

УДК 532.546:536.421

МОДЕЛИРОВАНИЕ КУПОЛА-СЕПАРАТОРА ПРИ РАЗЛИВЕ НЕФТИ В ШЕЛЬФЕ

Кильдибаева С.Р.

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

В статье рассматривается математическая модель купола-сепаратора, предназначенная для ликвидации разлива нефти при разработке месторождений в шельфе. Тема особенно актуальна в связи с растущим интересом к добыче сырья в шельфе. Установка купола происходит непосредственно над местом утечки углеводородов, в несколько этапов. На первом этапе решается задача о всплытии капли нефти внутри купола, на втором этапе происходит процесс заполнения купола нефтью. Определено изменение температуры струи от вертикальной координаты и её влияние на газовые пузырьки. Исследован процесс заполнения купола нефтью, определено время полного заполнения купола нефтью. Исследовано влияние тепловых потоков, влияющих на температуру слоев внутри купола, получена зависимость температуры слоев нефти и дизеля от времени. Получены зависимости высот нефти и дизеля внутри купола.

Ключевые слова: купол-сепаратор, разлив нефти в шельфе, затопленная струя, тепловые потоки

MODELING DOME-SEPARATORS FOR OIL SPILLS ON THE SHELF

Kildibaeva S.R.

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

In this article we consider a mathematical model of the dome-separator for oil spill response in the development of deposits on the shelf. Theme is particularly relevant due to the growing interest in the raw materials extraction to the shelf. Installation of the dome is directly over the leak of hydrocarbons in several stages. In the first step we solve the problem of the emersion of oil droplets inside the dome, the second step is the process of filling the dome with oil. The change in temperature of the vertical coordinates of the jet and its influence on the gas bubbles. The process of filling the dome with oil, determined the time of the dome is full of oil. Obtained the influence of heat flows affecting the temperature of the layers inside the dome, the dependence of the temperature of layers of oil and diesel on the time. We obtain the dependence of the heights of oil and diesel in the dome.

Keywords: dome-separator, the oil spill in the shelf, submerged jet, heat flow

В рамках современного научно-технологического прогресса объемы потребления углеводородов приобретают огромные масштабы, что приводит к их уменьшению в рамках материковых месторождений. Однако их истощение способствует поиску новых нетрадиционных способов добычи углеводородов. Одним из наиболее развивающихся инновационных направлений в этой области является разработка газовых и нефтяных месторождений в шельфовой зоне океанов.

Наряду с введением методов разработки таких месторождений немаловажную роль играет проблема разработки качественной и эффективной модели, способствующей ликвидации последствий техногенных аварий, вызванных разработкой шельфа.

Один из возможных вариантов устранения аварий в шельфе рассматривается в этой статье. Схема купола-сепаратора и процесс его установки приводится на рис. 1.

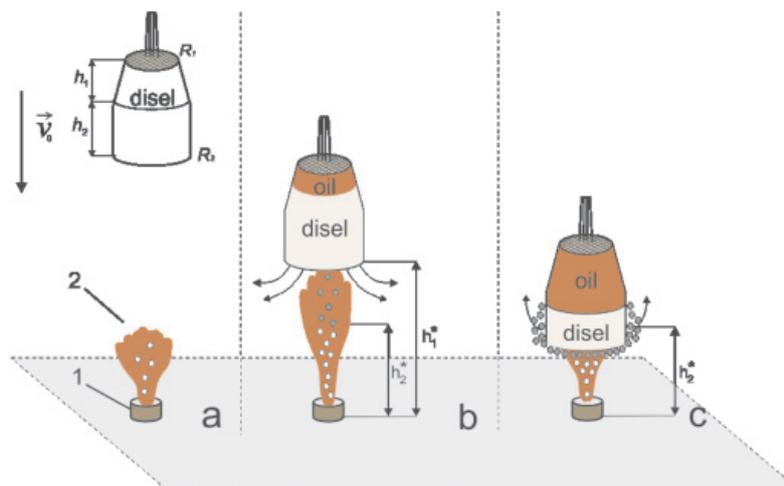


Рис. 1. Процесс установки купола-сепаратора, v_0 – скорость опускания купола, h_1, h_2 – высота, на которой открывается нижнее основание купола, h_1^*, h_2^* – характерная высота, выше которой газовые пузырьки покрываются гидратной коркой

Купол имеет следующие размеры: $R_1 = 4$ м – радиус верхнего основания, $R_2 = 12$ м – радиус нижнего основания, $h_1 = 3$ м – высота верхней части купола, $h_2 = 9$ м – высота цилиндрической части купола.

