МНОГОФАЗНЫЕ СИСТЕМЫ 2012

УДК 532.546

О механизме процесса образования газогидрата как способе ликвидации аварий на подводных скважинах

Русинов А.А., Чиглинцева А.С.

Бирская государственная социально-педагогическая академия, Бирск

В данной работе предложена технологическая схема и построена соответствующая математическая модель, которая описывает физико-химические процессы образования гидрата в вертикальной скважине. Получены результаты, которые могут быть использованы при создании технологий по ликвидации утечек и выбросов газа из подводных источников, образованных в результате аварий на нефтегазовых скважинах.

1. Введение

В современном мире возникла новая проблема, связанная с техногенными авариями, — утечка газа из скважин в морских глубинах. Для устранения такого рода аварий различными нефтяными и газовыми компаниями, а также ведущими учеными предлагаются десятки, сотни и даже тысячи идей, многие из которых не находят применения. Поэтому на сегодняшний день остро стоит проблема разработки технологии, с помощью которой можно было бы эффективно и быстро устранить аварию такого рода.

В данной работе построена математическая модель, которая позволяет устранить место утечки с помощью образования гидрата в вертикальной скважине.

2. Постановка задачи и основные уравнения

Согласно предлагаемой технологической схеме к месту утечки газа опускается металлическая конструкция, имеющая форму цилиндра, внутри которой имеется система алюминиевых решеток. В вертикальный канал снизу поступает вода. В результате этого происходит образование гидрата как в восходящем потоке, так и на алюминиевой решетке, что, как следствие, приведет к полному закрытию места утечки газа.

Ось z направим по оси цилиндрической конструкции вертикально вверх. Полагаем, что все основные параметры течения трехфазной системы, состоящей из частиц гидрата, воды и газа, однородны по сечению цилиндра. Пузырьки газа поднимаются вверх вдоль оси z, причем на поверхности этих пузырьков образуется гидрат.

Пусть n_g — число пузырьков в единице объема; w_g — скорость миграции пузырьков. Тогда уравнение сохранения числа пузырьков запишется в виде [1]:

$$\frac{d(Sn_gw_g)}{dz} = 0, \qquad (1)$$

где S — площадь сечения реактора. Здесь и далее нижние индексы h, l, g относятся к параметрам гидрата, воды и газа, а sk — металлическая конструкция (скелет).

Запишем уравнения сохранения масс соответственно для воды, газа и гидрата:

$$M_l = S\rho_l^0\alpha_l w_l = \text{const}, \qquad (2)$$

$$\frac{dM_g}{dz} = -(J_{gb}+J_{gsk}),\ J_{gb}=GJ_{hb},\ J_{gsk}=GJ_{hsk}, \qquad (3)$$

$$\frac{dM_{hb}}{dz} = J_{hb}, \quad M_{hb} = S\rho_h^0\alpha_{hb}w_h, \quad (w_h = w_g), \qquad (4)$$

где M_i, ρ_i^0, α_i, w_i, $(i = h, l, g, hb)$ — массовые расходы, истинные плотности, объемные содержания и скорости фаз; J_{hb}, J_{hsk}, J_{gb}, J_{gsk} — интенсивности образования гидрата, расхода воды и газа. Приведенную систему уравнений необходимо дополнить следующими соотношениями:

$$\alpha_g = \frac{4}{3}\pi a_g^3 n_g, \quad \alpha_{hb} = \frac{4}{3}\pi(a_{hb}^3 - a_g^3)n_g, \qquad (5)$$

$$\alpha_{sk} = \pi a_{sk}^3 l, \quad \alpha_{hsk} = \pi(a_{hsk}^2 - a_{sk}^2)l, \qquad (6)$$

$$\alpha_l + \alpha_g + \alpha_{hb} + \alpha_{hsk} + \alpha_{sk} = 1, \qquad (7)$$

где a_g — радиус газовых пузырьков; a_{hb} — радиус гидратных пузырьков; a_{sk} — радиус проволоки; a_{hsk} — радиус гидратного слоя на скелете; l —

удельный параметр, т.е. длина проволоки в единице объема.

Уравнение импульсов для двухфазного потока:

$$M_l\frac{dw_l}{dz}+M_{gh}\frac{dw_{gh}}{dz}=-S(1-\alpha_{sk}-\alpha_{skh})\frac{dp}{dz}-$$
$$-Sg(\rho_g^0\alpha_g+\rho_l^0\alpha_l+\rho_h^0\alpha_{hb})-2a_{hsk}Sl\rho_l^0\alpha_l\xi\frac{w_l^2}{2}-$$
$$-2a_{hsk}Sl(\rho_g^0\alpha_g+\rho_h^0\alpha_h)\xi\frac{w_g^2}{2}.$$

Пренебрегая инерционными эффектами, уравнение импульсов примет вид:

$$(1-\alpha_{sk}-\alpha_{skh})\frac{dp}{dz}=-g(\rho_g^0\alpha_g+\rho_l^0\alpha_l+\rho_h^0\alpha_{hb})-$$
$$-2a_{hsk}l\rho_l^0\alpha_l\xi\frac{w_l^2}{2}-2a_{hsk}lt(\rho_g^0\alpha_g+\rho_h^0\alpha_h)\xi\frac{w_g^2}{2}.$$

