

УДК 532.546:536.421

**ДИНАМИКА МНОГОФАЗНОГО СТРУЙНОГО ПОТОКА
С УЧЕТОМ СОЛЕННОСТИ ОКРУЖАЮЩЕЙ ВОДЫ**

**DYNAMICS OF MULTIPHASE JETTING FLOW
WITH ACCOUNT FOR THE AMBIENT WATER SALINITY**

Кильдибаева С.Р.

**Стерлитамакский филиал Башкирского государственного
университета, Стерлитамак, Российская Федерация**

Гималтдинов И.К.

**Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Уфа, Российская Федерация**

Kildibaeva S.R.

**Sterlitamak Branch of Bashkir State University,
Sterlitamak, Russian Federation**

I.K. Gimaltdinov

**Ufa State Petroleum Technological University,
Ufa, Russian Federation**

e-mail: freya.13@mail.ru

Аннотация. В работе рассматривается течение многофазной затопленной струи с учётом солёности окружающей воды. Струя состоит из капель нефти, пузырьков газа и воды, вовлеченной в струю. Термобарические условия окружающей среды таковы, что на поверхности пузырьков газа могут образовываться гидратные оболочки. Таким образом, пузырьки могут быть газовыми, композитными (газовый пузырек с

гидратной оболочкой) или полностью гидратными. В основе метода, который применяется для моделирования течения затопленной струи, лежит интегральный Лагранжевый метод контрольного объёма (КО), который дополнен уравнениями, описывающими процесс гидратообразования. Гидратообразование описывается предельной схемой, когда процесс описывается диффузией газа через гидратную оболочку. Согласно рассматриваемому методу, струя представляется в виде последовательности элементарных объёмов, каждый из которых обладает соответствующей характеристикой: радиусом, высотой, пространственными координатами, температурой, скоростью, плотностью, массой. Предполагаем, что координаты центра КО являются геометрическим местом траектории центра струи, а осевая линия струи совпадает с траекторией движения КО, вследствие чего можно рассчитать параметры струи в целом. Турбулентное вовлечение окружающей воды в струю рассчитывается на каждом шаге по времени. Впервые в модель вводится коэффициент солёности. В качестве расчетных данных используются экспериментальные данные. Также в работе учитывается влияние течения окружающей среды. Вследствие влияния течения струя может искривляться, а пузырьки покидать пределы струи. Значение скорости течения окружающей воды соответствует экспериментальным данным. При моделировании течения струи учитываются законы сохранения массы, импульса и энергии для компонент, входящих в контрольный объём. Результаты расчетов сравниваются с экспериментальными данными, что позволяет верифицировать предложенную модель с течением многофазной затопленной струи при глубоководных разливах в шельфе.

Abstract. In this paper, the multiphase submerged jet flow is considered with account for the of the ambient water salinity. The jet consists of oil droplets, gas bubbles and water involved in the jet. Thermobaric environmental conditions promote the formation of hydrate shells on the surface of gas

bubbles. Thus, the bubbles can be gas, composite (gas bubble with hydrated shell) or completely hydrated. The method that was used to simulate the flow of a submerged jet with integral control volume Lagrangian method, which is appended by equations which describe the process of hydrate formation. The limiting scheme is adopted as the basis for the hydrate formation descriptions, when the process is described by diffusion of a gas through a hydrated shell. According to the proposed method, the jet is considered as a sequence of elementary control volumes, which characterized by: radius, height, spatial coordinates, temperature, velocity, density, mass.

We assume that the coordinates of the control volume center are the geometric place is the center of the jet trajectory, then it is possible to calculate the parameters of the jet as a whole. Turbulent involvement of ambient water in the jet is calculated at each step in time. For the first time, the salinity coefficient is introduced into the model. Experimental data are used as calculated data. The work takes into account the influence of the flow of the environment. Due to the influence of the flow, the jet can be bent, and the bubbles can leave the jet. The value of the flow velocity of the ambient water corresponds to the experimental data. When modeling the flow of a jet, the laws of conservation of mass, momentum, and energy for the components included in the control volume are taken into account. The results of the calculations are compared with the experimental data, which makes it possible to variate the model for the multiphase submerged jet in the case of deep-sea spills in the shelf.