Физическая модель и процесс установки

Пусть на дне океана из скважины вытекают нефть и газ. Будем полагать, что известны теплофизические параметры нефти и газа, окружающей воды, а также объемные дебиты нефти и газа. Установка купола происходит непосредственно над местом утечки углеводородов, в несколько этапов.

Термобарические условия на глубине 1500 м являются идеальными для образования твердых кристаллических веществ – гидратов. Известно, что для конструкций в виде купола газовые гидраты могут придать нежелательную плавучесть, вследствие чего во избежание процесса гидратообразования перед установкой на поверхности океана в купол закачивают теплый дизель. Купол начинают опускать с некоторой постоянной скоростью (рис. 1, а). На расстоянии от дна океана происходит открытие нижнего основания купола, после чего нефть в виде капель начинает накапливаться внутри купола, вытесняя при этом дизель. Будем полагать, что весь объем выбрасываемой из скважины нефти «попадает» в купол. Для определения температуры струи используем соотношение, предложенное в [5]. Отметим, что струей происходит процесс «захвата» воды [1], что будет способствовать понижению температуры в струе и на высоте h_1^* , пузырьки метана начнут покрываться газогидратной коркой. Таким образом, выше некоторой высоты h_2^* (рис. 1, б) пузырьки газа будут превращаться в частицы гидрата, при этом плотность частиц гидрата больше плотности солянки, вследствие чего при установке купола до высоты от дна в купол из струи через дизель будут проникать только капли нефти. Будем полагать, что образующиеся при этом частицы гидрата вместе с потоком воды, увлекаемой струей, омывают открытое нижнее основание купола. При дальнейшей установке купола, когда нижнее основание купола опускается ниже высоты h_2 , в купол начинает проникать газ (рис. 1, в). В данной статье рассматриваемый купол зафиксирован на высоте h_1 так, что в куполе накапливается только нефть. После процесса полного заполнения купола нефтью подключается трубка для откачки нефти.

Температуру в соответствующем сечении струи определяем следующим образом:

$$T = T_w + (T_0 - T_w)V_0/V, \quad (1)$$

где T_w , T_0 – соответственно температуры окружающей воды и вытекающей из скважины нефти (и газа), V_0 – начальный объемный расход из скважины, $V = \pi w B^2 z$ – объемный расход, определяется через значение скорости струи $w = \sqrt{M/\pi B^2}$ и её радиуса $B = (3,4\alpha z/B_0 + 1)B_0$, соответствующие координате z ; M – удельный импульс, B_0 – начальный радиус [1].

Равновесная температура T^* гидратообразования при давлении 150 атм. составляет 21°C , таким образом, если температура в струе будет равной или ниже данной температуры, пузырьки метана будут покрываться гидратной коркой. Все расчеты в данной статье проводятся для следующих параметров: температура окружающей воды $T = 4^\circ\text{C}$, объемный расход нефти $V_0^o = 0,8 \text{ м}^3/\text{с}$, начальная температура в устье скважины $T_0 = 80^\circ\text{C}$. На рис. 2 приведено распределение струи, из которого видно, что на расстоянии 2,4 м от дна температура струи становится равной T^* и газовые пузырьки превращаются в частицы гидрата.

Накопление нефти в куполе

Первый этап связан с проникновением капель нефти внутрь купола. Этот этап завершается, когда капли нефти достигли верхнего основания купола. Запишем уравнения сохранения масс для нефти и дизеля в куполе. Будем полагать, что нефть, вытекающая из скважины, полностью накапливается в куполе, а дизель «вытесняется» нефтью:

$$\frac{dM_o}{dt} = m_o;$$

$$\frac{dM_d}{dt} = -m_{out};$$

$$m_{out} = V_0^o \cdot \rho_d,$$

где $m_o = V_0^o \rho_o$ – массовый расход нефти; m_{out} – массовый расход «вымещающего» дизеля.

