

## Математическое моделирование процесса гидратообразования на поверхности пузырьков для случаев глубоководных разливов

Кильдибаева С.Р., Харисов Э.И.

Стерлитамакский филиал Уфимского университета науки и технологий, Стерлитамак

Для случаев глубоководной разработки нефтегазовых месторождений в шельфе возникает высокая вероятность разлива углеводородов. Миграция углеводородов происходит в три этапа: струя, шлейф и капельно-пузырьковый режим. На первом этапе преобладает начальный импульс потока, на втором этапе преобладает удельный импульс силы плавучести, на третьем этапе миграция капель и пузырьков происходит в виде капельно-пузырькового облака, которое движется под действием сил сдвигающего течения и плавучести. Рассмотрим основные уравнения, описывающие миграцию капель нефти, пузырьков (газовых, композитных или гидратных), процессы образования и разложения газогидратов на поверхности пузырьков. Рассмотрим основные уравнения, описывающие миграцию пузырька, который может быть газовым, композитным (газовое ядро и гидратная оболочка) и гидратным. Отметим, что миграция пузырька на этапе струи и шлейфа происходит в контрольном объеме согласно методу ИЛМКО [1].

Запишем уравнения сохранения массы для композитного пузырька [2]:

$$\frac{dm_{gh}}{dt} = 4\pi a_{gh}^2 j_w, \quad m_{gh} = m_g + m_h, \quad (1)$$

где  $m_g = \frac{4}{3}\pi a_g^3 \rho_g$  и  $m_h = \frac{4}{3}\pi (a_{gh}^3 - a_g^3) \rho_h$  – масса газа и гидрата в композитном пузырьке,  $a_g$  – радиус газового ядра,  $j_w$  – интенсивность потребления воды при образовании гидратной оболочки, отнесенная на единицу площади пузырька. Интенсивность потребления воды  $j_w$  связанная с интенсивностью гидратообразования  $j_h$ , которая будет рассмотрена в следующем пункте.

Общая масса газа в композитном пузырьке:

$$m_g + m_h G = m_{g0}, \quad m_{g0} = \frac{4}{3}\pi a_{g0}^3 \rho_{g0}, \quad (2)$$

где  $m_{g0}$  – масса газа в композитном пузырьке в начальный момент времени,  $a_{g0}$  – начальный радиус газового пузырька,  $\rho_{g0}$  – начальная плотность газового пузырька.

Согласно (1) и (2) радиусы газового ядра и композитного пузырька:

$$a_g^3 = \frac{(a_{g0}^3 \rho_{g0} - a_{gh}^3 \rho_h G)}{(\rho_g - \rho_h G)}, \quad \frac{da_{gh}}{dt} = \frac{j_w}{(1-G)} \left( \frac{1}{\rho_h} - \frac{G}{\rho_{g0}} \right) \quad (3)$$

Для распределения давления в воде по высоте примем гидростатический закон:

$$p = p_a + \rho_w g (h_u - z), \quad (4)$$

где  $h_u$  – начальная глубина истечения углеводородов,  $p_a$  – атмосферное давление,  $z$  – координата композитного пузырька.

Уравнение импульсов для композитного пузырька:

$$\frac{d(w_b (m_{gh} + \mu_{gh}))}{dt} = f_A - f_T - f_C, \quad (5)$$

где  $m_{gh} = \frac{4}{3}\pi (a_{gh}^3 - a_g^3) \rho_h + \frac{4}{3}\pi a_g^3 \rho_g$  – масса пузырька,  $\mu_{gh} = \frac{2}{3}\pi a_{gh}^3 \rho_w$  – присоединенная масса,  $f_A = \frac{4}{3}\pi a_{gh}^3 \rho_w g$  – сила Архимеда,  $f_T = \frac{4}{3}\pi ((a_{gh}^3 - a_g^3) \rho_h + a_g^3 \rho_g) g$  – сила тяжести,  $f_C = \xi_b \pi a_{gh}^2 \frac{\rho_w w_b^2}{2}$  – сила сопротивления.

