

УДК 536.243

**СОПОСТАВЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КУПОЛА-СЕПАРАТОРА
ИЗ ПОЛИУРЕТАНА, РЕЗИНЫ И ДЮРАЛЮМИНИЯ**

**CHARACTERISTICS COMPARISON OF DOME SEPARATOR
MADE OF POLYURETHANE, RUBBER AND DURALUMINIUM**

И.А. Чиглинцев, А.А. Насыров, А.С. Чиглинцева

**Башкирский государственный университет,
филиал, г. Бирск, Российская Федерация,
Уфимский государственный нефтяной технический университет,
г. Уфа, Российская Федерация**

Igor A. Chiglinev, Azat A. Nasyrov, Angelina S. Chiglineva

**Bashkir State University, Branch, Birsk, Russian Federation,
Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation**

e-mail: nasaza@mail.ru

Аннотация. В статье описывается использование установки «купол-сепаратор», представляющей собой огромный резервуар цилиндрической формы и открытой снизу. Высота установки достигает нескольких десятков метров, а радиус – несколько метров. Такая конструкция может быть изготовлена из эластичных (например полиуретана, резины) или твердых (дюралюминий) материалов. Купол можно использовать для устранения прорывов газовых и нефтяных скважин на больших глубинах (более 500 м), когда блокировка скважины является трудным событием. Предполагаются достаточно большие размеры установки, чтобы входящая в нее смесь могла быть разделена на газовую и нефтяную фазы для отдельного отбора. Также купольный сепаратор можно использовать как метод добычи. Изготовление такой конструкции из упругих материалов способствует упрощению

способа транспортировки купола-сепаратора к месту эксплуатации. Математическое моделирование такой установки показало, что изготовление резинового купола-сепаратора способствует более эффективному аккумулярованию тепла внутри конструкции, что благотворно сказывается на разложении гидрата, который может образовываться в рабочих условиях.

Abstract. The paper describes the use of the of the dome-separator installation, which is a huge tank, cylindrical in shape and open from the bottom. The installation height reaches several tens of meters and a radius of several meters. Such a design can be made of elastic (such as polyurethane, rubber) or hard (duralumin) materials. The dome-separator can be used to eliminate the breakthroughs of gas and oil wells at great depths (more than 500 m), when blocking the well is a difficult event. Sufficiently large dimensions of the installation are needed so that the mixture entering it can be separated into gas and oil phases for separate selection. Also, the dome-separator can be used as a method for extraction. The manufacture of such a structure made of elastic materials contributes to an easier way to transport the dome-separator to the place of operation. The mathematical modeling of such an installation showed that the manufacture of a rubber dome-separator contributes to more efficient heat storage inside the structure, which has a beneficial effect on the decomposition of hydrate, which can be formed under operating conditions.

Ключевые слова: гидрат; купол-сепаратор; углеводороды; полиуретан; резина; дюралюминий

Key words: hydrate; dome-separator; hydrocarbons; polyurethane; rubber; duralumin

Введение

В условиях возрастания уровня нефтедобычи, особенно в зонах шельфа, важной задачей является предотвращение последствий нефтегазовых аварий. Примерами таких аварийных выбросов углеводородов в воды мирового океана являются случаи в 2010 г. на нефтяной платформе возле берегов США в Мексиканском заливе и Северном море в 2012 г. [1, 2]. В условиях увеличения нефтедобычи в районах шельфа Северного Ледовитого океана особо важным становится вопрос защиты экосистем данной области от подобных аварий, потому как живые организмы, обитающие в этих суровых широтах, особо чувствительны к изменениям в окружающей среде. Предотвратить последствия таких аварий возможно с помощью купола-сепаратора, предназначенного для сбора углеводородов [3, 4]. В случае же применения такой установки также возможно появление дополнительных проблем, связанных с образующимся газогидратом на глубинах, при которых реализуются соответствующие условия, что, в свою очередь, будет затруднять процесс откачки углеводородов. Сам механизм процесса гидратообразования описан во множестве работ [5–11]. Данная статья является развитием работ [12] и [13]. Здесь рассматривается процесс разложения газогидрата в куполе-сепараторе, изготовленном из различных материалов.

Основные уравнения

Рассмотрим случай аварийного выброса углеводородов из скважины. На рисунке 1 изображён купол-сепаратор, который закреплён у дна океана в месте прорыва. Для упрощения описания форма купола принята цилиндрической. В данном случае внутри установки располагается скважина, через которую и происходит аварийный выброс. Фазы внутри купола располагаются согласно значениям их плотностей. В верхней части

при сборе углеводородов скапливается газ, далее идёт слой нефти, ниже газогидрат и вода.

