

УДК 532.546:536.421

## Модель затопленной струи с учетом двух предельных схем гидратообразования\*

И.К. Гималтдинов<sup>1</sup>, С.Р. Кильдибаева<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Уфимский государственный нефтяной технический университет

<sup>2</sup>Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета

E-mail: iljas\_g@mail.ru

Рассматривается течение затопленных струй, распространяющихся в условиях стабильного существования гидрата и течения окружающей среды. Развита интегральный лагранжевый метод контрольного объема для расчетов параметров струи: траектории, радиуса, температуры, плотности и объемных содержаний компонент струи. Определено влияние двух предельных схем гидратообразования на параметры струи. Исследовано влияние начального значения дебита газа на температуру струи.

**Ключевые слова:** многофазная затопленная струя, гидратообразование, разлив углеводородов на дне водоема, накопление нефти.

### Введение

В связи с увеличением объемов добычи углеводородов из глубоководных залежей Мирового океана возрастает необходимость исследования течения многофазных затопленных струй, в виде которых происходит миграция углеводородов (нефти, газа, гидрата). Для ликвидации последствий разлива нефтепродуктов важно знать, как изменяются теплофизические характеристики многофазной затопленной струи: ее траектория, температура и объемные содержания компонент, входящих в струю. В случае, когда струя распространяется в условиях стабильного существования гидрата, важно определить влияние гидратообразования на теплофизические характеристики струи. Исследование процесса распространения струи особенно важно для моделирования устройств, предназначенных для устранения утечек [1, 2]. В работе [3] рассматривалась модель многофазной струи с учетом гидратообразования. Настоящее исследование является ее дополнением — проведен более подробный анализ влияния гидратообразования на параметры струи, установлено влияние начального значения дебита поступающего из скважины газа на температуру струи.

### 1. Постановка задачи и основные уравнения

Пусть на дне водоема из скважины с радиусом  $r$  с известной начальной температурой  $T^e$  и объемными расходами  $Q_0^e$  и  $Q_g^e$  вытекает смесь нефти и газа. Также известны

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-01-97032 p\_поволжье\_a).

характеристики окружающей среды — температура  $T_w$  и скорость движения воды  $\vec{V}_w$ . Примем, что газ распространяется в виде пузырьков, а сами пузырьки газа занимают центральное положение в ядре струи. При распространении струи из-за поперечного течения окружающей среды траектория струи может искривляться, из-за чего пузырьки газа могут покинуть струю. Положим, что распространение струи происходит в условиях стабильного существования гидрата. Т.е. температура и давление, при которых распространяется струя, таковы, что газовые пузырьки при контакте с водой образуют газовый гидрат.

Рассмотрим динамику многофазной затопленной струи. В основе математической модели лежит интегральный лагранжев метод контрольного объема (ИЛМКО), предложенный в работах [4, 5]. Согласно этому методу принято, что струя (рис. 1а) состоит из последовательных элементов — цилиндров, характеризующихся высотой  $h$ , радиусом  $b$  и пространственными координатами  $(x, y, z)$ , начало которых соответствует центру осевого сечения цилиндра, в дальнейшем называемого центром цилиндра (рис. 1б). Каждый элемент — контрольный объем (КО) — характеризуется своим расположением в пространстве, средней скоростью, температурой, плотностью и концентрацией веществ, входящих в состав струи. Турбулентное вовлечение окружающей жидкости в КО вычисляется на каждом шаге по времени. Задача состоит в том, чтобы определить все характеристики КО с течением времени. Полагая, что координаты центра КО являются геометрическим местом траектории центра струи, а осевая линия струи совпадает с траекторией движения КО, можно рассчитать параметры струи в целом.

Высота КО изменяется и вычисляется согласно формуле

$$h = |\vec{V}| \cdot \Delta t,$$

где  $V$  — скорость КО,  $\Delta t$  — шаг по времени.

