

УДК 66.01:532.546:536.421

## ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ РЕЗЕРВУАРОВ ДЛЯ ЛИКВИДАЦИИ РАЗЛИВОВ УГЛЕВОДОРОДОВ, ИСКЛЮЧАЮЩИХ НАКОПЛЕНИЕ ГИДРАТА

Кильдибаева С.Р., Гильманов С.А., Ишмухаметова А.А.

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

В статье рассматривается установка и работа специального резервуара, который может быть использован в случае разливов углеводородов на дне водоема. Такой разлив характерен для техногенной аварии нефтедобывающей конструкции при глубоководной добыче. Согласно термобарическим условиям на дне Мирового океана газовые пузырьки будут превращаться в гидратные пузырьки. Гидрат, накапливаясь внутри резервуара, может помешать стабильной работе купола. Вследствие чего необходимо рассмотреть особенности накопления углеводородов без учета гидрата. Один из способов, исключающих накопление гидрата, рассмотрен в данной статье. Внутри резервуара предварительно закачивается раствор, который препятствует попаданию внутрь резервуара частиц гидрата. Считая, что нефть распространяется в виде капель, а газ в виде пузырьков, внутрь купола сначала будут проникать только капли нефти, затем ещё и пузырьки метана. В работе определены режимы накопления углеводородов внутри купола, определено влияние тепловых потоков на формирование температурных полей углеводородов.

**Ключевые слова:** резервуар для сбора углеводородов, разлив нефти, гидратообразование, накопление углеводородов, затопленная струя

## FEATURES SIMULATION OF RESERVOIRS TO ELIMINATE HYDROCARBON SPILLS, EXCLUDE THE ACCUMULATION OF HYDRATE

Kildibaeva S.R., Gilmanov S.A., Ishmukhametova A.A.

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

The article discusses the installation and operation of a special reservoir, which can be used in the case of hydrocarbon spills on the bottom of the pond. This oil spill is characteristic construction with deep-sea mining for technogenic accident. According to thermobaric conditions on the ocean floor, gas bubbles will turn into a hydrate bubbles. Hydrate accumulate within the reservoir may interfere with the stable operation of the dome. The result is that you need to consider the characteristics of hydrocarbon accumulation excluding hydrate. One of the ways that exclude the accumulation of hydrate discussed in this article. Pre-pumped inside the reservoir solution which prevents the ingress of hydrate particles reservoir. Assuming that the oil is distributed in the form of droplets and the gas as bubbles into the dome will penetrate only the first drop of oil, and then more bubbles of methane. The paper defines the modes of accumulation of hydrocarbons inside the dome, determine the influence of heat fluxes on the formation of temperature fields of hydrocarbons.

**Keywords:** reservoir for collecting hydrocarbons, oil spill, hydrate, hydrocarbon accumulation, submerged jet

В связи с уменьшением запасов углеводородов в континентальной части, ежегодно учеными предлагаются альтернативные способы добычи углеводородов. Наряду с этим ведется активное освоение шельфа и глубоководной добычи нефти. Несмотря на позитивный прогноз относительно объемов нефти, сосредоточенных в шельфе, данный вид добычи природных ископаемых несет большую вероятность возникновения аварийных ситуаций, как это было в Мексиканском заливе в 2010 году. Для предупреждения такого рода случаев техногенных разливов необходимо разработать модели устройств, предназначенных для устранения утечек. В работах [2, 4] были рассмотрены модели работы устройств, предназначенных для устранения глубоководных утечек углеводородов. Проблема устранения накопления гидрата внутри купола является немаловажной, так как, накаплива-

ясь внутри купола, гидрат может помешать стабильной работе купола (накопление гидрата в куполе ведет к возникновению «положительной плавучести» и всплытию купола к поверхности Мирового океана).