Скорость всплытия капли нефти определяем из уравнения импульсов в безынерционном приближении:

$$\left(\frac{4}{3} \cdot \pi a_o^3 \rho_d^o - m_o^{dr}\right)g - f = 0, \quad (2)$$

где $m_o^{dr} = \frac{4}{3} \cdot \pi a_o^3 \rho_o^o$ – масса капли нефти; g – ускорение свободного падения;

$f = \xi \pi a_o^2 \rho_d^0 w_{od}^2 / 2$ – сила гидродинамического сопротивления, $w_{od} = w_o$ – относительная скорость капель нефти. Для определения

коэффициента гидравлического сопротивления ξ и числа Рейнолдса используем следующие выражения [2]:

$$\xi = \frac{12}{\text{Re}} \left(1 + 0,241 \text{Re}^{0,687} \right) + 0,42 \left(1 + 1,902 \cdot 10^4 \text{Re}^{-1,16} \right)^{-1};$$

$$\text{Re} = \frac{2a_o \rho_d^0 w_{od}}{\mu_d} \quad (3)$$

Расчеты скорости производятся при следующих параметрах системы: $\rho_o^0 = 650 \text{ кг/м}^3$, $\rho_d^0 = 850 \text{ кг/м}^3$, $g = 9,8 \text{ м/с}^2$, $a_o = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $\mu_d = 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2$.

Уравнение сохранения энергии для капли нефти, которая попадает в купол из струи, имеет вид:

$$\frac{dQ_o^{dr}}{dt} = \alpha S_o^{dr} (T_d - T_o^{dr}); \quad (4)$$

$$Q_o^{dr} = c_o m_o^{dr} T_o^{dr},$$

$$\frac{dQ_d}{dt} = -n_o \cdot \alpha_o \cdot S_o^{dr} (T_d - T_o) - q_{dw} \cdot S_{dw} - \int_0^{z_{od}} 2\pi r \sqrt{1+r'^2} q_s^d dz, \quad (5)$$

где
$$n_o = \frac{V_o^o \cdot t}{V_{dr}};$$

$$q_s^d = \frac{\lambda_p}{\delta} (T_d - T_w);$$

$$q_{dw} = \frac{\lambda_{dw}}{\delta_{dw}} \text{Nu}_{dw} (T_d - T_w);$$

$$V^{dr} = \frac{4}{3} \pi a_o^3.$$

Первое слагаемое в (5) – поток тепла от капель нефти, q_{dw} – поток тепла от дизеля в воду через нижнее основание купола; q_{od} – поток тепла от дизеля к нефти; q_s – поток, уходящий из слоя дизеля через боковые стенки купола; S^{dr} , S_{dw} – площадь капли нефти и границы раздела фаз нефти и дизеля; λ_p , δ – коэффициент теплопроводности и толщина изолирующей стенки; T_d , T_w – температура дизеля и воды в океане; n – количество капель нефти в слое дизеля.

Решая уравнение (2), с учетом (3) найдем скорость всплытия капли нефти. Скорость всплытия капель нефти при данных параметрах составляет $w_o = 0,62 \text{ м/с}$. Профиль температур капель нефти и слоя дизеля приведен на рис. 3. Температура капель нефти, попадающих в теплый дизель, с те-

где $\alpha = \text{Nu} \cdot \lambda_d / (2a_o)$;

$$S^{dr} = 4\pi a_o^2;$$

$$\text{Nu} = 2 + 0,6 \cdot \text{Re}^{0,5} \cdot \text{Pr}^{0,33};$$

$$\text{Pr} = \nu_d / \lambda_d.$$

Здесь Nu – число Нуссельта; Pr – число Прандтля; S^{dr} – площадь поверхности капли нефти, a_o – радиус капли нефти; λ_d – коэффициент теплопроводности дизеля; λ_p , ν_i – соответственно коэффициент теплопроводности и кинематическая вязкость, нижние индексы $i = o, d$ соответствуют нефти и дизелю.