Начальные характеристики КО определяются согласно параметрам объемного расхода нефти  $Q_o^e$  и газа  $Q_g^e$  и радиуса скважины  $r$ . Начальные значения радиуса  $b$  и высоты  $h$  полагаются равными  $r$ , шаг по времени составляет  $\Delta t = 0,1 \cdot b / |V|$  [4], масса КО  $M = \pi b^2 h \rho$ , где  $\rho$  — плотность КО. На рис. 1 представлена ориентация КО в трехмерной системе координат, здесь угол  $\varphi$  — угол между вектором скорости КО  $\vec{V}$  и плоскостью  $xOy$ , угол  $\theta$  — угол между проекцией вектора скорости  $\vec{V}$  на плоскость  $xOy$  и осью  $Ox$ .

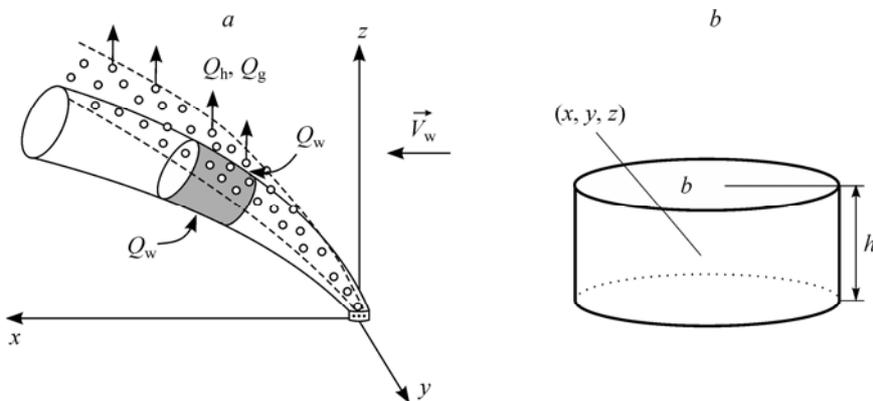


Рис. 1. Схема затопленной струи (а), контрольного объема (б).

Запишем уравнения сохранения масс для компонент в КО:

$$\frac{dM_i}{dt} = m_i, \quad m_i = \begin{cases} 0, & i = o, \\ -J_g - \rho_g Q_g^f, & i = g, \\ J_h - \rho_h Q_h^f, & i = h, \\ \rho_w Q_w - J_w, & i = w, \end{cases} \quad (1)$$

где  $M_i$  и  $\rho_i$  ( $i = o, g, h, w$ ) — масса и плотность соответствующих компонент в КО,  $m_i$  — коэффициент изменения массы компонента струи,  $Q_w$  — объемный расход вовлеченной в струю окружающей воды,  $Q_g^f, Q_h^f$  — объемный расход газа и гидрата, «покидающий» КО в связи с искривлением струи,  $J_w, J_g$  — интенсивности расхода воды и газа при образовании гидрата,  $J_h$  — интенсивность образования газогидрата. Здесь и далее нижние индексы  $o, g, h, w$  относятся соответственно к параметрам нефти, газа, гидрата и воды.

Интенсивности расходов газа, воды и гидрата связаны следующими соотношениями:

$$J_g = G \cdot J_h, \quad J_w = (1 - G) J_h, \quad J_h = N 4 \pi a_{gh}^2 j_h, \quad (2)$$

где  $G$  — гидратное число,  $N$  — количество пузырьков в КО,  $a_{gh}$  — радиус композитных пузырьков, состоящих из газового ядра и гидратной оболочки,  $j_h$  — интенсивность образования гидрата, отнесенная к площади поверхности пузырька.

Выражение для массы КО с учетом уравнений (1) и (2) примет вид:

$$\frac{dM}{dt} = \sum \frac{dM_i}{dt} = \rho_w Q_w - \rho_{com} Q^f, \quad \rho = \sum_i \alpha_i \rho_i, \quad \sum_i \alpha_i = 1, \quad (3)$$

здесь  $M$  — масса КО,  $Q^f = Q_g^f + Q_h^f$  — объемный поток газа и гидрата, «покидающий» КО в связи с искривлением струи,  $\alpha_i$  ( $i = o, g, h, w$ ) — объемные содержания соответствующих компонент в КО,  $\rho_{com}$  — плотность композитного пузырька с гидратной оболочкой. Пузырек может быть газовым, композитным, состоящим из газового ядра и гидратной оболочки или полностью гидратным.