### 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 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.

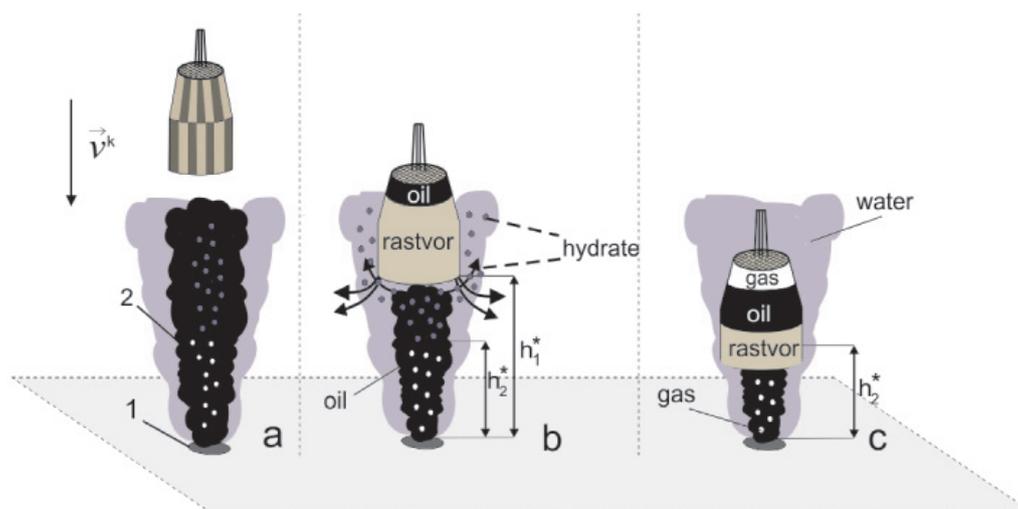


Рис. 1. Процесс установки купола-сепаратора:  
1 – источник углеводородов; 2 – углеводороды (нефть и газ)

Термобарические условия на дне океана таковы, что созданы идеальные условия для образования газовых гидратов. Так, в апреле 2010 г. при разливе нефти в Мексиканском заливе использовалась купольная технология, однако не была предусмотрена стратегия управления гидратами, которые накапливались внутри купола, вследствие чего гидраты копились внутри купола и придавали конструкции положительную плавучесть. Этот факт не позволил зафиксировать купол и использовать его в качестве средства для предотвращения утечки углеводородов.

При создании модели устройства, рассматриваемого в этой статье, для предупреждения гидратообразования, внутрь купола 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  $\rho_o$ ,  $\rho_a$ ,  $\rho_h$  – соответственно плотности нефти, раствора и гидрата.

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 варьи-

роваться, толщина слоя нефти важна на этапе откачки). Отметим, что струей происходит «захват» воды [5], что будет понижать температуру в струе и на высоте  $h_2^*$ , наступит условие гидратообразования, что спровоцирует покрытие газовых пузырьков гидратной коркой. Таким образом, выше некоторой высоты  $h_2^*$  (рис. 1, b), пузырьки газа будут превращаться в частицы гидрата, которые внутрь купола проникать не будут (рис. 1, c). 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 скоростью  $v_1$ , 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

Для определения температуры струи используем соотношение, предложенное в [1]:

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

где  $T_w$ ,  $T_0$  – соответственно температуры окружающей воды и вытекающей из скважины

нефти (и газа);  $V_0^l$  – начальный объемный расход из скважины;  $V = \pi w B^2$  – объемный расход.

Зная равновесную температуру гидратообразования при давлении 150 атм., которая соответствует  $T^* = 21^\circ\text{C}$ , найдем расстояние, выше которого пузырьки газа будут покрываться гидратной коркой. На рис. 2 приведено распределение струи, из которого видно, что на расстоянии  $z^* = 2,4$  м от дна температура струи становится равной  $T^*$  и газовые пузырьки превращаются в частицы гидрата.

Уравнения сохранения масс для нефти и раствора в куполе имеют вид

$$\frac{dM_o}{dt} = m_o^+; \quad \frac{dM_r}{dt} = -m_{out};$$

$$m_{out} = V_0^o \cdot \rho_r, \quad (1)$$

где  $m_o^+ = V_0^o \rho_o$  – массовый расход нефти;  $m_{out}$  – массовый расход «вымещаемого» раствора. В случае, когда внутрь поступает также газ, уравнение модифицируется:

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

$$\frac{dM_r}{dt} = -m_{out}; \quad m_{out} = \rho_r (V_0^o + V_0^g),$$

где  $m_g^+$  – массовый расход поступающего в купол газа.