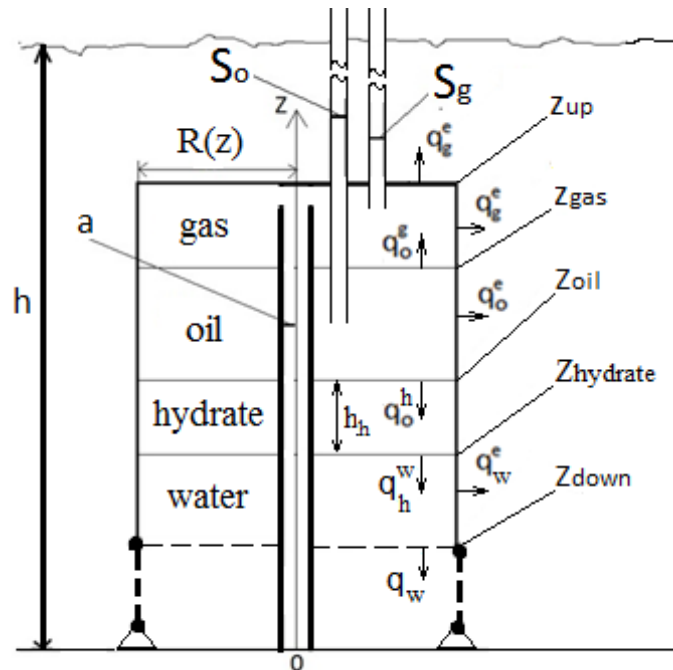


Рисунок 1. Принципиальная схема купола-сепаратора

На принципиальной схеме показаны параметры купола и скважины, а также расположение границ фаз. Таким образом a – радиус рассматриваемого трубопровода, из которого произошёл прорыв; $R(z)$ – радиус описываемой установки; z_{up} , z_{down} – координаты границ купола (верхней и нижней, соответственно); z_{gas} , z_{oil} , $z_{hydrate}$ – координаты, описывающие границы разделения фаз на нефть и газ, нефть и гидрат, гидрат и воду соответственно; S_o , S_g – площади поперечных сечений труб в верхней части купола для откачки нефти и газа; h – расстояние, отсчитываемое от поверхности океана до его дна; h_h – толщина слоя гидрата газа.

В работе предполагается, что внутри описываемого купола-сепаратора не происходит процесса массопереноса между соприкасающимися фазами. Тогда можно при помощи записи уравнения сохранения массы для фаз описать их динамику в установке [14]:

$$\frac{dM_j}{dt} = m_j, \quad (1)$$

$$M_j = \int_{z_j}^{z_{j+1}} \rho_j \cdot F(z) dz, \quad F(z) = \pi(R^2(z) - a^2), \quad (z_j < z < z_{j+1}).$$

В записанном уравнении m_j – массовый расход углеводородов, поступающих в купол при их сборе ($j = g, o$). Так же M_j – массы накапливаемых газа и нефти; $F(z)$ – площадь купола в поперечном сечении в координате z ; ρ_j – плотности рассматриваемых фаз.

Для имеющейся воды внутри установки, которая вытесняется из-под купола при аварийном сборе углеводородов у дна океана, также необходимо записать уравнение сохранения, описывающее данный процесс:

$$\frac{dM_w}{dt} = \rho_w w_w F(z_h), \quad (2)$$

где w_w – скорость с которой движется граница воды; M_w – масса воды; $F(z_h)$ – площадь цилиндрического купола-сепаратора в поперечном сечении на координате $z_{hydrate}$.

Изменение массы гидрата газа, который находится (согласно своей плотности) под слоем нефти и над слоем купольной воды, будет происходить по следующему уравнению:

$$\frac{dM_h}{dt} = F(z_h) j_h, \quad (3)$$

где j_h – приведённая интенсивность образования гидрата; M_h – его масса.

Далее, применяя закон сохранения энергии, мы можем записать выражения, с помощью которых допустимо определить средние температуры имеющихся внутри установки фаз:

$$\frac{d(M_g c_g T_g)}{dt} = - \int_{z_g}^{z_{up}} 2\pi R(z) \sqrt{1 + R'(z)^2} q_g^e dz - F(z_{up}) q_g^e + F(z_g) q_o^g + m_g^+ c_g T_g^+, \quad (4)$$

$$\frac{d(M_o c_o T_o)}{dt} = - \int_{z_o}^{z_g} 2\pi R(z) \sqrt{1 + R'(z)^2} q_o^e dz - F(z_g) q_o^g + F(z_o) q_o^h + m_o^+ c_o T_o^+, \quad (5)$$

$$\frac{d(M_w c_w T_w)}{dt} = - \int_{z_d}^{z_h} 2\pi R(z) \sqrt{1 + R'(z)^2} q_w^e dz - F(z_h) q_h^w - F(z_d) q_w + F(z_h) w_w \rho_w c_w T_w, \quad (6)$$

$$R'(z) = \frac{dR(z)}{dz}.$$

Здесь q_w^e , q_h^w , q_w , q_g^e , q_o^g , q_o^e , q_o^g , q_o^h – тепловые потоки, которые показаны выше на рисунке 1; T_g , T_w , T_o – средние температуры фаз, определяемые с помощью выражений (4)–(6); c_g , c_o – удельные теплоемкости газа и нефти, которые поступают в купол-сепаратор, а T_g^+ , T_o^+ – их температуры.

