

УДК 532.546:536.421

## ЭВОЛЮЦИЯ НЕФТЕГАЗОВОЙ СТРУИ, ИСТЕКАЮЩЕЙ ЧЕРЕЗ РАЗРЫВ МАГИСТРАЛЬНОГО НЕФТЕПРОВОДА (ГАЗОПРОВОДА), РАСПОЛОЖЕННОГО НА ДНЕ ВОДОЕМА

Кильдибаева Светлана Рустамовна<sup>1</sup>,  
freya.13@mail.ru

Гималтдинов Ильяс Кадинович<sup>2,3</sup>,  
iljas\_g@mail.ru

<sup>1</sup> Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета,  
Россия, 453103, г. Стерлитамак, пр. Ленина, 49.

<sup>2</sup> Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Россия, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

<sup>3</sup> Академия наук Республики Башкортостан,  
Россия, 450008, г. Уфа, ул. Кирова, 15.

**Актуальность** исследования связана с растущим интересом к добыче углеводородов на дне Мирового океана. При этом многократно увеличивается опасность аварийного разлива нефтепродуктов в воду. Разливы нефти на платформах Ixtoc-1 и Deepwater Horizon в Мексиканском заливе продемонстрировали неготовность современных методов к быстрой ликвидации аварийных утечек. В связи с этим существует необходимость в исследовании затопленных струй, состоящих из смеси углеводородов (нефти и газа). Кроме этого, при глубоководных разливах многофазной смеси нефти и попутных газов могут образовываться кристаллогидраты, которые могут влиять на динамику распространения этих выбросов. Поэтому изучение динамики распространения струи с учетом гидратообразования позволит сократить время ликвидации возможных утечек. В данной работе рассматривается математическая модель формирования затопленной многофазной струи с учетом гидратообразования при различных начальных условиях.

**Цель:** исследовать формирование затопленной струи в зависимости от начальных условий.

**Объекты:** многофазная струя углеводородов; компоненты струи: нефть, газ, вода; композитные пузырьки, покрытые гидратной оболочкой; характер распространения струйного течения, процесс гидратообразования.

**Методы.** Для описания процесса распространения затопленной струи используется интегральный Лагранжевый метод контрольного объема, согласно которому струя представляется в виде последовательности элементарных объемов, каждый из которых характеризуется линейными размерами и теплофизическими характеристиками. Распространение затопленной струи рассматривается для глубоководных разливов на дне океана, что соответствует случаю, когда на поверхности пузырьки начинают образовываться гидратные оболочки и газовый пузырек превращается в гидратный. Для описания процесса гидратообразования в работе принята предельная схема, согласно которой гидратообразование лимитируется диффузией газа через гидратную оболочку.

**Результаты.** Дополнена математическая модель течения многофазной затопленной струи с учетом образования гидрата на поверхности пузырьков. Получены зависимости теплофизических характеристик затопленной струи от вертикальной координаты, траектория распространения струи. Для пузырьков метана, которые покрываются гидратной оболочкой, применено уравнение состояния для реальных газов. В результате расчетов получены зависимости радиусов газовой и гидратной составляющих композитного пузырька и его плотности от вертикальной координаты. Установлено, что радиус гидратной составляющей пузырька убывает для случая, когда поведение газа описывается уравнением состояния для идеального газа, и растет для случая применения уравнения состояния для реального газа.

### Ключевые слова:

Затопленная струя, многофазная струя, гидрат, метан, нефть, разлив углеводородов, нефть, метод контрольного объема, уравнение состояния газа.

### Введение

В связи с уменьшением объемов добычи углеводородов, разработка которых может производиться традиционным образом, увеличивается интерес исследователей к новым способам добычи, разведки и оценки запасов природных ресурсов [1, 2]. Интенсивная разработка нефтяных и газовых месторождений на шельфе может приводить к экологическим катастрофам. Нефтяные разливы в Мексиканском заливе на нефтедобывающих платформах Ixtoc-1 и Deepwater Horizon относят к наиболее крупным разливам нефти за всю историю [3, 4]. Такого рода разливы представляют серьезную проблему в связи с увеличением объемов добычи нефти из недр Мирового океана,

а также отсутствием быстрого и качественного способа устранения утечки. Помимо разработки способа локализации разлива нефти также немаловажную роль играет исследование особенностей распространения углеводородов, течение которых происходит в виде затопленной струи [5–11]. При совместном течении нефти и газа из скважины будем говорить о многофазных затопленных струях, а в случае, когда из источника поступают только нефть или газ, – об однофазных затопленных струях.

Если затопленная струя, содержащая газ, распространяется при высоких давлениях и низких температурах, то на поверхности пузырьков газа могут образовываться гидратные оболочки. Таким образом,

вследствие процесса гидратообразования пузырек может быть газовым, композитным (газовое ядро и гидратная оболочка) или полностью гидратным. При получении исчерпывающих сведений относительно распространения затопленных струй можно сократить время и увеличить качество устранения разлива. Одним из наиболее перспективных способов устранения утечки является установка купола, предназначенного для сбора и накопления углеводородов с целью их дальнейшего промышленного использования [12, 13].

