

УДК 532.546:536.421

РАСЧЕТ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И КИНЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУИ

Гималтдинов И.К., Кильдибаева С.Р., Ахмадеева Р.З.

*Стерлитамакский филиал ФГБОУ ВПО «Башкирский государственный университет»,
Стерлитамак, e-mail: freya.13@mail.ru, Akhmadeevarz@mail.ru*

В статье рассматриваются две математические модели многофазных затопленных струй. Актуальность изучения затопленных струй связана с проблемой охраны прибрежной и шельфовой зоны морей и океанов от загрязнений, вызванных утечкой углеводородов. В работе проведен расчет теплофизических и кинетических параметров затопленной струи, получены графики зависимости температуры и скорости от вертикальной координаты. Особенное внимание в исследовании струи уделено процессу охлаждения струи из-за «захвата» окружающей воды. Вследствие того, что струя охлаждается до равновесной температуры гидратообразования, определены характерные координаты, выше которых пузырьки газа начинают покрываться газогидратной коркой. С ростом вертикальной координаты увеличение скорости струи замедляется, что вызвано увеличением массы струи. Рассмотренные модели дают аналогичные результаты.

Ключевые слова: затопленная струя, разлив нефти в шельфе

CALCULATION OF THERMAL AND KINETIC PARAMETERS SUBMERGED JET

Gimaltdinov I.K., Kildibaeva S.R., Akhmadeeva R.Z.

*Sterlitamak branch of Bashkir State University, Sterlitamak,
e-mail: freya.13@mail.ru, Akhmadeevarz@mail.ru*

In article are considered two mathematical models of multiphase submerged jets. Multiphase jet consists of oil and gas bubbles. Actuality of studying submerged jets connected with the problem of protection of the coastal and offshore areas of the seas and oceans from pollution caused by leaking hydrocarbons. In this paper we calculated the thermal and kinetic parameters of the submerged jet, obtained plots of the temperature and velocity of the vertical coordinate. Particular attention is paid to the study of the jet cooling process associated with the «capture» of the surrounding water. Because the stream is cooled to the hydrate equilibrium temperature, determined by the characteristic location above which the gas bubbles are starting gas hydrate coated crust. With the growth of the vertical coordinate increasing jet velocity slows down, which is caused by the increase in mass of the jet. These models give similar results. The second model is more accurate three-dimensional coordinate system is considered, the angle at which the liquid flows may vary.

Keywords: submerged jet, the oil spill in the shelf

Затопленная струя жидкости является классическим объектом исследования авторемодельных асимптотических решений [1]. Несмотря на большой интерес к струйным потокам со стороны исследователей, некоторые вопросы учета взаимодействия струй с окружающей более плотной жидкой средой до сих пор четко не проработаны [5].

Изучение затопленных потоков весьма актуально в рамках проблемы охраны прибрежной и шельфовой зоны морей от загрязнения [6]. Возможные масштабы загрязнения водоемов зависят от поля скоростей самих водоемов, глубины залегания трубопроводов, размеров и характера разрывов, а также от интенсивности выбросов и свойств этих жидкостей [2]. Моделирование струи используется для создания математических моделей устройств, предназначенных для сбора нефтепродуктов при их разливе [3,4].

При истечении струи в жидкость изменяются следующие параметры: скорость течения, температура, концентрация примеси, при этом возникают вихри, движущиеся вдоль и поперек потока, и между соседними струями происходит обмен конечными массами. На границе двух струй

формируется область конечной толщины с непрерывным распределением скорости, температуры и концентрации примеси.

§1. Приближенная модель течения затопленной струи

Рассмотрим следующую задачу. Пусть на дне океана из устья скважины вытекает смесь нефти и газа. Предположим, что известны объемные расходы, теплофизические параметры нефти, газа и окружающей воды. Требуется произвести расчет параметров многофазной струи.

Рассмотрим распределение температуры нефти и газа в струе. Предположим, что капли нефти, пузырьки газа и вода, вовлекаемая в струю, имеют одинаковые температуру, скорость и траекторию в каждом сечении струи. Ось z направлена вертикально вверх. При расчетах используем методику, предложенную в [7].

Начальная площадь поперечного сечения струи:

$$S_0 = \frac{\pi D^2}{4},$$

где $D = 2B_0$, B_0 – радиус скважины.