Условие гидростатического равновесия позволяет определить давления, создаваемые в установке «купол-сепаратор», на рассматриваемой глубине h :

$$p_{oc} = p_g + \rho_o g(z_g - z_o) + \rho_w g(z_o - z_d), \quad (7)$$

где p_{oc} – гидростатическое давление океанической воды от его поверхности до нижней границы купола; z_j , z_d – координаты границ фаз и нижнего части купола; p_g – давление газа под куполом.

Тепломассобмен

Интенсивность образования гидрата определим из баланса тепла:

$$j_h = \frac{-q_o^h + q_h^w}{l}, \quad (8)$$

здесь q_o^h , q_h^w – тепловые потоки от нефти в слой гидрата и от гидрата в воду.

Для описания теплообмена между собранными под куполом фазами запишем [15]:

$$q_o^g = -\frac{(T_g - T_o)\lambda_g\lambda_o}{\lambda_o\sqrt{\pi}\sqrt{\chi_g t} + \lambda_g\sqrt{\pi}\sqrt{\chi_o t}}, \quad q_h^w = \frac{(T_s(p) - T_w)\lambda_h\lambda_w}{\lambda_h\sqrt{\pi}\sqrt{\chi_h t} + \lambda_w\sqrt{\pi}\sqrt{\chi_w t}}, \quad (9)$$

$$q_o^h = -\frac{(T_s(p) - T_o)\lambda_h\lambda_o}{\lambda_o\sqrt{\pi}\sqrt{\chi_h t} + \lambda_h\sqrt{\pi}\sqrt{\chi_o t}}, \quad q_w = -\frac{(T_w - T_w^0)\lambda_w^2}{2\lambda_w\sqrt{\pi}\sqrt{\chi_w t}}.$$

Здесь q_h^w , q_o^h , q_o^g – тепловые потоки, приведённые к единице площади фаз; χ_j , λ_j – коэффициенты температуро- и теплопроводности ($j = g, o, h, w$); q_w – приведенный тепловой поток между водой в куполе и под ним; t – время, берущее начало в момент заполнения установки.

Примем во внимание то, что в основную часть попутного газа входит метан [16]. Поэтому будем полагать, что в куполе-сепараторе идёт процесс образования газогидрата метана при соответствующей для него равновесной температуре, которая будет зависеть от создаваемого давления p_{oc} . Данная температура будет равна температуре на границе z_h , и описывается она в соответствии с [17–20] в виде:

$$T_s(p_{oc}) = T_{h0} + T_* \ln\left(\frac{p_{oc}}{p_{h0}}\right), \quad (10)$$

где T_* , p_{h0} , T_{h0} – параметры, которые определяются из эксперимента.

Рассмотрим работу купола-сепаратора, когда сбор углеводородов производится в течение суток. Это позволит считать границы фаз находящимися в покое, что, в свою очередь, даст возможность записать процесс передачи тепла через стенку купола в окружающую среду от воды, гидрата, нефти и газа в установке как [21]:

$$q_j^- = \beta_c^-(T_j - T_c^-), \quad q_c = \beta_c(T_c^- - T_c^+), \quad q_c^+ = \beta_c^+(T_c^+ - T_w^0),$$

$$\beta_c^- = \frac{\lambda_j Nu_j}{2R(z)}, \quad \beta_c = \frac{\lambda_c}{\delta}, \quad \beta_c^+ = \frac{\lambda_w Nu_w}{z_{j+1} - z_j}, \quad (11)$$

$$Nu_j = B(Gr_j \cdot Pr_j)^n, \quad Nu_w = B(Gr_w \cdot Pr_w)^n.$$

Здесь все записанные тепловые потоки приведены к единице площади. Также q_c , q_j^- , q_c^+ – соответственно приведённые тепловые потоки через стенку установки толщиной δ от фаз ($j = g, o, w$) к внутренней стенке установки и от внешней поверхности стенки в окружающую среду. Далее T_c^+ и T_c^- – температуры внешней и внутренней поверхностей стенок купола; n и B – константы (вертикальная поверхность); λ_w, λ_c – коэффициенты теплопроводности воды и стенки [22–25] (λ_p – полиуретан, λ_{dur} – дюралюминий, λ_{rub} – резина); Nu, Pr, Gr – числа Нуссельта, Прандтля, Грасгофа.

