

Влияние материала трубки отвода газа на интенсивность гидратообразования¹

Уразов Р.Р.*, Чиглинцев И.А.**, Насыров А.А.**

*Ишимбайский филиал Уфимского государственного авиационного технического университета, Ишимбай

**Бирский филиал Башкирского государственного университета, Бирск

В работе на основе уравнений механики многофазных сред построена математическая модель, описывающая процесс течения влажного природного газа в трубке, отводящей газ из «купола–сепаратора», с учётом гидратообразования на внутренних стенках канала. Приведены результаты расчетов эволюции полей скорости, температуры и давления газа, а также толщины гидратных отложений на стенках трубопровода. Описаны склеротические процессы, которые могут привести к закупорке отводящей трубки и последующему переполнению купола. Показано влияние типа материала трубки на динамику отложения в ней газогидратных образований.

Ключевые слова: отбор газа, склеротические отложения, гидрат, «купол–сепаратор», углеводороды

1. Введение

Важной проблемой в современном мире является предотвращение экологических аварий, вызванных неконтролируемым выбросом углеводородного сырья в воды Мирового океана вследствие разрыва скважин вблизи дна глубоких водоемов. Наглядными примерами подобных аварий могут служить прорывы скважин в Мексиканском заливе в 2010 г. и утечка газа на добывающей платформе в Северном море в марте 2012 г.

Одним из наиболее эффективных методов предотвращения подобных выбросов может служить применение «купола–сепаратора», который крепится с помощью якорей непосредственно над местом утечки [1–3]. Собранные таким образом нефть и газ откачиваются с помощью гибких труб (что позволяет не использовать жестко закрепленные над местом добычи платформы) на судно-сборщик для последующей транспортировки на сушу.

В настоящей статье, являющейся продолжением

и дальнейшим развитием работ [2, 4–6], рассматривается течение газа в трубке отбора с учётом образования склеротических отложений газогидрата.

2. Основные уравнения

Для образования газовых гидратов необходимо наличие воды (или ее паров) и легких углеводородных компонент [7–9]. Примем допущения, что поток природного газа в трубопроводе состоит из двух компонент: воды (в парообразном состоянии и в виде капелек) и углеводородной смеси; температура для каждого сечения канала одинакова для обеих фаз (газа и жидкости); фазовые переходы происходят в равновесном режиме; течение в газопроводе квазиустановившееся; массовый расход газа гораздо больше скорости роста массы гидратного слоя. Расход газа m_g по всей длине трубопровода будем считать постоянным ($m_g = m_{g0} = \text{const}$):

$$m_g = \rho_g w_g S, \quad S = \pi a^2. \quad (1)$$

где ρ_g и w_g — плотность и скорость газа в трубопроводе; S и a — площадь и радиус «живого» сечения трубопровода. Здесь и в дальнейшем нижним индексом l и v обозначим параметры, относящиеся к жидкой и парообразной фазам, w и g — параметры, относящиеся к воде и газовому потоку в целом, а равновесные параметры — s . Поскольку транспорт

¹Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-41-020244-р_а).

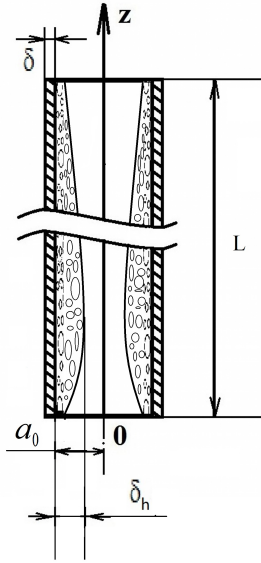


Рис. 1. Схема трубопровода для отвода газа

газа может сопровождаться отложением газогидрата, то a и, следовательно, S являются функциями координаты z и времени t . Координату z будем отсчитывать от входного сечения трубопровода. Трубопровод расположен строго вертикально (рис. 1).

Введем параметр $\delta_h = \delta_h(z, t)$, определяющий толщину газогидратного слоя вблизи стенки трубопровода с радиусом a_0 , тогда $a = a_0 - \delta_h$.

