

ОТОЗВАНА/RETRACTED 10.01.2019

© В.Ш. ШАГАПОВ¹, А.С. ЧИГЛИНЦЕВА², Г.А. КУНСБАЕВА³

¹ Институт механики Уфимского научного центра РАН (г. Уфа)

² Бирский филиал Башкирского государственного университета (г. Бирск)

³ Сибайский филиал Башкирского государственного университета (г. Сибай)
Shagapov@rambler.ru, changelina@rambler.ru, Kun_gulnaz@mail.ru

УДК 532.546

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ГАЗА ИЗ ГАЗОГИДРАТА
В ВЕРТИКАЛЬНОМ РЕАКТОРЕ**

**MATHEMATICAL MODELING OF WASHING GAS
FROM GAS HYDRATES IN THE VERTICAL REACTOR**

В статье ставится задача рассмотреть технологическую схему и теоретическую модель для процесса вымывания газа из состава гидрата теплой водой в противоточном вертикальном трубчатом реакторе непрерывного действия.

The article considers the technological scheme and a theoretical model for the process of washing the gas from the hydrate with warm water in a countercurrent vertical tubular continuous reactor.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Гидрат, теплоноситель, реактор.

KEY WORDS. Hydrate, coolant, reactor.

Гидраты природного газа представляют собой уникальное сырье не только для получения легких углеводородных источников энергии, но также и для получения экологически чистой пресной воды. Запасы такой системы в природе практически неисчерпаемы. При этом только потенциальные запасы метана в газогидратах оцениваются специалистами до 2×10^{16} м³ [1-5]. Поэтому большой интерес в будущем представляет создание способов добычи газогидратов и их переработки с целью получения газа и пресной воды.

Согласно предполагаемой схеме, реактор сверху постоянно загружается гидратом, а снизу в реактор подается теплая вода некоторым постоянным расходом (см. рис. 1). Продукты разложения (вода и газ) самотеком удаляются из реактора, при котором уровень воды поддерживается на постоянной высоте.

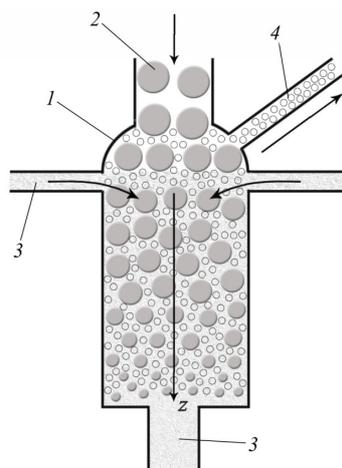


Рис. 1. Технологическая схема:
1 — реактор, 2 — гидрат, 3 — вода, 4 — газ

Экспериментальная часть. Ось z направим по оси трубчатого канала вертикально вниз. Полагаем, что все основные параметры течения трехфазной системы, состоящей из частиц гидрата, воды и газа, однородны по сечению канала [6]. Дроблением частиц гидрата, опускающихся со скоростью v_h , будем пренебрегать, тогда уравнение сохранения их числа запишется как:

$$\frac{d(Sn_h v_h)}{dz} = 0, \quad S = \pi R^2. \quad (1)$$

Здесь и далее нижние индексы h, w, g относятся к параметрам гидрата, воды и газа, n_h число частиц гидрата в единицах объема, R и S — радиус и площадь сечения реактора.

Уравнения сохранения масс гидрата ($i = h$), воды ($i = w$) и газа ($i = g$) имеют вид:

$$\frac{dm_h}{dz} = -J_h, \quad \frac{dm_w}{dz} = -J_w, \quad \frac{dm_g}{dz} = -J_g, \quad (2)$$

$$m_h = S\alpha_h \rho_h^0 v_h, \quad m_w = S\alpha_w \rho_w^0 v_w, \quad m_g = S\alpha_g \rho_g^0 v_g,$$

где $m_i, \rho_i^0, \alpha_i, v_i$ ($i = h, w, g$) — массовые расходы, истинные плотности, объемные концентрации и скорости фаз; J_h, J_w, J_g — интенсивности разложения гидрата, образования воды и газа (за счет разложения гидрата), отнесенные на единицу длины реактора.

