

Теоретическое исследование накопления нефти в куполе

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

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

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

*Email: freya.13@mail.ru

Разработана математическая модель наполнения нефти в куполе, который используется для устранения техногенного разлива нефти в океане. В предположении, что купол зафиксирован на высоте h_1 (которая выше высоты гидратообразования) и в купол закачен раствор спирта, считаем, что внутри купола не накапливается гидрат. Решена задача о миграции капель нефти, описывается начальный этап процесса накопления нефти в куполе. Определены зависимости температуры слоя нефти и раствора спирта в куполе от времени.

Ключевые слова: купол, разлив углеводородов, гидрат, накопление нефти.

В последнее время увеличивается интерес исследователей к процессу освоения шельфовой зоны мирового океана с целью добычи углеводородного сырья. Наряду с увеличением объемов добычи нефти и газа многократно возрастает угроза протечек в нефтепроводах, в результате которых происходит загрязнение водоемов нефтепродуктами. Исследователями предлагается множество способов устранения аварий, связанных с повреждением скважин и трубопроводов, одним из оригинальных способов является установка над местом утечки углеводородов устройства – купола, в котором нефть будет накапливаться, а затем откачиваться в танкер, находящийся на поверхности океана.

Пусть на дне водоема имеется источник углеводородов с известными массовыми расходами нефти M_o и газа M_g и начальной температурой углеводородов T^o . Будем полагать, что нефть и газ распространяются в виде затопленной струи [1,2], а сама струя представляет собой капли нефти, пузырьки газа и «вовлеченную» в струю окружающую воду. Допустим, что теплофизические параметры струи такие, что пузырьки газа выше некоторой высоты h^* начинают покрываться газогидратной коркой [3]. Для сбора нефти под водой над источником истечения углеводородов устанавливается цилиндрический купол (см. рис.1), нижнее основание которого открыто для накопления углеводородов, а верхнее – закрыто. Купол фиксируется а высоте $h_1 > h^*$. При разливе нефти в Мексиканском заливе в апреле 2010 г. [4] была предпринята попытка установки купола над местом аварии, который должен был

устранить утечку углеводородов из поврежденной скважины. При этом зафиксировать купол не удалось, из-за накопления гидратов.

Для предотвращения процесса накопления гидратов внутри купола, до установки на дно океана, купол наполняется теплым раствором спирта с температурой T_a , причем $T_a > T_s(p)$, где $T_s(p)$ – равновесная температура гидратообразования при данном давлении [5], кроме этого, должно выполняться условие $\rho_o < \rho_a < \rho_h$, где ρ_o , ρ_a , ρ_h – соответственно плотности нефти, раствора спирта и гидрата. Это условие позволяет считать, что после открытия нижнего основания купола, капли нефти из струи будут проникать в купол, а частицы газового гидрата вместе с вовлеченной водой будут «омывать» нижнее основание купола. При этом полагаем, что нефть не смешивается с раствором спирта, кроме того будем полагать, что в конструкции купола есть устройства, которые поддерживают необходимую концентрацию раствора спирта в куполе.

Будем также полагать, что стенки купола изготовлены из мягкой полиуретановой оболочки. Купол оснащен трубкой для откачки нефти, накапливающейся в внутри купола и устройством, обеспечивающими его маневренность и управляемость, которые не учитываются при математическом моделировании.

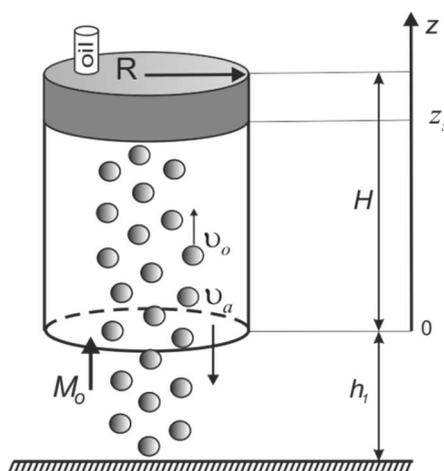


Рис.1 Схема купола: H – высота купола, R – радиус купола, серыми кружками обозначены капли нефти, к верхнему основанию подключена трубка для откачки нефти