Скорость течения смеси определим как

$$V_o = \frac{Q_o}{S_o}, \quad Q_o = Q_o^o + Q_o^g,$$

здесь Q_o^o , Q_o^g – начальные объемные расходы нефти и газа.

Удельный поток импульса на устье: $M_o = Q_o V_o$.

Сила плавучести на единицу массы представляется в виде:

$$g'_o = g \cdot \frac{\rho_w - \rho}{\rho},$$

где ρ_w – плотность окружающей воды; ρ – плотность истекающей смеси; g – ускорение свободного падения.

Удельный поток плавучести:

$$F_o = g'_o \cdot Q_o.$$

Расстояние, на котором удельный импульс силы плавучести превышает удельный импульс, приобретаемый струей вначале:

$$l_s = M_o^{3/4} / F_o^{3/4}.$$

Время для перемещения объема жидкости на расстояние z :

$$t = \left(\frac{3\alpha}{4} \right)^{2/3} \cdot \left(\frac{\pi}{F_o} \right)^{1/3} \cdot z^{4/3}.$$

Радиус струи на высоте z представляется в виде

$$B = \left(\frac{3,4\alpha z}{B_o} + 1 \right) B_o.$$

Скорость подъема струи в сечении z :

$$w = \sqrt{M / \pi B^2}.$$

Объемный расход представим в следующем виде: $Q = \pi w B^2$.

Таким образом, можно определить температуру в любом сечении струи, считая, что температура в сечении струи одинаковая и зависит только от координаты z :

$$T_{jet} = T_w + (T_o - T_w) \frac{Q_o}{Q},$$

где T_w , T_o – температуры окружающей воды и вытекающей жидкости; Q_o – начальный объемный расход.

Далее представлены зависимости параметров струи от высоты z , полученные на основе численного решения. Для параметров расчета приняты следующие значения:

$$B_o = 1,7 \text{ м}, \quad T_w = 4^\circ\text{С}, \quad T_o = 80^\circ\text{С},$$

$$Q_o = 1 \text{ м}^3/\text{с}, \quad \alpha = 0,149.$$

На рис. 1 представлена зависимость температуры струи от вертикальной координаты z . Видно, что на расстоянии $z = 10$ м температура струи остывает до значения $T_{jet} = 7^\circ\text{С}$. При давлении 150 атм. равновесная температура гидратообразования составляет 21°С . Температура струи опускается ниже равновесной при $z = 2,4$ м, что говорит о том, что выше данной координаты пузырьки газа начинают покрываться газогидратной коркой.

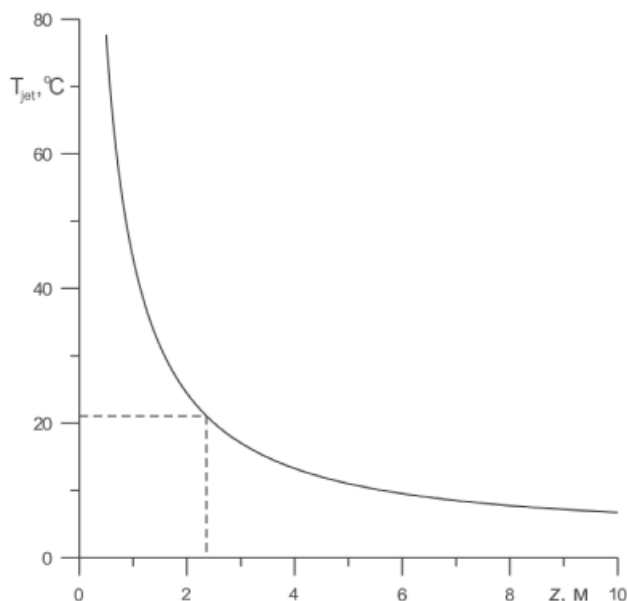


Рис. 1. Зависимость температуры струи от вертикальной координаты для 1 модели

На рис. 2 представлена зависимость скорости струи от высоты z . Видно, что до значения $z = 6$ м скорость струи растет, затем

происходит уменьшение скорости струи из-за утяжеления струи вследствие «вовлекаемой» в струю окружающей воды.