Газогидрат является клатратным соединением с массовым содержанием газа G . Поэтому интенсивности разложения гидрата и образования воды и газа связаны как:

$$J_w = (1 - G)J_h, \quad J_g = GJ_h. \quad (3)$$

Учитывая (3), уравнение (2) допускает следующие интегралы масс:

$$m_h - m_w - m_g = c, (1 - G)m_h - m_w = c_w, Gm_h - m_g = c_g. \quad (4)$$

Здесь c, c_w, c_g — постоянные, определяемые из условий на входе и на выходе из реактора. Отметим, что один из интегралов в (3) является зависимым и причем $c = c_w + c_g$.

При записи уравнений теплового баланса потерями тепла через стенки реактора будем пренебрегать, кроме того, будем считать, что температура воды и газа совпадают ($T_g = T_w$). Тогда можем записать следующие уравнения сохранения энергии гидрата и газожидкостной смеси:

$$\begin{aligned} \frac{d(m_h c_h T_h)}{dz} &= Q_{\sigma h} - J_h c_h T_\sigma, \\ \frac{d}{dz}(m_w c_w + m_g c_g) T_w &= Q_{w\sigma} - (J_w c_w + J_g c_g) T_\sigma. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь T_σ — температура на поверхности частицы гидрата; $Q_{w\sigma}$ и $Q_{\sigma h}$ — тепловые потоки от жидкости к поверхности гидрата и от этой поверхности к гидрату, отнесенные к единице длины реактора. Тепловые потоки, в свою очередь, должны удовлетворить условиям теплового баланса с учетом затрат на фазовые переходы:

$$Q_{w\sigma} - Q_{\sigma h} = J_h l_h, \quad (6)$$

где l_h — удельная теплота разложения, отнесенная на единицу массы гидрата.

Приведенные уравнения необходимо дополнить следующими кинематическими соотношениями:

$$\alpha_h + \alpha_w + \alpha_g = 1, \quad \alpha_h = \frac{4}{3} \pi a_h^3 n_h, \quad (7)$$

где a_h — радиус частиц гидрата. Для объемного содержания гидрата примем, что он равен величине объемного содержания для плотной засыпки сферических частиц. Тогда по [7] будем иметь $\alpha_h = 0.64$.

Интенсивности теплообмена, отнесенные к единице длины реактора, представим как:

$$Q_{w\sigma} = S n_h q_{w\sigma}, \quad Q_{\sigma h} = S n_h q_{\sigma h}, \quad (8)$$

где $q_{w\sigma}, q_{\sigma h}$ — интенсивности тепломассообмена, отнесенные к одной частице гидрата, которые, в свою очередь, записываются в виде:

$$\begin{aligned} q_{w\sigma} &= 2\pi a_h \beta_w^{(T)} (T_w - T_\sigma), \quad q_{\sigma h} = 2\pi a_h \beta_h^{(T)} (T_\sigma - T_h), \\ \beta_w^{(T)} &= \lambda_w \text{Nu}_w, \quad \beta_h^{(T)} = \lambda_h \text{Nu}_h, \\ \text{Nu}_w &= 2 + 0.65 \sqrt{\text{Pe}_{wh}}, \quad \text{Nu}_h = 10, \\ \text{Pe}_{wh} &= \frac{2a_h (v_w + v_h)}{\chi_w}, \quad \chi_w = \frac{\lambda_w}{\rho_w c_w}. \end{aligned} \quad (9)$$

Здесь β, λ, χ — коэффициенты теплопереноса, теплопроводности, температуропроводности, Nu и Pe — числа Нуссельта и Пекле.

Скорость газовой фазы представим как:

$$v_g = v_w - v_{gw}, \quad (10)$$

где v_{gw} — скорость миграции газовой фазы относительно жидкости.

Рассмотренная выше система уравнений, дополненная некоторыми гипотезами, позволяющими получить конкретные численные величины для параметров, определяющих интенсивность разложения гидрата и относительное движение газовой фазы, позволяет рассчитывать производство газа и воды при заданной интенсивности загрузки реактора гидратом и теплой водой. Для функционирования такого реактора необходимо обеспечить во всем его объеме условия разложения гидрата. Таким условием является величина температуры воды T_w , контактирующей с гидратом, которая должна быть выше равновесной температуры $T_s(p)$ для значения давления в реакторе p .