Ключевые слова: затопленная струя, гидратообразование, гидрат, пузырьки метана, капли нефти, солёность

Key words: submerged jet, hydrate formation, hydrate, methane bubbles, oil droplets, salinity

Введение

Разливы нефти в недрах Мирового океана несут негативные последствия для всего региона разлива. В большинстве случаев такие разливы имеют техногенный характер и связаны с глубоководной разработкой нефтегазовых месторождений. Яркими примерами разлива нефти в водоём являются аварии в Мексиканском заливе на платформах Ixtoc-1, Deepwater Horizon [1, 2]. Устранение последствий разливов занимает продолжительное время, а для прогнозирования распространения разлившейся нефти в толще воды важно знать особенности их взаимодействия с окружающей средой.

Особенность описанных выше разливов – большая глубина источника разлива и труднодоступность в устранении последствий аварии. Обычно вместе с нефтью из поврежденного трубопровода в окружающую воду поступает также и газ, чаще всего метан, и если термобарические условия окружающей среды способствуют образованию газовых гидратов на поверхности пузырьков газа, это обстоятельство также негативно влияет на устранение аварии.

Углеводороды (нефть и газ), поступающие из источника разлива, распространяются в виде затопленной струи. В ходе исследований, посвященных особенностям распространения затопленных струй, было установлено, что существенное влияние имеют течение и солёность окружающей воды.

В данной работе разработана математическая модель распространения затопленной струи с учетом этих факторов.

Исследование теплофизических характеристик струи является начальным этапом для моделирования устройств для сбора углеводородов при глубоководных разливах [3].

Постановка задачи

Согласно постановленной задаче, на дне водоема существует поврежденная скважина радиусом r , из которой вытекают нефть и газ (метан). Нефть поступает в виде капель, газ – в виде пузырьков. Известны температура поступающих из струи углеводородов, а также их объемные расходы. Также известны характеристики окружающей среды: температура, солёность, плотность, давление, скорость течения окружающей среды. При распространении струи из-за поперечного течения окружающей среды траектория струи может искривляться, из-за чего пузырьки газа, которые в начальный момент времени занимают центральную часть струи, могут покидать струю. Также положим, что распространение струи происходит в условиях стабильного существования гидрата. То есть, температура и давление, при которых распространяется струя, таковы, что газовые пузырьки при контакте с водой образуют газовый гидрат. Необходимо определить траекторию распространения затопленной струи, а также изменение следующих характеристик затопленной струи: температуры, плотности, скорости распространения. Также необходимо определить влияние течения окружающей среды и солёности окружающей воды на затопленную струю.

Введем следующие обозначения, характеризующие начальное состояние исходной системы:

r – радиус источника, откуда поступают углеводороды;

T^e – начальная температура поступающих из источника углеводородов;

Q_o^e – начальный объемный расход нефти;

Q_g^e – начальный объемный расход газа;

T_w – температура окружающей воды;

\vec{V}_w – скорость окружающей воды.

Для моделирования течения многофазной затопленной струи дополним интегральный Лагранжевый метод контрольного объема (ИЛМКО), который более подробно был рассмотрен в работах [4-6]. Согласно этому методу, струя рассматривается в виде последовательности элементарных контрольных объемов (КО), характеризующихся: радиусом, высотой, пространственными координатами, температурой, скоростью, плотностью, массой. Турбулентное вовлечение окружающей воды в контрольный объем вычисляется на каждом шаге по времени. Определив характеристики для КО, получим соответствующие распределения для струи. Такое допущение возможно, если предположить, что координаты центра КО являются геометрическим местом траектории центра струи, а осевая линия струи совпадает с траекторией движения КО. Тогда можно рассчитать параметры струи в целом. На рисунке 1 приводится схема затопленной струи.

