексы g, l, h относятся к параметрам газа, воды и гидрата.

Жидкость будем считать несжимаемой, а газ калорически совершенным:

$$\rho_l^0 = \text{const}, \quad p_g = \rho_g^0 R_g T. \quad (10)$$

Полагаем, что газогидратные пузырьки состоят из газового ядра радиусом a_g и гидратной «скорлупы». Тогда для средней плотности ρ_{gh}^0 :

$$\frac{4}{3} \pi a^3 \rho_{gh}^0 = \frac{4}{3} \pi a_g^3 \rho_g^0 + \frac{4}{3} \pi (a^3 - a_g^3) \rho_h^0, \quad (11)$$

где ρ_g^0, ρ_h^0 – истинные плотности газовой и гидратной фаз.

Выражение (11) разрешим относительно плотности газогидратного пузырька, которое будет иметь вид:

$$\rho_{gh}^0 = \frac{a_g^3 \rho_g^0 + (a^3 - a_g^3) \rho_h^0}{a^3}. \quad (12)$$

Следовательно, средняя плотность ρ_{gh}^0 газогидратного пузырька определяется значениями радиусов газового ядра a_g и всего пузырька a , а также текущей плотностью газа ρ_g^0 .

В газогидратном пузырьке газ содержится как в свободном состоянии, так и в составе гидрата с массовым содержанием G . Запишем условие постоянства общей массы газа в пузырьке как:

$$\frac{4}{3}\pi a_g^3 \rho_g^0 + \frac{4}{3}\pi (a^3 - a_g^3) G \rho_h^0 = \frac{4}{3}\pi a_{g0}^3 \rho_{g0}^0, \quad (13)$$

где a_{g0} , ρ_{g0}^0 – искомые значения радиуса и плотности газа в пузырьке.

Примем, что интенсивность образования гидратного пузырька лимитируется интенсивностью отвода тепла от его поверхности жидкостью:

$$J_h = \frac{Q}{l}, \quad (14)$$

где l – удельная теплота образования гидрата.

Расчеты производились для следующих значений: $\rho_h^0 = 910$ кг/м³, $\rho_l^0 = 1000$ кг/м³, $l_h = 5 \cdot 10^5$ Дж/кг, $\lambda_l = 0.58$ Дж/(м с К), $c_l = 4200$ Дж/(кг К), $\mu_l = 0.001$ кг/(м с), $R_g = 520$ Дж/(кг К), $G = 0.12$, $\alpha = 10^{-3}$, $H = 20$ м, $h = 10$ м, $R = 4$ м.

На рис. 3-5 представлены результаты для момента времени, когда гидратные частицы достигли высоты $z=14,5$ м. На рис. 3-4 представлены зависимости радиуса и плотности частицы от вертикальной координаты. Из рис. 3 видим, что на высоте $z=1$ м радиус частицы прекращает рост, становится стационарным. Из рис. 4 видим, что пузырьки полностью покрываются гидратной коркой, превращаясь в гидратную частицу на высоте $z=1$ м.

На рис. 5 представлена зависимость температуры воды в куполе от вертикальной координаты. Температура жидкости внутри купола не превышает температуру гидратообразования, что свидетельствует о том, что гидратная частица не разлагается.

Выводы

В работе рассмотрен процесс всплытия пузырьков метана внутри купола и их превращение в гидратные частицы. При рассмотрении модели было принято, что интенсивность образования гидратного пузырька лимитируется интенсивностью отвода тепла. Получена зависимость радиуса и плотности гидратной частицы от вертикальной координаты, а также профиль изменения температуры жидкости внутри купола.