Приравнивая силу сопротивления (формула Стокса), действующую на гидратный пузырек со стороны жидкости, к разности силы тяжести и архимедовой силы, можно получить следующее выражение для скорости всплытия сферического гидратного пузырька относительно жидкости [2]:

$$w_{gl}=\frac{2t(a_g^3(\rho_h-\rho_g^0)+a_{hb}^3(\rho_l^0-\rho_h))}{9\mu_l a_{hb}}g. \tag{8}$$

Тогда скорость миграции гидратного пузырька будет определяться формулой:

$$w_g=w_l+w_{gl}. \tag{9}$$

Запишем уравнение баланса тепла, полагая, что температура газа и воды одинаковые ($T_g=T_l$), а температура гидрата на поверхности пузырьков определяется текущим давлением, соответствующим равновесной температуре образования гидрата $T_s(p)=T_{(h0)}+T_*\ln(p/p_{(h0)})$ [3]:

$$m_lc_l\frac{dT_l}{dz}=Q_{lb}+Q_{lsk}, \tag{10}$$

$$Q_{lb}=Sn_g4\pi a_{hb}^2q_{lb},\quad Q_{lsk}=S2\pi a_{hsk}lq_{lsk}. \tag{11}$$

Запишем выражение для определения интенсивности образования гидрата на скелете и на пузырьке:

$$J_{hsk}=S2\pi a_{hsk}lj_{hsk},\quad j_{hsk}=\frac{q_{ls}-q^*}{r_h}, \tag{12}$$

$$J_{hb}=Sn_g4\pi a_{hb}^2j_{hb},\quad j_{hb}=-\frac{q_{lb}}{r_h}, \tag{13}$$

где r_h — удельная теплота образования гидрата.

3. Межфазный тепло- и массообмен

Интенсивность теплопередачи между жидкостью и поверхностью гидрата на скелете, учитывая поперечное обтекание цилиндрической трубы, примем в виде [4]:

$$q_{ls}=\frac{\mathrm{Nu}_{lsk}\lambda_l}{a_{hsk}}(T_l-T_{hs}),$$
$$\mathrm{Nu}_{lsk}=0,57\sqrt{\mathrm{Re}_l}\,\mathrm{Pr}^{0,38}\left(\frac{\mathrm{Pr}}{\mathrm{Pr}_0}\right)^{0,25}. \tag{14}$$

Здесь T_l, T_{hs} — соответственно температуры жидкости и поверхности гидрата на скелете.

Для теплового взаимодействия жидкости с поверхностью гидратного пузырька примем следующие соотношения [1]:

$$q_{lb}=\frac{Nu_{lb}\lambda_l}{2a_{hb}}(T_l-T_{hbs}),$$
$$\mathrm{Nu}_{lb}=2+0,46\mathrm{Re}^{0,55}\,\mathrm{Pr}^{0,33}. \tag{15}$$

где T_{hbs} — температура на поверхности гидратного пузырька.

Решая уравнения теплопроводности в слое гидрата, образованного на скелете, получим:

$$\frac{1}{r}\left(\frac{\partial}{\partial r}r\frac{\partial T_h}{\partial r}\right)=0,\quad T_h=C_1\ln r+C_2, \tag{16}$$

удовлетворяющие следующим граничным условиям на скелете и на поверхности гидрата:

$$T=T_{sk}\quad (r=a_{sk}),\qquad T=T_{hs}\quad (r=a_{hsk}). \tag{17}$$

Тогда выражение для интенсивности теплового потока от поверхности гидрата к скелету примет вид:

$$q^*=-\lambda_h\frac{T_{hs}-T_{sk}}{a_{hsk}\ln(a_{sk}/a_{hsk})}, \tag{18}$$

где λ_h — коэффициент теплопроводности гидрата.

При этом жидкость будем полагать несжимаемой и газ — калорически совершенным:

$$\rho_l^0=\mathrm{const},\quad p=\rho_g^0R_gT_h. \tag{19}$$

Скорость изменения радиуса гидрата на пузырьке и газового пузырька будем определять на основе уравнений [3]:

$$\frac{da_{hb}}{dt}=j_h\left(\frac{1}{\rho_h^0}-\frac{G}{\rho_g^0}\right),\quad \frac{da_g}{dt}=-j_h\frac{Ga_{hb}^2}{a_g^2\rho_g^0}. \tag{20}$$

4. Заключение

Полученные в работе результаты расширяют теоретические представления о процессе образования газовых гидратов на морских глубинах, которые могут быть использованы при планировании и проведении комплекса инженерно-технологических мероприятий по ликвидации аварий на трубопроводах в условиях Мирового Океана.

Список литературы

[1] Нигматуллин Р.И. Динамика многофазных сред. Т. 1. М.: Наука, 1987. 464 с.

[2] Кутепов А.М., Полянин А.Д., Запрянов С.Д. Химическая гидродинамика: Справочное пособие. М.: Квантум, 1996. 336 с.

[3] Шагапов В.Ш., Чиглинцева А.А., Сыртланов В.Р. О возможности вымывания газа из газогидратного массива посредством циркуляции теплой воды // Прикладная механика и техническая физика. 2009. Т. 50. С. 100–111.

[4] Кислицын А.А. Основы теплофизики: Лекции и семинары. Тюмень: Издательство Тюменского государственного университета, 2002. 152 с.