Представляется, что наибольший практический интерес имеет случай, когда изначально гидрат попадает в реактор с температурой T_{h0} , превышающей равновесную температуру фазовых переходов $T_s(p)$ для значения давления в реакторе ($T_{h0} > T_s(p)$). Поэтому для такой ситуации естественно предположить, что все тепло, отбираемое от воды, уходит в основном на затраты, связанные с теплотой фазовых переходов. В соответствии с этим в дальнейшем будем считать, что температура гидрата в реакторе не меняется ($T_h = T_{h0}$), кроме того, температура на поверхности частицы гидрата равна средней температуре гидрата $T_\sigma = T_h$. Тогда в соответствии с (5) интенсивность разложения гидрата будет полностью определяться из условия теплового баланса как:

$$J_h = \frac{Q_{w\sigma}}{l_h} \text{ или } j_h = \frac{q_{w\sigma}}{l_h}. \quad (11)$$

Пусть реактор загружается гидратом и водой с интенсивностью m_{h0} и m_{w0} , имеющих температуры $T_h = T_{h0}$ и $T_w = T_{we}$. Следовательно, на входе ($z = 0$) и на выходе ($z = z_e$) реактора можем записать следующие граничные условия:

$$m_h = m_{h0}, T_h = T_{h0} \quad (z = 0) \text{ и } m_w = m_{we}, T_w = T_{we} \quad (z = z_e). \quad (12)$$

При прохождении гидрата через реактор происходит полное разложение. Поэтому для массовых расходов гидрата m_{he} , а также газа m_{ge} при $z = z_e$ имеет место $m_{he} = m_{ge} = 0$. Тогда на основе интегралов масс (4) можем записать:

$$m_g = Gm_h, m_w = (1 - G)m_h + m_{we}. \quad (13)$$

Кроме того, на основе второго уравнения из (4) с учетом (10) — (12), а также полагая $T_\sigma = T_h$, получим интеграл энергии:

$$m_{we}c_wT_w + m_h((c_w(1 - G) + c_gG)(T_w - T_h) + l_h) = m_{we}c_wT_{we}. \quad (14)$$

Данное выражение позволяет однозначно определить температуру воды T_w через массовый расход гидрата m_h .

Принятые выше допущения позволяют свести задачу о структуре течения в реакторе к одному дифференциальному уравнению для m_h :

$$\frac{dm_h}{dz} = -\frac{Q_{w\sigma}}{l}. \quad (15)$$

Результаты расчетов. Для параметров, определяющих теплофизические свойства гидрата, воды и газа, были приняты следующие значения: $\rho = 913 \text{ кг/м}^3$, $l_h = 5 \times 10^5 \text{ Дж/кг}$, $\rho_w = 1000 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 0.58 \text{ Дж/(м с К)}$, $c_w = 4200 \text{ Дж/(кг К)}$, $\lambda_g = 0.03 \text{ Дж/(м с К)}$, $R_g = 520 \text{ Дж/(кг К)}$, $G = 0.12$.

Для базовых параметров, определяющих геометрию и режим работы реактора, принимались следующие численные величины для параметров: $R = 1 \text{ м}$, $m_{h0} = 100 \text{ кг/с}$, $T_w = 300 \text{ К}$, $T_h = 277 \text{ К}$, $p = 3 \times 10^6 \text{ Па}$. Значение расхода теплой воды на входе ($m_{we} = 517 \text{ кг/с}$) реактора принималось на основе формулы (15). Отметим, что данное значение соответствует минимальному значению расхода теплой воды, обеспечивающего в энергетическом плане полное разложение гидрата при задании m_{h0} , T_{h0} и T_{we} .

При задании величины скорости миграции газа относительно жидкости ориентировались на результаты работ [9; 10] и при расчетах использовали значение $v_{gw} = 0.1 \text{ м/с}$.

На рис. 2 представлены результаты расчетов для распределения массовых расходов и скоростей фаз, а также температуры воды, радиуса частиц гидрата и объемного содержания газа вдоль реактора.

Установлено, что при заданных производительности и радиусе высота реактора должна быть не менее чем $z_e = 15 \text{ м}$. Видно, что объемное содержание воды в реакторе не опускается ниже значения $\alpha_w = 0.2$.