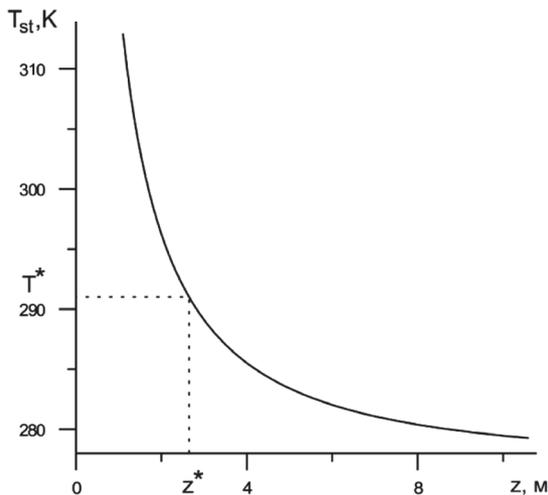


Рис. 2. Зависимость температуры струи от вертикальной координаты

$$\frac{dQ_o}{dt} = m_o c_o T_o^+ + N_o^o \cdot \alpha_g \cdot S_g^b (T_o - T_g^o) + S_{oa} \cdot q_{oa} + S_{go} \cdot q_{go} -$$

$$- \int_{z_{od}}^{z_{go}} 2\pi R(z) \sqrt{1 + R(z)^2} \cdot q_s^o dz - \pi R_1^2 \cdot q_s^o;$$

$$Q_o = M_o^l c_o T_o. \quad (3)$$

Уравнение сохранения массы газа и нефти в слое запишется в виде:

$$\frac{dM_g^l}{dt} = \rho_g V_0^g; \quad M_g^l = \int_{z_{go}}^{H+h_2^*} \rho_g \pi R^2(z) dz;$$

$$\frac{dM_o^l}{dt} = \rho_o \cdot V_0^o; \quad M_o^l = \int_{z_{od}}^{H+h_1^*} \rho_o \pi R^2(z) dz.$$

Уравнение сохранения энергии для слоя раствора спирта имеет вид

$$\frac{dQ_r}{dt} = -m_{out} c_r T_r - N_o^r \cdot \alpha_o \cdot S_o^{dr} (T_r - T_o^{dr}) -$$

$$- N_g^r \cdot \alpha_g \cdot S_g^r (T_r - T_g^r) - S_{rw} \cdot q_{rw} - \quad (2)$$

$$- \int_{h_1^*}^{h_1^*+H} 2\pi R(z) \sqrt{1 + R(z)^2} \cdot q_s^r dz - \pi R_1^2 \cdot q_s^r;$$

$$Q_r = M_r c_r T_r,$$

где  $N_o^a = \frac{V_0^o \cdot t}{V^{dr}}; \quad N_g^r = \frac{V_0^g \cdot h_r}{V^b w_g^r};$

$$q_s^r = \frac{\lambda_p}{\delta} (T_r - T_w); \quad V^{dr} = \frac{4}{3} \pi a^3.$$

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 раствора спирта,  $N_o^r, N_g^r$  – количество капель нефти / пузырьков газа в куполе;  $q_{rw}$  – поток тепла от раствора спирта в воду через нижнее основание купола;  $q_s^r$  – поток из слоя раствора спирта через боковые стенки и верхнее основание купола;  $S_{rw}$  – площадь границы раздела слоев нефти и раствора спирта;  $\lambda_p, \delta$  – 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:

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 раствора 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

$$N_g^o = \frac{V_0^g \cdot h_o}{V^b w_g^o}.$$

Уравнение сохранения энергии для слоя газа примет вид

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

здесь первое слагаемое в правой части соответствует потоку тепла, «поступающему» с нефтью через слой раствора 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 учётом объемных расходов газа и нефти:

$$\begin{aligned} \frac{dz_{go}}{dt} &= - \left( \frac{V_0^g}{\pi R^2(z_{go})} + v_1 \right); \\ \frac{dz_{or}}{dt} &= - \left( \frac{V_0^o}{\pi R^2(z_{or})} + v_1 \right). \end{aligned} \quad (5)$$

