

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:

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

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 :

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

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 $\alpha_w = 0.2$.

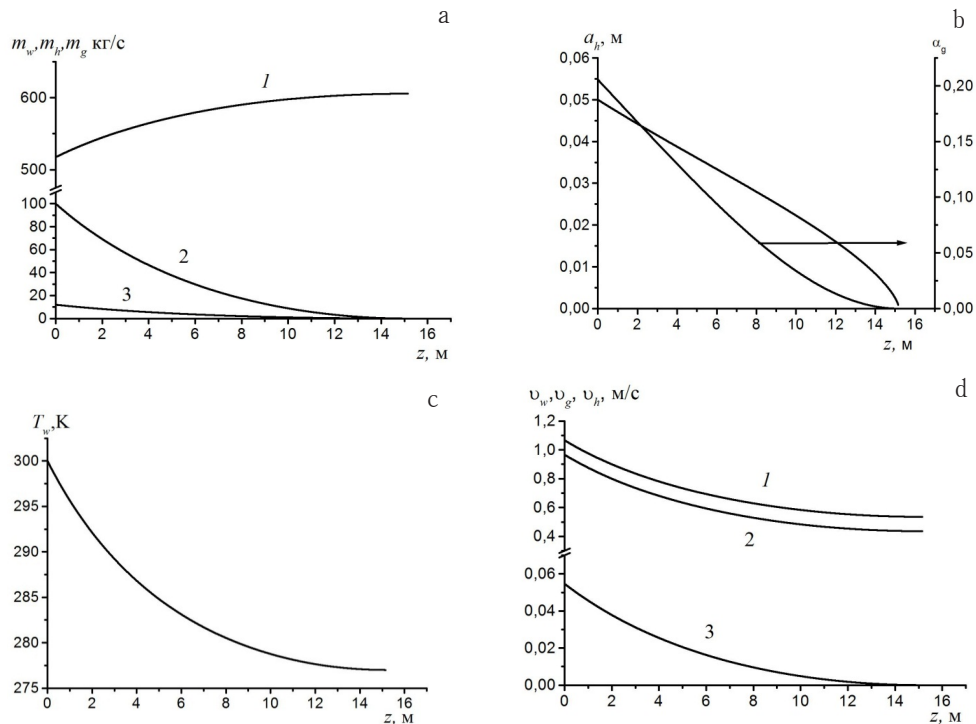


Рис. 2. Распределения (а) массовых расходов: 1 — воды, 2 — гидрата, 3 — газа; (б) объемного газосодержания и радиуса частиц гидрата; (с) температуры воды; (д) скоростей частиц: 1 — воды, 2 — газа, 3 — гидрата вдоль реактора

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. Fizicheskaya khimiya 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