Предполагая, что тепловые потоки q_j^-, q_c, q_c^+ будут равны между собой (11), можно записать:

$$q_j^e = q_j^- = q_c = q_c^+ = \beta(T_j - T_w^0), \quad (12)$$

где

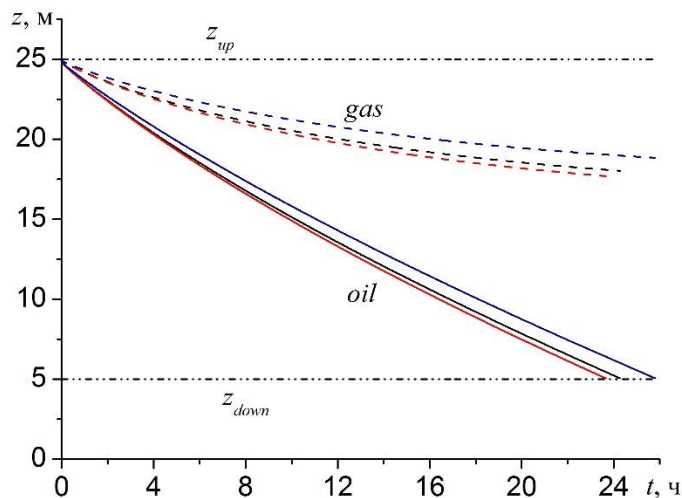
$$\frac{1}{\beta} = \frac{1}{\beta_c^-} + \frac{1}{\beta_c} + \frac{1}{\beta_c^+}. \quad (13)$$

Примем, что отбор газа и нефти из-под купола-сепаратора не производится. При проведении сравнительных расчётов рассмотрим купол, изготовленный из полиуретана, дюралюминия и резины.

Расчётные данные

Расчёты показывают динамику границ и изменение температур фаз при заполнении установки в течение промежутка времени, равного 1 сут. Параметры для рассматриваемого купола-сепаратора примем равными $h = 1000$ м, $z_{up} = 25$ м, $z_{down} = 5$ м, $R = 5$ м; радиус скважины $a = 0,2$ м. Температуру углеводородов в поступающей смеси примем равной $T_o^+ = T_g^+ = 370$ К; массовые расходы нефти и газа соответственно

$m_o^+ = 10$ кг/с, $m_g^+ = 1$ кг/с; толщина стенки купола $\delta = 1,5$ см. Для теплофизических параметров фаз примем: $c_o = 1670$ Дж/(кг·К); $\rho_o = 866$ кг/м³; $\lambda_o = 0,12$ Вт/(м·К); $\beta_o = 9,2 \cdot 10^{-4}$ К⁻¹; $\mu_o = 0,43$ кг/(м·с); $\nu_o = 4,965 \cdot 10^{-4}$ м²/с; $T_w^0 = 277$ К; $\lambda_w = 0,58$ Вт/(м·К); $\mu_w = 10^{-3}$ кг/(м·с); $\rho_w = 1000$ кг/м³; $\beta_w = 0,54 \cdot 10^{-4}$ К⁻¹; $c_w = 4218$ Дж/(кг·К); $\nu_w = 10^{-6}$ м²/с; $\lambda_g = 0,03$ Вт/(м·К); $\mu_g = 1028 \cdot 10^{-8}$ кг/(м·с); $c_g = 2365$ Дж/(кг·К); $R_g = 519,38$ Дж/(кг·К); $\lambda_{rub} = 0,11$ Вт/(м·К); $\lambda_p = 0,25$ Вт/(м·К); $\lambda_{dur} = 145$ Вт/(м·К); $\lambda_h = 0,5$ Вт/(м·К); $\rho_h = 910$ кг/м³; $T_{h0} = 283$ К; $p_{h0} = 6,95$ МПа; $T_* = 10$ К; $l = 5 \cdot 10^5$ Дж/кг; $c_h = 2044$ Дж/(кг·К).
 Начальные значения для уровня газа $z_{g0} = 24,9$ м; для уровня нефти $z_{o0} = 24,8$ м; толщина слоя гидрата $h_h^0 = 0,1$ м.

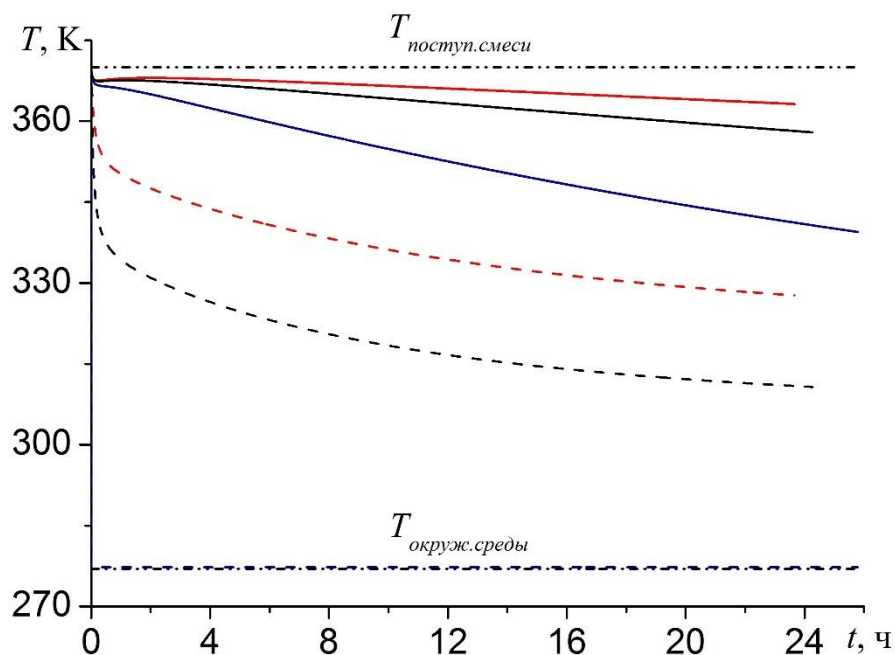


штриховые линии – газовая фаза; сплошные – нефтяная фаза;
 штрихпунктирные – соответственно верхняя и нижняя границы купола