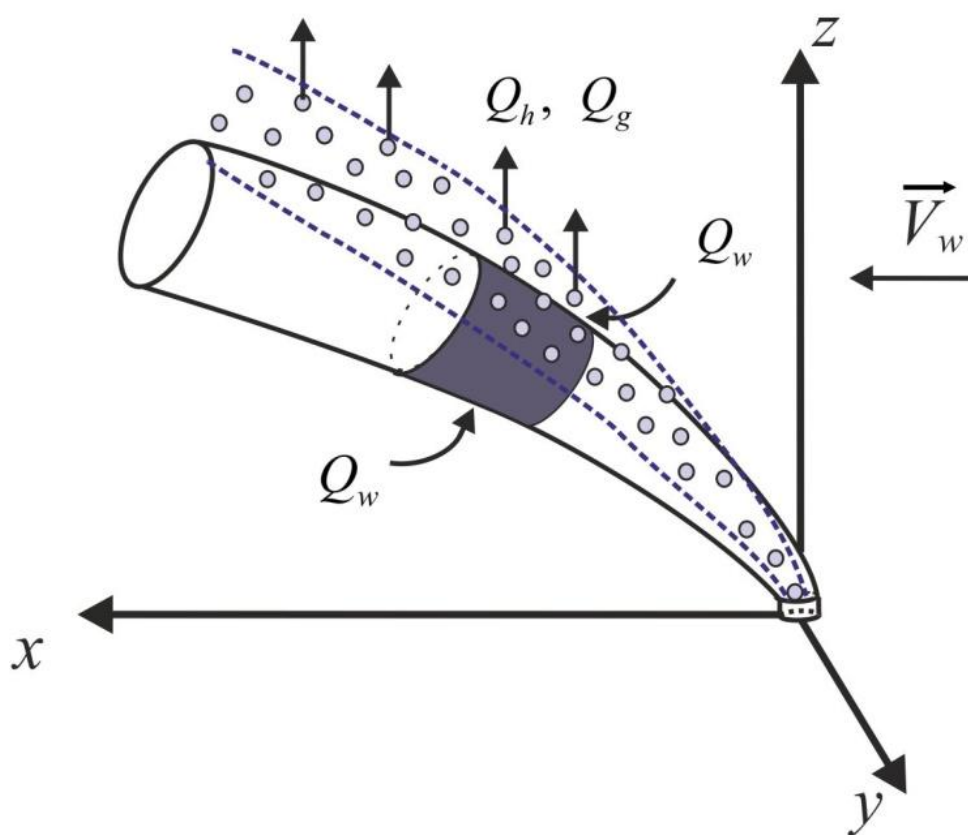


Рисунок 1. Схема затопленной струи

Основные уравнения

Уравнение сохранения компонент, входящих в контрольный объём, запишутся в виде:

$$\frac{dM_o}{dt} = 0, \quad \frac{dM_g}{dt} = -J_g - \rho_g Q_g^f, \quad \frac{dM_h}{dt} = J_h - \rho_h Q_h^f, \quad \frac{dM_w}{dt} = \rho_w Q_w - J_w, \quad (1)$$

где M_i , ρ_i ($i = o, g, h, w$) – масса и плотность соответствующих компонент в КО; Q_w – объемный расход вовлеченной в струю окружающей воды; Q_i^f ($i = g, h$) – объемный расход пузырьков, «покидающих» контрольный объем в связи с искривлением струи; J_i ($i = g, h, w$) – интенсивности воды, газа и гидрата при образовании гидрата. Здесь и далее нижние индексы o, g, h, w относятся соответственно к параметрам нефти, газа, гидрата и воды.