В работе рассмотрим струйные течения, распространение которых происходит в условиях стабильного существования гидрата. По всей глубине распространения струи термобарические условия окружающей среды соответствуют условиям гидратообразования, но не разложения уже образованного гидрата.

#### Постановка задачи

Для моделирования течения струи используем интегральный Лагранжевый метод контрольного объема. Согласно этому методу струя представляется в виде последовательности цилиндрически контрольных объемов (КО). На рис. 1 приведена схема затопленной многофазной струи. Каждый контрольный объем характеризуется следующими теплофизическими параметрами струи: температурой, плотностью, скоростью, координатами и т. д. Пусть на дне водоема существует некоторый источник радиуса  $r_0$ , из которого вытекает смесь нефти и газа. В качестве начальных условий известны: начальная температура истечения нефти и газа, а также их объемные расходы ( $Q_o^e$  и  $Q_g^e$ ). Также известны характеристики окружающей среды: температура  $T_w$  и скорость окружающей воды  $\vec{V}_w$ .

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.

Для описания процесса распространения затопленной струи используем уравнения сохранения масс, энергии и импульсов:

$$\frac{dM}{dt} = \rho_w Q_w - \rho_{gh} Q^f, \quad \rho = \sum_i \alpha_i \rho_i, \quad \sum_i \alpha_i = 1, \quad \alpha_i = V_{ki}/V_k, \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt}(cMT) = c_w T_w \rho_w Q_w + J_h L - J_w c_w T_{hs}, \quad c = \sum_i \chi_i c_i, \quad \chi_i = M_i/M, \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt}(Mu) = u_w \rho_w Q_w - u \rho_{gh} Q^f,$$

$$\frac{d}{dt}(Mv) = v_w \rho_w Q_w - v \rho_{gh} Q^f,$$

$$\frac{d}{dt}[(M_w + M_o)w + (M_g + M_h) \cdot (w + w_b)] = w_w \rho_w Q_w - (w + w_b) \rho_{gh} Q^f + (\rho_w - \rho_l) \pi b^2 h (\alpha_w + \alpha_o) g + (\rho_w - \rho_{gh}) \pi b^2 h (\alpha_g + \alpha_h) g, \quad (3)$$

где нижний индекс  $i$  относится к соответствующей компоненте в КО ( $o$  – нефть,  $g$  – газ,  $h$  – гидрат,  $w$  – вода);  $\alpha_i$  – объемные содержания;  $V_{ki}$  – объем,  $m^3$ ;  $c_i$  –

теплоемкость, Дж/(кг К);  $\rho_i$  – плотность,  $кг/м^3$ ,  $J_i$  – интенсивности расхода компоненты при образовании гидрата,  $кг/с$ ;  $Q_w$  – объемный расход воды, которая поступает в струю,  $м^3/с$ ;  $Q^f$  – объемный поток пузырьков, который «покидает» КО,  $м^3/с$ ;  $V_k$ ,  $M$ ,  $N$  – объем, масса и количество пузырьков в КО;  $r_{gh}$  – радиус композитного пузырька,  $м$ ;  $\rho_{gh}$  – плотность композитного пузырька,  $кг/м^3$ ;  $\rho_l$  – плотность жидкой составляющей в КО,  $кг/м^3$ ;  $L$  – теплота фазовых переходов, Дж/кг;  $g$  – ускорение силы тяжести,  $м^2/с$ ;  $u$ ,  $v$ ,  $w$  – компоненты скорости КО  $\vec{V}$ ;  $u_w$ ,  $v_w$ ,  $w_w$  – компоненты скорости течения воды, окружающей КО  $\vec{V}_w$ ,  $м/с$ .

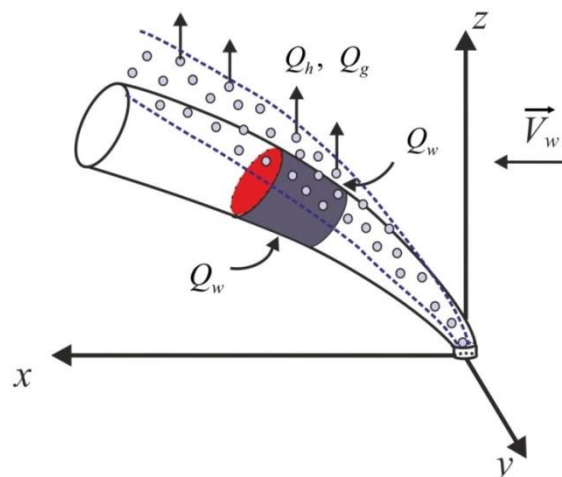


Рис. 1. Схема затопленной многофазной струи  
 Fig. 1. Diagram of the multiphase submerged jet

Дополним полученную систему следующими соотношениями:

$$\frac{dz}{dt} = w, \quad \frac{dx}{dt} = u, \quad \frac{dy}{dt} = v, \quad (4)$$

$$Q^f = I^f \frac{4}{3} \pi r_{gh}^3, \quad Q_w = 2\pi b h A \left| |\vec{V}| - V_w' \right|,$$

$$J_g = G \cdot J_h, \quad J_w = (1 - G) J_h, \quad J_h = N 4 \pi r_{gh}^2 j_h, \quad (5)$$

где  $I^f$  – поток пузырьков, покидающих КО,  $с^{-1}$ ;  $V_w'$  – проекция скорости течения воды  $\vec{V}_w$  на направление  $\vec{V}$ ,  $м/с$ ;  $A$  – коэффициент вовлечения окружающей воды;  $j_h$  – интенсивность образования гидрата, отнесенная к площади поверхности пузырька,  $кг/(м^2 \cdot с)$ .