Рисунок 2. Динамика границ для фаз «газ – нефть» и «нефть – гидрат»

На рисунке 2 и далее черная кривая соответствует случаю изготовления купола-сепаратора из полиуретана, красная кривая – резине и синяя – дюралюминию. Как видно, наполнение купола, изготовленного из резины, происходит быстрее по причине того, что в этом случае материал

способствует менее интенсивному процессу теплообмена с окружающей средой, в результате чего фазы медленнее остывают и газ имеет более высокую температуру. Применение купола из дюралюминия, в свою очередь, позволяет проводить сбор углеводородов более длительное время по сравнению с другими рассматриваемыми материалами.



Штриховые линии соответствуют фазе газа; сплошные – нефти; штрихпунктирные линии – температура окружающей среды (277 К) и поступающей смеси (370 К)

Рисунок 3. Изменение температуры газа

Полученные данные показывают, что температура газа в дюралюминиевом куполе по сравнению с резиновым и полиуретановым падает быстро и становится равной температуре окружающей среды $T_w=277$ К уже на самом начальном этапе использования установки. Это также, в свою очередь, способствует более длительному процессу наполнения купола-сепаратора.

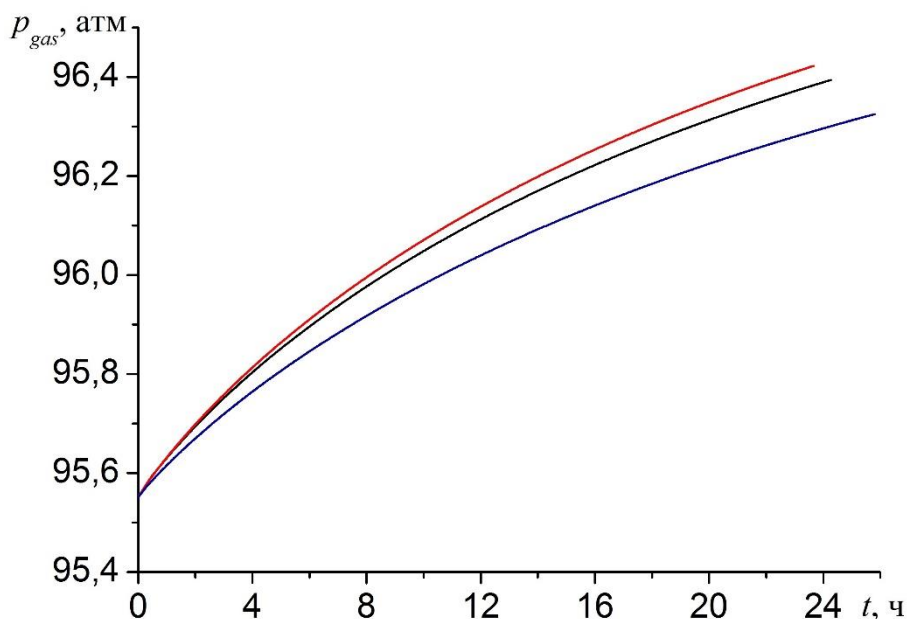


Рисунок 4. Изменение давления газа

Из приведённых расчетов видно, что давление газа в случаях купола из резины и полиуретана растет значительно быстрее по сравнению с куполом из дюралюминия, что связано с теплоизоляционными свойствами этих материалов. В случае дюралюминия падение температуры газа приводит к тому, что давление в процессе наполнения купола-сепаратора растёт более медленно.

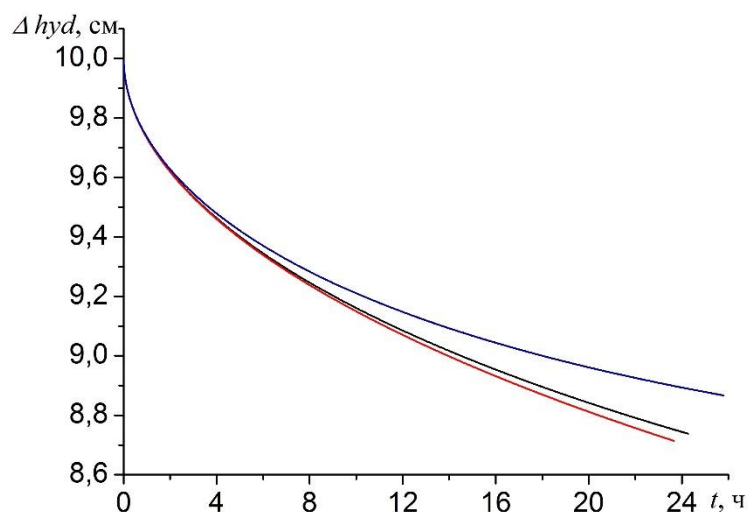


Рисунок 5. Разложение газогидратного слоя в куполе-сепараторе

На рисунке 5 представлен закон изменения толщины слоя газогидрата в куполе-сепараторе. Видно, что интенсивность разложения газогидрата в