Объемные содержания нефти, газа, гидрата и воды в КО определяются следующим образом:

$$\alpha_o = V_{ko}/V_k, \quad \alpha_g = V_{kg}/V_k, \quad \alpha_h = V_{kh}/V_k, \quad \alpha_w = V_{kw}/V_k,$$

где  $V_k$  — объем КО,  $V_{ki}$  ( $i = o, g, h, w$ ) — объем  $i$ -го компонента.

Объемный расход композитных пузырьков, покидающий КО в связи с искривлением струи [6]:

$$Q^f = J^f \frac{4}{3} \pi a_{gh}^3,$$

где  $J^f$  — поток пузырьков, покидающих КО.

Количество пузырьков  $N$ , находящихся в КО в начальный момент времени, определяется следующим образом:

$$N_0 = \frac{J_0 h}{w + w_b}, \quad J_0 = \frac{Q_g^e}{4/3 (\pi a_g^3)},$$

где  $w$  — вертикальная составляющая скорости КО,  $w_b$  — скорость относительного движения пузырьков,  $a_g$  — радиус газовых пузырьков,  $J_0$  — интенсивность (расход) газа,

поступающего из скважины. Изменение количества пузырьков внутри КО определяется как

$$dN/dt = -J^f.$$

Уравнения сохранения импульсов для КО имеют вид:

$$\frac{d(M\vec{V})}{dt} = \vec{V}_w \rho_w Q_w + m \frac{\Delta\rho}{\rho} g \vec{k} - \vec{V} \rho_{\text{com}} Q^f - \rho 2\pi b h C_D^b \left( \|\vec{V}\| - V_w' \right)^2 \frac{\vec{V}}{\|\vec{V}\|}, \quad (4)$$

здесь  $\vec{V} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}$  — скорость контрольного объема,  $\vec{V}_w$  — средняя скорость поперечного течения воды, окружающей КО,  $V_w'$  — проекция  $\vec{V}_w$  на направление  $\vec{V}$ ,  $\Delta\rho = \rho_w - \rho$  — разность плотности окружающей жидкости и КО,  $g$  — модуль ускорения силы тяжести,  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$  — единичные вектора по координатным осям  $x, y, z$ . Первое слагаемое в (4) соответствует изменению момента, связанного с вовлечением в КО окружающей воды, второе — подъемная сила, третье — изменение момента, связанное с уходом пузырьков из струи, четвертое — сила сопротивления при боковом обтекании. При расчетах полагаем, что  $C_D^b = 0$ .

Координаты КО определяются выражениями

$$dz/dt = w, \quad dx/dt = u, \quad dy/dt = v. \quad (5)$$

Уравнение сохранения энергии КО имеет вид:

$$\frac{d}{dt}(cMT) = c_w T_w \rho_w Q_w + J_h L - J_w c_w T_{hs}, \quad c = \sum \chi_i c_i, \quad (6)$$

где  $c, c_w, T, T_w$  — теплоемкость и температура КО и воды,  $L$  — теплота фазовых переходов,  $c_i, \chi_i = M_i/M$  ( $i = o, g, h, w$ ) — теплоемкость и массовое содержание нефти, газа, гидрата и воды в КО.

Будем полагать, что объемный расход вовлеченной окружающей жидкости в КО определяется согласно [4] как

$$Q_w = 2\pi b h \alpha \left\| \vec{V} \right\| - V_w',$$

где  $V_w'$  — проекция скорости течения воды  $\vec{V}_w$  на направление  $\vec{V}$ .

Коэффициент вовлечения окружающей воды [4, 7] запишется в виде

$$\alpha = \sqrt{2} \left( 0,057 + \frac{0,554 \sin \varphi}{E^2 \text{Fr}^2} \right) \left( 1 + 5 \frac{V_w'}{\left\| \vec{V} \right\| - V_w'} \right)^{-1},$$

где  $E = 2$  — эмпирический параметр,  $\text{Fr}$  — число Фруда, определяющееся следующим образом [4]:

$$\text{Fr} = \left\| \vec{V} \right\| - V_w' \cdot \left( g \frac{\rho_w - \rho}{\rho_w} b \right)^{-1/2}.$$

## 2. Миграция пузырька и процесс гидратообразования

Скорость пузырька, который может быть газовым, композитным, состоящим из газового ядра и гидратной оболочки или полностью гидратным, будем вычислять следующим образом:

$$\vec{V}_g = a_1 \vec{V} + a_2 \vec{V}_w + w_b \vec{k},$$

здесь  $a_1 = 1$  и  $a_2 = 0$  для случая, когда пузырек находится внутри КО,  $a_1 = 0$  и  $a_2 = 1$ , когда пузырек находится в окружающей воде. Изменение радиуса и скорости миграции композитного пузырька определим согласно результатам [8].

