

УДК 532.546:536.421

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ В ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУЕ

Кильдибаева С.Р.

Стерлитамакский филиал ФГБОУ ВПО «Башкирский государственный университет», Стерлитамак, Россия (453100 Стерлитамак, Проспект Ленина 37), e-mail: freya.13@mail.ru

В статье рассматривается совместная миграция капель нефти и пузырьков газа в затопленной струе. Проблема изучения теплофизических характеристик затопленной струи тесно связана с защитой Мирового океана от загрязнения углеводородами (нефть и газ). Такого рода утечки могут возникать при разработке шельфа. Одним из наиболее ярких примеров загрязнения океана нефтепродуктами является разлив нефти в Мексиканском заливе. Особую роль занимает процесс гидратообразования на поверхности пузырька. Моделирование миграции капель нефти и пузырьков газа является начальным этапом моделирования устройства, предназначенного для сбора углеводородов. Пузырьки газа, превращающиеся в частицы гидрата, могут помешать зафиксировать устройство для сбора углеводородов. В статье рассматриваются два основных подхода для моделирования затопленных струй, определяются основные характеристики: температура и скорость струи.

Ключевые слова: миграция пузырьков и капель, затопленная струя, гидрат, Мексиканский залив, разлив нефти в шельфе.

MODELING OF THE FLOW OF HYDROCARBONS IN THE SUBMERGED JET

Kildibaeva S.R.

Sterlitamak branch of Bashkir State University, Sterlitamak, Russia (453100 Sterlitamak, Prospekt Lenina 37), e-mail: freya.13@mail.ru

The article considers the joint migration of oil droplets and gas bubbles in the submerged jet. The problem of studying the thermal characteristics of a submerged jet is closely linked to the protection of the oceans from pollution by hydrocarbons (oil and gas). This kind of leakage can occur when developing shelf. One of the most striking examples of ocean pollution oil is the oil spill in the Gulf of Mexico. A special role does the process of hydrate formation on the surface of the bubble. Simulation of migration oil droplets and gas bubbles is the initial stage of modeling device for collecting hydrocarbons. Gas bubbles turning into hydrate particles can prevent fix device for collecting hydrocarbons. The article discusses two basic approaches for modeling of submerged jets, identifies the main characteristics of the temperature and velocity of the jet.

Keywords: migration of bubbles and drops, submerged jet, hydrate, The Gulf of Mexico, oil spill in the shelf.

Разработка газовых и нефтяных месторождений в шельфе неминуемо многократно увеличивает риски возникновения аварийных ситуаций и как следствие загрязнение Мирового океана нефтепродуктами. При этом очень важную роль играет как способ устранения аварий такого рода, так и изучение миграции углеводородов, изменение их теплофизических характеристик. Актуальность изучения данной тематики тесно связана с проблемой охраны прибрежной и шельфовой зоны морей и океанов от загрязнений [4], вызванных утечкой нефти и газа. Большой вклад в изучение затопленных струй внес Г.Н. Абрамович в работе [1], в которой описаны автомодельные асимптотические решения [1].

Постановка задачи. Пусть на дне водоема существует источник истечения углеводородов (нефть и газ) с известной температурой и объемным расходом. Считаем, что известны теплофизические характеристики окружающей воды и углеводородов. Необходимо получить зависимость каждого параметра многофазной струи от вертикальной координаты. Считаем, что миграция углеводородов происходит в рамках затопленной струи.

Для получения модели, описывающей течения углеводородов, примем ряд допущений. Считаем, что капли нефти, пузырьки газа и вода, вовлекаемая в струю, имеют одинаковые температуру, скорость и траекторию в каждом сечении струи. Капли нефти не слипаются, не деформируются. Ось z направлена вертикально вверх. В теоретической части особое внимание в исследовании струи уделено процессу охлаждения струи из-за «захвата» окружающей воды.

§1 Приближенная модель

Методика расчета предложена в [5]. Результаты, которые получены на основе этой модели, носят приближенный характер.

