

УДК 532.546:536.421

МОДЕЛЬ МИГРАЦИИ ПУЗЫРЬКОВ ГАЗА В КУПОЛЕ, НАПОЛНЕННОМ СОЛЯРКОЙ

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 рассматривается течение углеводородов в затопленной струе и определение теплофизических характеристик, которые используются в качестве начальных параметров для накопления углеводородов в куполе. Далее рассматривается миграция капель нефти и пузырьков газа в куполе. Купол заполнен дизельным топливом (солярккой) для предотвращения накопления гидрата внутри. Накопление гидрата внутри купола важно исключить для его фиксации и стационарной работы. Определены характеристики струи, а также режимы накопления газа и нефти в куполе. Определено изменение температуры струи от вертикальной координаты и её влияние на температуру газовых пузырьков.

Ключевые слова: купол, разлив нефти в шельфе, затопленная струя, пузырек газа

MODEL MIGRATION OF GAS BUBBLES IN THE DOME, FILLED WITH DIESEL FUEL

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

The article discusses a mathematical model of a dome-separator designed for the elimination of the oil spill in the development of deposits in the shelf. The topic is particularly relevant due to the growing interest in the extraction of raw materials in the shelf. Installation of the dome is directly above the leak of hydrocarbons in several stages. At the first stage deals with the hydrocarbons in a submerged jet and the determination of thermophysical characteristics, which are used as the initial parameters for the accumulation of hydrocarbons in the dome. The following section discusses the migration of oil droplets and gas bubbles in the dome. The dome is filled with diesel fuel (diesel fuel) to prevent the accumulation of hydrate inside. The accumulation of hydrate inside the dome it is important to exclude for its fixing and inpatient work. The characteristics of the jet, as well as the modes of accumulation of oil and gas in the dome. Determined the temperature variation of the jet from the vertical coordinate and its influence on the temperature of gas bubbles.

Keywords: dome, the oil spill in the shelf, submerged jet, a gas bubble

В связи с уменьшением запасов нефти на континенте увеличивается интерес исследователей к разработке месторождений в шельфовой зоне Мирового океана, которые практически нетронуты. Негативной стороной разработки таких месторождений являются неизбежные техногенные аварии, сопровождающиеся выбросами нефти и газа в океан. Последствия таких выбросов загрязняют экосистему региона. Как показал случай разлива в Мексиканском заливе, который произошел в апреле 2010 г., на данный момент отсутствует метод быстрого и качественного устранения утечки такого типа.

Среди предлагаемых методов разлива наиболее привлекательным для инженеров является установка купола непосредственно над местом утечки. При этом такой купол не только способен устранить утечку, но и накапливать внутри нефть и газ для дальнейшей откачки и эксплуатации месторождения в промышленных масштабах.

Пусть на дне океана существует источник углеводородов, из которого с определенным

объемным расходом вытекает смесь нефти и газа – метана. Будем полагать, что нефть и газ распространяются в виде затопленной струи, а сама струя представляет собой капли нефти, пузырьки газа и «вовлеченную» в струю окружающую воду. Допустим, что теплофизические параметры струи такие, что пузырьки газа на некоторой высоте h_1 превращаются в частицы газового гидрата.

Для сбора нефти и газа под водой на источник углеводородов устанавливается купол, который представляет собой цилиндрическую емкость из полиуретана, снабженную трубками для откачки углеводородов, накапливающихся в куполе (рис. 1).

Как показала практика, помешать фиксации купола над местом утечки нефти и газа может накопление газовых гидратов внутри купола, как это случилось при аварии в Мексиканском заливе. Во избежание проникновения частиц гидрата внутрь купола, на поверхности в него закачивают дизельное топливо (солярку) и герметизируют, после чего опускают к месту утечки углеводородов.

Постановка задачи

Будем полагать, что загерметизированный купол устанавливается над источником так, чтобы нижнее основание купола находилось на расстоянии h_2^* от источника углеводородов. В общем случае полагаем, что $h_2^* > h_1^*$. В этом положении нижнее основание купола омывает струя из капель нефти, гидратных частиц и воды, «вовлеченной» в струю. Далее происходит открытие нижнего основания купола специальным механизмом.

Процесс построения математической модели состоит из нескольких этапов. Сначала определим распределение температуры по высоте струи, чтобы знать высоту h_2^* , выше которой начинается гидратообразование в струе.

