

Математическая модель работы купола, предназначенного для ликвидации последствий разлива нефти

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 рассматривается математическая модель режима работы купола, предназначенного для накопления углеводородов при их разливе. Получена зависимость температуры струи от вертикальной координаты, зависимость координат раздела слоев газ-нефть, нефть-спирт, спирт-вода от времени для всего процесса посадки купола. Полученные данные позволяют более полно визуально представить процесс.

Ключевые слова: купол, разлив нефти, гидрат.

Проблема разработки нефтяных залежей стоит особо остро в связи с уменьшением запасов углеводородов на континенте. Одним из наиболее динамично развивающихся и актуальных альтернативных способов на данный момент является добыча нефти и газа в шельфе, запасы, которых практически нетронуты. Но, несмотря на перспективность добычи углеводородов в шельфе, возникает ряд трудностей, связанных с большой вероятностью разлива нефти в океан. Нефть, попавшая в океан, наносит непоправимый урон экосистеме региона. Вместе с тем пока не предложен способ быстрого сбора нефти и локализации разлива. В работе будет рассматриваться математическая модель устройства, которое может производить сбор углеводородов при глубоководных разливах.

Постановка задачи. Пусть на дне водоема имеется источник истечения углеводородов (нефть и газ) с известным объемным расходом V_0 и начальной температурой T_0 . Известны состав смеси углеводородов, их теплофизические характеристики и характеристики окружающей воды. В статье рассматривается математическая модель устройства, предназначенного для сбора углеводородов на дне водоема. По предлагаемой схеме к месту утечки углеводородов предлагается опустить и установить купол-сепаратор, схема которого приведена на *рис. 1*. Термобарические условия на дне океана таковы, что созданы идеальные условия для образования газовых гидратов. При создании модели устройства, рассматриваемого в этой статье, для предупреждения гидратообразования, внутрь купол закачивается специальный раствор с температурой $T_r=60^\circ\text{C}$, который не смешивается с нефтью и водой, и в котором не растворяется газ.

Плотность раствора такова, что выполняется условие: $\rho_o < \rho_a < \rho_h$, где ρ_o , ρ_a , ρ_h – соответственно плотности нефти, раствора и гидрата.

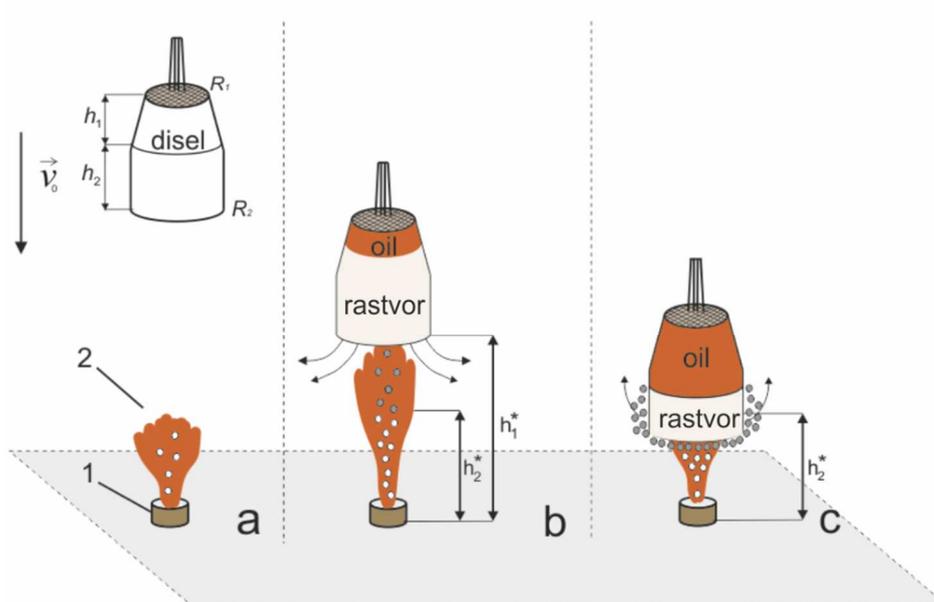


Рис. 1. Процесс установки купола-сепаратора. 1 – источник углеводородов, 2 – углеводороды (нефть и газ).

