

Определение критических параметров при распространении затопленной струи

С. Р. Кильдибаева^{1*}, И. К. Гималтдинов²

¹Башкирский государственный университет, Стерлитамакский филиал
Россия, Республика Башкортостан, 453103 г. Стерлитамак, проспект Ленина, 49.

²Уфимский государственный нефтяной технический университет
Россия, Республика Башкортостан, 450000 г. Уфа, улица Первомайская, 14.

*Email: freya.13@mail.ru

В работе проводится теоретический анализ критических параметров, определяющих высоты, на которых происходит качественное изменение течения струи: удельный импульс силы плавучести начинает превышать удельный импульс, приобретаемый струей вначале (превращается в плюс), начинается отделение пузырьков из струи, струя достигает нейтрального уровня плавучести. Рассматривается струя, состоящая из нефти и пузырьков газа, на которую действует течение окружающей воды. Полученные результаты тестировались на начальных параметрах системы, соответствующих эксперименту, траектория струи также сравнивалась с экспериментом.

Ключевые слова: затопленная струя, течение, критические параметры.

Постановка задачи и основные уравнения

Возникновение течения затопленных струй может иметь как естественный, так и техногенный характер. В случаях, когда в состав струи входят токсичные для окружающей среды компоненты (например, нефть) необходимо не только спрогнозировать траекторию распространения струи и ее скорость, но также определить ключевые критические параметры, которые могут охарактеризовать течение струи для последующего анализа.

Считаем, что на дне водоема существует источник истечения углеводородов (нефти и газа), с известными параметрами истечения. Также известны параметры окружающей среды. Введем следующие обозначения: r – радиус скважины, откуда поступает нефть; Q_o^e – объемный расход нефти; Q_g^e – объемный расход газа; T^e – начальная температура нефти и газа; T^w – температура воды; z^* – высота, на которой крепится купол.

Для моделирования течения затопленной струи будет использован интегральный лагранжевый метод контрольного объема, который был предложен в работах [1–2] и дополнен в работах [3–5]. Согласно методу струя представляется в виде последовательных элементарных контрольных объемов (КО), каждый из которых характеризуется

положением в пространстве, физическими характеристиками, соотношением компонент нефти и газа, входящих в объем. Данные параметры вычисляются на каждом шаге по времени, вследствие чего можно получить исчерпывающие данные относительно параметров струи в целом.

Основные уравнения, описывающие распространение струи запишутся следующим образом:

$$\frac{dM_w}{dt} = \rho_w Q_w, \quad \frac{dM_g}{dt} = 0, \quad \frac{dM_o}{dt} = 0,$$

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

$$\frac{d}{dt}(Mu) = 0, \quad \frac{d}{dt}(Mv) = 0,$$

$$\frac{d}{dt}[(M_w + M_o)w + M_g \cdot (w + w_b)] =$$

$$(\rho_w - \rho_l)\pi b^2 h(\alpha_w + \alpha_o)g + (\rho_w - \rho_g)\pi b^2 h \alpha_g g,$$

$$\vec{V} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}, \quad \rho_l = \alpha_w \rho_w + \alpha_o \rho_o,$$

$$Q_w = 2\pi b h \alpha \left| \vec{V} \right|, \quad \alpha = \sqrt{2} \left(0.057 + \frac{0.554 \sin \varphi}{E^2 Fr^2} \right), \quad Fr = \left| \vec{V} \right| \left(g \frac{\Delta \rho}{\rho_a} b \right)^{-1/2},$$

где M_i , ρ_i – масса, плотность компонент контрольного объема (КО), Q_w – объемный расход жидкости, которая вовлекается в струю, N и a_g – количество и радиус пузырьков; $i=o, g, w$ – индексы, которые соответствуют нефти, газу и воде.

Система уравнений, описанных выше позволяет вычислить следующие параметры струи: траектория и скорость течения струи, а также концентрации нефти, газа и воды в струе.

Критические параметры струи

Расстояние, на котором удельный импульс силы плавучести превысит удельный импульс, приобретаемый струей вначале, вычислится следующим образом [6]:

$$z_s = M_o^{3/4} / F_o^{1/2}. \quad (1)$$

где M_o – удельный поток импульса на устье, F_o – удельный поток плести:

$$M_o = (Q_o^e + Q_g^e) \cdot w_0, \quad F_o = (Q_o^e + Q_g^e) \cdot (g \Delta \rho / \rho_w).$$

В работах [7–9] экспериментальным путем определены характерные высоты, на которых начинается процесс отделения пузырьков газа из струи. Согласно работам эти высоты вычисляются по следующим соотношениям:

$$h_{r,j} = C_1 M_0^{1/2} / V_w, \quad (2)$$

где $M_0 = \pi R^2 V_0^2$ – кинематический импульс струи.