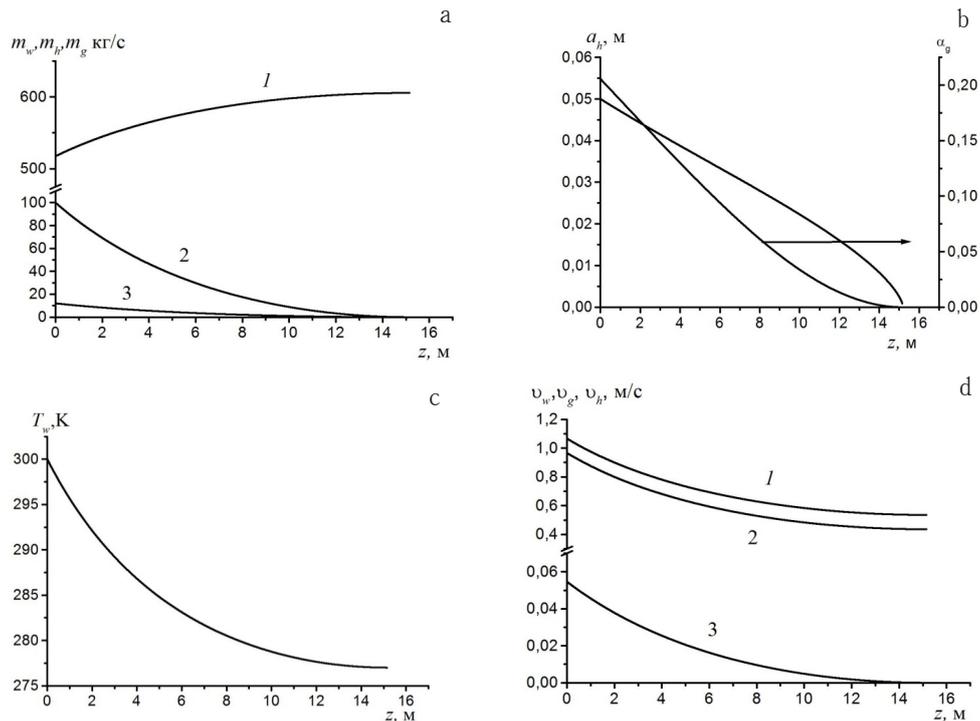


Рис. 2. Распределения (а) массовых расходов: 1 — воды, 2 — гидрата, 3 — газа; (б) объемного газосодержания и радиуса частиц гидрата; (с) температуры воды; (д) скоростей частиц: 1 — воды, 2 — газа, 3 — гидрата вдоль реактора

Следовательно, по всей длине реактора процесс разложения гидратных частиц происходит в основном из-за контакта их поверхности с водяной фазой. При этом перепад давления в реакторе мал и составляет порядка 1% от значения давления, которое реализуется в реакторе. Таким образом, вышеприведенная схема для данных расчетов вполне оправдана.

Выводы. В работе исследована возможность вымывания газа из гидратных валунов. Построена соответствующая технологическая схема и описана модель реактора для процесса разложения гидрата с целью получения газа и пресной воды. Установлены оптимальные режимы работы и минимальные размеры реактора с точки зрения энергетических затрат в зависимости от исходных параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Makogon, Y.F. Natural gas hydrates — A promising source of energy // J. of Natural Gas Sci. and Eng. 2010. № 2. P. 49.
2. Истомин В.А., Якушев В.С. Газовые гидраты: в природных условиях. М.: Недра, 1992.
3. Нигматулин Р.И. Основы механики гетерогенных сред. М.: Наука, 1978.
4. Peng Zhang, Qingbai Wu, Yibin Pu and Yousheng Deng. Water transfer characteristics during methane hydrate formation processes in layered media // Energies. 2011. Vol. 4. P. 1129.
5. Bei Liu, Qing Yuan, Ke-Hua Su, Xin Yang, Ben-Cheng Wu, Chang-Yu Sun and Guang-Jin Chen Experimental simulation of the exploitation of natural gas hydrate // Energies. 2012. Vol. 5. P. 466.
6. Шагапов В.Ш., Буркин М.В., Воронин А.В., Шатов А.А. К расчету обжига известняка в коксовой печи // Теоретические основы химической технологии. 2004. Т. 38, № 4. С. 467.
7. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Т. 1. М.: Наука, 1987.
8. Физическая химия: учебник для хим. спец. вузов / под ред. А.Г. Стромберга. М.: Высшая школа, 2001.
9. Покусаев Б.Г. Процессы переноса в многофазной среде // Теоретические основы химической технологии. 2007. Т. 41, № 1. С. 35.
10. Шагапов В.Ш., Чиглинцева А.С., Кунсбаева Г.А. Теоретическое моделирование реактора. Для процесса вымывания газа из гидрата // Теоретические основы химической технологии. 2013. Т. 47, № 2 С. 208-213.