Уравнения (1)–(5) используются для расчета теплофизических параметров КО.

#### Уравнения, описывающие миграцию пузырька

Приведем систему уравнений, описывающих поднятие газового пузырька, с учётом гидратообразования [14]. Скорость пузырька определим следующим образом:

$$\vec{V}_g = K_1 \vec{V} + K_2 \vec{V}_w + w_b \vec{k},$$

здесь  $K_1=1$  и  $K_2=0$  для случая, когда пузырек находится внутри КО, и значения  $K_1=0$  и  $K_2=1$ , когда пузырек находится вне КО. На рис. 2 схематично показан композитный пузырек. Вначале пузырек газовый, затем начинается образование гидратной оболочки

(внутри – газовое ядро), в завершении гидратообразования пузырьки полностью гидратный.

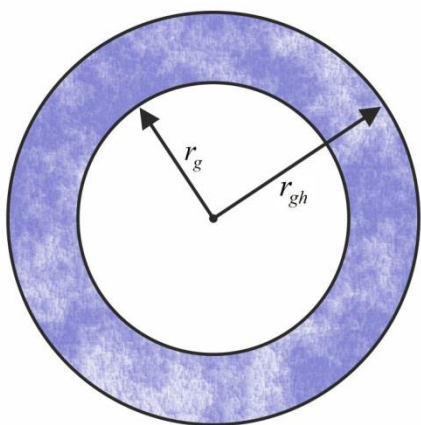
Запишем уравнения сохранения массы для композитного пузырька [14, 15]:

$$\frac{dm_{gh}}{dt} = 4\pi r_{gh}^2 j_w, \quad m_{gh} = m_g + m_h, \quad (6)$$

где  $m_g = \frac{4}{3}\pi r_g^3 \rho_g$  и  $m_h = \frac{4}{3}\pi (r_{gh}^3 - r_g^3) \rho_h$  – масса газа и гидрата в композитном пузырьке. Интенсивность потребления воды  $j_w$  определяется следующим образом, согласно [14]:

$$j_w = \frac{(1-G) D^* \rho_g}{G(1/r_g - 1/r_{gh}) r_{gh}^2},$$

где  $D^* = D_g \rho_g / \rho_g$  – приведенный коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с. В работе [16] получено значение  $D^*$  с учетом экспериментальных данных из работы [17].



**Рис. 2.** Композитный пузырек:  $r_{gh}$  – радиус композитного пузырька,  $r_g$  – радиус его газовой составляющей

**Fig. 2.** Composite bubble:  $r_{gh}$  – radius of the composite bubble,  $r_g$  – radius of its gas component

Общая масса газа в композитном пузырьке:

$$m_g + m_h G = m_{g0}, \quad m_{g0} = \frac{4}{3}\pi r_{g0}^3 \rho_{g0}, \quad (7)$$

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

Согласно (6) и (7) радиусы газового ядра и композитного пузырька:

$$r_g^3 = \frac{(r_{g0}^3 \rho_{g0} - r_{gh}^3 \rho_h G)}{(\rho_g - \rho_h G)}, \quad \frac{dr_{gh}}{dt} = \frac{j_w}{(1-G)} \left( \frac{1}{\rho_h} - \frac{G}{\rho_{g0}} \right).$$

Давление в толще воды определим следующим образом:

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

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

Уравнение импульсов для композитного пузырька [14]:

$$\frac{d(w_b (m_{gh} + \mu_{gh}))}{dt} = f_A - f_T - f_C, \quad (8)$$

где  $m_{gh}$  и  $\mu_{gh}$  – масса пузырька и его присоединенная масса;  $f_A$ ,  $f_T$  и  $f_C$  – силы Архимеда, тяжести и сопротивления:

$$m_{gh} = \frac{4}{3}\pi (r_{gh}^3 - r_g^3) \rho_h + \frac{4}{3}\pi r_g^3 \rho_g, \quad \mu_{gh} = \frac{2}{3}\pi r_{gh}^3 \rho_w,$$

$$f_A = \frac{4}{3}\pi r_{gh}^3 \rho_w g, \quad f_T = \frac{4}{3}\pi ((r_{gh}^3 - r_g^3) \rho_h + r_g^3 \rho_g) g,$$

$$f_C = \xi_b \pi r_{gh}^2 \frac{\rho_w w_b^2}{2}.$$

Параметры  $\xi$  и  $Re_{gh}$  определим следующим образом [18]:

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

Скорость миграции композитного пузырька  $w_b$  определим из (8) с учетом (6). Температура композитного пузырька равна равновесной температуре [19]:

$$T_{hs} = T_{h0} + \theta \ln \left( \frac{p}{p_{h0}} \right),$$

где  $T_{h0}$  – равновесная температура фазовых переходов для гидрата, соответствующего давления  $p_{h0}$ .