В случае, когда термодинамические условия, в которых распространяется струя, соответствуют условиям стабильного существования гидрата, на поверхности газовых пузырьков может образовываться газовый гидрат: вследствие вовлечения окружающей воды в струю газ будет контактировать с водой и газовые пузырьки будут покрываться гидратной оболочкой [9, 10]. Для описания гидратообразования примем две предельные схемы, приведенные в работах [8, 11]. Согласно первой схеме гидратообразования, лимитируемого теплообменом с окружающей средой, будем полагать, что газогидратная оболочка является достаточно рыхлой и диффузионного сопротивления на процессы переноса не осуществляется. Следовательно, интенсивность образования гидрата определяется скоростью движения окружающей пузырек воды, отводящей тепло, выделяющееся в результате гидратообразования. Согласно второй схеме гидратообразования, лимитируемого диффузией, будем полагать, что интенсивность гидратообразования лимитируется диффузией газа через гидратную оболочку. В соответствии с первой схемой гидратообразования, пренебрегая затратами тепла на изменение температуры всего композитного пузырька, можем записать следующее условие баланса тепла [8]:

$$j_h = \frac{q_{1s}}{L}, \quad q_{1s} = \beta_h (T_{hs} - T), \quad \beta_h = \frac{\lambda_w \text{Nu}_h}{2a_{gh}}, \quad (7)$$

где  $q_{1s}$  — тепловой поток от поверхности композитного пузырька в жидкость, равный количеству тепла при гидратообразовании на поверхности пузырька,  $T_{hs}$  — температура на поверхности композитного пузырька, соответствующая равновесной температуре гидратообразования,  $\lambda_w$  — коэффициент теплопроводности для воды,  $\text{Nu}_h = 2 + 0,46 \text{Re}_h^{0,55} \text{Pr}_h^{0,3}$ ,  $\text{Pr}_h = \mu_w c_w / \lambda_w$ ,  $\text{Re}_h = 2R\rho_w / \mu_w$  — приведенные числа Нуссельта, Прандтля и Рейнольдса,  $\mu_w$  — динамическая вязкость воды.

Рассмотрим в соответствии со второй схемой гидратообразования [8, 11] диффузию метана к внешней поверхности композитного пузырька и положим, что на этой границе газ мгновенно переходит в состав гидратной оболочки. Интенсивность образования гидрата согласно результатам [8] примет вид

$$j_h = \frac{D^* \rho_g}{G(1/a_g - 1/a_{gh})a_{gh}^2}. \quad (8)$$

где  $D^* = D_g \rho_{g1} / \rho_g$  — приведенный коэффициент диффузии. В работе [8] было получено значение приведенного коэффициента диффузии  $D^*$  путем сравнения с экспериментальными данными работы [9]. При дальнейших расчетах будем использовать значение  $D^* = 10^{10} \text{ м}^2/\text{с}$ .

### 3. Начальные условия и допущения

Будем полагать, что движение струи происходит только в плоскости  $xOz$ , а течение окружающей воды действует только в направлении  $x$ . Таким образом,  $w_w = 0$ ,  $v_w = 0$ .

Запишем начальные условия.

1. Полагаем, что в начальный момент времени радиус и высота КО равны радиусу сопла  $r$ , из которого вытекают газ и нефть:

$$h_0 = r, \quad b_0 = r, \quad V_k^0 = \pi r^3.$$

2. В начальный момент времени плотность в КО определяется в виде

$$\rho^0 = \alpha_o^0 \rho_o + \alpha_g^0 \rho_g,$$

где  $\alpha_i^0$ ,  $\rho_i$  ( $i = o, g$ ) — объемные содержания и плотности газа и нефти, поступающих из скважины.