Положим, что на первом этапе купол зафиксирован на высоте h_1 от дна океана, нижнее основание купола открывается и внутрь купола начинает проникать капли нефти. Для простоты положим, что весь объем нефти, вытекающей из скважины, попадает внутрь купола. Тогда можно считать, что на входе в купол имеется источник нефти, из которого с известным массовым расходом $M_o = \rho_o \alpha v_o$, отнесенным на единицу площади,

выделяются капли нефти, которые поступают в теплый раствор спирта, образуя потоки капель. Пусть n – число капель нефти в единице объема. Дроблением и слипанием капель, поднимающихся со скоростью v_o , будем пренебрегать. Так как в куполе происходит противоточное движение, т.е. капли движутся вверх, а раствор спирта из-за «вытеснения» каплями нефти – вниз, тогда для скорости v_o можем записать $v_o = w_o - v_a$, где w_o – скорость миграции капель нефти относительно раствора спирта, v_a – скорость раствора спирта. Здесь и далее нижние индексы o, a относятся к параметрам нефти и раствора спирта.

Тогда уравнение сохранения числа капель нефти, а также уравнения сохранения масс для нефти и раствора спирта запишутся в виде [3]:

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial m v_o}{\partial z} = 0. \tag{1}$$

$$\frac{\partial \alpha \rho_o}{\partial t} + \frac{\partial \alpha \rho_o v_o}{\partial z} = 0, \tag{2}$$

$$\frac{\partial (1-\alpha) \rho_a}{\partial t} + \frac{\partial (1-\alpha) v_a \rho_a}{\partial z} = 0, \tag{3}$$

где $\alpha = \frac{4}{3} \pi a_o^3 n$ – объемное содержание капель нефти в куполе, a_o – радиус капли нефти.

Уравнения импульсов для капель нефти и раствора спирта в безынерционном приближении могут быть записаны в виде [3]:

$$-\alpha \frac{\partial p}{\partial z} - n f - \alpha \rho_o g = 0, \quad -(1-\alpha) \frac{\partial p}{\partial z} + n f - (1-\alpha) \rho_a g = 0, \quad f = C_\mu \frac{\rho_a (w_o)^2 \pi a_o^2}{2}, \tag{4}$$

где f – сила трения, $C_\mu = (\mu^* C_{x_{xx}} + C_{x_0}) / (1 + \mu^*)$ – коэффициент сопротивления капли, $C_{x_{xx}} = 18.5 / \text{Re}^{3/5}$ – коэффициент сопротивления для твердой сферы $C_{x_0} = \frac{48}{\text{Re}} \left(1 - \frac{2.2}{\sqrt{\text{Re}}} \right)$ – коэффициент сопротивления для пузырька, $\mu^* = \mu_o / \mu_a$ – отношение вязкостей нефти и спирта, $\text{Re} = 2 a_o \rho_a w_o / \mu_a$ – число Рейнольдса.

Коэффициент сопротивления с учетом деформации капель C'_μ [6]:

$$C'_\mu - C_\mu = \lambda \frac{3(\mu^*)^2 - \mu^* + 8 \text{Re}^2 \frac{\rho_a V_\infty^2 a_o}{\sigma_{oa}}}{5(\mu^* + 1)^2}, \quad V_\infty \frac{2(\rho_a - \rho_o) g a^2}{3 \mu_a} \frac{\mu_a + \mu_o}{2 \mu_a + 3 \mu_o}$$

$$\lambda = \frac{1}{4(\mu^* + 1)^3} \left\{ \left[\frac{81}{80} (\mu^*)^3 + \frac{57}{20} (\mu^*)^2 + \frac{103}{40} \mu^* + \frac{3}{4} \right] - \frac{(\rho_o / \rho_a) - 1}{12} (\mu^* + 1) \right\}.$$