Уравнение сохранения энергии для слоя дизеля имеет вид:

чением времени растет. При этом температура дизеля незначительно убывает. Капли достигают верхнее основание купола за $t_1 = 19,2 \text{ с}$.

Определив скорость всплытия капель нефти, определим время начала накопления слоя нефти в куполе t_1 . Заметим, что первая группа капель поднимается на высоту H (к верхнему основанию купола), а последующие партии капель с учетом накопившегося слоя нефти будут подниматься на высоту $H - h_o$, где h_o – толщина слоя нефти.

Второй этап связан с достижением капель нефти верхнего основания купола, которые начинают накапливаться в виде слоя нефти у верхнего основания. Уравнение сохранения массы нефти в слое запишется в виде:

$$\frac{dM_o^{sl}}{dt} = \rho_o^o \cdot V_o^o; \quad (6)$$

$$M_o^{sl} = \int_{z_{od}}^H \rho_o^o \pi R^2(z) dz,$$

где z_{od} – координата границы между слоями нефти и дизеля. Координату раздела «нефть–дизель» определим следующим образом:

$$\frac{dz_{od}}{dt} = - \frac{V_o^o}{S(z_{od})}.$$

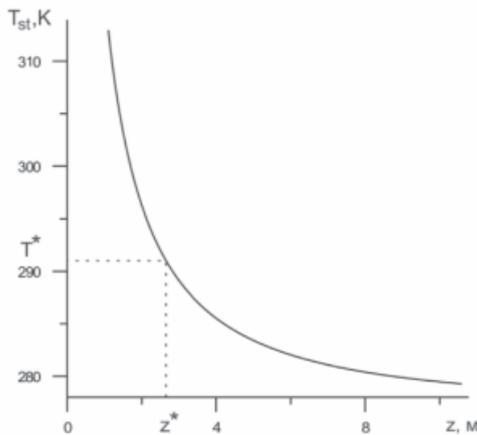


Рис. 2. Зависимость температуры струи от вертикальной координаты

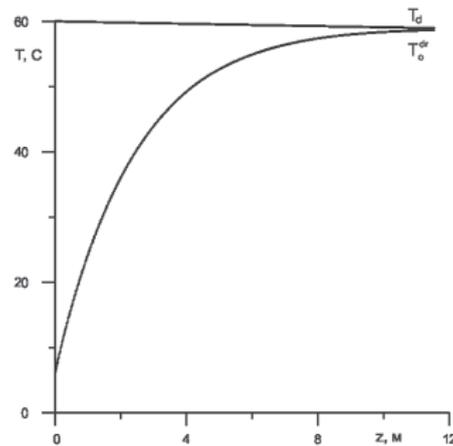


Рис. 3. Температура капли нефти в слое дизеля по вертикальной координате

Запишем уравнение сохранения энергии для слоя нефти, который на-

капливается у верхнего основания купола

$$\frac{d(c_o M_o T_o)}{dt} = m_o c_o T_o^+ + q_{od} \cdot S_{od} - \int_{z_{od}}^H 2\pi r \sqrt{1+r'^2} q_s^o dz. \quad (7)$$

Здесь первое слагаемое в правой части соответствует потоку тепла, «поступающему» с нефтью через слой дизеля, T_o^+ – температура «поступающей» нефти, она равна температуре капель нефти на высоте z_{od} , т.е. $T_o^+ = T_o^{dr}(z_{od})$, второе слагаемое соответствует потоку тепла, поступающему из

слоя дизеля, третье слагаемое – поток тепла от слоя нефти через боковые поверхности и верхнее основание купола.