3. Объемные содержания нефти, газа, гидрата и воды в КО в начальный момент времени составляют

$$\alpha_o^0 = V_{ko}^0 / V_k, \quad \alpha_g^0 = V_{kg}^0 / V_k, \quad \alpha_h^0 = 0, \quad \alpha_w^0 = 0,$$

где  $V_{ko}^0$ ,  $V_{kg}^0$  — соответственно объемы нефти и газа в КО в начальный момент времени.

4. Начальные значения массы газа и нефти, поступающих из скважины, определяются следующим образом:

$$M_o^0 = V_{ko}^0 \rho_o, \quad M_g^0 = V_{kg}^0 \rho_g.$$

### 4. Результаты расчетов

Рассмотрим ситуацию, когда на дне океана происходит непрерывный выброс нефти и газа, и условия таковы, что газ при контакте с водой может образовывать газовый гидрат. На рис. 2 приведена траектория струи для случая образования гидрата. Вследствие вовлечения окружающей воды в струю происходит расширение последней. Высота, на которой начальный импульс струи затухает, определяется согласно выражению

$$z_s = M_o^{3/4} / F_o^{1/2}, \quad M_o = Q_o^e \cdot w_o, \quad F_o = Q_o^e \cdot (g \Delta \rho / \rho_w),$$

где  $M_o$  — поток импульса на устье скважины,  $F_o$  — удельный поток плавучести.

На рис. 3 представлена зависимость температуры струи от вертикальной координаты для двух предельных схем гидратообразования. Температура струи убывает в связи с вовлечением холодной

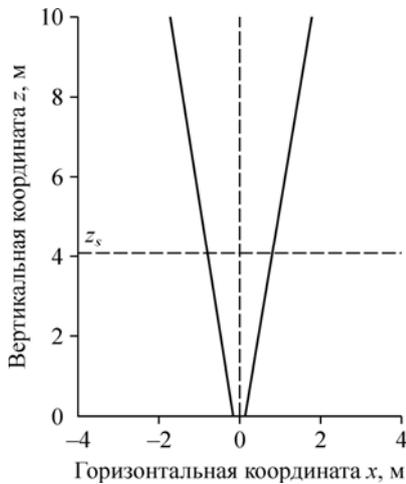


Рис. 2. Траектория струи.

$z_s = 4,03$  м; здесь и далее расчеты приведены для начальных параметров системы:  $r = 0,1$  м,  $Q_o^e = 0,3$  м<sup>3</sup>/с,  $Q_g^e = 0,7$  м<sup>3</sup>/с,

$$T_w = 4 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad T^e = 80 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad p = 15 \text{ МПа}, \quad \rho_w = 1030 \text{ кг/м}^3,$$

$$\rho_o = 650 \text{ кг/м}^3, \quad \rho_g = 99,4 \text{ кг/м}^3, \quad \rho_h = 910 \text{ кг/м}^3, \quad \varphi = 90^\circ, \quad \theta = 0^\circ,$$

$$V_w = 0 \text{ м/с}, \quad c_o = 2090 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}, \quad c_g = 2365 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)},$$

$$c_h = 2100 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}, \quad c_w = 4200 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}, \quad \lambda_w = 0,58 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)},$$

$$\mu_w = 1,57 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}, \quad L = 5 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}, \quad G = 0,12,$$

$$D^* = 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}, \quad g = 9,8 \text{ м/с}^2.$$

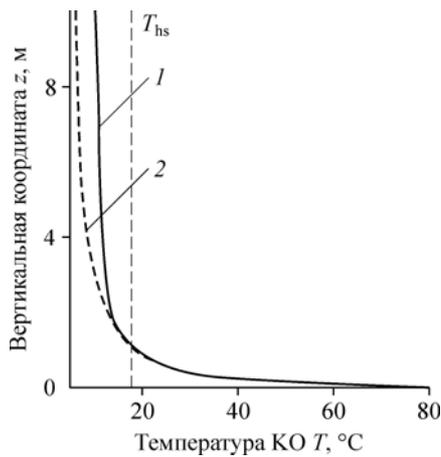


Рис. 3. Зависимость температуры КО от вертикальной координаты в случае, когда гидратообразование лимитируется теплообменом (1) и диффузией (2).

Вертикальная линия соответствует равновесной температуре гидратообразования.