С учётом соотношения, описывающего взаимосвязь баланса воды, газа и гидрата при гидратообразовании:

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

уравнение сохранения масс с учётом нефти, газа, гидрата и вовлечённой в струю воды, запишется в следующем виде:

$$\frac{dM}{dt} = \rho_w Q_w - \rho_{com} Q^f, \quad \rho = \sum_i \alpha_i \rho_i, \quad \sum_i \alpha_i = 1, \quad (2)$$

где M – масса контрольного объема; Q^f – объемный поток пузырьков, «покидающих» контрольный объем; α_i – объемные содержания компонент в контрольном объеме; a_{gh} , ρ_{com} , N – радиус, плотность и количество пузырьков в контрольном объеме; G , j_h – гидратное число и интенсивность образования гидрата.

Уравнения сохранения импульсов для контрольного объёма запишем с учётом действия на струю течения окружающей среды:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(Mu) &= u_w \rho_w Q_w - u \rho_{com} Q^f, \\ \frac{d}{dt}(Mv) &= v_w \rho_w Q_w - v \rho_{com} Q^f, \\ \frac{d}{dt} \left[(M_w + M_o)w + (M_g + M_h) \cdot (w + w_b) \right] &= w_w \rho_w Q_w - (w + w_b) \rho_{com} Q^f + \\ &+ (\rho_w - \rho_l) \pi b^2 h (\alpha_w + \alpha_o) g + (\rho_w - \rho_{com}) \pi b^2 h (\alpha_g + \alpha_h) g, \end{aligned} \quad (3)$$

где u, v, w – компоненты скорости КО \vec{V} ; u_w, v_w, w_w – компоненты скорости течения воды, окружающей КО \vec{V}_w ; g – модуль ускорения силы тяжести; $\rho_l = \alpha_w \rho_w + \alpha_o \rho_o$ – плотность жидкой составляющей в КО.

Уравнение сохранения энергии КО примет вид:

$$\frac{d}{dt}(cMT) = c_w T_w \rho_w Q_w + J_h L - J_w c_w T_{hs}, \quad c = \sum \chi_i c_i, \quad (4)$$

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

Теплоёмкость струи примет вид:

$$c = \chi_o c_o + \chi_g c_g + \chi_h c_h + \chi_w c_w,$$

где $c_i, \chi_i = M_i/M$ ($i = o, g, h, w$) – теплоёмкость и массовое содержание нефти, газа, гидрата и воды в КО.

В процессе распространения струи происходит турбулентное вовлечение окружающей воды в струю. Будем полагать, что объемный расход вовлеченной окружающей жидкости в КО определяется согласно [6]:

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

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

Коэффициент вовлечения окружающей воды вычисляется следующим образом:

$$\alpha = \sqrt{2} \left(0.057 + \frac{0.554 \sin \varphi}{E^2 Fr^2} \right) \left(1 + 5 \frac{V_w'}{\|\vec{V}\| - V_w'} \right)^{-1},$$

где E – эмпирический параметр; $Fr = \|\vec{V}\| - V_w' \cdot (g \cdot b \cdot (\rho_w - \rho) / \rho_w)^{-1/2}$ – число Фруда.

Солёность окружающей воды учтём следующим образом [4]:

$$\frac{d(m_w S)}{dt} = S \frac{dm_w}{dt}, \quad (4)$$

где S – коэффициент солёности, нижний индекс w – относится к вовлеченной в струю воде.

В работе рассматривается случай, когда гидратообразование лимитируется диффузией газа через гидратную оболочку [7, 8].

Для распределения давления в воде по высоте примем гидростатический закон:

$$p = p_a + \rho_w g (h_z - z), \quad (5)$$

где h_z – начальная глубина истечения углеводородов; p_a – атмосферное давление; z – вертикальная координата.

Результаты расчетов

Результаты расчетов будут сравниваться с результатами экспериментальных данных, представленных в работе [9]. Согласно описанному эксперименту, было проведено 4 различных выброса, отличных друг от друга глубиной истечения углеводородов, наличием процесса гидратообразования и сепарации пузырьков газа.

Результаты расчетов сравниваются с экспериментом номер 3, отмеченным на рисунке 3, *a* как SS3 [9].