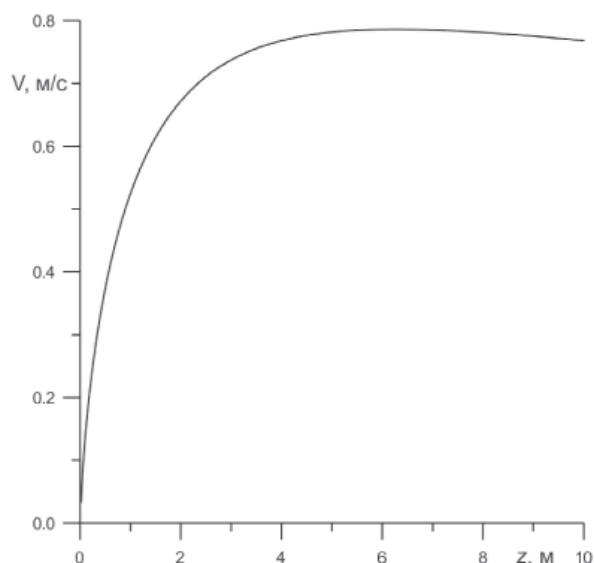


Рис. 2. Зависимость скорости струи от вертикальной координаты для 1 модели

§2. Численная модель расчета параметров струи

Идея модели основана на методе конечных объемов и описана в [7]. Считается, что струя состоит из последовательных (u_k, v_k, ω_k) , при этом скорость определяется как (x_k, y_k, z_k)

$$V_k = \sqrt{u_k^2 + v_k^2 + \omega_k^2},$$

здесь (u_k, v_k) – горизонтальные составляющие скорости, (ω_k) вертикальная составляющая скорости.

Угол между осью струи и горизонтальной плоскостью обозначим как φ_k , а угол между осью x и проекцией оси струи на горизонтальную плоскость через θ_k .

Радиус струи – B_k , высота элемента в данный момент времени – H_k , масса элемента

$$M_k = \rho_k \pi b_k^2 h_k.$$

Дополнительно используют следующие характеристики среды: температура T_k и плотность ρ_k .

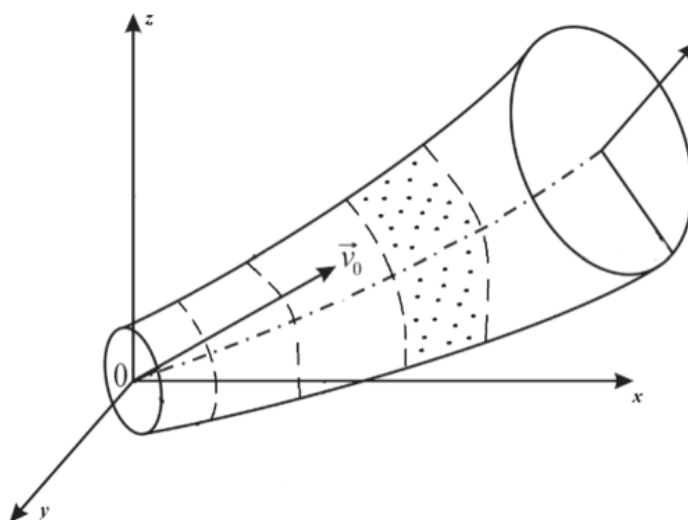


Рис. 3. Схема метода конечных объемов

Применяя уравнения сохранения массы, горизонтального и вертикального импульсов, энергии, а также учитывая увеличение массы на каждом шаге за счет увлечения воды и вихревого течения, получаем следующую численную модель. В этих уравнениях пренебрегаем сопротивлением окружающей воды и не учитываем скорость окружающей среды, считая ее покоящейся.

$$M_{k+1} = M_k + \Delta M_k;$$

$$u_{k+1} = \frac{M_k u_k}{M_{k+1}}; \quad v_{k+1} = \frac{M_k v_k}{M_{k+1}};$$

$$\omega_{k+1} = \frac{M_k \omega_k + M_{k+1} \left(\frac{\Delta \rho}{\rho} \right)_{k+1} g \Delta t}{M_{k+1}};$$

$$V_{k+1} = \sqrt{u_{k+1}^2 + v_{k+1}^2 + \omega_{k+1}^2};$$

$$H_{k+1} = \frac{V_{k+1}}{V_k} H_k; \quad B_{k+1} = \sqrt{\frac{M_{k+1}}{\rho_{k+1} \pi H_{k+1}}};$$