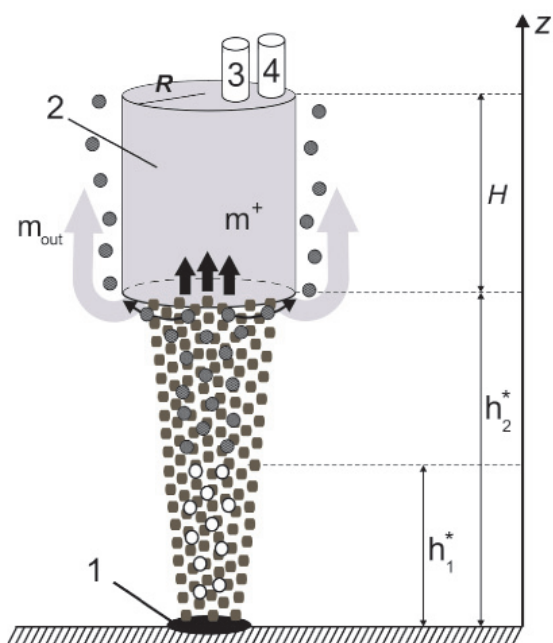


Рис. 1. Схема купола:

1 – источник истечения углеводородов;
 2 – купол; 3 – трубка для откачки смеси;
 4 – трубка для откачки газа; h_1^* – высота, на которой открывается нижнее основание купола; h_2^* – высота, выше которой пузырьки газа покрываются гидратной коркой;
 H – общая высота купола; R – радиус купола;
 m_{out} – массовый расход «вытесненной» смеси из купола; m^+ – массовый расход «поступающей» нефти в купол

На этапе 1 купол зафиксирован на высоте h_2^* , открывается нижнее основание купола и внутрь начинают проникать капли нефти и смешиваться с дизелем. Этот этап продолжается до момента времени t_1 . Далее, на втором этапе, купол начинает опускаться с некоторой постоянной скоростью, это продолжается, пока купол не достигнет

высоты h_2^* . Этап 2 продолжается с момента времени t_1 до момента t_2 . На 3 этапе купол фиксируется на высоте h_2^* и внутрь начинают проникать пузырьки газа, этап продолжается до тех пор, пока толщина слоя газа не достигнет h_g^1 м, время завершения этапа t_3 . На этапе 4 купол опускается до дна, где фиксируется. На последнем, 5 этапе, который начинается с момента времени t_4 , рассматривается стационарная работа купола, подключаются трубки для откачки.

Распределение температуры в струе

Поступающие из скважины нефть и газ мигрируют в виде затопленной струи. Определение их температуры и скорости от вертикальной координаты особенно важно, так как эти параметры используются в качестве начальных при их накоплении в куполе. Распределение температуры и скорости миграции струи подробно рассмотрено в работах [1, 2]. Зная начальную температуру вытекающих углеводородов T_0 и температуру воды T_w , а также начальный объемный расход Q^e , согласно [5] определим температуру в любом сечении струи T_{jet} :

$$T_{jet} = T_w + (T_0 - T_w) \frac{Q^e}{Q}, \quad (1)$$

Согласно распределению температуры в струе, определяется высота h_1^* , на которой струя остывает до температуры гидратообразования. Выше этой высоты пузырьки метана газа начинают покрываться гидратной коркой, превращаясь в гидратную частицу.

До момента, пока нижнее основание купола не пройдет отметку h_2 , отсчитываемую от дна, будем полагать, что внутрь купола, вытесняя смесь, будут проникать только капли нефти, а при дальнейшем движении купола внутрь начинают проникать и газовые пузырьки.

Этапы работы купола-сепаратора

Этап 1 начинается с момента «открытия» нижнего основания купола $t_{нач}$, который до этого был загерметизирован. Запишем уравнение сохранения масс для смеси с учетом, что нефть, вытекающая из скважины, полностью попадает в купол и смешивается с дизелем, образуя смесь, которая в свою очередь «вытесняется» нефтью:

$$\frac{dM_m}{dt} = m_o^+ - m^{out}, \quad (2)$$

где m_o^+ – массовый расход поступающей нефти; m^{out} – массовый расход «вытесняемой» смеси; $M_m = V_t \cdot (k_o \rho_o + (1 - k_o) \rho_d)$ –

масса смеси; V_i – объем купола; k_o – концентрация нефти в смеси. Нижний индекс m соответствует параметрам смеси; o – для параметров нефти. Массовый расход поступающей в купол нефти определяется с учетом известного объемного расхода.

Уравнение сохранения энергии для смеси:

$$\frac{dQ_m}{dt} = c_o m^+ T_o - c_m m^{out} T_m - \pi R^2 q_{mw};$$

$$Q_m = c_m T_m M_m, \quad (3)$$

здесь c_o, c_m – теплоемкости нефти и смеси; q_{mw} – тепловой поток на границе между смесью и водой; T_m, M_m – температура и масса смеси.