лимитируется теплообменом с окружающей средой (первая схема гидратообразования), темп уменьшения температуры струи замедляется, что связано с интенсивным гидратообразованием. В случае, когда образование гидратной оболочки на поверхности пузырьков лимитируется диффузией газа через гидратную оболочку (вторая схема гидратообразования), струя охлаждается сильнее.

На рис. 4 представлена зависимость температуры  $\Delta T$  от различных значений объемного содержания газа в струе. Температура  $\Delta T$  определяется как разница между температурами струи, рассчитанными согласно двум предельным режимам гидратообразования:

$$\Delta T = |T_1 - T_2|,$$

где  $T_1$  — температура струи, когда гидратообразование лимитируется теплообменом с окружающей средой,  $T_2$  — температура струи, когда гидратообразование лимитируется диффузией газа через гидратную оболочку. Из рис. 4 видно, что при увеличении объемного содержания газа разница температур возрастает. Это связано с интенсивным образованием гидрата на поверхности пузырьков.

На рис. 5 представлена зависимость скорости КО от вертикальной координаты  $z$ . Скорость КО с увеличением координаты уменьшается в связи с захватом окружающей воды и, как следствие, утяжелением струи.

На рис. 6 представлена зависимость плотности КО от вертикальной координаты  $z$ . Линия 1 соответствует процессу гидратообразования, лимитируемого процессом теплообмена с окружающей средой, линия 2 — диффузионному переносу газа через гидратную оболочку. Из графика видно, что плотность КО приближается к плотности окружающей воды. В случае, когда гидратообразование лимитируется теплообменом с окружающей средой, плотность КО повышается, это связано с тем, что газовые пузырьки интенсивнее покрываются гидратной оболочкой и их плотность выше. Значение плотности КО на высоте  $z = 10$  м для случая, когда гидратообразование лимитируется процессом теплообмена с окружающей средой, составляет  $\rho = 1010,9 \text{ кг/м}^3$ , а в случае диффузионного переноса газа через гидратную оболочку —  $\rho = 999,1 \text{ кг/м}^3$ .

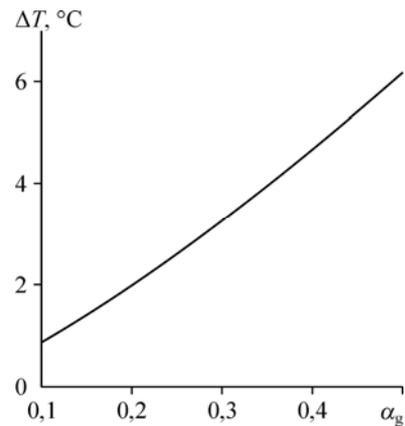


Рис. 4. Зависимость  $\Delta T$  от объемного содержания газа.

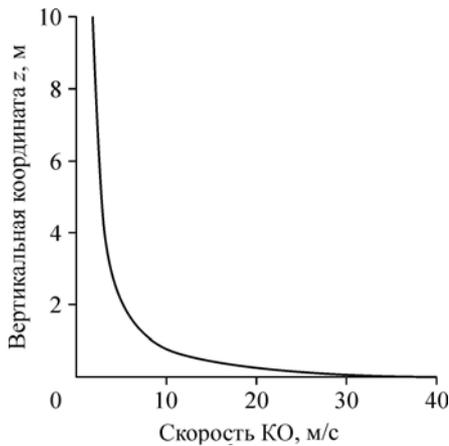


Рис. 5. Зависимость скорости КО от вертикальной координаты  $z$ .

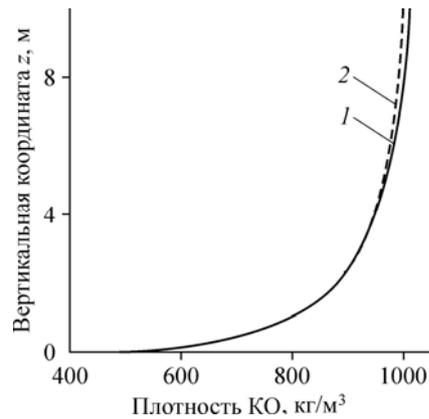


Рис. 6. Зависимость плотности КО от вертикальной координаты  $z$ .

