



УДК 532.546

## ОБ ОСОБЕННОСТЯХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МНОГОФАЗНЫХ ЗАТОПЛЕННЫХ СТРУЙ С УЧЁТОМ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ

### ABOUT FEATURES OF DISTRIBUTION OF THE MULTIPHASE FLOODED STREAMS TAKING INTO ACCOUNT PHASE TRANSITIONS

**Кильдибаева Светлана Рустамовна**

кандидат физико-математических наук,  
доцент кафедры прикладной информатики  
и программирования,  
Стерлитамакский филиал  
Башкирского государственного университета  
freya.13@mail.ru

**Гималтдинов Ильяс Кадирович**

доктор физико-математических наук, профессор,  
профессор кафедры физика,  
Уфимский государственный  
нефтяной технический университет  
freya.13@mail.ru

**Кильдибаева Гульназ Ринатовна**

студентка,  
Стерлитамакский филиал  
Башкирского государственного университета  
freya.13@mail.ru

**Аннотация.** В работе рассматривается распространение многофазной затопленной струи, которая может возникать на дне водоема вследствие повреждения трубопровода или скважины. Струя состоит из капель нефти, пузырьков газа, вовлеченной в струю воды, а также гидратных пузырьков, если распространение струи происходит в условиях стабильного существования гидрата. В работе исследуется влияние на струю процесса гидратообразования.

**Ключевые слова:** затопленная струя, гидратообразование, метан, нефть.

**Kildibayeva Svetlana Rustamovna**

Candidate physical and mathematical sciences,  
Associate professor of applied informatics  
and programming,  
Sterlitamak branch Bashkir state university  
freya.13@mail.ru

**Gimaltdinov Ilyas Kadirovich**

Doctor of physical and mathematical  
sciences, Professor,  
Professor of department of the physicist,  
Ufa state oil technical university  
freya.13@mail.ru

**Kildibayeva Gulnaz Rinatovna**

Student,  
Sterlitamak branch Bashkir state university  
freya.13@mail.ru

**Annotation.** The paper deals with the propagation of a multi-phase submerged jet, which can occur at the bottom of the reservoir due to damage to the pipeline or well. The jet consists of droplets of oil, gas bubbles, water are involved in the jet and hydrate bubbles, if the distribution of the jet takes place under conditions of stable existence of hydrate. The paper investigates the influence of hydrate formation process on the jet.

**Keywords:** submerged jet, hydrate formation, methane, oil.

**Б**ольшие объемы выбросов нефти и газа в океан, чаще всего, связаны с повреждением трубопровода или скважины. В таких случаях обычно углеводороды распространяются в виде затопленных струй. Струя обычно состоит из капель нефти, пузырьков газа, вовлеченной в струю воды, а также гидратных пузырьков, если распространение струи происходит в условиях стабильного существования гидрата.

Считаем, что в начальный момент времени известны значения объемных расходов нефти и газа, поступающих из поврежденного трубопровода. Также известны начальные температуры углеводородов (нефти и газа), а также окружающей среды. Для моделирования поведения струи необходимо определить радиус струи, траекторию, скорость, плотность и температуру. Также необходимо выяснить, как влияет поперечное течение на распространение струи. Полученные зависимости данных параметров от времени позволят спрогнозировать дальнейшее распространение струи [1] и смоделировать работу устройств для устранения нежелательных техногенных утечек [2]. Считаем, что газ распространяется в виде пузырьков и занимает центральное ядро сечения струи, а термобарические условия на дне водоема соответствуют условиям стабильного существования гидрата.

В основе математической модели лежит интегральный Лагранжевый метод контрольного объема, предложенный в работе [3]. Согласно этому методу считаем, что струя (рис. 1а) состоит из последовательных элементов – цилиндров, имеющих высоту  $h$  и радиус  $b$  (рис. 1б).



Каждый элемент струи – контрольный объем характеризуется своим положением в пространстве, средней скоростью, температурой, плотностью и объемным содержанием веществ, входящих в струю. Турбулентное вовлечение окружающей воды в контрольный объем учитывается при расчетах на каждом шаге по времени. Необходимо определить все характеристики КО с течением времени. Зная характеристики контрольного объема, можно вычислить параметры струи.