Для определения теплового потока q_{mw} будем полагать, что струя углеводородов с вовлеченной водой натекает на неподвижное основание купола и, используя выражение для теплообмена при натекании струи на неподвижную стенку [4], получим

$$q_{mw} = \frac{\lambda_w}{\delta_{mw}} \text{Nu}_{mw} (T_m - T_w),$$

где λ_w – коэффициент теплопроводности воды; $\delta_{mw} = 2R_2$; Nu_{mw} – число Нуссельта.

На втором этапе с момента времени t_2 купол начинает опускаться с постоянной скоростью w_0 . С учетом этого получим уравнение для нахождения изменения координаты нижнего основания купола z_n :

$$\frac{dz_n}{dt} = -w_0.$$

Миграция газового пузырька в слое солярка

На этапе 3 нижнее основание купола достигает и фиксируется на высоте h_2^* , на этой высоте пузырьки газа ещё не покрываются гидратной коркой. Этап 3 начинается с момента времени t_3 . С этого момента внутрь купола начинают проникать пузырьки газа. Считаем, что газ не смешивается со смесью, а накапливается наверху. Этап 2 продолжается до тех пор, пока толщина слоя газа не станет равной h_g^1 .

Уравнения сохранения для смеси и газа внутри купола запишутся в виде

$$\frac{dM_g}{dt} = m_g^+;$$

$$\frac{dM_m}{dt} = m_o^+ - m_{out}, \quad (4)$$

где m_g^+ – массовый расход поступающего в купол газа; M_g – масса газа в куполе, нижний индекс g относится к газу.

$$\frac{dQ_m}{dt} = c_o m^+ T_o - c_m m^{out} T_m - \pi R^2 q_{mw} - N_g \alpha_m S_g^b (T_m - T_g^m); \quad Q_m = c_m T_m M_m, \quad (8)$$

Скорость всплытия для пузырька газа в куполе определяем из уравнения импульсов в безинерционном приближении:

$$\left(\frac{4}{3} \pi a_g^3 \rho_m - m_g^b \right) g - f = 0, \quad (5)$$

где a_g и m_g^b – радиус и масса пузырька газа;

$f = \frac{\xi \pi a_g^2 \rho_m (w_{gm})^2}{2}$ – сила гидродинамического сопротивления. Скорость пузырьков газа внутри купола:

$$w_g^m = w_{gm} - w_m,$$

где w_{gm} – относительная скорость пузырьков газа в смеси; w_m – скорость смеси. При условии, что купол зафиксирован и неподвижен $w_g^m = w_{gm}$. Для определения коэффициента гидравлического сопротивления ξ и числа Рейнольдса Re_{gm} для пузырька газа используем следующие выражения:

$$\xi = \frac{12}{\text{Re}_{gm}} \left(1 + 0,0811 (\text{Re}_{gm})^{0,879} \right);$$

$$\text{Re}_{gm} = \frac{2a_g \rho_m w_{gm}}{\mu_m}. \quad (6)$$

Решая уравнение (5), с учетом (6) найдем скорость всплытия пузырька газа. При параметрах системы: $\rho_g = 193 \text{ кг/м}^3$, $a_g = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, – скорость всплытия пузырька газа в смеси составляет $w_g^m = 0,38 \text{ м/с}$.

Запишем уравнение сохранения энергии для пузырька газа, попадающего в купол из струи, движущегося внутри купола:

$$\frac{dQ_g^m}{dt} = \alpha_g^m S_g^b (T_m - T_g^m); \quad Q_g^m = c_g m_g^b T_g^m, \quad (7)$$

где $\alpha_g^m = \frac{\text{Nu}_g^m \cdot \lambda_m}{2a_g}$; $S_g^b = 4\pi a_g^2$;

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

$(\text{Pr}_g^m) = \frac{\nu_m}{\chi_m}$; S_g^b – площадь поверхности пузырька.

На рис. 2 представлена зависимость температуры пузырьков газа от вертикальной координаты z . График приведен для этапа 3, времени t_3 . Начальной температурой пузырька является температура струи на высоте $h_2^* = 2,4 \text{ м}$. С увеличением вертикальной координаты z пузырьки газа нагреваются до температуры смеси.

Уравнение сохранения энергии для смеси (7) с учетом пузырьков газа примет вид

здесь N_g – количество пузырьков газа в слое смеси.