Полагаем, что композитные пузырьки состоят из газового ядра с радиусом  $a_g$  и гидратной оболочки:

$$\frac{4}{3}\pi r_{gh}^3 \rho_{gh} = \frac{4}{3}\pi r_g^3 \rho_g + \frac{4}{3}\pi (r_{gh}^3 - r_g^3) \rho_h.$$

Тогда плотность композитного пузырька с гидратной оболочкой определится следующим образом:

$$\rho_{gh} = \frac{r_g^3 \rho_g + (r_{gh}^3 - r_g^3) \rho_h}{r_{gh}^3}.$$

В предыдущих работах, посвященных процессу течения затопленной струи [6], газ принимался идеальным:

$$p_g = \rho_g R T_g, \quad (9)$$

где  $p_g$  – давление;  $\rho_g$  – плотность;  $T_g$  – температура;  $R$  – удельная газовая постоянная.

Уравнение состояния реального газа, которое применимо для описания поведения газа на больших глубинах, имеет следующий вид [7, 20]:

$$p_g M_g = \rho_b Z_g R_g T_g, \quad (10)$$

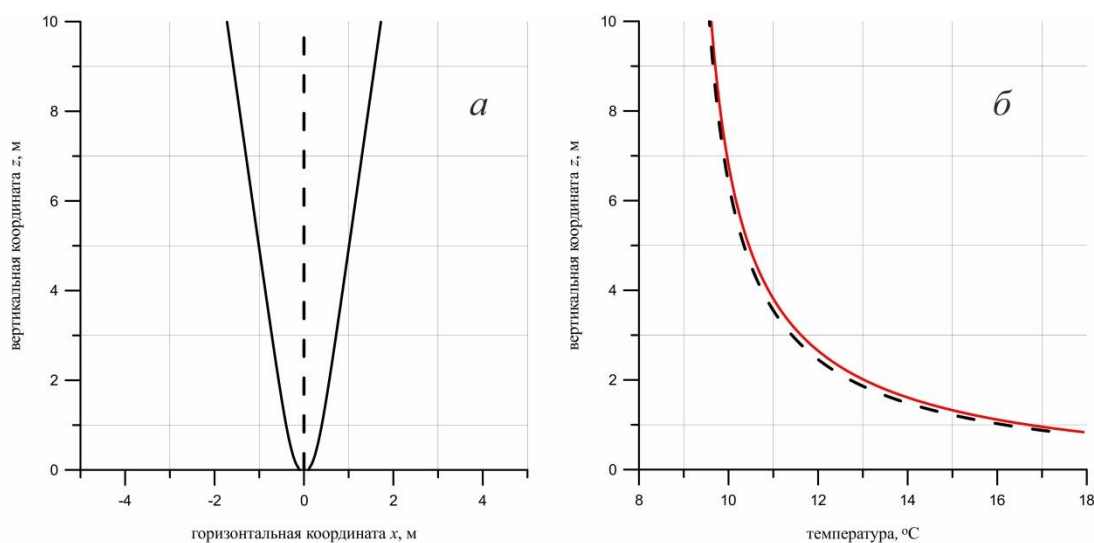
где  $Z_g$  – коэффициент сжимаемости. В работе [21] экспериментально определен коэффициент сжимаемости:  $Z_g=0,91$  для метана.

#### Результаты расчетов

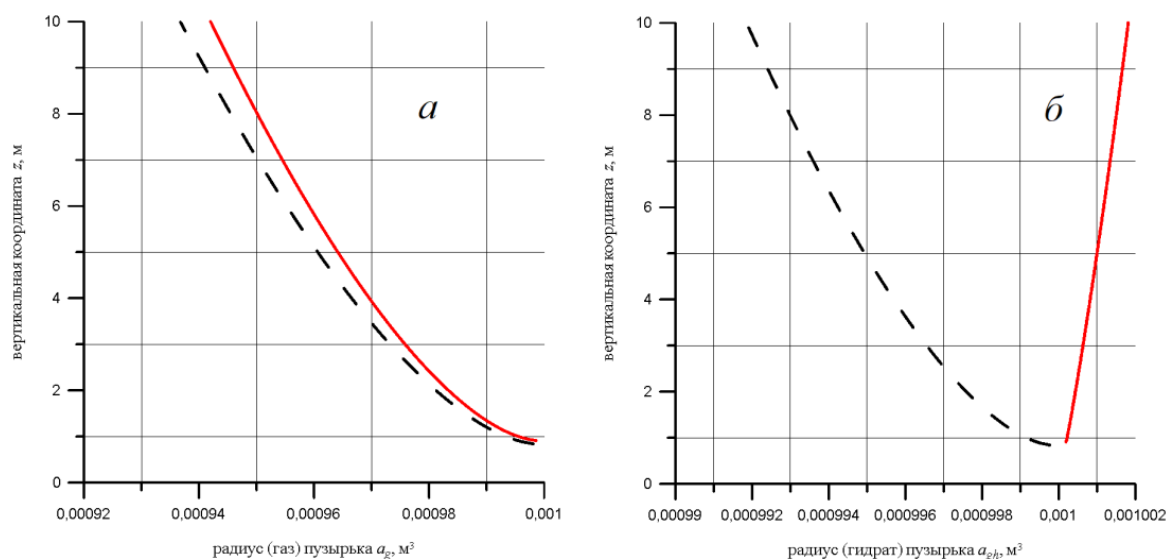
Начальные параметры системы, использованные для расчетов: радиус скважины  $r_0=0,1$  м, температура вытекающих углеводородов  $T^e=80$  °С и окружающей воды  $T_w=4$  °С, плотности нефти  $\rho_o=650$  кг/м<sup>3</sup>, гидрата