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

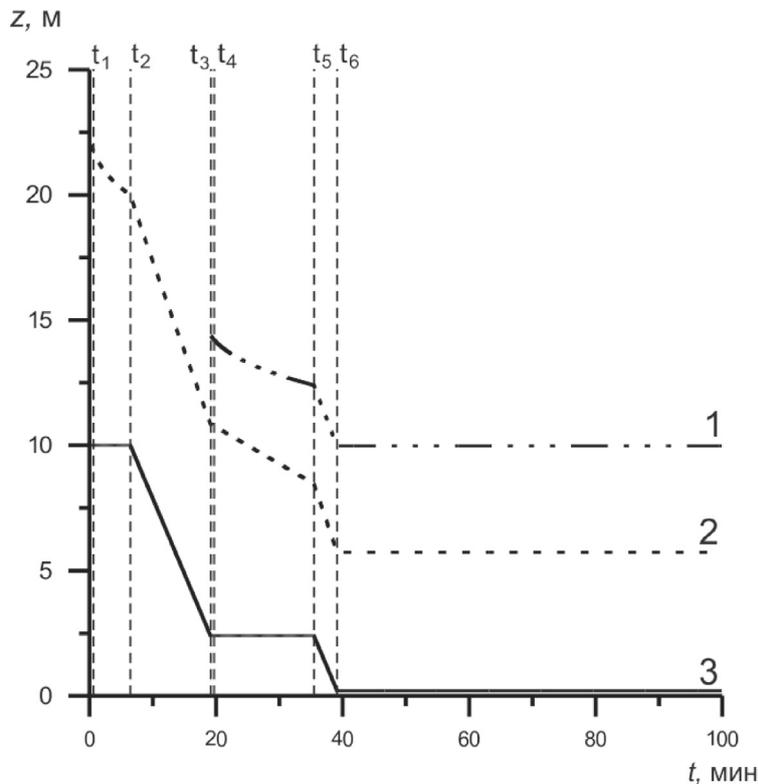


Рис. 3. Зависимость координаты раздела слоев газа и нефти (1), нефти и раствора (2), раствора и воды (3) от времени для всего процесса установки купола

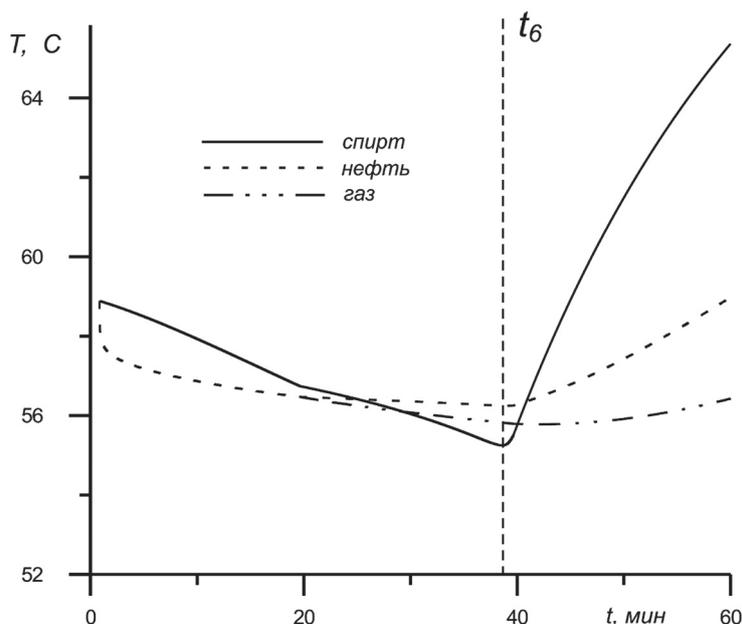


Рис. 4. Зависимость температуры слоя раствора, нефти и газа от времени для всего процесса установки:  
1 – спирт; 2 – нефть; 3 – газ

### Выводы

Рассмотренная модель работы резервуара используется для накопления углеводородов в случае их разлива в океане. Для стабильной работы купола и его надежной фиксации исключается процесс гидратообразования и накопления гидрата в куполе. Для получения общих представлений о процессе накопления углеводородов в резервуаре исследованы температурные поля внутри купола, получены зависимости координат раздела соответствующих слоев углеводородов, а также зависимость их температур от времени.

Работа поддержана грантом РФФИ № 14-01-97032 p\_поволжье\_a.

### Список литературы

1. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. – М.: ЭКОЛИТ, 2011. – 720 с.
2. Насыров А.А. Моделирование процесса наполнения «Купола-сепаратора», предназначенного для ликвидации нефтегазовых выбросов в зоне морского дна // Вестник Кемеровского государственного университета. – 2015. – № 2–1 (62). – С. 41–45.
3. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Т. 1. – М.: Наука, 1987. – 464 с.
4. Чиглинцев И.А., Насыров А.А. Моделирование процесса наполнения купола-сепаратора с разложением газогидрата, образовавшегося в период монтажа установки // Инженерно-физический журнал. – 2016. – Т. 89, № 4. – С. 851–860.
5. Lee J.H.W., Chu V.H. Turbulent jets and plumes: a Lagrangian approach. – Kluwer, 2003. – 390 p.