установках из различных материалов в коротких периодах времени несильно отличается. Тем не менее, наблюдается тенденция к более интенсивному разложению гидрата в куполе из резины, что, в свою очередь, будет более способствовать решению проблемы закупорки отводящих трубопроводов от купола на поверхность океана при аварийном отборе углеводородов с его дна. При этом сама интенсивность разложения газогидрата остаётся довольно низкой, и за 1 сут в случае резинового купола количество гидрата уменьшилось чуть более чем на 10 %, поэтому необходимо проведение дополнительных мероприятий по интенсификации процесса разложения.

Выводы

Полученные данные показали, что в куполе, изготовленном из резины, теплообмен происходит более медленно, что способствует сохранению температуры газа на более высоком значении. Это, в свою очередь, оказывает влияние на его давление в куполе. Так как фазы в установке из такого материала сохраняют больше тепла, то и процесс разложения гидрата происходит быстрее. Данное обстоятельство более способствует решению проблем откачки углеводородов на поверхность океана. В свою очередь, купол-сепаратор из дюралюминия в случае сбора углеводородов позволяет эксплуатировать установку более длительные периоды времени, но не способствует процессу разложения гидрата.

Благодарность

Работа поддержана грантом президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – докторов наук (Конкурс – МД-2020) № МД-2179.2020.1.

Acknowledgments

The research was funded by a grant of the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists – doctors of sciences (Competition – MD-2020), according to the research project No. MD-2179.2020.1.

Список используемых источников

1. Carte G.A. Novel Concept to Control and Remediate Deep Water Oil Spills: the Universal Deepwater Oil Containment System (UDOC) // Yumpu. URL: <https://www.yumpu.com/en/document/read/3649822/universal-deepwater-oil-containment-george-carter-inventions> (дата обращения: 27.06.2020).

2. Report to the President. Deep Water: The Gulf Oil Disaster and the Future of Offshore Drilling // National Commission on the BP Deepwater Horizon Oil Spill and Offshore Drilling. 2011. URL: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/GPO-OILCOMMISSION/pdf/GPO-OILCOMMISSION.pdf> (дата обращения: 27.06.2020).

3. Жуков А.В., Звонарев М.И., Жукова Ю.А. Способ добычи газа из глубоководных месторождений газогидратов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2013. № 10-1. С. 16-20.

4. Гималтдинов И.К., Кильдибаева С.Р. К теории начального этапа накопления нефти в куполе-сепараторе // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22. № 3. С. 401-406.

5. Макогон Ю.Ф. Гидраты природных газов. М.: Недра, 1974. 208 с.

6. Истомин В.А., Якушев В.С. Газовые гидраты в природных условиях. М.: Недра, 1992. 235 с.

7. Masutani S.M., Adams E.E. Experimental Study of Multi-Phase Plumes with Application to Deep Ocean Oil Spills. Final Report of U.S. Department of the Interior. Minerals Management Service. Hawaii: University of Hawaii, 2003. 88 p.

8. Mingjun Y., Yongchen S., Yu L., Yongjun C., Qingping L. Influence of Pore Size, Salinity and Gas Composition upon the Hydrate Formation Conditions // Chinese Journal of Chemical Engineering. 2010. Vol. 18. Issue 2. P. 292-296. DOI: 10.1016/S1004-9541(08)60355-9.

9. Шагапов В.Ш., Чиглинцева А.С., Русинов А.А. О миграции пузырьков в условиях образования гидрата // Прикладная механика и техническая физика. 2015. Т. 56. № 2. С. 43-52. DOI: 10.15372/PMTF20150205.

10. Шагапов В.Ш., Тазетдинов Б.И. К теории разложения метастабильного газогидрата // Теоретические основы химической технологии. 2013. Т. 47. № 4. С. 454-463. DOI: 10.7868/S0040357113030123.

11. Шагапов В.Ш., Тазетдинов Б.И., Нурисламов О.Р. К теории образования и разложения газогидратных частиц в процессе их всплытия в воде // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2013. № 6 (26). С. 106-113.

12. 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.

13. 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.

14. Кильдибаева С.Р. Моделирование купола-сепаратора при разливе нефти в шельфе // Фундаментальные исследования. 2013. № 10-5. С. 1045-1050.

15. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Изд-во МГУ, 2004. 798 с.

16. Гиматудинов Ш.К. Физика нефтяного и газового пласта. М.: Недра, 1971. 312 с.