Вода, содержащаяся в потоке с массовой концентрацией k_w , может находиться в двух агрегатных состояниях: в виде жидких капелек с концентрацией k_l и в виде пара в газовой фазе с массовой концентрацией k_v . Эти концентрации связаны между собой следующим образом:

$$k_w = k_l + (1 - k_l)k_v.$$

Уравнение импульсов для рассматриваемого течения газа в стационарном приближении может быть записано в виде:

$$m_g \frac{dw_g}{dz} = -S \frac{dp}{dz} - \rho_g g S - f, \quad (2)$$

где p — давление газа; g — ускорение свободного падения; f — сила трения, отнесенная на единицу площади трубки.

Силу трения между потоком и стенками канала примем в виде [10–12]:

$$f = 2\pi a \lambda \frac{\rho_g w_g^2}{8},$$

где λ — коэффициент гидравлического сопротивления, определяемый по формуле Блазиуса.

Уравнение сохранения энергии с учётом тепловых эффектов конденсации пара, отвода тепла к внутренней стенке трубопровода запишем в виде:

$$m_g c_g \frac{dT_g}{dz} = \frac{m_g}{\rho_g} \frac{dp}{dz} + m_g l_w \frac{dk_l}{dz} - Q_{gc}, \quad (3)$$

$$Q_{gc} = 2\pi a q_{gc}.$$

Здесь T_g — температура газа; c_g — удельная теплоемкость газа; l_w — теплота перехода в парообразное состояние для воды; q_{gc} — интенсивность теплопередачи от газового потока к стенке трубопровода, отнесенная к единице площади.

Теплопередача от газового потока к стенке трубы [13, 14] будет происходить в трёх режимах: первый режим реализуется на участке, где не происходит гидратообразования; второй режим будет реализовываться там, где образование гидратных отложений лимитируется теплопроводом; третий режим обусловлен отложением гидратов по диффузионному механизму.

Приведенные уравнения масс (1), импульсов (2), энергии (3), с учётом уравнения Клапейрона–Менделеева, при задании гидравлического трения f , интенсивности теплоотвода Q_{gc} являются замкнутой системой.

Пусть массовая интенсивность образования газогидрата на единицу площади равна j_h . Тогда для скорости роста толщины газогидрата на внутренней стенке трубопровода можно записать:

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} = \frac{j_h}{\rho_g}.$$

Для упрощения численных расчетов примем, что интенсивности потребления влаги и роста гидрата связаны следующим «стехиометрическим» условием:

$$j_w = (1 - k_{gh})j_h,$$

где k_{gh} — массовая концентрация гидратообразующего газа в составе газогидрата.

Образование газогидрата может происходить двумя способами. Первый будем называть режимом теплового баланса, когда интенсивность процесса определяется лишь интенсивностью теплоотвода от поверхности фазовых переходов (поверхности газогидрата). В этом случае полагается, что температура поверхности фазовых переходов T_c^- (которая является одновременно температурой внутренней стенки трубопровода) изотермична и равна равновесной температуре гидратообразования $T_s(p)$, соответствующей значению давления газа p в потоке ($T_c^- = T_s(p)$) [5]. Следовательно, интенсивность гидратообразования определяется из

условия теплового баланса:

$$l_h j_h = q_{cw} - q_{gc}.$$

Для второго режима, сопровождающегося «дефицитом» влаги, процесс полностью лимитируется поступлением влаги к поверхности газогидратного слоя. При этом температура поверхности T_c^- должна удовлетворять условию существования газогидрата $T_c^- \leq T_s(p)$. Примем, что концентрация влаги в газовой фазе вблизи поверхности газогидрата равна нулю ($k_{wc} = 0$). Тогда, используя известные соотношения [14, 15] для теплопереноса и аналогии процессов теплопередачи и диффузии в турбулентном потоке, получим:

$$j_{h(w)} = \frac{v^{(D)}}{2a} \rho_g k_w \text{Sh}, \quad \text{Sh} = 0.021 \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{(D)0.43},$$

$$\text{Pr}^{(D)} = \frac{v^{(\mu)}}{v^{(D)}}, \quad v^{(\mu)} = \frac{\mu_g}{\rho_g}.$$

Здесь $v^{(D)}$ и $v^{(\mu)}$ — коэффициенты диффузии и кинематической вязкости; Sh — число Шервуда; Re — число Рейнольдса; $\text{Pr}^{(D)}$ — диффузионное число Прандтля.

За температуру гидратообразования смеси газов примем равновесную температуру образования гидрата метана, соответствующую давлению p , которая, как отмечается в работах [13, 15, 16], для большинства гидратообразующих сред (в частности, для метана и воды) хорошо описывается

формулой

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

где T_{h0} , p_{h0} , T_* — эмпирические параметры.