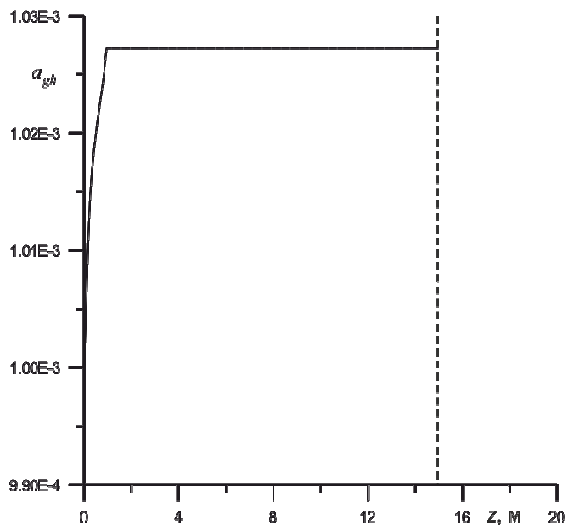


Рис. 3. Зависимость радиуса частицы от вертикальной координаты.

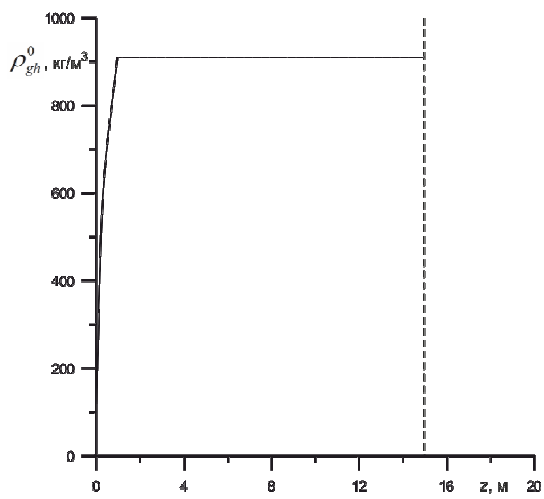


Рис. 4. Зависимость плотности частицы от вертикальной координаты.

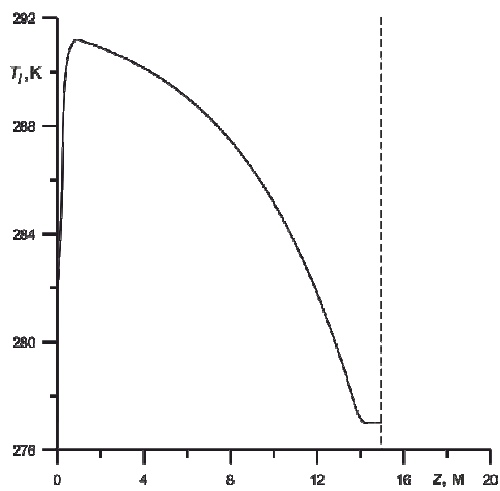


Рис. 5. Зависимость температуры воды в куполе от вертикальной координаты.

Работа выполнена при поддержке гранта СФ БГУ, договор № В14-6.

Список литературы

1. Макогон Ю.Ф. Гидраты природных газов. – М. : Недра, 1974. – 285 с.
2. Математическое моделирование процесса отбора газа из пористой среды, частично насыщенной газовым гидратом / Кильдибаева С.Р. // *Фундаментальные исследования.* – 2013. - № 11 (часть 6). - С. 1163-1166.
3. Моделирование купола-сепаратора при разливе нефти в шельфе / Кильдибаева С.Р. // *Фундаментальные исследования.* - 2013. - № 10 (часть 5). - С. 1045-1050.
4. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Т. 1. – М. : Наука, 1987. – 464 с.
5. Gumerov N.A., Chahine G.L. Dynamics of bubbles in conditions of gas hydrate formation // *Fluid Dynamics.* - 1992. - № 5. - P. 664-669.
6. Sautera E.J. et al. Methane discharge from a deep-sea submarine mud volcano into the upper water column by gas hydrate-coated methane bubbles // *Earth and Planetary Science Letters.* - 2006. - № 243 (3-4). - P. 354-365.

Рецензенты:

Гималтдинов И.К., д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой «Прикладная математика и механика» Стерлитамакского филиала ФГБОУ ВПО «Башкирский государственный университет», г. Стерлитамак.

Мустафина С.А., д.ф.-м.н., профессор, заведующая кафедрой «Математическое моделирование», декан физико-математического факультета Стерлитамакского филиала ФГБОУ ВПО «Башкирский государственный университет», г. Стерлитамак.