Зная начальный радиус скважины, из которой происходит истечение углеводородов, получим начальную площадь поперечного сечения струи: $S_0 = \pi(B_0)^2$.

Скорость течения смеси определим как $V_o = \frac{Q_0}{S_0}$, $Q_0 = Q_0^o + Q_0^g$, здесь Q_0^o , Q_0^g – начальные объемные расходы нефти и газа.

Удельный поток импульса на устье скважины выразится через скорость течения и объемный расход смеси: $M_o = Q_0 V_o$.

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: $F_o = g'_o \cdot Q_0$.

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 :

$$T_{jet} = T_w + (T_0 - T_w) \frac{Q_0}{Q},$$

где T_w , T_0 – температуры окружающей воды и вытекающей жидкости, Q_0 – начальный объемный расход.

§2 Численная модель расчета параметров струи

Идея модели основана на методе конечных объемов и описана в [5]. Считается, что струя состоит из последовательности элементов, каждый из которых обладает набором следующих характеристик – радиус, высота, скорость, масса и координаты.

На k шаге элемент струи располагается в точке (x_k, y_k, z_k) со следующими компонентами скорости (u_k, v_k, w_k) , при этом скорость определяется как $V_k = \sqrt{u_k^2 + v_k^2 + w_k^2}$ здесь (u_k, v_k) – горизонтальные составляющие скорости, (w_k) вертикальная составляющая скорости. Для простоты полагаем, что горизонтальные составляющие скорости струи нулевые.

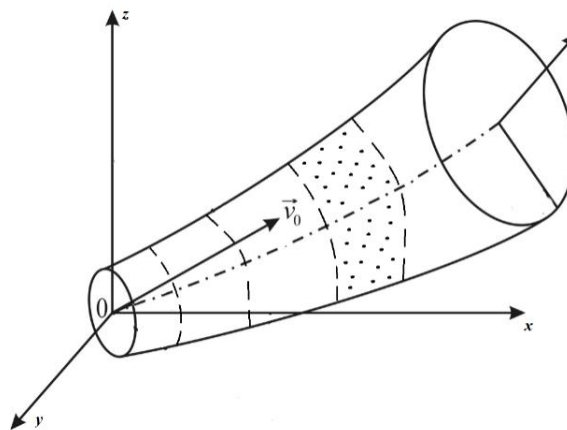


Рис.1 Схема метода конечных объемов

Для моделирования струи разобьем её на элементы – контрольные объемы, обладающие координатами и значениями радиуса струи – b_k , высота элемента в данный момент времени – h_k .

Тогда масса контрольного объема определится следующим образом:

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

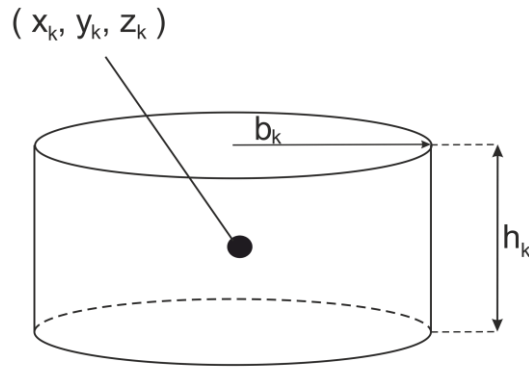


Рис. 2 Схема контрольного объема

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

Законы сохранения масс для воды, газа, нефти и гидрата в контрольном объеме (КО):

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

где $m_w = \pi b_k^2 h_k \alpha_w \rho_w^0$, $m_g = \pi b_k^2 h_k \alpha_g \rho_g^0$, $m_o = \pi b_k^2 h_k \alpha_o \rho_o^0$, $m_h = \pi b_k^2 h_k \alpha_h \rho_h^0$, α_i – объемное содержание i -й фазы, ρ_i^0 – плотность i -й фазы.