$\rho_n=910 \text{ кг/м}^3$  и воды  $\rho_w=1030 \text{ кг/м}^3$ , компоненты скорости течения окружающей воды  $u_w=0 \text{ м/с}$ ,  $w_w=0 \text{ м/с}$ ,  $v_w=0 \text{ м/с}$ , давление  $p=15 \text{ МПа}$ , теплоемкости нефти  $c_o=2090 \text{ Дж/(кг·К)}$ , газа  $c_g=2365 \text{ Дж/(кг·К)}$ , гидрата  $c_h=2100 \text{ Дж/(кг·К)}$ , воды  $c_w=4200 \text{ Дж/(кг·К)}$ , радиус пузырька  $r_g=10^{-3} \text{ м}$ ,  $M_g=16.04 \text{ г/моль}$ ,  $L=5 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}$ ,  $D^*=5 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $R=520 \text{ Дж/(кг·К)}$ ,  $R_g=8,31 \text{ Дж/(моль·К)}$ ,  $\theta=10 \text{ К}$ ,  $T_{h0}=273 \text{ К}$ ,  $p_{h0}=2,57 \text{ МПа}$ . При расчетах объемный расход газа примем равным  $Q_g^e=1 \text{ м}^3/\text{с}$ , а объемный расход нефти для простоты анализа полученных результатов примем  $Q_o^e=0 \text{ м}^3/\text{с}$ .

На рис. 3, а приведена траектория распространения струи. С увеличением вертикальной координаты происходит расширение струи за счет вовлечения окружающей воды в струю. На рис. 3, б приведена зависимость температуры струи от вертикальной координаты. С увеличением вертикальной координаты температура струи уменьшается. Такой эффект вызван процессом вовлечения холодной окружающей воды в струю. На рис. 3, б и далее пунктирная черная кривая относится к случаю, когда поведение газа описывается уравнением состояния идеального газа (случай 1), а сплошная красная кривая – для случая реального газа (случай 2).



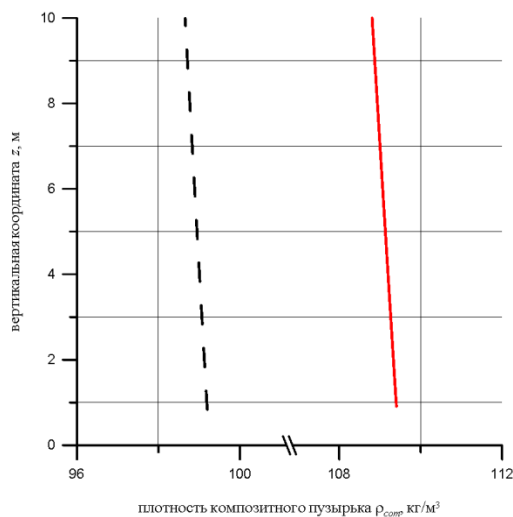
**Рис. 3.** Траектория струи (а) и зависимость температуры струи от вертикальной координаты (б)  
**Fig. 3.** Jet trajectory (a) and jet temperature dependence on vertical coordinate (b)



**Рис. 4.** Зависимость газовой и гидратной составляющих композитного пузырька от вертикальной координаты  
**Fig. 4.** Dependence of gas and hydrate components of a composite bubble on the vertical coordinate

На рис. 4 представлена зависимость газовой (а) и гидратной (б) составляющих композитного пузырька от вертикальной координаты. Из графика видим, что для случая 1 гидратообразование протекает быстрее, вслед-

ствие чего радиус газовой составляющей композитного пузырька уменьшается быстрее, чем для случая 2. В то же время видим, что радиус гидратной составляющей убывает для случая 1, но возрастает для случая 2.