Процесс установки купола происходит в несколько этапов. Купол начинают опускать с постоянной скоростью v_0 (рис. 1 а). На этапе 1 на расстоянии h_1^* от дна происходит открытие нижнего основания купола. Внутри начинают проникать капли нефти. С момента времени t_1 рассматривается накопление слоя нефти внутри купола, вытесняя при этом равное количество раствора спирта. Этап 2 продолжается до тех пор, пока толщина слоя нефти не достигнет заданного значения (может варьироваться, толщина слоя нефти важна на этапе откачки). Отметим, что струей происходит «захват» воды [1], что будет понижать температуру в струе и на высоте h_2^* , термобарические условия будут способствовать процессу гидратообразования, что спровоцирует покрытие газовых пузырьков гидратной коркой. Таким образом, выше некоторой высоты h_2^* (см. рис. 1 б), пузырьки газа будут превращаться в частицы гидрата, которые внутрь купола проникать не будут (рис. 1 с). На третьем этапе купол опускается с постоянной скоростью v_1 , пока низ купола не достигнет высоты h_2^* . Этап 3 начинается с момента t_3 , в купол начинают проникать пузырьки газа. С момента t_4 начинается этап 4 – в куполе начинает накапливаться слой газа. Этот этап продолжается до тех пор, пока толщина слоя газа не достигнет заданного значения (может варьироваться, толщина слоя газа важна на этапе откачки). С момента t_5 (этап 5) купол опускается с постоянной скоро-

стью ν_1 , пока нижнее основание купола не достигнет дна водоема. Начиная с момента времени t_6 рассматривается стационарная работа купола (этап 6). Ниже приведены уравнения, описывающие процесс установки купола, в общем виде. Каждое из уравнений будет модифицироваться для каждого из этапов установки.

Основные уравнения. Методика расчета температуры в струе более подробно рассмотрена в работе [4]. Для рассматриваемых в данной работе параметров приведена следующая зависимость температуры струи от вертикальной координаты.

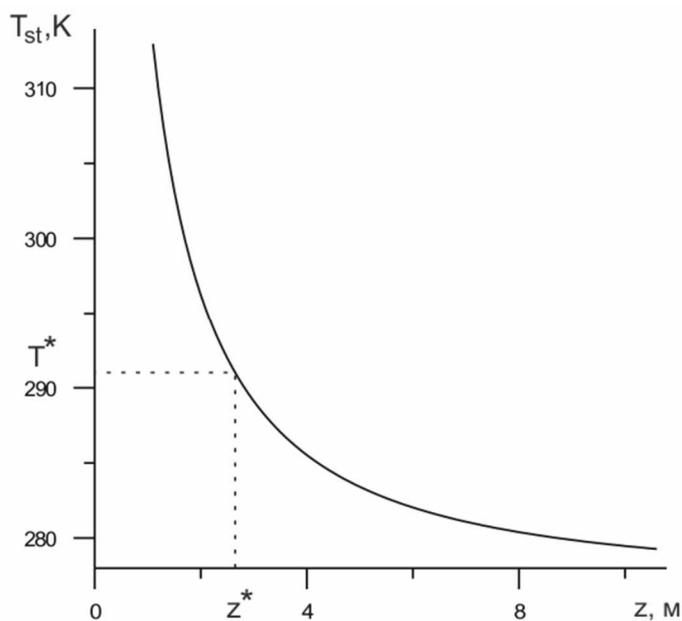


Рис. 2. Зависимость температуры струи от вертикальной координаты

Уравнение сохранения массы газа и нефти в слое:

$$\frac{dM_g^1}{dt} = \rho_g V_0^g, \quad M_g^1 = \int_{z_{go}}^{H+h_2^*} \rho_g \pi R^2(z) dz, \quad \frac{dM_o^1}{dt} = \rho_o \cdot V_0^o, \quad M_o^1 = \int_{z_{od}}^{H+h_1^*} \rho_o \pi R^2(z) dz.$$