Начальные параметры системы: $r = 0.0445$ м, $T^e = 80^\circ\text{C}$,
 $Q_o^e = 0.0184$ м³/с, $Q_g^e = 3.2752$ м³/с, $u_w = 0.2$ м/с, $w_w = 0$ м/с, $v_w = 0$ м/с,
 $\rho_o = 842$ кг/м³, $\rho_h = 900$ кг/м³, $a_o = 6 \cdot 10^{-3}$ м, $h_z = 400$ м, $p_o = 4$ МПа.

Для определения значений температуры и солёности окружающей среды, соответствующим параметрам эксперимента, воспользуемся данными, предоставленными в работе [9]. На рисунке 2 представлены зависимости температуры и солёности от вертикальной координаты. Глубине $h_z = 400$ м соответствуют следующие значения температуры и солёности: $T_w = 9^\circ\text{C}$ и $S = 35.2$ ppt.

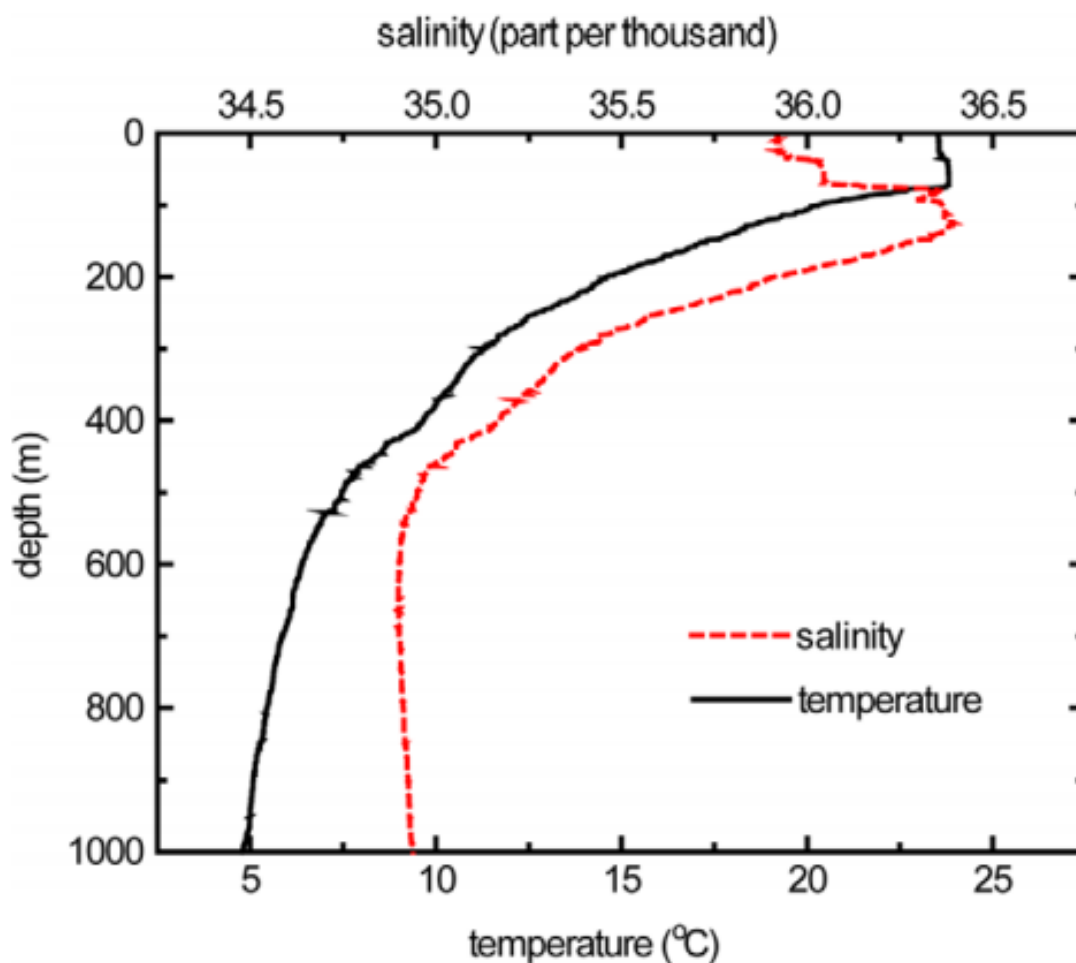


Рисунок 2. Распределение температуры и солёности по глубине [9]