**Рис. 5.** Зависимость плотности композитного пузырька от вертикальной координаты

**Fig. 5.** Dependence of the composite bubble density on the vertical coordinate

В связи с тем, что начальная плотность пузырька вычисляется для 1 случая уравнением (9) и для 2 случая уравнением (10) и соответственно составляет  $99,25 \text{ кг/м}^3$  и  $109,47 \text{ кг/м}^3$ , то и характер изменения радиуса связан с плотностью пузырька. Схожий эффект был установлен в работе [16], в которой были рассмотрены случаи миграции метановых пузырьков для различных глубин. В рамках работы [10] было установлено, что начальная плотность пузырька, которая была различной для глубин 1800, 1600 и 800 м, также оказывала влияние на рост или убывание радиуса гидратной составляющей пузырька. Таким обра-

зом, рис. 4 отражает влияние начальных условий на режим гидратообразования в струе.

На рис. 5 для двух случаев представлены зависимости плотности газа в композитном пузырьке от вертикальной координаты. Из графика видно, что начальные значения плотности различаются, но с увеличением вертикальной координаты характер изменения плотности носит линейный характер.

#### Заключение

Рассмотрена математическая модель струйного течения в условиях гидратообразования. Исследовано влияние начальных параметров окружающей среды на формирование затопленной многофазной струи с учетом гидратообразования. Проведены численные эксперименты, отражающие распространение многофазной затопленной струи, для случаев с различными начальными условиями. Рассмотрены случаи, когда поведение газа описывается уравнениями состояния для идеального и реального газа. Установлено, что радиус гидратной составляющей пузырька убывает для случая, когда поведение газа описывается уравнением состояния для идеального газа, и растет для случая применения уравнения состояния для реального газа. Такой эффект связан с разными способами описания состояния газа и различными значениями плотности газа. Полученный эффект является физически непротиворечивым и согласуется с исследованиями других авторов.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России в сфере научной деятельности, номер для публикаций FEUR-2020-0004 «Решение актуальных задач и исследование процессов в нефтехимических производствах, сопровождающихся течениями многофазных сред».*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Хасанов М.К. Математическая модель инъекции сероводорода в пласт, частично насыщенный водой // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 329. – № 9. – С. 6–14.
- Полетаев А.В., Полетаева Е.В. Оценка объемов углеводородных газов газогидратов Азербайджанского сектора Южного Каспия по сейсмическим данным // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 10. – С. 153–162.
- Recovery of saltmarsh meiofauna six years after the Deepwater Horizon oil spill // J.W. Fleeger, M.R. Riggio, I.A. Mendelsohn, Q. Lin, A. Houc, D.R. Deis // Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. – 2018. – V. 502. – P. 182–190.
- Богоявленский В.И., Баринов П.С., Богоявленский И.В. Катастрофа в мексиканском заливе на месторождении Ixtoc комплекса Cantarell // Бурение и нефть. – 2018. – № 1. – С. 3–13.
- Гималтдинов И.К., Кильдибаева С.Р. Модель затопленной струи с учетом двух предельных схем гидратообразования // Теплофизика и аэромеханика. – 2018. – Т. 25. – № 1. – С. 79–88.
- Гималтдинов И.К., Кильдибаева С.Р. Динамика многофазной затопленной струи с учетом образования гидратов // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2015. – Т. 1. – № 3. – С. 92–101.
- Zheng L., Yapa P.D., Chen F. A model for simulating deepwater oil and gas blowouts – part I: theory and model formulation // Journal of hydraulic research. – 2002. – V. 41. – № 4. – P. 339–351.
- Chen F.H., Yapa P.D. A model for simulating deepwater oil and gas blowouts part ii: comparison of numerical simulations with deepspill field experiments // Journal of Hydraulic Research. – 2003. – V. 41. – № 4. – P. 353–365.
- Lee J.H.W., Chu V.H. Turbulent jets and plumes – a Lagrangian approach. – Kluwer, Kluwer Academic Publishers, 2003. – 390 p.
- Bishnoi P.R., Maini B.B. Laboratory study of behaviour of oil and gas particles in salt water, relating to deepwater blowouts // Spill Technology Newsletter. – 1979. – V. 4. – № 1. – P. 24–36.
- Chen F.H., Yapa P.D. Estimating hydrate formation and decomposition of gases released in a deepwater ocean plume // Journal of marine systems. – 2001. – № 30. – P. 21–32.
- Novel concept to control and remediate deep water oil spills: the universal deepwater oil containment system (UDOC). Patent XP055056864 USA, 2016.
- 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.
- 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.
- О миграции одиночного газового пузырька в воде при образовании на его поверхности стабильной газогидратной корки / В.Ш. Шагапов, А.С. Чиглинцева, А.А. Русинов, Б.И. Тазетдинов // Теоретические основы химической технологии. – 2017. – V. 51. – № 2. – С. 199–206.
- О миграции одиночного газового пузырька в воде / В.Ш. Шагапов, А.С. Чиглинцева, А.А. Русинов, Б.И. Тазетдинов // Теплофизика высоких температур. – 2017. – V. 55. – № 3. – P. 440–446.
- Fate of rising methane bubbles in stratified waters: how much methane reaches the atmosphere? / D.F. McGinnis, J. Greinert, Y. Artemov, S.E. Beaubien, A. Wuest // J. Geophys. Res. – 2006. – V. 111. – P. 382–397.