Уравнение сохранения энергии для слоя раствора спирта:

$$\begin{aligned} \frac{dQ_r}{dt} = & -m_{out} c_r T_r - N_o^r \cdot \alpha_o \cdot S_o^{dr} (T_r - T_o^{dr}) - N_g^r \cdot \alpha_g \cdot S_g^r (T_r - T_g^r) - S_{rw} \cdot q_{rw} - \\ & - \int_{h_1^*}^{h_1^*+H} 2\pi R(z) \sqrt{1+R'(z)^2} \cdot q_s^r dz - \pi R_1^2 \cdot q_s^r, \quad Q_r = M_r c_r T_r, \end{aligned} \quad (2)$$

где $N_o^a = \frac{V_0^o \cdot t}{V^{dr}}$, $N_g^r = \frac{V_0^g \cdot h_r}{V^b w_g^r}$, $q_s^r = \frac{\lambda_p}{\delta} (T_r - T_w)$, $V^{dr} = \frac{4}{3} \pi a_0^3$.

В уравнении (2) справа первое слагаемое – поток тепла, связанный с «вытекающим» из купола раствором спирта, второе и третье слагаемые – поток тепла от капель нефти / пузырьков газа, всплывающих в слое спирта, N_o^r , N_g^r – количество капель нефти/ пузырьков газа в куполе; q_{rw} – поток тепла от спирта в воду через нижнее основание купола; q_s^r – поток из слоя спирта через боковые стенки и верхнее основание купола; S_{rw} – площадь границы раздела слоев нефти и спирта; λ_p , δ – коэффициент теплопроводности полиуретана и толщина стенки купола; $R(z)$ – радиус купола для соответствующей координаты z .

Аналогично запишем уравнение сохранения энергии для слоя нефти, который накапливается у верхнего основания купола

$$\frac{dQ_o}{dt} = m_o c_o T_o^+ + N_g^o \cdot \alpha_g \cdot S_g^b (T_o - T_g^o) + S_{oa} \cdot q_{oa} + S_{go} \cdot q_{go} - \int_{z_{od}}^{z_{go}} 2\pi R(z) \sqrt{1 + R(z)^2} \cdot q_s^o dz - \pi R_1^2 \cdot q_s^o, \quad Q_o = M_o^1 c_o T_o \quad (3)$$

Здесь, первое слагаемое в правой части соответствует потоку тепла, «поступающему» с нефтью через слой раствора спирта, второе – теплу, приходящему с пузырьками газа, T_o^+ – температура «поступающей» нефти, она равна температуре капель нефти на высоте z_{or} , т.е. $T_o^+ = T_o^{dr}(z_{or})$, третье и четвертое слагаемые соответствуют потоку тепла из слоя спирта и слоя газа, пятое и шестое слагаемые – поток тепла от слоя нефти через боковые поверхности и верхнее основание купола. Число пузырьков в слое нефти

$$N_g^o = \frac{V_o^g \cdot h_o}{V^b w_g^o}.$$

Уравнение сохранения энергии для слоя газа примет вид:

$$\frac{dQ_g}{dt} = m_g c_g T_g^+ - S_{go} q_{go} - \int_{z_{go}}^{H+h_2^*} 2\pi R(z) \sqrt{1 + R(z)^2} \cdot q_s^g dz - \pi R_1^2 \cdot q_s^g, \quad Q_g = M_g^1 c_g T_g \quad (4)$$

здесь первое слагаемое в правой части соответствует потоку тепла, «поступающему» с нефтью через слой спирта, где T_g^+ – температура «поступающего» газа, она равна температуре пузырьков газа на высоте z_{go} , т.е. $T_g^+ = T_g^o(z_{go})$, второе слагаемое соответствует потоку тепла в слой нефти, третье и четвертое слагаемые – поток тепла от слоя газа через боковые поверхности и верхнее основание купола.

Координату раздела «газ-нефть» z_{go} и «нефть-раствор спирта» z_{or} найдем с учетом объемных расходов газа и нефти:

$$\frac{dz_{go}}{dt} = -\left(\frac{V_o^g}{\pi R^2(z_{go})} + v_1 \right), \quad \frac{dz_{oa}}{dt} = -\left(\frac{V_o^o}{\pi R^2(z_{oa})} + v_1 \right). \quad (5)$$

На рис. 3–4 приведена зависимость координаты раздела слоев газа и нефти, нефти и спирта, спирта и воды, а также температуры слоя спирта, нефти и газа от времени для всего процесса установки.