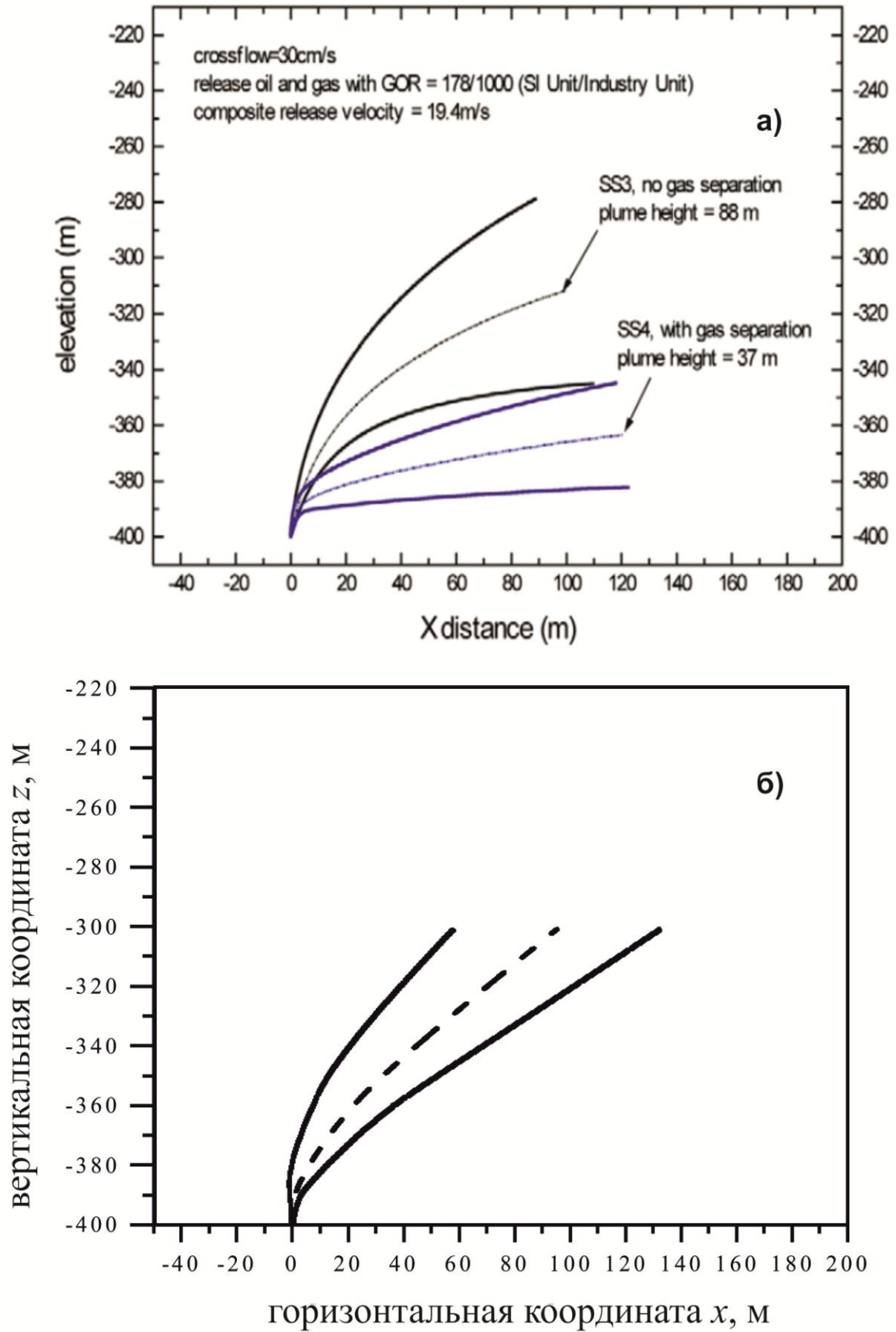


Рисунок 3. Траектория струи для эксперимента (а) и расчетных значений (б)

На рисунке 4 представлена зависимость радиуса струи от вертикальной координаты. Согласно полученным данным видно, что со временем радиус струи увеличивается, что связано с процессом вовлечения окружающей воды в струю.