В уравнении сохранения энергии для слоя дизеля (5) добавляется слагаемое, учитывающее теплообмен между слоями нефти и дизеля, тогда уравнение запишется в следующем виде:

$$\frac{d(c_d M_d T_d)}{dt} = -n_o \cdot \alpha_o \cdot S_o^{dr} (T_d - T_o) - q_{od} \cdot S_{od} - q_{dw} \cdot S_{dw} - \int_0^{z_{od}} 2\pi r \sqrt{1+r'^2} q_s^d dz, \quad (8)$$

где $n_o = V_o^d / V^{dr}$ количество капель нефти, находящихся в слое дизеля; вычисляется как отношение объема нефти в слое дизеля к объему капли нефти. Представляя V_o^d через объемный расход поступающей в купол нефти, получим

$$n_o = \frac{V_o^o \cdot h_d}{V^{dr} w_o}.$$

Для определения теплового потока q_{dw} будем полагать, что струя углеводородов с «захваченной» в струю водой натекает на слой дизеля снизу купола, тогда, согласно [4], получим:

$$\text{Nu}_{dw} = \begin{cases} 2 < \bar{h} \leq 6, \text{Nu}_{dw} = 0,935 \frac{\text{Re}_o^{0,5}}{\bar{h}^{0,11}} (1 + 0,00197 \bar{h}^{1,75} \text{Re}_o^{0,24}) \text{Pr}^{0,24} \\ 6 < \bar{h} \leq 16, \text{Nu}_{dw} = 3,06 \frac{\text{Re}_o^{0,5}}{\bar{h}^{0,77}} (1 + 0,0157 \bar{h}^{0,66} \text{Re}_o^{0,24}) \text{Pr}^{0,4} \end{cases},$$

где $\text{Re}_o = \frac{w_o d_o}{\nu}$; w_o – скорость на срезе скважины $w_o = \frac{V_o}{\pi R^2}$; d_o – диаметр сква-

h – расстояние от устья скважины до дна купола. Тогда тепловой поток от дизеля к воде можем определить следующим образом:

$$q_{dw} = \frac{\lambda_{dw}}{\delta_{dw}} \text{Nu}_{dw} (T_d - T_w).$$

жины; ν – вязкость воды океана; $\bar{h} = h/d_o$,

Тепловой поток q_{od} определим согласно [3], используя схему теплообмена для полуграниченного тела:

$$q_{od} = \alpha (T_o - T_d) e^{H^2 \lambda \tau} (1 - \operatorname{erf}(H \sqrt{\lambda \tau})),$$

здесь λ – коэффициент теплопроводности для нефти; H – сумма полутолщин нефти и дизеля; τ – текущее время, $\alpha = \lambda/H$ – коэффициент теплообмена.

$$\begin{cases} \frac{dT_o}{dz} = \frac{\alpha S^{dr} (T_d - T_o^{dr}) - c_o m_o^{dr} T_o^{dr}}{w_o}, \\ \frac{dT_d}{dt} = \frac{1}{M_d c_d} \left[-n_o \cdot \alpha_o \cdot S_o^{dr} (T_d - T_o) - q_{dw} \cdot S_{dw} - \int_0^{z_{od}} 2\pi r \sqrt{1+r'^2} q_s^d dz \right]. \end{cases} \quad (9)$$

Для времени $t > t_1$ (второй этап) для слоя дизеля и нефти будет иметь вид уравнений теплопроводности вид:

$$\begin{cases} \frac{dz_{od}}{dt} = - \frac{V_o^o}{S(z_{od})}, \\ \frac{dT_o}{dt} = \frac{1}{M_o c_o} \left[m_o c_o T_o^+ + q_{od} \cdot S_{od} - \int_{z_{od}}^H 2\pi r \sqrt{1+r'^2} q_s^o dz \right], \\ \frac{dT_d}{dt} = \frac{1}{M_d c_d} \left[-n_o \cdot \alpha_o \cdot S_o^{dr} (T_d - T_o) - q_{od} \cdot S_{od} - q_{dw} \cdot S_{dw} - \int_0^{z_{od}} 2\pi r \sqrt{1+r'^2} q_s^d dz \right]. \end{cases} \quad (10)$$

Системы уравнения (9) и (10) решаем методом Эйлера. Система (10) решается до момента t_2 – времени заполнения купола нефтью.