REFERENCES

1. Makogon, Y.F. Natural gas hydrates — a promising source of energy // J. of Natural Gas Sci. and Eng. 2010. № 2. P. 49.
2. Istomin, V.A., Yakushev V.S. Gazovye gidraty: v prirodnykh usloviakh. Gas hydrates: under natural conditions. Moscow: Nedra, 1992. (in Russian).
3. Nigmatulin, R.I. Osnovy mekhaniki geterogennykh sred. Fundamentals of mechanics of heterogeneous media. Moscow: Nauka, 1978. (in Russian).
4. Peng Zhang, Qingbai Wu, Yibin Pu and Yousheng Deng. Water transfer characteristics during methane hydrate formation processes in layered media // Energies. Vol. 4. 2011. 1129 p.
5. Bei Liu, Qing Yuan, Ke-Hua Su, Xin Yang, Ben-Cheng Wu, Chang-Yu Sun and Guang-Jin Chen. Experimental simulation of the exploitation of natural gas hydrate // Energies. Vol. 5. 2012. 466 p.
6. Shagapov, V.S., Burkin, M.V., Voronin, A.V., Shatov, A.A. K raschetu obzhiga izvestniaka v koksovoi pechi // Teoreticheskie osnovy khim. tekhnologii. On the calculation

of burning limestone in a coke oven // Theory of chemical technology. Vol. 38. № 4. 2004. 467 p. (in Russian).

7. Nigmatulin, R.I. Динамика многофазных сред. Dynamics of multiphase media. Vol. 1. Moscow: Nauka, 1987. (in Russian).

8. Fizicheskaja khimiia Physical chemistry. Moscow: Vysshaya Shkola, 2001. (in Russian).

9. Pokusaev, B.G. Protssesy perenosa v mnogofaznoi srede // Teoreticheskie osnovy khimicheskoi tekhnologii. Transport processes in multiphase environment // Theory of chemical technology. Vol. 41. № 1. 2007. 35 p. (in Russian).

10. Shagapov, V.S., Chiglintseva, A.S., Kunsbaeva, G.A. Teoreticheskoe modelirovanie reaktora. Dlia protsessa vymyvaniia gaza iz gidrata // Teoret. osnovy khim. tekhnologii. Theoretical modeling of the reactor. The process of washing the gas hydrate // Theory of chemical technology. Vol. 47. № 2. 2013. Pp. 208-213. (in Russian).

Авторы публикации

Шагапов Владислав Шайхулагзамович — ведущий научный сотрудник Института механики Уфимского научного центра РАН (г. Уфа), доктор физико-математических наук, профессор

Чиглинцева Ангелина Сергеевна — доцент кафедры высшей математики Бирского филиала Башкирского государственного университета (г. Бирск), кандидат физико-математических наук

Кунсбаева Гульназ Абдулхаковна — старший преподаватель кафедры прикладной математики и информационных технологий Сибайского филиала Башкирского государственного университета (г. Сибай)

Authors of the publication

Vladislav Sh. Shagapov — Dr. Phys. and Math. Sci., Leading Researcher, Institute of Mechanics, Ufa Scientific Center of the Russian Academy of Sciences

Angelina S. Chiglintseva — Associate Professor, Cand. Phys. and Math. Sci., Department of Higher Mathematics Birsik Branch of Bashkir State University

Gulnaz A. Kunsbaeva — Senior Lecturer, Department of Applied Mathematics and Information Technologies, Sibai Branch of Bashkir State University