На рис. 7 представлена зависимость объемных содержаний компонентов струи от вертикальной координаты  $z$ . Объемные содержания нефти и газа уменьшаются, а воды — увеличивается в связи с вовлечением окружающей воды в струю. В случае, когда гидратообразование лимитируется диффузионным переносом газа через гидратную оболочку (рис. 7а), объемное содержание гидрата увеличивается постепенно, а в случае, когда гидратообразование лимитируется теплообменом с окружающей средой (рис. 7б), объемное содержание гидрата увеличивается интенсивнее, при этом объемное содержание газа уменьшается быстрее, что связано с интенсивным потреблением газа, необходимого для процесса гидратообразования.

На рис. 8 представлено изменение массы газа (рис. 8а) и гидрата (рис. 8б) в зависимости от вертикальной координаты  $z$  для различных начальных объемных расходов газа. В рассмотренном случае образование гидратной оболочки на поверхности пузырька лимитируется теплоотводом. Чем больше начальный объемный расход поступающего из скважины газа, тем дольше протекает процесс гидратообразования. Гидратообразование продолжается до тех пор, пока весь газ в пузырьках не перейдет в гидратное состояние.

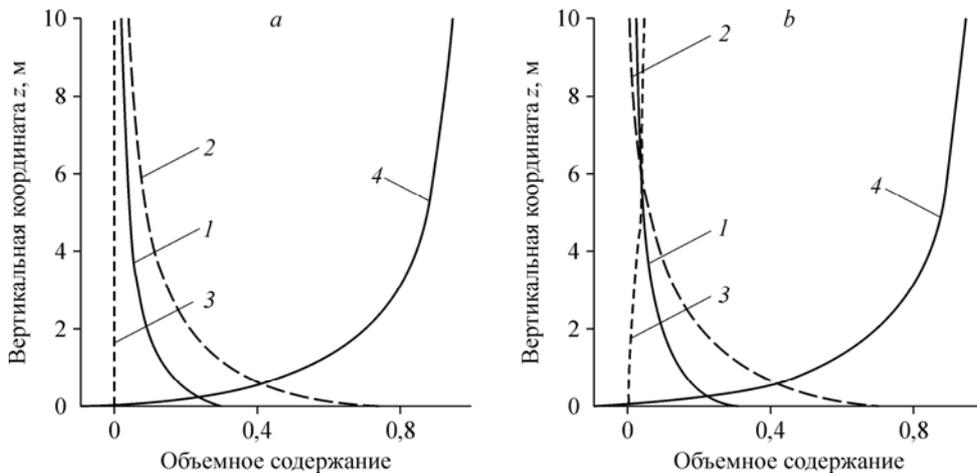


Рис. 7. Зависимость объемных содержаний компонентов струи от вертикальной координаты  $z$  в случае, когда гидратообразование лимитируется диффузией (а) и теплоотводом (б).

1 — нефть, 2 — газ, 3 — гидрат, 4 — вода.

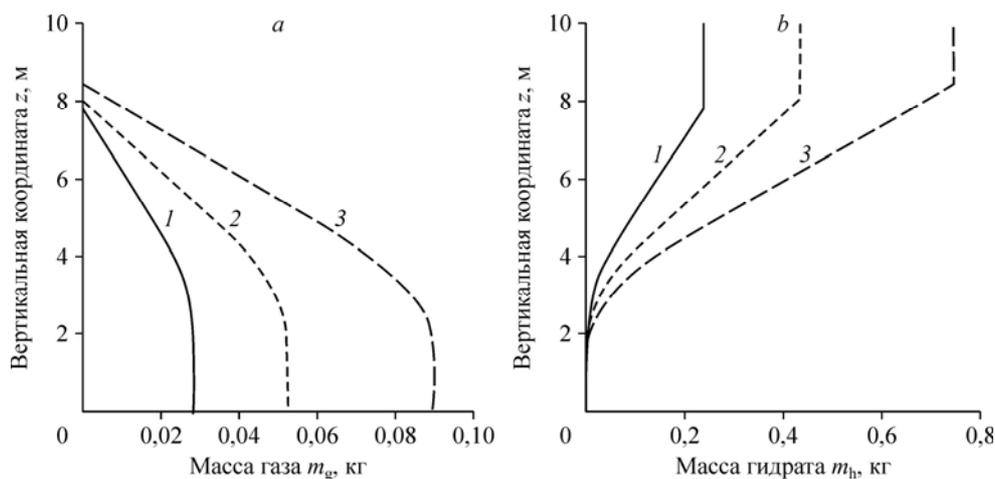


Рис. 8. Зависимость массы газа (а) и гидрата (б) в КО от вертикальной координаты  $z$ .