Закон сохранения числа частиц в контрольном объеме :

$$\frac{dN}{dt} = -N^f.$$

Масса всего контрольного объема (КО):

$$\frac{dm}{dt} = \rho_w Q_w - \rho_{com} Q^f.$$

Закон сохранения импульсов:

$$\frac{d(mu)}{dt} = u_a \rho_w Q_w - u \rho_{com} Q^f,$$

$$\frac{d(mv)}{dt} = v_a \rho_w Q_w - v \rho_{com} Q^f,$$

$$\frac{d(mw)}{dt} = w_a \rho_w Q_w - w \rho_{com} Q^f + (\rho_a - \rho) g \pi b_k^2 h_k.$$

Закон сохранения энергии для контрольного объема (КО):

$$\frac{d}{dt}(mcT) = c_w T_w \rho_w Q_w + J_h l.$$

$$(HVEL)_{k+1} = (u_{k+1}^2 + v_{k+1}^2)^{1/2},$$

$$V_{k+1} = (u_{k+1}^2 + v_{k+1}^2 + w_{k+1}^2)^{1/2}$$

Толщина и радиус контрольного объема на следующем шаге:

$$h_{k+1} = \frac{V_{k+1}}{V_k} h_k, \quad b_{k+1} = \left(\frac{M_{k+1}}{\rho_{k+1} \pi h_{k+1}} \right)^{1/2}.$$

Направление струи: $\sin \phi_{k+1} = \left(\frac{w}{V} \right)_{k+1}, \quad \cos \phi_{k+1} = \left(\frac{HVEL}{V} \right)_{k+1},$

$$\sin \theta_{k+1} = \left(\frac{v}{HVEL} \right)_{k+1}, \quad \cos \theta_{k+1} = \left(\frac{u}{HVEL} \right)_{k+1}.$$

Координата контрольного объема на следующем шаге:

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= x_k + u_{k+1} \Delta t, \\ y_{k+1} &= y_k + v_{k+1} \Delta t, \\ z_{k+1} &= z_k + w_{k+1} \Delta t, \\ \Delta s_{k+1} &= V_{k+1} \Delta t. \end{aligned}$$

Начальные и граничные условия:

$$u_0 = V_0 \cos \varphi_0 \cos \theta_0, \quad v_0 = V_0 \cos \varphi_0 \sin \theta_0, \quad \omega_0 = V_0 \sin \varphi_0$$

$$H_0 = B_0, \quad \Delta t_0 = 0.1 \frac{H_0}{V_0}.$$

$$Q_w = 2\pi \alpha_w b_k h_k \Delta U \Delta t,$$

$$\alpha_w = \sqrt{2} \left(0.057 + 0.554 \sin \phi_k / F_l^2 \right) \left(\frac{2V_k}{\Delta U + V_k} \right).$$

Выводы

В работе представлены две модели затопленных струй. Приведена методика расчета теплофизических и кинематических параметров. Вследствие «захвата» окружающей воды струей происходит охлаждение струи до температуры окружающей среды.

Список литературы

1. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. М.: ЭКОЛИТ, 2011.– 720 с.
2. Гильманов С.А., Шабаев Р.Б. Экспериментальное исследование струй положительной плавучести в воде // Современные проблемы физики и математики. – 2004. – Т. 2. – С. 44-48.
3. Маликов З.М., Стасенко А.Л. Асимптотика затопленной струи и процессы переноса в ней // Труды МФТИ. Аэрогидромеханика. – 2013. – Т. 5, № 2. – С. 59-68.
4. Мельников Н.Н., Калашник А.И. Шельфовые нефтегазовые разработки западного сектора российской Арктики: геодинамические риски и безопасность // Газовая промышленность. – 2011. – № 661. – С. 46-55.
5. Lee J.H.W., Chu V.H. Turbulent jets and plumes – a Lagrangian approach. Kluwer Academic Publishers, 2003. – 390 p.

Рецензенты:

Гималтдинов И.К., д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой «прикладная информатика и программирование» Стерлитамакского филиала ФГБОУ ВПО «Башкирский государственный университет», г.Стерлитамак.

Мустафина С.А., д.ф.-м.н., профессор, заведующая кафедрой «математическое моделирование», декан физико-математического факультета Стерлитамакского филиала ФГБОУ ВПО «Башкирский государственный университет», г.Стерлитамак.