Изменение температуры раствора спирта происходит за счет температурного следа капель нефти. Уравнение, описывающее этот процесс, имеет вид:

$$\rho_a c_a (1-\alpha) \left(\frac{\partial T_a}{\partial t} + v_a \frac{\partial T_a}{\partial z} \right) = -nQ, \quad Q = 4\pi a_o^2 q, \quad (5)$$

где T_a и c_a – температура и теплоемкость раствора спирта; Q – интенсивность источника тепла, отнесенная на единицу объема, q – интенсивность источника тепла, отнесенная на поверхность капли.

Уравнение, описывающее изменение температуры капель нефти за счет нагревания в растворе спирта, имеет вид:

$$\rho_o c_o \alpha \left(\frac{\partial T_o}{\partial t} + v_o \frac{\partial T_o}{\partial z} \right) = nQ. \quad (6)$$

Скорость миграции капли нефти в слое неподвижного раствора спирта найдем из (5). Для определения скорости дрейфа капель с учетом стесненности используем [3]:

$$w_o = \frac{w_d}{\psi_\alpha (1-\alpha)}, \quad (7)$$

где w_d – скорость капель нефти, вычисленная по (5), $\psi_\alpha = \alpha^{-m}$ коэффициент неоднородности частиц, $m=3$.

Для определения интенсивности теплового потока между раствором спирта в куполе и поверхностью капли будем использовать формулу [3]:

$$q = \beta(T_a - T_o), \quad \beta = \frac{\lambda_a \text{Nu}}{2a_o}, \quad (8)$$

где $\text{Pr} = \frac{\mu_a c_a}{\lambda_a}$ и $\text{Nu} = 2 + 0.46 \text{Re}^{0.55} \text{Pr}^{0.3}$ – приведенные числа Прандтля и Нуссельта; λ_a – эффективный коэффициент теплопроводности для раствора спирта.

Начальные и граничные условия. Пусть начало координат совпадает с основанием купола в исходном состоянии ($t=0, z>0$), раствор спирта неподвижен ($v_a = 0$), капли нефти отсутствуют ($\alpha=0$), а распределение давления внутри купола соответствует гидростатическому: $p = p_0 - \rho_a g z$, где p_0 – давление на сечении нижнего основания купола. В момент времени $t=0$ открывается нижнее основание купола и из струи с интенсивностью M_o в купол начинает поступать нефть. Уравнения (1), (5), (6) решаем численно.

Результаты расчетов. На рис. 2 представлены зависимости температуры капель нефти (рис.2а), температуры слоя раствора спирта внутри купола (рис.2б) и количества капель от вертикальной координаты z (рис.2а) для процесса всплытия капель нефти в слое раствора спирта. Из графиков следует, что при фиксированном массовом расходе нефти M_o , со временем устанавливаются некоторая квазистационарная картина в виде волны типа «ступенька» для концентрации капель и раствора спирта. Мигрирующая часть волн представляет собой поток капель нефти. Температура в волне до-

стигает значения $T_o=T_a=311$ К, т.е. происходит нагрев капель нефти и охлаждение слоя раствора спирта. Отметим также, поскольку в куполе реализуется противоточное движение, «информация» о начальной температуре капель нефти не передается «внутрь» купола.