3. Результаты расчетов

Проведены расчёты, описывающие динамику изменения скорости, температуры, давления и изменение толщины гидратных отложений на стенках трубки со временем. Для параметров отводящей трубки из полиуретана приняты следующие значения: радиус $a = 0.05$ м; длина $l = 1000$ м и толщина стенки $\delta = 0.005$ м. Теплофизические параметры для газа, воды, пара и гидрата: $T_w = 277$ К; $m_g = 1$ кг/с; $R_g = 520$ Дж/(кг · К); $\mu_g = 1028 \cdot 10^{-8}$ кг/(м · с); $c_g = 2365$ Дж/(кг · К); $\lambda_g = 0.03$ Вт/(кг · К); $l_w = 1.7 \cdot 10^6$ Дж/кг; $R_v = 461$ Дж/(кг · К); $p_{w*} = 9.34 \cdot 10^9$; $T_{w*} = 4228$; $l_h = 5 \cdot 10^5$ Дж/К; $k_v = 3 \cdot 10^{-3}$; $\rho_h = 910$ кг/м³; $T_{h0} = 283$ К; $p_{h0} = 6.95$ МПа; $T_* = 10$ К. Начальные температура и давление газа на входе были приняты $T_g^0 = 320$ К; $P_g^0 = 97$ атм. Время расчёта составляет 50 часов. Параметры для полиуретана и резины, соответственно: $\lambda_p = 0.25$ Вт/(кг · К); $\lambda_{rez} = 0.15$ Вт/(кг · К).

На рис. 2 представлены кривые, описывающие изменение различных параметров по длине трубки: из полиуретана (штриховая линия), из резины

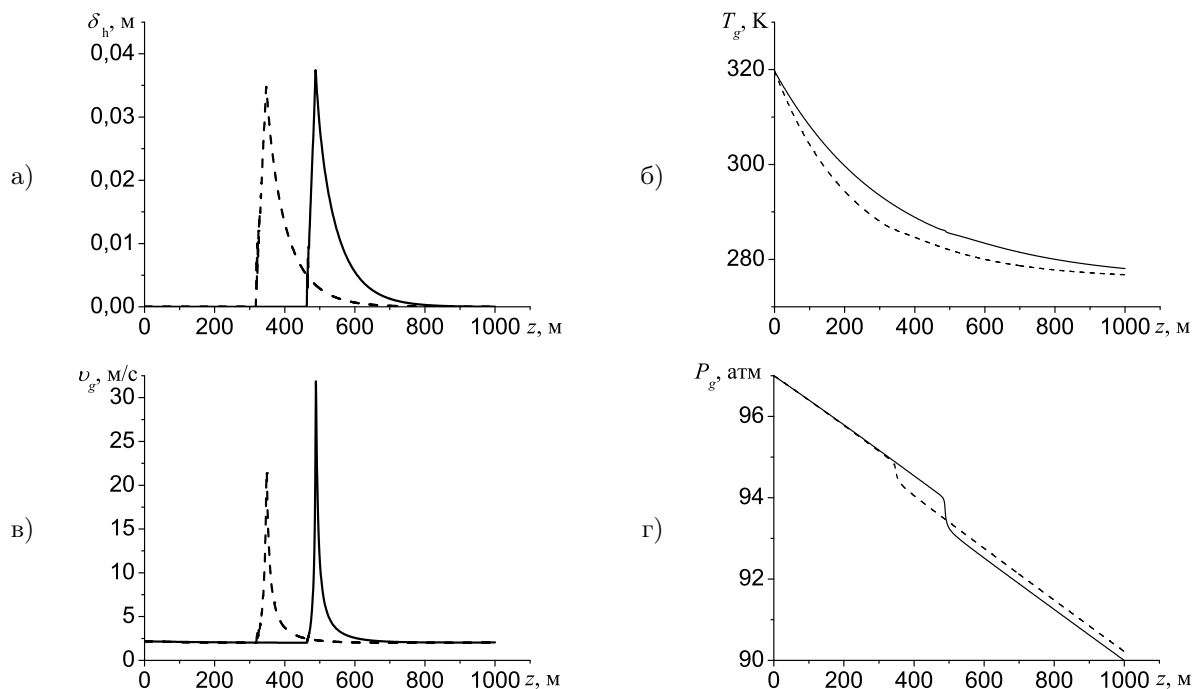


Рис. 2. Изменение толщины образующегося гидрата (а), температуры (б), скорости (в) и давления (г) газа в отводящей трубке

(сплошная линия). Так как теплопроводность резины ниже, чем у полиуретана, т.е. теплорезистивные свойства резины выше, это позволяет сохранять температуру газа достаточно продолжительное время и, как следствие, сместить область образования гидратных отложений в трубке.