$$T_{k+1} = \frac{M_k T_k + \Delta M_k T_0}{M_{k+1}};$$

$$x_{k+1} = x_k + u_{k+1} \Delta t; \quad y_{k+1} = y_k + v_{k+1} \Delta t;$$

$$z_{k+1} = z_k + \omega_{k+1} \Delta t.$$

Начальные условия:

$$u_0 = V_0 \cos \varphi_0 \cos \theta_0; \quad v_0 = V_0 \cos \varphi_0 \sin \theta_0;$$

$$\omega_0 = V_0 \sin \varphi_0;$$

$$B_0 = H_0; \quad \Delta t_0 = 0,1 \frac{H_0}{V_0}.$$

В данном случае предполагаем, что приход массы есть постоянная величина на каждом шаге и определяется как доля от массы элемента на предыдущем шаге. В дальнейшем модель предполагается улучшить за счет расчета поступающей массы, учитывая захват воды за счет смешивания, увлечения и вихревого течения самого потока.

Далее представлены зависимости параметров струи от высоты z , полученные на основе представленного численного решения. Для параметров расчета приняты следующие значения: $V_0 = 0,3$ м/с, $\varphi_0 = 90^\circ$, $\theta_0 = 0^\circ$, $B_0 = 0,2$ м, $T_{0cp} = 4^\circ\text{C}$, $T_{0ст} = 80^\circ\text{C}$.

На рис. 4 представлена зависимость температуры струи от координаты z . Температура струи опускается с 80°C до 4°C , т.е. до температуры окружающей среды. При $z = 3$ м температура струи остывает до равновесной температуры гидратообразования, что говорит о том, что выше данной координаты пузырьки газа начинают покрываться газогидратной коркой.

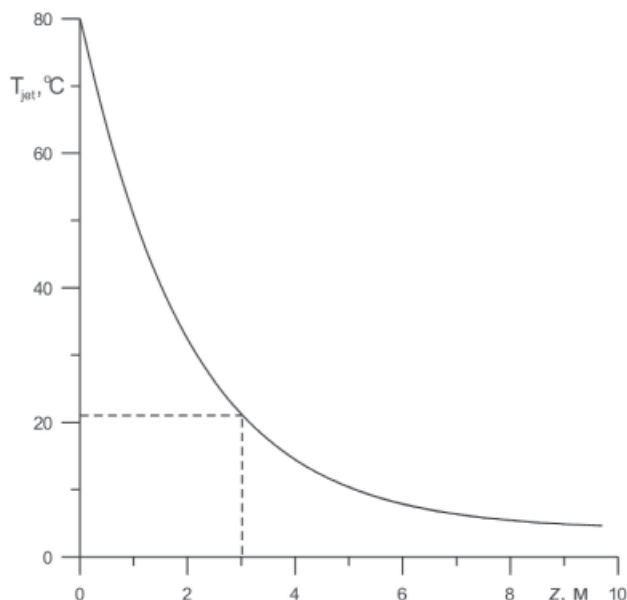


Рис. 4. Зависимость температуры струи от вертикальной координаты для 2 модели

На рис. 5 приведена зависимость скорости струи от вертикальной координаты.

При $z = 4,5$ м скорость струи становится постоянной.