Согласно работам [8–9] высота, на которой начинается отделение пузырьков:

$$h_{sep} = \frac{5.1 B_1}{(V_w V^{2.4})^{0.88}}, \quad B_1 = g(Q_o^e + Q_g^e) \Delta \rho / \rho. \quad (3)$$

Согласно экспериментальным исследованиям при достижении нейтрального уровня плавучести z_n (плотность струи равна плотности окружающей воды) нефть и газ движутся, как отдельные капли и пузырьки [10–11]. Достижение струи нейтрального уровня плавучести зависит от ряда факторов, таких как стратификация окружающей среды, плотность нефти, глубина и начальная скорость струи.

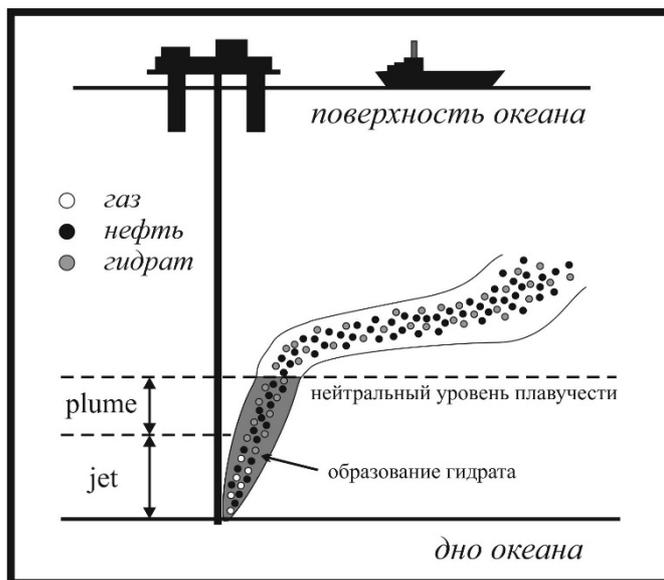


Рис. 1. Схема глубоководного разлива струи.

Результаты расчетов

При расчетах использовались следующие параметры системы: $r = 1.25$ см, глубина $z = 60$ см, объемные расходы нефти $Q_o^e = 10^{-5}$ м³/с и газа $Q_g^e = 10^{-5}$ м³/с, $P = 10^5$ Па, $\rho_w = 1000$ кг/м³, $\rho_o = 870$ кг/м³, $\rho_g = 1.2$ кг/м³, $\varphi = 90^\circ$, $u_w = 0.1$ м/с.

Расстояние, на котором удельный импульс силы плавучести превышает удельный импульс, приобретаемый струей вначале, составляет $z_s=0.0018$ м. Для определения высоты, на которой начинается отделение пузырьков под действием течения окружающей среды, использовались уравнения (2)–(3). Получены соответствующие значения, на которых начинается процесс отделения пузырькового ядра из струи: $h_{r,j} = 0.009$ м, $h_{sep} = 0.0085$ м. Расчетное значение, полученное методом ИЛМКО, для отделения пузырьков, составляет $h = 0.0098$ м. Таким образом, и для характерных высот, на которых начинается процесс отделения пузырькового ядра, есть удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными. Для рассмотренного случая нейтральный уровень плавучести достигается струей на высоте $z_n = 0.164218$ м.