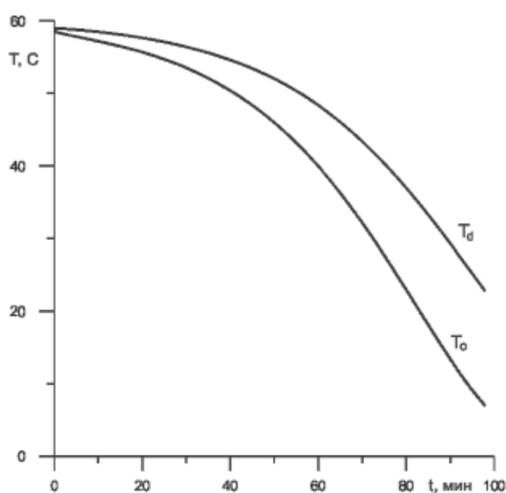


Рис. 4. Зависимость температуры слоев нефти и дизеля от времени

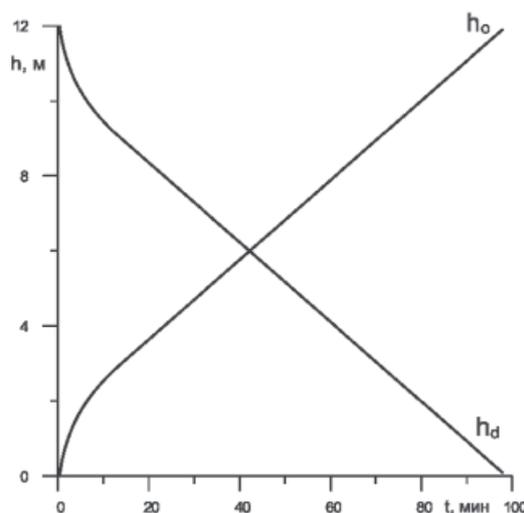


Рис. 5. Зависимость высот слоев от времени

На рис. 4 приведено температурное распределение внутри купола в процессе заполнения купола нефтью. Время полного заполнения купола нефтью составляет

$t_2 = 97,8$ мин. На рис. 5 представлено изменение высот слоев нефти (h_o) и дизеля (h_d), изменяющихся с течением времени. Видно, что с течением времени слой нефти

растет за счет вновь поступающих капель нефти, при этом слой дизеля убывает, что вызвано принятым допущением, что вся поступающая нефть вытесняет дизель из купола.

Выводы

Разработана математическая модель работы купола-сепаратора и описана его работа на начальном этапе установки. Исследован процесс заполнения купола нефтью, определено время полного заполнения купола нефтью. Получены зависимости температур для слоев нефти и дизеля от времени. Также получены графики зависимости высот каждого слоя от времени.

Список литературы

1. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. – М.: ЭКОЛИТ, 2011. – 720 с.
2. Химмичекая гидродинамика: справочное пособие / А.М. Кутепов, А.Д. Полянин, З.Д. Запрынов, А.В. Вязьмин, Д.А. Казенин. – М.: Квантум, 1996. – 336 с.
3. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высш. школа, 1966. – 600 с.
4. Юдаев Б.Н. Теплопередача: учебник для вузов. – М.: Высш. школа, 1973. – 360 с.

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

References

1. Abramovich G.N. Teoriya turbulentnykh struy. M.: EKOLIT, 2011. 720 p.
2. Kutepov A.M., Polyenin A.D., Zapryanov Z.D., Vyazmin A.V., Kazenin D.A. Khimicheskaya gidrodinamika: spravochnoye posobiye. M.: Kvantum, 1996. 336 p.
3. Lykov A.V. Teoriya teploprovodnosti. M.: Vyssh. shkola, 1966. 600 p.
4. Yudayev B.N. Teploperedacha: uchebnik dlya vtuzov. M.: Vyssh. shkola, 1973. 360 p.
5. Lee J.H.W., Chu V.H. Turbulent jets and plumes: a Lagrangian approach. Kluwer, 2003. 390 p.

Рецензенты:

Гималтдинов И.К., д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой «Прикладная математика и механика» Стерлитамакского филиала ФГБОУ ВПО «Башкирский государственный университет», г. Стерлитамак;
Биккулова Н.Н., д.ф.-м.н., профессор, заведующая кафедрой «Общая физика» Стерлитамакского филиала ФГБОУ ВПО «Башкирский государственный университет», г. Стерлитамак.

Работа поступила в редакцию 18.09.2013.