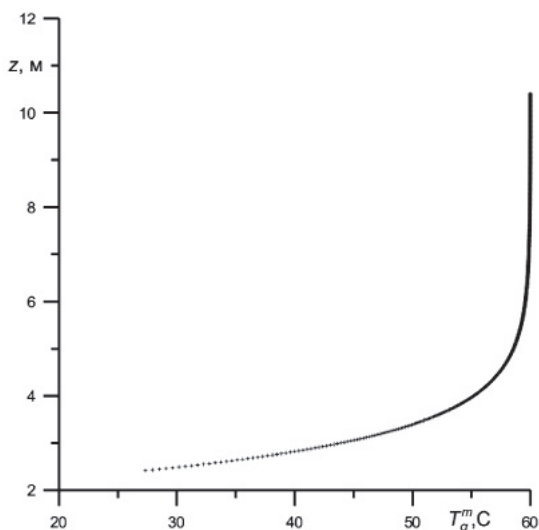


Рис. 2. Зависимость температуры пузырька газа от координаты z

Накопление слоя газа в куполе

При достижении пузырьков газа верхнего основания купола они начинают накапливаться, образуя слой. Уравнение сохранения энергии для слоя газа:

$$\frac{dQ_g}{dt} = c_g m_g^+ T_g + \pi R^2 q_{gm}; \quad Q_g = c_g T_g M_g. \quad (9)$$

С учетом теплообмена со слоем газа уравнение сохранения энергии для смеси примет вид

$$\begin{aligned} \frac{dQ_m}{dt} &= c_o m^+ T_o - c_m m^{out} T_m - \pi R^2 q_{mw} - \\ &- N_g \alpha_m S_g^b (T_m - T_g^m) - \pi R^2 q_{gm}; \\ Q_m &= c_m T_m M_m, \end{aligned} \quad (10)$$

где q_{gm} – тепловой поток от слоя газа к слою смеси, который определяется с использованием выражения для теплообмена полуограниченного тела согласно [3]:

$$q_{gm} = \alpha_{gm} (T_m - T_g) e^{\frac{H_{gm}^2 \lambda_g \tau_g}{2}} \left(1 - \operatorname{erf} \left(H_{gm} \sqrt{\lambda_g \tau_g} \right) \right), \quad (11)$$

здесь λ_g – коэффициент теплопроводности для газа; $H_{gm} = \frac{h_g}{2} + \frac{h_m}{2}$ – сумма полутолщин слоев газа и смеси; τ_g – характерное время, отсчитываемое от начала накопления слоя газа; $\alpha_{gm} = \lambda_g / H_{gm}$ – коэффициент теплообмена.

Введем координату раздела слоя газа и смеси z_{gm} с учетом объемного расхода газа:

$$\frac{dz_{gm}}{dt} = - \left(\frac{Q_g^e}{\pi R^2 (z_{gm})} \right). \quad (12)$$

Выводы

В работе описана динамика многофазной затопленной струи, рассмотрен процесс установки купола, предназначенного для накопления газа и нефти, а также рассмотрена задача о миграции пузырьков газа в куполе. Установлено, что пузырек газа, попадающий в купол, наполненный смесью солянки и нефти, нагревается до температуры смеси.

Работа поддержана грантом СФ БашГУ В15-12.

Список литературы

1. Гималтдинов И.К., Кильдибаева С.Р., Ахмадеева Р.З. Расчет теплофизических и кинетических параметров затопленной струи // *Фундаментальные исследования*. – 2013. – № 11 (часть 7). – С. 1323–1327.
2. Кильдибаева С.Р. Моделирование течения углеводородов в затопленной струе // *Современные проблемы науки и образования*. – 2014. – № 6; URL: <http://www.science-education.ru/120-15769> (дата обращения: 07.12.2014).
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. Gimaltdinov I.K., Kildibayeva S.R., Akhmadeyeva R.Z. Raschet teplofizicheskikh i kineticheskikh parametrov zatoplennoy strui // *Fundamentalnyye issledovaniya*. no. 11 (chast 7) 2013, str. 1323–1327.
2. Kildibayeva S.R. Modelirovaniye techeniya uglevodorodov v zatoplennoy struye // *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*. 2014. no. 6; URL: <http://www.science-education.ru/120-15769> (data obrashcheniya: 07.12.2014).
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», Стерлитамакский филиал, ФГБОУ ВПО «Башкирский государственный университет», г. Стерлитамак;
 Биккулова Н.Н., д.ф.-м.н., профессор кафедры «Общая и теоретическая физика», Стерлитамакский филиал, ФГБОУ ВПО «Башкирский государственный университет», г. Стерлитамак.