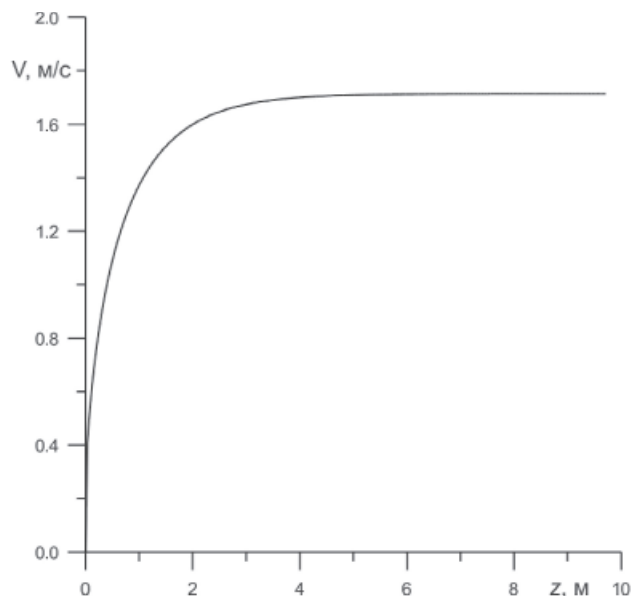


Рис. 5. Зависимость скорости струи от вертикальной координаты для 2 модели

Выводы

В работе представлены две модели затопленных струй, проведены расчеты теплофизических и кинематических параметров, получены графики зависимости температуры и скорости от вертикальной координаты. Вследствие «захвата» окружающей воды струей происходит охлаждение струи до температуры окружающей среды. Для каждой модели определены характерные координаты, выше которых наступает условие гидратообразования. С ростом вертикальной координаты увеличение скорости струи замедляется, что вызвано увеличением массы струи.

Список литературы

1. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. – М.: ЭКОЛИТ, 2011. – 720 с.
2. Гильманов С.А., Шабаетв Р.Б. Экспериментальное исследование струй положительной плавучести в воде // Современные проблемы физики и математики. – 2004. – Т. 2. – С. 44–48.
3. Кильдибаева С.Р. Моделирование купола-сепаратора при разливе нефти в шельфе // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10 (часть 5). – С. 1045–1050.
4. Кильдибаева С.Р., Гималтдинов И.К. Математическая модель наполнения купола нефтью. // Математическое моделирование в естественных науках: материалы XXII Всероссийской школы-конференции молодых ученых и студентов (Пермь, Пермский национальный политехнический университет, 2–5 октября 2013 г.), – Пермь, 2013. – С. 79–80.
5. Маликов З.М., Стасенко А.Л. Асимптотика затопленной струи и процессы переноса в ней // Труды МФТИ. Аэрогидромеханика. – 2013. – Т. 5, № 2. – С. 59–68.
6. Мельников Н.Н., Калашник А.И. Шельфовые нефтегазовые разработки западного сектора российской Арктики: геодинамические риски и безопасность // Газовая промышленность. – 2011. – № 661. – С. 46–55.

7. Lee J.H.W., Chu V.H. Turbulent jets and plumes – a Lagrangian approach. Kluwer Academic Publishers, 2003. – 390 p.

References

1. Abramovich G.N. Teoriya turbulentykh struy. M.: EKOLIT, 2011. 720 p.
2. Gilmanov S.A., Shabaev R.B. Jeksperimentalnoe issledovanie struj položitelnoj plavuchesti v vode. *Sovremennyye problem fiziki i matematiki*, 2004, T. 2, pp. 44–48.
3. Kildibayeva S.R. Modelirovaniye kupola-separatora pri razlive nefiti v shelfe // *Fundamentalnyye issledovaniya*. 2013. no. 10 (chast 5). pp. 1045–1050.
4. Kildibayeva S.R., Gimaltidinov I.K. Matematicheskaya model napolneniya kupola neftyu. // *Matematicheskoye modelirovaniye v yestestvennykh naukakh: materialy XXII Vserossiyskoy shkoly-konferentsii molodykh uchenykh i studentov* (Perm, Permskiy natsionalnyy politekhnicheskiy universitet, 2-5 oktyabrya 2013g.), Perm, 2013. pp. 79–80.
5. Malikov Z.M., Stasenko A.L. Asimptotika zatoplennoj strui i process perenosa v nej. *Trudy MFTI. Ajerogidromehaniка*, 2013, T. 5, no. 2, pp. 59–68.
6. Melnikov N.N., Kalashnik A.I. Shelfovye neftegazovye razrabotki zapadnogo sektora rossijskoj Arktiki: geodinamicheskie riski i bezopasnost. *Gazovaya promyshlennost*, 2011, no. 661, pp. 46–55.
7. Lee J.H.W., Chu V.H. Turbulent jets and plumes – a Lagrangian approach. Kluwer Academic Publishers, 2003. 390 p.

Рецензенты:

Михайлов П.Н., д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедры «Алгебра и геометрия» Стерлитамакского филиала, ФГБОУ ВПО «Башкирский государственный университет», г. Стерлитамак;
 Мустафина С.А., д.ф.-м.н., профессор, заведующая кафедры «Математическое моделирование», декан физико-математического факультета Стерлитамакского филиала, ФГБОУ ВПО «Башкирский государственный университет», г. Стерлитамак.
 Работа поступила в редакцию 30.12.2013.