18. Химическая гидродинамика / А.М. Кутепов, А.Д. Полянин, З.Д. Запрянов, А.В. Вязьмин. – М.: Казенин Квантум, 1996. – 336 с.
19. Хасанов М.К. Математическая модель образования гидрата диоксида углерода при инъекции углекислого газа в метано-гидратный пласт // Теоретические основы химической технологии. – 2017. – Т. 51. – № 5. – С. 499–509.
20. Sloan E.D. Clathrate hydrates of natural gases. 2nd ed. – New York: Mercel dekker, Inc., 1997. – 750 p.
21. Лапшин В.И., Волков А.Н., Шафиев И.М. Коэффициент сжимаемости газов и газоконденсатных смесей: экспериментальное определение и расчеты // Научно-технический сборник. Вести газовой науки. – 2011. – № 1 (6). – С. 120–131.

*Поступила 11.10.2019 г.*

#### **Информация об авторах**

**Кильдибаева С.Р.**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной информатики и программирования Стерлитамакского филиала Башкирского государственного университета.

**Гималтдинов И.К.**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики Уфимского государственного нефтяного технического университета; член-корреспондент, Академия наук Республики Башкортостан.



UDC 532.546:536.421

## EVOLUTION OF OIL AND GAS JET FLOWING THROUGH RUPTURE OF MAIN OIL PIPELINE (GAS PIPELINE) LOCATED ON BOTTOM OF WATER RESERVOIR

**Svetlana R. Kildibaeva**<sup>1</sup>,  
freya.13@mail.ru

**Ilyas K. Gimaltdinov**<sup>2,3</sup>,  
iljas\_g@mail.ru

<sup>1</sup> Sterlitamak Branch of Bashkir State University,  
49, Lenin avenue, Sterlitamak, 453100, Russia.

<sup>2</sup> Ufa State Oil Technical University,  
1, Kosmonavtov street, 450062, Russia.

<sup>3</sup> Academy of Sciences of Bashkortostan,  
15, Kirov street, 450008, Ufa, Russia.

**The relevance** of the research is associated with increasing interest in production of hydrocarbons at the bottom of the world ocean. The risk of accidental spills of oil products into the water increases many times. Oil spills on the Ixtoc-1 platform and Deepwater Horizon in the Gulf of Mexico demonstrated the unavailability of modern methods to eliminate emergency underwater leaks. In this regard, there is a need to study the submerged jets consisting of hydrocarbons mixture (oil and gas). In addition, deep-sea spills of a multiphase mixture of oil and associated gases can produce hydrates, which can affect the dynamics of these emissions. Therefore, the study of the multiphase jets dynamics in ocean water accompanied by hydrate formation is an urgent and multifaceted task. This study will reduce the time of elimination of possible leaks. In this work we study a submerged multiphase jet formation taking into account hydrate formation under different initial conditions.

**The main aim** of the research is to investigate the formation of a submerged jet depending on the initial conditions.

**Objects:** multiphase jet of hydrocarbons; components of the jet: oil, gas, water; composite bubbles, covered with a hydrate shell; nature of jet flow spread, hydrate formation.

**Methods.** The integral Lagrangian method of the control volume is used to describe the submerged jet propagation. According to this method, the jet is represented as a sequence of elementary volumes, each of which is characterized by linear dimensions and thermophysical characteristics. Submerged jet distribution is considered for deep-sea spills, which corresponds to the case when hydrate shells begin to form on the surface of the bubbles and the gas bubble turns into a hydrate. The paper adopts a limit scheme, according to which hydrate formation is limited by the diffusion of gas through the hydrate shell.

**Result.** The authors have supplemented the mathematical model of multiphase submerged jet flow taking into account the formation of hydrate on the surface of bubbles. The dependences of the submerged jet thermophysical characteristics on vertical coordinate and the trajectory of jet propagation are obtained. The equation of state for real gases is applied for methane bubbles, which are covered with a hydrate shell. As a result of calculations, the dependences of the radius of the gas and hydrate component of the composite bubble and its density on vertical coordinate are obtained. It is found that the radius of the bubble hydrate component decreases for the case when the gas is described by the ideal gas state equation and grows for the case of applying the equation of state for real gas.

### Key words:

Submerged jet, multiphase jet, hydrate, methane, oil, hydrocarbon spill, oil, control volume method, gas state equation.