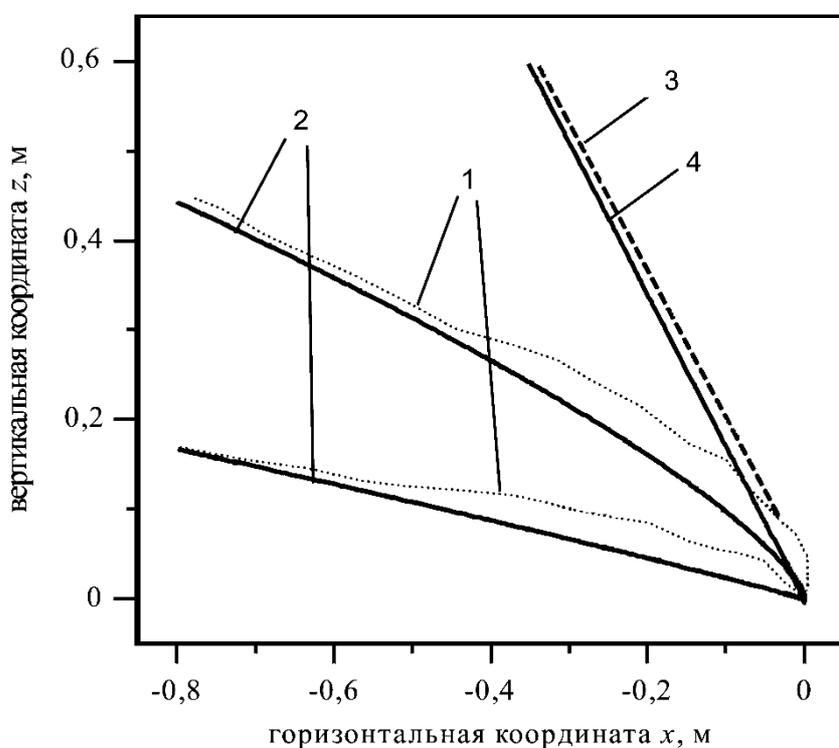


Рис. 2. Траектория струи и пузырьков, пунктирная линия соответствует эксперименту, сплошная – расчетам ИЛМКО.

Заключение

В работе рассмотрены расчеты параметров затопленной струи. Определены предельные критические значения параметров, определяющих высоты, на которых происходит качественное изменение течения струи: удельный импульс силы плавучести начинает превышать удельный импульс, приобретаемый струей вначале (превращается в плюм), начинается отделение пузырьков из струи, струя достигает нейтрального уровня плавучести.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-31-00264 мол_а).

Литература

1. 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, №5. – P. 673–688.
2. Yapa P. D., Dasanayaka L. K., Bandara U. C., Nakata K. A model to simulate the transport and fate of gas and hydrates released in deepwater // Journal of hydraulic research. – 2010. – Vol. 48, №5. – P. 559–572.
3. 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.
4. Кильдибаева С. Р., Гималтдинов И. К. Динамика многофазного струйного потока с учетом солености окружающей воды // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2018. – №6. – С. 197–211.
5. Кильдибаева С. Р., Гималтдинов И. К. Математическая модель затопленной струи с учетом влияния 3D течения окружающей воды // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математическое моделирование и программирование. – 2019. – Т. 12, №1. – С. 137–143.
6. Lee J. H. W., Chu V. H. Turbulent jets and plumes – a Lagrangian approach // Kluwer, 2003. 390 p.
7. Davidson M. J., Pun K. L. Weakly advected jets in crossflow // Journal of hydraulic research. – 1999. – Vol. 125, №1. – P. 47–58.
8. Socolofsky S. A., Adams E. E. Multi-phase plumes in uniform and stratified // Journal of hydraulic research. – 2002. – Vol. 40, №6. – P. 661–672.
9. Wright S. J. Buoyant jets in density-stratified crossflow // Journal of Hydraulic Engineering – 1984. – №110. – P. 643–656.
10. Yapa P. D., Zheng L., Nakata K. Modeling of underwater oil/gas jets and plumes // Journal of hydraulic engineering. – 1999. – Vol. 125, №5. – P. 481–491.
11. Rye H., Brandvik P. J., Reed M. Subsurface oil release field experiment-observations and modeling of subsurface plume behavior // Proceedings, 19th arctic and marine oil spill program (AMOP), technical seminar. – 1996. – №2. – P. 1417–1435.

Статья рекомендована к печати кафедрой прикладной информатики и программирования СФ БашГУ (канд. физ.-мат. наук, доц. М. К. Хасанов)

Determination of critical parameters in the propagation of a submerged jet

S. R. Kildibaeva^{1*}, I. K. Gimaltdinov²

¹*Bashkir State University, Sterlitamak Branch*

49 Lenin Street, 453103 Sterlitamak, Republic of Bashkortostan, Russia.

²*Ufa State Oil Technical University*

14 Pervomayskaya Street, 450000 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.

**Email: freya.13@mail.ru*

A theoretical analysis of critical parameters determining the heights at which a qualitative change in the flow of the jet takes place is carried out: the specific impulse of the buoyancy force begins to exceed the specific impulse acquired by the jet at the beginning, the separation of bubbles from the jet begins, the jet turns into a plume. A jet consisting of oil and gas bubbles on which the flow of the surrounding water acts is considered. The results obtained were tested on the initial parameters of the system, corresponding to the experiment, and the jet trajectory was also compared with the experiment.

Keywords: submerged jet, flow, critical parameters.