4. Заключение

На основе построенной модели получена эволюция толщины гидратных отложений на стенках трубки, а также скорости, температуры и давления газа. Показано, что использование резины в качестве материала для изготовления трубки отбора способствует более длительному сохранению температуры газа по сравнению с полиуретаном, что, в свою очередь, смещает область возможной закупорки трубопровода к поверхности океана. Однако, здесь следует учитывать прочностные характеристики такой трубки при ее эксплуатации в условиях больших глубин и давлений.

Таким образом, уменьшение теплоотвода от отводящей трубки за счёт использования различных материалов может способствовать предотвращению закупорки канала газогидратом в процессе отбора газа из «купола-сепаратора».

Список литературы

- [1] Жуков А.В., Звонарев М.И., Жукова Ю.А. Способ добычи газа из глубоководных месторождений газогидратов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2013. № 10, ч. 1. С. 16–20.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Насыров А.А. Моделирование процесса наполнения «купола – сепаратора», предназначенного для ликвидации нефтегазовых выбросов в зоне морского дна // Вестник Кемеровского государственного университета. 2015. № 2(62). Т. 1. С. 41–45.
- [5] Уразов Р.Р., Чиглинцев И.А., Насыров А.А. Влияние толщины стенки отводящей трубки на гидратообразование при отборе газа из «купола-сепаратора» // Вестник Башкирского университета. 2017. Т. 22, № 4. С. 330–335.
- [6] Уразов Р.Р., Чиглинцев И.А., Насыров А.А. Образование склеротических отложений гидрата в трубке для отбора газа из «купола-сепаратора» // Инженерно-физический журнал. 2017. Т. 90, № 5. С. 1223–1231.
- [7] Билошов В.М. Математическая модель образования гидратов при течении влажного газа в трубах // Инженерно-физический журнал. 1984. № 1. С. 57–64.
- [8] Бондарев Э.А., Габышева Л.Н., Каниболотский М.А. Моделирование образования гидратов при движении газа в трубах // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. 1982. № 5. С. 105–112.
- [9] Истомин В.А. Фазовые равновесия и физико-химические свойства газовых гидратов: анализ новых экспериментальных данных. М.: ВНИИГазпром, 1992. 41 с.
- [10] Бекиров Т.М., Шаталов А.Т. Сбор и подготовка к транспорту природных газов. М.: Недра, 1986. 261 с.
- [11] Билошов В.М. Математическая модель образования гидратов при течении влажного газа в трубах // Инженерно-физический журнал. 1984. № 1. С. 57–64.
- [12] Гужов А.И., Титов В.Г., Медведев В.Ф., Васильев В.А. Сбор, транспорт и хранение природных углеводородных газов. М.: Недра, 1978. 401 с.
- [13] 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.
- [14] Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.
- [15] Бык С.Ш. Газовые гидраты / С.Ш. Бык, Ю.Ф. Макогон, В.И. Фомина. М.: Химия, 1980. 296 с.
- [16] 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 Уфимского научного центра РАН. 2016. Т. 11, № 2. С. 233–239.

Influence of the gas extraction pipes material on the intensity of hydrate formation

Urazov R.R.* , Chiglinev I.A.** , Nasyrov A.A.**

*Ishimbay Branch of Ufa State Aviation Technical University, Ishimbay

**Birsk Branch of Bashkir State University, Birsk

The paper considers the process of formation of hydrate deposits on the walls of the pipeline, in the process of gas extraction from the "dome-separator", designed for emergency collection of hydrocarbons on the ocean floor. On the basis of the constructed mathematical model the influence of the kind of tube material on the deposition of gas hydrates is shown.

Keywords: the extraction of the gas, the sclerotic deposits, hydrate, dome-separator, hydrocarbons



Многофазные системы:
модели, эксперимент, приложения

ИМех им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН

Статья рекомендована к публикации
Программным комитетом VI Российской конференции
«Многофазные системы: модели, эксперимент, приложения»