17. Бык С.Ш., Макогон Ю.Ф., Фомина В.И. Газовые гидраты. М.: Химия, 1980. 296 с.
18. Нигматулин Р.И., Шагапов В.Ш., Сыртланов В.Р. Автомодельная задача о разложении газогидратов в пористой среде при депрессии и нагреве // Прикладная механика и техническая физика. 1998. Т. 39. № 3. С. 111-118.
19. Шагапов В.Ш., Чиглинцева А.С., Сыртланов В.Р. О возможности вымывания газа из газогидратного массива посредством циркуляции теплой воды // Прикладная механика и техническая физика. 2009. Т. 50. № 4. С. 100-111.
20. Шагапов В.Ш., Чиглинцева А.С., Белова С.В. Математическое моделирование нагнетания гидратообразующего газа в снежный массив, насыщенный тем же газом // Труды Института механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН. 2016. Т. 11. № 2. С. 233-239. DOI: 10.21662/uim2016.2.034.
21. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.
22. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. М.: Атомиздат, 1968. 484 с.
23. Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. Физические величины: справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
24. Белецкий В.М., Кривов Г.А. Алюминиевые сплавы (состав, свойства, технология, применение): справочник. Киев: Коминтех, 2005. 365 с.
25. Богданов С.Н., Бурцев С.И., Иванов О.П., Куприянова А.В. Холодильная техника. Кондиционирование воздуха. Свойства веществ: справочник. СПб.: СПбГАХПТ, 1999. 308 с.

References

1. Carte G.A. Novel Concept to Control and Remediate Deep Water Oil Spills: the Universal Deepwater Oil Containment System (UDOC). *Yumpu*. URL: <https://www.yumpu.com/en/document/read/3649822/universal-deepwater-oil-containment-george-carter-inventions> (accessed 27.06.2020).

2. Report to the President. Deep Water: The Gulf Oil Disaster and the Future of Offshore Drilling. *National Commission on the BP Deepwater Horizon Oil Spill and Offshore Drilling*. 2011. URL: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/GPO-OILCOMMISSION/pdf/GPO-OILCOMMISSION.pdf> (accessed 27.06.2020).

3. Zhukov A.V., Zvonarev M.I., Zhukova Yu.A. Sposob dobychi gaza iz glubokovodnykh mestorozhdenii gazogidratov [Gas Mining Method from Deep Water Deposits of Gas Hydrates]. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy – International Journal of Applied and Fundamental Research*, 2013, No. 10-1, pp. 16-20. [in Russian].

4. Gimaltdinov I.K., Kildibaeva S.R. K teorii nachal'nogo etapa nakopleniya nefti v kupole-separatore [About the Theory of Initial Stage of Oil Accumulation in a Dome-Separator]. *Teplofizika i aeromekhanika – Thermophysics and Aeromechanics*, 2015, Vol. 22, No. 3, pp. 401-406. [in Russian].

5. Makogon Yu.F. *Gidraty prirodnykh gazov* [Natural Gas Hydrates]. Moscow, Nedra Publ., 1974. 208 p. [in Russian].

6. Istomin V.A., Yakushev V.S. *Gazovye gidraty v prirodnykh usloviyakh* [Gas Hydrates in Natural Conditions]. Moscow, Nedra Publ., 1992. 235 p. [in Russian].

7. Masutani S.M., Adams E.E. *Experimental Study of Multi-Phase Plumes with Application to Deep Ocean Oil Spills. Final Report of U.S. Department of the Interior. Minerals Management Service*. Hawaii, University of Hawaii, 2003. 88 p.

8. Mingjun Y., Yongchen S., Yu L., Yongjun C., Qingping L. Influence of Pore Size, Salinity and Gas Composition upon the Hydrate Formation Conditions. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2010, Vol. 18, Issue 2, pp. 292-296. DOI: 10.1016/S1004-9541(08)60355-9.

9. Shagapov V.Sh., Chiglintseva A.S., Rusinov A.A. O migratsii puzyr'kov v usloviyakh obrazovaniya gidrata [Bubble Migration during Hydrate Formation]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika – Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2015, Vol. 56, No. 2, pp. 43-52. DOI: 10.15372/PMTF20150205. [in Russian].

10. Shagapov V.Sh., Tazetdinov B.I. K teorii razlozheniya metastabil'nogo gazogidrata [On the Theory of the Decomposition of a Metastable Gas Hydrate]. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoi tekhnologii – Theoretical Foundation of Chemical Engineering*, 2013, Vol. 47, No. 4, pp. 454-463. DOI: 10.7868/S0040357113030123. [in Russian].

11. Shagapov V.Sh., Tazetdinov B.I., Nurislamov O.R. K teorii obrazovaniya i razlozheniya gazogidratnykh chastits v protsesse ikh vsplytiya v vode [A Contribution to the Theory of Gas Hydrate Particle Formation and Decomposition in the Process of Their Ascent in Water]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*, 2013, No. 6 (26), pp. 106-113. [in Russian].

12. Nasyrov A.A. Modelirovanie protsessa napolneniya «kupola-separatora», prednaznachennogo dlya likvidatsii neftegazovykh vybrosov v zone morskogo dna [Modelling of Filling the «Dome-Separator» Intended for Elimination of Oil and Gas Emissions in the Seabed Zone]. *Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta – Bulletin of Kemerovo State University*, 2015, No. 2-1 (62), pp. 41-45. [in Russian].