Коэффициент гидродинамического сопротивления  $\xi_b$  и число Рейнольдса  $Re_{gh}$  запишем в следующем виде [3]:

$$\xi_b = \frac{12}{Re_b} (1 + 0.0811 Re_b^{0.879}), \quad Re_b = \frac{a_{gh} \rho_w w_b}{\mu_w}.$$

Скорости миграции композитного пузырька  $w_b$ , определим из (5) с учетом (1).

Предельные схемы образования гидрата на поверхности пузырьков описаны в работе [1]. Процесс гидратообразования продолжается до тех пор, пока внутри газового пузырька достаточно газа, необходимого для формирования гидратной оболочки. Также необходимым условием гидратообразования является соблюдение условий стабильного существования гидрата согласно фазовой диаграмме. На рисунке 1а представлена зависимость массы образовавшегося гидрата от вертикальной координаты. Из рисунка видим, что до глубины  $z=1255.41$  м масса образовавшегося гидрата растет, затем фиксируется, так как образование гидрата останавливается. Далее, когда условия стабильного существования гидрата нарушаются, происходит процесс разложения гидратной частицы и масса убывает. Полное завершение разложения гидрата происходит на глубине  $z= 226.29$  м. На рисунке 1б представлена динамика изменения радиуса гидратного пузырька на стадии разложения гидрата.

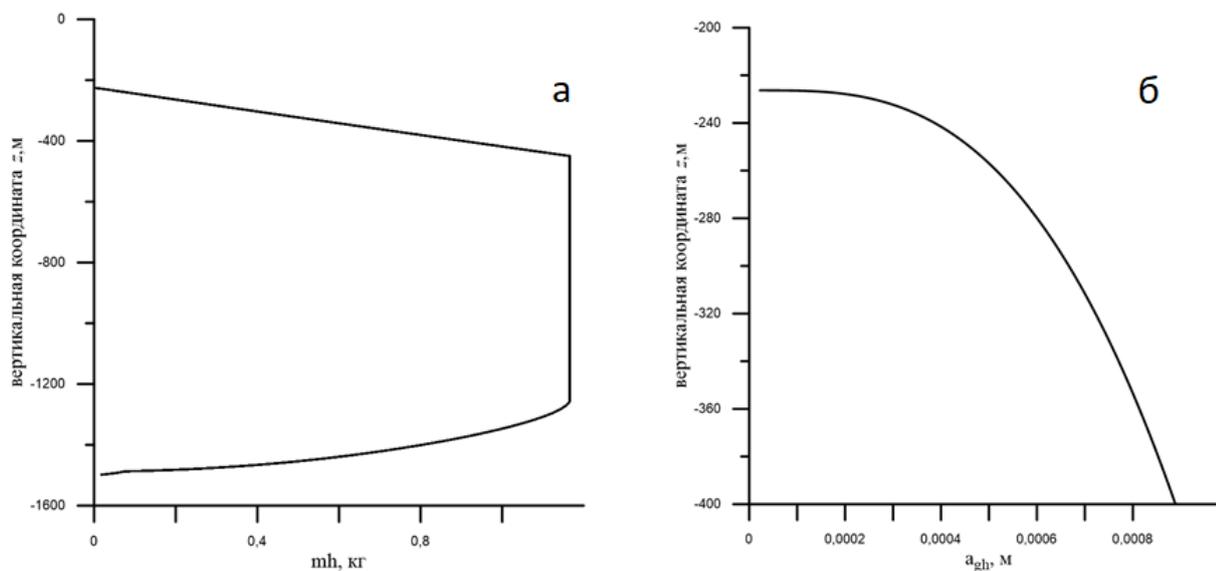


Рис.1. Зависимость массы образовавшегося гидрата (а) и радиуса гидратного пузырька (б) от вертикальной координаты.

## Список литературы

- [1] Гималтдинов И.К., Кильдибаева С.Р. Модель затопленной струи с учетом двух предельных схем гидратообразования // Теплофизика и аэромеханика. 2018. Т. 25, № 1 (109). С. 79-88.
- [2] Шагапов В. Ш., Тазетдинов Б.И. Образование и разложение газогидратных включений при миграции в воде // Теплофизика и аэромеханика. 2014.Т. 21. № 3. С. 355-364.
- [3] Кутепов А. М. Полянин А.Д., Запрянов З.Д., Вязьмин А.В., Казенин Д.А.М. Химическая гидродинамика. Квантум, 1996. 336 с.