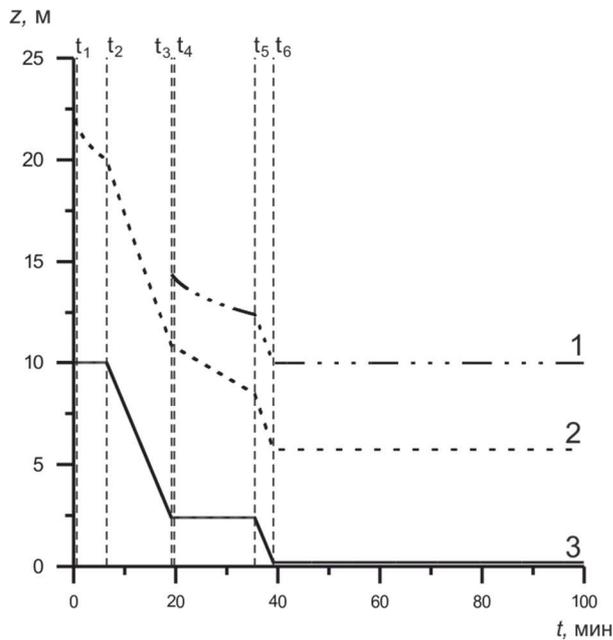


Рис. 3. Зависимость координаты раздела слоев газа и нефти (1), нефти и спирта (2), спирта и воды (3) от времени для всего процесса посадки купола.

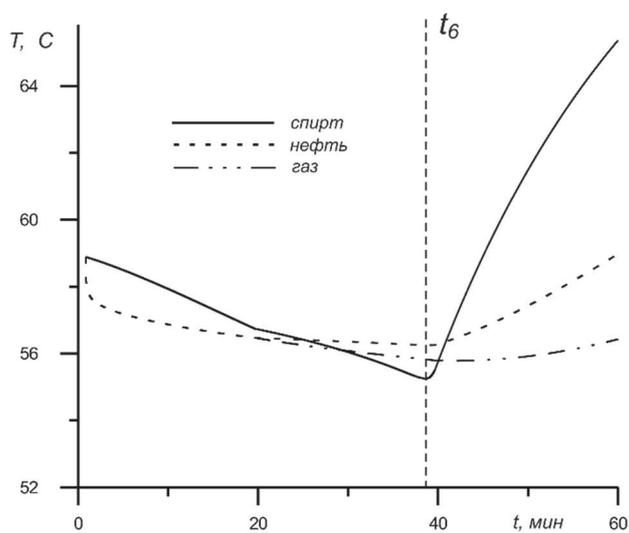


Рис. 4. Зависимость температуры слоя спирта, нефти и газа от времени для всего процесса установки, 1: спирт, 2: нефть, 3: газ.

Заключение. Рассматриваемая математическая модель купола может быть использована для устранения утечек нефти и газа на дне водоема. Получены: график зависимости температуры в струе от вертикальной координаты, график зависимость координаты раздела слоев внутри купола, а также температуры слоев.

Литература

1. Lee J. H. W., Chu V. H. Turbulent jets and plumes: a Lagrangian approach. Kluwer, 2003. 390 p.
2. Абрамович Г. Н. Теория турбулентных струй. М.: ЭКОЛИТ, 2011. 720 с.
3. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. Т. 1. – М.: Наука, 1987.– 464 с.
4. Кильдибаева С. Р., Гималтдинов И. К. Динамика многофазной затопленной струи с учетом образования гидратов. Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2016. – Т. 1, №3(3). – С. 92–101.

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

Mathematical model of the operation of the dome intended for liquidation of consequences of the oil spill

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

The mathematical model of the operating mode of the dome, intended for the accumulation of hydrocarbons during their spillage, is considered in the work. The dependence of the jet temperature on the vertical coordinate is obtained, the dependence of the coordinates of the gas-oil, oil-alcohol, alcohol-water layers on time for the whole process of landing of the dome. The obtained data allow to more fully visualize the process.

Keywords: dome, oil spill, hydrate.