13. Chiglintsev I.A., Nasyrov A.A. Modelirovanie protsessa napolneniya «kupola-separatora», s razlozheniem gazogidrata, obrazovavshegosya v period montazha ustanovki [Modeling of the Process of Filling a Dome Separator with

the Decomposition of a Gas Hydrate Formed during the Mounting of the Installation]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal – Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2016, Vol. 89, No. 4, pp. 851-860. [in Russian].

14. Kildibaeva S.R. Modelirovanie kupola-separatora pri razlive nefti v shel'fe [Modeling Dome-Separators for Oil Spills on the Shelf]. *Fundamental'nye issledovaniya – Fundamental Research*, 2013, No. 10-5, pp. 1045-1050. [in Russian].

15. Tikhonov A.N., Samarskii A.A. *Uravneniya matematicheskoi fiziki* [Equations of Mathematical Physics]. Moscow, MGU Publ., 2004. 798 p. [in Russian].

16. Gimatudinov Sh.K. *Fizika neftyanogo i gazovogo plasta* [Physics of Oil and Gas Reservoir]. Moscow, Nedra Publ., 1971. 312 p. [in Russian].

17. Byk S.Sh., Makogon Yu.F., Fomina V.I. *Gazovye gidraty* [Gas Hydrates]. Moscow, Khimiya Publ., 1980. 296 p. [in Russian].

18. Nigmatulin R.I., Shagapov V.Sh., Syrtlanov V.R. Avtomodel'naya zadacha o razlozhenii gazogidratov v poristoi srede pri depressii i nagreve [Self-Similar Problem on the Decomposition of Gas Hydrates in a Porous Medium under Depression and Heating]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika – Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1998, Vol. 39, No. 3, pp. 111-118. [in Russian].

19. Shagapov V.Sh., Chiglintseva A.S., Syrtlanov V.R. O vozmozhnosti vymyvaniya gaza iz gazogidratnogo massiva posredstvom tsirkulyatsii teploi vody [Possibility of Gas Washout from a Gas-Hydrate Massif by Circulation of Warm Water]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika – Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2009, Vol. 50, No. 4, pp. 100-111. [in Russian].

20. Shagapov V.Sh., Chiglintseva A.S., Belova S.V. Matematicheskoe modelirovanie nagnetaniya gidratoobrazuyushchego gaza v snezhnyi massiv, nasyshchennyi tem zhe gazom [Mathematical Modelling of Injection Gas Hydrate Formation into the Massif of Snow Saturated the Same Gas]. *Trudy Instituta*

mekhaniki im. R.R. Mavlyutova UNTs RAN – Proceedings of the Mavlyutov Institute of Mechanics, 2016, Vol. 11, No. 2, pp. 233-239. DOI: 10.21662/uim2016.2.034. [in Russian].

21. Kutateladze S.S. *Osnovy teorii teploobmena* [Basics of the Theory of Heat Transfer]. Moscow, Atomizdat Publ., 1979. 416 p. [in Russian].

22. Chirkin V.S. *Teplofizicheskie svoystva materialov yadernoi tekhniki* [Thermophysical Properties of Materials for Nuclear Technology]. Moscow, Atomizdat Publ., 1968. 484 p. [in Russian].

23. Babichev A.P., Babushkina N.A., Bratkovskii A.M. *Fizicheskie velichiny. Spravochnik* [Physical Quantities. Directory]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 1232 p. [in Russian].

24. Beletskii V.M., Krivov G.A. *Alyuminiyevye splavy (sostav, svoystva, tekhnologiya, primeneniye): Spravochnik* [Aluminum Alloys (Composition, Properties, Technology, Application). Directory]. Kiev, Komintekh Publ., 2005. 365 p. [in Russian].

25. Bogdanov S.N., Burtsev S.I., Ivanov O.P., Kupriyanova A.V. *Kholodil'naya tekhnika. Konditsionirovaniye vozdukha. Svoystva veshchestv: Spravochnik* [Refrigeration Equipment. Air Conditioning. Properties of Substances: Handbook]. Saint-Petersburg, SPbGAKhPT Publ., 1999. 308 p. [in Russian].

Сведения об авторах

About the authors

Чиглинцев Игорь Александрович, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры технологического образования, БашГУ, филиал, г. Бирск, Республика Башкортостан, Российская Федерация

Igor A. Chiglintsev, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor of Technological Education Department, BashSU, Branch, Birsk, Republic of Bashkortostan, Russian Federation

e-mail: schnik@mail.ru

Насыров Азат Аскатович, канд. физ.-мат. наук, г. Бирск, Республика Башкортостан, Российская Федерация

Azat A. Nasyrov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, BirsK, Republic of Bashkortostan, Russian Federation

e-mail: nasaza@mail.ru

Чиглинцева Ангелина Сергеевна, д-р физ.-мат. наук, доцент кафедры физики, УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Angelina S. Chiglintseva, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor of Physics Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: Changelina@rambler.ru