$$Q_0^e = 0,5 \text{ м}^3/\text{с}; \quad Q_g^e = 0,05 \text{ (1)}, \quad Q_g^e = 0,1 \text{ (2)}, \quad Q_g^e = 0,2 \text{ (3)} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Стационарные режимы, когда массы газа и гидрата не изменяются, соответствуют моментам, когда процесс гидратообразования завершен и газовые пузырьки полностью превратились в гидратные.

### Заключение

Развит интегральный лагранжев метод контрольного объема для исследования многофазных затопленных струй с учетом двух предельных схем гидратообразования. Согласно первой схеме, скорость образования гидрата на поверхности пузырьков лимитируется интенсивностью отвода тепла, выделяющегося в процессе гидратообразования, а в соответствии со второй схемой интенсивность гидратообразования лимитируется диффузией газа через гидратную оболочку. Анализ результатов численного моделирования для многофазных затопленных струй показал следующее. В случае формирования гидратных оболочек на газовых пузырьках, лимитируемых процессом теплообмена с окружающей средой, темпы уменьшения температуры струи замедляются, что связано с интенсивным выделением тепла при образовании гидрата. При увеличении начального объемного содержания газа в смеси нефти с газом до 0,5 при остальных одинаковых параметрах системы разница температур струи для двух предельных схем гидратообразования может достигать 6 °С.

### Список литературы

1. Гималтдинов И.К., Кильдибаева С.Р. К теории начального этапа накопления нефти в куполе-сепараторе // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22, № 3. С. 401–406.
2. Гималтдинов И.К., Кильдибаева С.Р. К теории накопления углеводородов в куполе, применяемом при ликвидации техногенного разлива на дне океана // Инж.-физический журнал. 2018, Т. 91, № 1. С. 260–265.
3. Кильдибаева С.Р., Гималтдинов И.К. Динамика многофазной затопленной струи с учетом образования гидратов // Вест. ТюмГУ. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2016. Т. 1, № 3 (3). С. 92–101.
4. Yapa P.D., Zheng L. Simulation of oil spills from underwater accidents I: model development // J. Hydraulic Research. 1997. Vol. 35. No. 5. P. 673–688.
5. Yapa P.D., Dasanayaka L.K., Bandara U.C., Nakata K. A model (MEGADEEP) to simulate the transport and fate of gas and hydrates released in deepwater // J. Hydraulic Research. 2010. Vol. 48, No. 5. P. 559–572.
6. Кильдибаева С.Р. Температурные режимы многофазной струи и накопления углеводородов в куполе с учетом гидратообразования: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.02.05. Башкир. Гос. Университет, Уфа, 2016. 19 с.

7. **Бондур В.Г., Журбас В.М., Гребенюк Ю.В.** Моделирование и экспериментальные исследования распространения турбулентных струй в стратифицированной среде прибрежных акваторий // *Океанология*. 2009. Т. 49, № 5. С. 645–657.
8. **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.
9. **Rehder G., Brewer P.W., Peltzer E.T., Friederich G.** Enhanced lifetime of methane bubble streams within the deep ocean // *Geophysical Research Letters*. 2002. Vol. 29, No. 15. P. 21–24.
10. **Sloan E. D.** Clathrate hydrates of natural gases. 2d ed. // N.Y.: Marcel Dekker, Inc., 1997. 750 p.
11. **Шагапов В.Ш., Чиглинцева А.С., Русинов А.А.** О Механизмах роста гидратной оболочки на поверхности всплывающих газовых пузырьков // *Вест. ТГУ. Математика и механика*. 2015. № 3. С. 73–86.

*Статья поступила в редакцию 22 сентября 2016 г.,  
после доработки — 25 апреля 2017 г.*