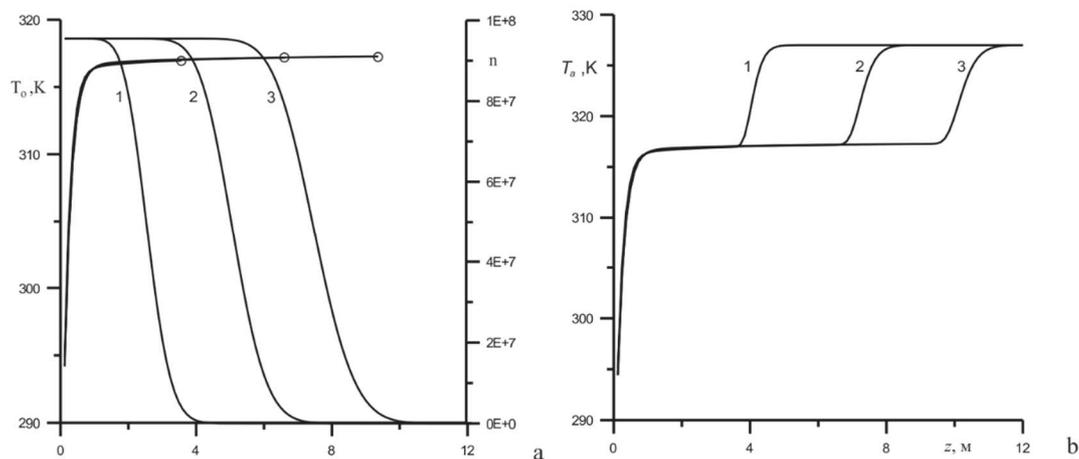


Рис.2 Распределение температуры капель нефти, температуры слоя раствора спирта внутри купола и концентрации капель от вертикальной координаты z . Цифрами обозначены моменты времени: 1 – 30 мин, 2 – 60 мин, 3 – 90 мин. Расчеты производились при следующих параметрах: высота купола $H=12$ м, начальная температура капель нефти $T_o=277$ К, температура раствора спирта $T_a=327$ К, радиус капли нефти $a_o=10^{-5}$ м, $\alpha=0.4$, $\rho_h=910$ кг/м³, $\rho_a=810$ кг/м³, $\rho_o=650$ кг/м³, $\mu_a=1.4 \cdot 10^{-3}$ Па·с, $\mu_o=0.7 \cdot 10^{-3}$ Па·с, $\lambda_a=K$ Вт/(м 0.167, c_o Дж/(К кг), c_a К), Дж/(кг =4200 $\sigma_{oa}=0.7 \cdot 10^{-3}$ Н/м, $p_0=15$ МПа.

Заключение. Построена математическая модель начального этапа заполнения нефтью купола. Рассмотрено два этапа установки, включающих процесс поднятия капель в слое раствора спирта и процесс накопления слоя нефти в куполе. Получена зависимость температуры капель нефти, слоя раствора спирта и количества капель нефти от высоты купола.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-01-97032 p_поволжье_a

Литература

1. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй / Г.Н. Абрамович / Репринтное воспроизведение издания 1960 г. М.: ЭКОЛИТ, 2011. 720 с.
2. Lee J.N.W., Chu V.H. Turbulent jets and plumes - a Lagrangian approach. Kluwer, 2003. 390 p.
3. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. Ч 1. М.: Наука, 1987. 464 с.

4. Шарапов Р.В. Глобальные экологические катастрофы: миф или реальность? // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности, 2011. № 1. С. 14-16.
5. Макогон Ю. Ф. Гидраты природных газов. М.: Недрa, 1974. 285 с.
6. Броунштейн Б.И., Фишбейн Г.А. Гидродинамика, массо- и теплообмен в дисперсных системах. Л. «Химия», 1977. 280 с.

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

Theoretical study of accumulation oil in the dome

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

¹ Sterlitamak branch of Bashkir State University

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

² Ufa State Oil Technical University

Russia, Republic of Bashkortostan, Ufa, 450000, st. Day 14.

*Email: freya.13@mail.ru

A mathematical model of oil content in the dome, which is used to eliminate man-made oil spills in the ocean. Assuming that the dome is fixed at a height h_1 (the height of which above the hydrate) and pumped into the dome alcohol solution, we believe that a hydrate is not accumulated inside the dome. The problem of migration oil droplets, described in the initial stage of the process-accumulation oil in the dome. The dependence of the temperature of oil layer and an alcohol-solution races in the dome of the time.

Keywords: dome, spill hydrocarbons, hydrate, oil accumulation.