*The work was performed within the framework of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation state task in the field of scientific activity, publication number FEUR-2020-0004 «Solving urgent problems and researching processes in petrochemical industries accompanied by flows of multiphase media».*

### REFERENCES

1. Khasanov M.K. Mathematical model of injection of hydrogen sulfide into the formation, partially saturated with water. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 9, pp. 6–14. In Rus.
2. Poletaev A.V., Poletaeva E.V. Estimation of volumes of hydrocarbon gases of gas hydrates of the Azerbaijan sector of the South Caspian sea by seismic data. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 10, pp. 153–162. In Rus.
3. Fleeger J.W., Riggio M.R., Mendelssohn I.A., Lin Q., Houc A., Deis D.R. Recovery of saltmarsh meiofauna six years after the Deepwater Horizon oil spill. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2018, vol. 502, pp. 182–190.
4. Bogoyavlenskiy V.I., Barinov P.S., Bogoyavlenskiy I.V. Katastrofa v meksikanskom zalive na mestorozhdenii Ixtoc kompleksa Cantarell [Disaster in the Gulf of Mexico at the Ixtoc Deposit of the Cantarell complex]. *Burenie i neft*, 2018, no. 1, pp. 3–13.
5. Gimaltdinov I.K., Kildibaeva S.R. Model of a submerged jet accounting for two limiting schemes of hydrate formation. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2018, vol. 25, no. 1, pp. 75–83. In Rus.
6. Kildibaeva S.R., Gimaltdinov I.K. Dinamika mnogofaznoy zatoplennoy strui s uchetom obrazovaniya gidratov [Dynamics of multiphase submerged jet taking into account hydrate formation]. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Fiziko-matematicheskoe modelirovanie. Neft, gaz, ehnergetika*, 2015, no. 3, pp. 92–101.
7. Zheng L., Yapa P. D., Chen F. A model for simulating deepwater oil and gas blowouts – part I: theory and model formulation. *Journal of hydraulic research*, 2002, vol. 41, no. 4, pp. 339–351.
8. Chen F.H., Yapa P.D. A model for simulating deepwater oil and gas blowouts part ii: comparison of numerical simulations with

- deepspill field experiments. *Journal of Hydraulic Research*, 2003, vol. 41, no. 4, pp. 353–365.
9. Lee J.H.W., Chu V.H. *Turbulent jets and plumes – a Lagrangian approach*. Kluwer, Kluwer Academic Publishers, 2003. 390 p.
  10. Bishnoi P.R., Maini B.B. Laboratory study of behaviour of oil and gas particles in salt water, relating to deepwater blowouts. *Spill Technology Newsletter*, 1979, vol. 4, no. 1, pp. 24–36.
  11. Chen F.H., Yapa P.D. Estimating hydrate formation and decomposition of gases released in a deepwater ocean plume. *Journal of marine systems*, 2001, no. 30, pp. 21–32.
  12. Carte G.A. *Novel concept to control and remediate deep water oil spills: the universal deepwater oil containment system (UDOC)*. Patent XP055056864 USA, 2016.
  13. Gimaltdinov I.K., Kildibaeva S.R. About the theory of initial stage of oil accumulation in a dome-separator. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2015, vol. 22, no. 3, pp. 387–392.
  14. Shagapov V.S., Tazetdinov B.I. Formation and dissociation of gas hydrate inclusions during migration in water. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2014, vol. 21, no. 3, pp. 337–345. In Rus.
  15. Shagapov V.S., Chiglintseva A.S., Rusinov A.A., Tazetdinov B.I. Migration of a single gas bubble in water during the formation of stable gas-hydrate crust on its surface. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2017, vol. 51, no. 2, pp. 216–223.
  16. Shagapov V.S., Chiglintseva A.S., Rusinov A.A., Tazetdinov B.I. On the migration of a single gas bubble in water. *High Temperature*, 2017, vol. 55, no. 3, pp. 420–425. In Rus.
  17. McGinnis D.F., Greinert J., Artemov Y., Beaubien S.E., Wuest A. Fate of rising methane bubbles in stratified waters: how much methane reaches the atmosphere? *J. Geophys. Res.*, 2006, vol. 111, pp. 382–397.
  18. Kutepov A.M., Polyaniin A.D., Zapryanov Z.D., Vyazmin A.V., Kazenin A.M. *Khimicheskaya gidrodinamika* [Chemical fluid dynamics]. Moscow, Kazenin Kvantum Publ., 1996. 336 p.
  19. Khasanov M.K. Mathematical model of formation of carbon dioxide hydrate upon injection of carbon dioxide into a methane hydrate stratum. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2017, vol. 51, no. 5, pp. 647–657. In Rus.
  20. Sloan E.D. *Clathrate hydrates of natural gases*. 2<sup>nd</sup> ed. New York, Marcel Dekker, Inc., 1997. 750 p.
  21. Lapshin V.I., Volkov A.N., Shafiev I.M. Koefffitsient szhimae-mosti gazov i gazokondensatnykh smesey: eksperimentalnoe opredelenie i raschety [Compressibility factor of gases and gas-condensate mixtures: experimental determination and calculations]. *Nauchno-tehnicheskiiy sbornik Vestii gazovoy nauki*, 2011, no. 1 (6), pp. 120–131.

Received: 11 October 2019.

#### Information about the authors

**Svetlana R. Kildibaeva**, Cand. Sc., associate professor, Sterlitamak Branch of Bashkir State University.

**Ilyas K. Gimaltdinov**, Dr. Sc., professor, Ufa State Oil Technical University; corresponding member, Academy of Sciences of Bashkortostan.