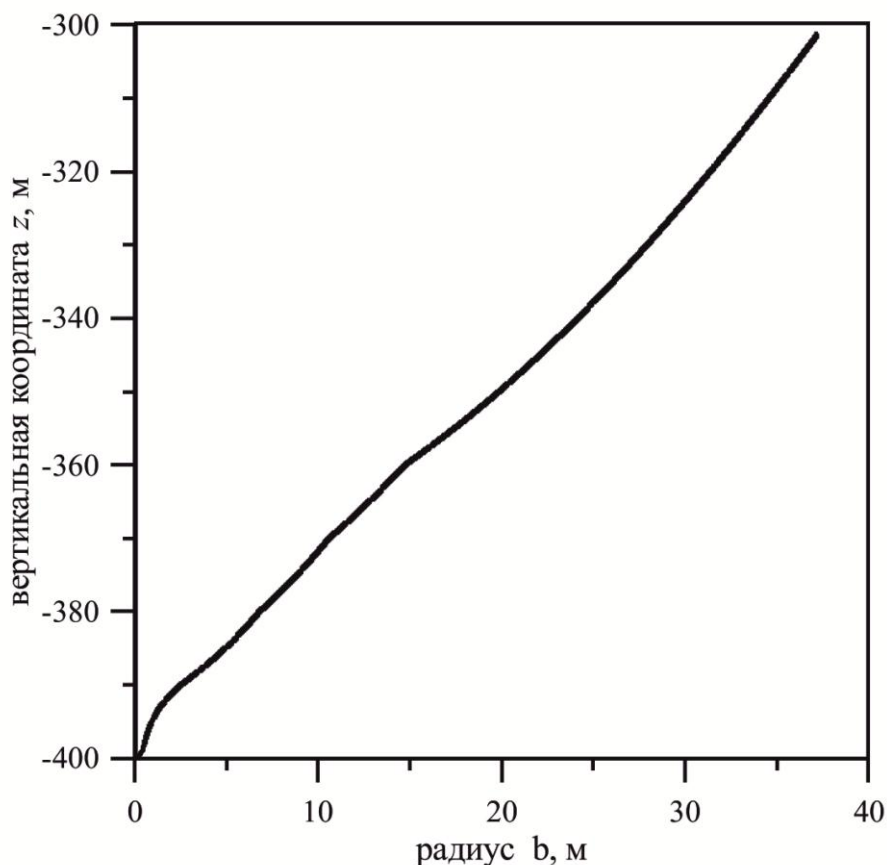


Рисунок 4. Зависимость радиуса струи от вертикальной координаты

Выводы

В работе разработана математическая модель течения затопленной многофазной струи с учётом солёности и течения окружающей воды. Проведен сравнительный анализ рассчитанной траектории струи с экспериментальными данными, получено качественное соответствие.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-31-00264 мол_а.