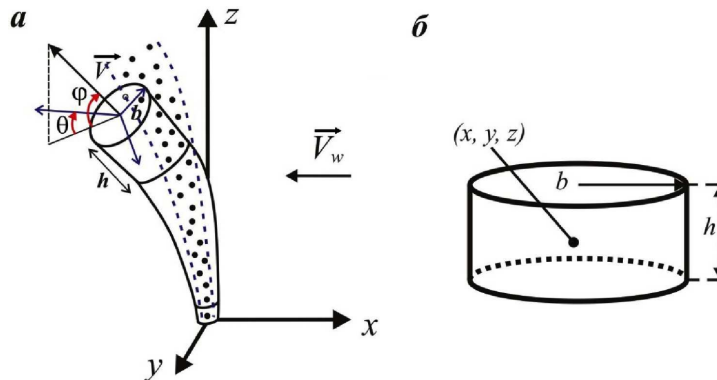


Рисунок 1 – Схема затопленной струи (а), контрольный объем (б)

Уравнения сохранения масс для воды, газа, нефти и гидрата в КО:

$$\frac{dm_w}{dt} = \rho_w Q_w - J_w^h, \quad \frac{dm_g}{dt} = -J_g^h - \rho_g Q_g, \quad \frac{dm_o}{dt} = 0, \quad \frac{dm_h}{dt} = -J_h - \rho_h Q_h, \quad (1)$$

где  $m_i$ ,  $\rho_i$  ( $i = w, g, o, h$ ) – масса компонентов в контрольном объеме и их плотность;  $Q_w$  – объемный поток, вовлеченной в струю окружающей воды;  $Q_g, Q_h$  – объемный поток газа и гидрата, «выходящий» из КО в связи с искривлением струи;  $J_w^h, J_g^h$  – соответственно интенсивности расхода воды и газа при образовании гидрата;  $J_h$  – интенсивность образования газогидрата. Здесь и далее нижние индексы  $w, g, o, h$  относятся к параметрам воды, газа, нефти и гидрата соответственно.

Интенсивности расходов связаны следующими соотношениями:

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

где  $G$  – гидратное число,  $N$  – количество пузырьков в контрольном объеме,  $a_{gh}$  – радиус композитных пузырьков,  $j_h$  – интенсивность образования гидрата, отнесенная к площади поверхности пузырька.

Уравнение (1) с учетом (2) примет вид:

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

здесь  $M$  – масса КО;  $Q^f$  – объемный поток газа и гидрата, «покидающий» КО в связи с искривлением струи,  $\alpha_i$  ( $i = o, g, h, w$ ) – объемные содержания соответствующих компонентов 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.

Уравнения сохранения импульсов для КО имеют вид:

$$\frac{d}{dt}(Mu) = 0, \quad \frac{d}{dt}(Mv) = 0, \quad \frac{d}{dt}[(M_w + M_o)w + (M_g + M_h) \cdot (w + w_b)] = (\rho_w - \rho_l) \cdot \pi b^2 h \cdot (\alpha_w + \alpha_o) \cdot g + (\rho_w - \rho_{com}) \cdot \pi b^2 h \cdot (\alpha_g + \alpha_h) \cdot g, \quad (4)$$

где  $u, v, w$  компоненты скорости КО  $\vec{V} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}$  (рис. 1а),  $g$  – модуль ускорения силы тяжести,  $\rho_l = \alpha_w \rho_w + \alpha_o \rho_o$  – плотность жидкой составляющей в КО,  $\rho_{com} = \frac{\rho_g \rho_o^3 + (\alpha_{gh}^3 - \alpha_g^3) \cdot \rho_h^3}{a_{gh}^3}$  – плотность композитного пузырька с гидратной оболочкой,  $M_i$  ( $i = o, g, h, w$ ) – масса компонент КО.



Уравнение сохранения энергии КО:

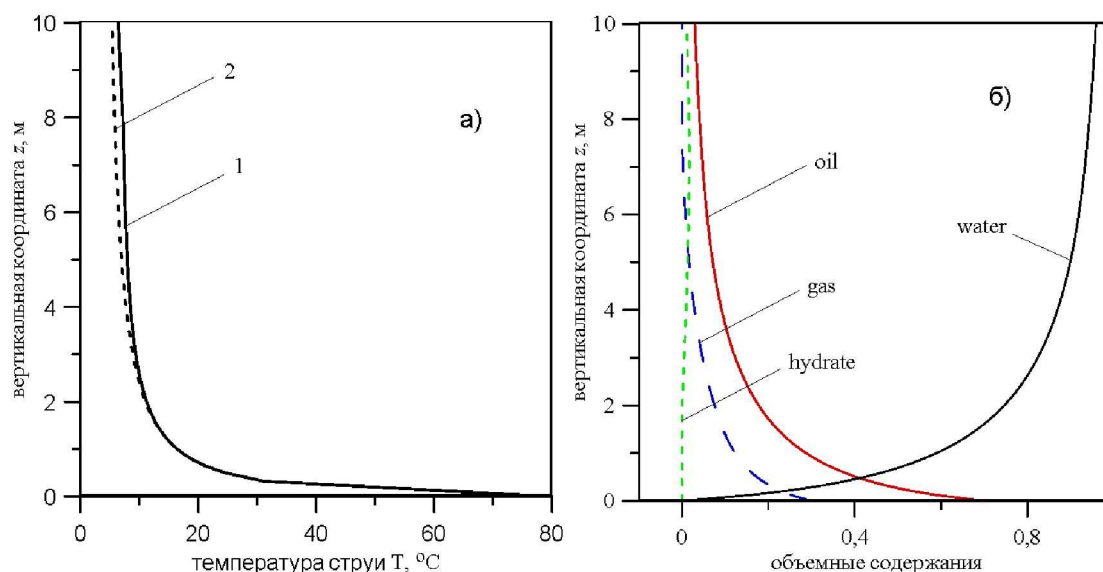
$$\frac{d}{dt} \cdot (cMT) = c_w T_w \rho_w Q_w + J_h L - J_w c_w T_{hs}, \quad (5)$$