Список используемых источников

1. 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.
2. Лаврова О.Ю., Костяной А.Г. Катастрофический разлив нефти в мексиканском заливе в апреле-мае 2010 г. // Исследование Земли из космоса. 2010. № 6. С. 67-72.
3. Гималтдинов И.К., Кильдибаева С.Р. Математическая модель купола, предназначенного для устранения утечек углеводородов // Нефтегазовое дело. 2014. Т. 12. № 4. С. 104-111.
4. Yapa P.D. Final Report Submitted to the Cooperative Institute for Coastal and Estuarine Environmental Technology (CICEET) Project Title: A Module for NOAA's GNOME Model to Provide Capability to Simulate Deepwater Oil and Gas Spills. 2003. P. 1-18.
5. 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.
6. Yapa P.D., Zheng L. Simulation of Oil Spills from Underwater Accidents I: Model Development // Journal of Hydraulic Research, International Association of Hydraulic Research. The Netherlands. 1997. Vol. 35, No. 5. P. 673-688.
7. 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.
8. Шагапов В. Ш., Чиглинцева А.С., Русинов А.А. О Механизмах роста гидратной оболочки на поверхности всплывающих газовых пузырьков // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2015. № 3. С. 73-86.

9. Chen F., Yapa P.D. Three-Dimensional Visualization of Multi-Phase (Oil/Gas/Hydrate) Plumes // *Environmental Modelling & Software*. 2004. № 19. P. 751-760.

References

1. Bogoyavlenskij V.I., Barinov P.S., Bogoyavlenskij I.V. Katastrofa v meksikanskom zalive na mestorozhdenii Ixtoc kompleksa Cantarell [Katastrofa v meksikanskom zalive na mestorozhdenii Ixtoc kompleksa Cantarell]. *Burenie i neft – Drilling and Oil*, 2018, No. 1, pp. 3-13. [in Russian].

2. Lavrova O.Yu., Kostyanov A.G. Katastroficheskiy razliv nefti v meksikanskom zalive v aprele-mae 2010 g. [Catastrophic Oil Spill in the Gulf of Mexico in May-April 2010]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa – Earth Exploration from Space*, 2010, No. 6, pp. 67-72. [in Russian].

3. Gimaltdinov I.K., Kildibaeva S.R. Matematicheskaya model' kupola, prednaznachennogo dlya ustraneniya utechek uglevodorodov [Mathematical Model of the Dome Designed to Eliminate Hydrocarbon Leaks]. *Neftgazovoe delo – Oil and Gas Business*, 2014, Vol. 12, No. 4, pp. 104-111. [in Russian].

4. Yapa P.D. Final Report Submitted to The Cooperative Institute for Coastal and Estuarine Environmental Technology (CICEET) *Project Title: A Module for NOAA's GNOME Model to Provide Capability to Simulate Deepwater Oil and Gas Spills*, 2003, pp. 1-18.

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.

6. Yapa P.D., Zheng L. Simulation of Oil Spills from Underwater Accidents I: Model Development. *Journal of Hydraulic Research, International Association of Hydraulic Research, The Netherlands*, 1997, Vol. 35, No. 5, pp. 673-688.

7. 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.

8. Shagapov V.Sh., Chiglinceva A.S., Rusinov A.A. O Mekhanizmah rosta gidratnoj obolochki na poverhnosti vsplyvayushchikh gazovykh puzyrkov [The Dynamics of a Multiphase Jet Stream, Taking into Account the Flow of the Surrounding Water]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Bulletin of Tomsk State University. Mathematics and Mechanics*, 2015, No. 3, pp. 73-86. [in Russian].

9. Chen F., Yapa P.D. Three-Dimensional Visualization of Multi-Phase (Oil/Gas/Hydrate) Plumes. *Environmental Modeling & Software*, 2004, No. 19, pp. 751-760.

Сведения об авторах

About the authors

Кильдибаева С.Р., канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры прикладной информатики и программирования, ФГБОУ ВО «БашГУ», филиал, г. Стерлитамак, Российская Федерация

S.R. Kildibaeva, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor of Informatics and Programming Department, FSBEI HE «BashSU», Branch, Sterlitamak, Russian Federation

e-mail: freya.13@mail.ru

Гималтдинов И.К., д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры физики, ФГБОУ ВО «УГНТУ», г. Уфа, Российская Федерация

I.K. Gimaltdinov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of Physics Department, FSBEI HE «USPTU», Ufa, Russian Federation

e-mail: iljas_g@mail.ru