где  $c$ ,  $T$ ,  $c_w$ ,  $T_w$  соответственно теплоемкость и температура КО и окружающей жидкости,  $L$  – скрытая теплота фазовых переходов.

Процесс формирования гидрата более подробно рассмотрен в работе [4]. Уравнения (1), (3)–(5) решаем численно.

Расчеты были проведены для параметров системы:  $R = 0,05$  м,  $Q_o^e = 0,35$  м<sup>3</sup>/с и газа  $Q_g^e = 0,15$  м<sup>3</sup>/с, температура окружающей воды  $T_w = 4$  °С, температура истечения смеси нефти и газа  $T^e = 80$  °С, давление  $P = 15$  МПа, плотность окружающей воды  $\rho_w = 1030$  кг/м<sup>3</sup>, нефти  $\rho_o = 650$  кг/м<sup>3</sup>, газа (метана)  $\rho_g = 0,7$  кг/м<sup>3</sup>.

В результате численных расчетов получены: зависимость температуры (рис. 2а) и объемных содержаний компонент (рис. 2б) КО от вертикальной координаты. На рисунке 2а линия 1 соответствует случаю, когда образование гидратной оболочки на поверхности пузырьков лимитируется теплообменом с окружающей средой, линия 2 – диффузионным переносом газа через гидратную корку. Температура КО понижается за счет вовлечения окружающей воды с меньшей температурой. В случае, когда в струе образование гидратных оболочек на поверхности пузырьков лимитируется процессом теплообмена с окружающей средой, темп уменьшения температуры струи замедляется, что связано с интенсивным выделением тепла при образовании гидрата. На рисунке 2б обозначение oil относится к нефти, gas – к газу, hydrate – к гидрату, water – к воде. Объемные содержания нефти и газа убывают в связи с вовлечением окружающей воды, объемное содержание воды возрастает. Объемное содержание газового гидрата начинает увеличиваться с высоты 1,62 м (начинается гидратообразование) и постепенно убывает с 6,2 м (несмотря на то, что гидрат всё ещё образуется, вода вовлекается в КО интенсивнее).



**Рисунок 2** – Зависимость температуры (а) и объемных содержаний компонент (б) КО от вертикальной координаты

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №18-31-00264 мол\_а).

### Литература:

1. Гималтдинов И.К., Кильдибаева С.Р. Модель затопленной струи с учётом двух предельных схем гидратообразования // Теплофизика и аэромеханика. – 2018. – Т. 25. – № 1. – С. 79–88.
2. 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.
3. Yara P.D. Zheng L. Simulation of oil spills from underwater accidents I: Model development // Journal of Hydraulic Research. – 1997. – № 5. – P. 673–688.
4. Кильдибаева С.Р., Гималтдинов И. К. Динамика многофазной затопленной струи с учетом образования гидратов // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2016. – Т. 1. – № 3 (3). – С. 92–101.

**References:**

1. Gimaltdinov I.K., Kildibaeva S.R. Model of the flooded jet with allowance for two limiting schemes of hydrate formation // Thermophysics and Aeromechanics. – 2018. – Vol. 25. – No. 1. – P. 79–88.
2. Gimaltdinov I.K., Kildibaeva S.R. To the theory of the initial stage of oil accumulation in the dome-separator // Thermophysics and Aeromechanics. – 2015. – Т. 22. – № 3. – P. 401–406.
3. Yapa P.D., Zheng L. Simulation of oil spills from underwater accidents I: Model development // Journal of Hydraulic Research. – 1997. – № 5. – P. 673–688.
4. Kildibaeva S.R., Gimaltdinov I.K. Dynamics of multiphase flooded jet taking into account the formation of hydrates // Bulletin of the Tyumen State University. Physico-mathematical modeling. Oil, gas, power. – 2016. – Т. 1. – No. 3 (3). – P. 92–101.