

К ТЕОРИИ ЗАМЕЩЕНИЯ ГАЗОГИДРАТА В ПОРИСТОМ ПЛАСТЕ ПРИ НАГНЕТАНИИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА

М.К. Хасанов¹, М.В. Столповский², С.Р. Кильдибаева¹

¹Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета,
Россия, г. Стерлитамак, пр. Ленина, 49, 453103

²Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Россия, г. Уфа, Космонавтов, 1, 450062
E-mail: freya.13@mail.ru

Научные исследования последних лет рассматривают газовые гидраты, как один из наиболее перспективных источников энергии. До настоящего времени основные подходы при добыче газогидратов были связаны с разгерметизацией, нагревом и добавлением ингибиторов. Данные подходы имеют ряд недостатков, основной из которых – высокие энергозатраты. В связи с этим был предложен метод замещения метана в газогидрате углекислым газом [1-2]. Согласно экспериментам, разложения гидрата на газ и воду не наблюдается вследствие сохранения термобарических условий стабильного существования гидрата [3-4]. В экспериментальных работах рассматривались образцы небольшого размера, поэтому процессы замещения лимитировались кинетикой (диффузией газа через гидратную корку). В случае реальных протяженных природных пластов процесс замещения лимитируется в большей степени тепломассопереносом в самой пористой среде.

На рисунке 1 представлена фазовая диаграмма диоксида углерода CO_2 и метана CH_4 . Кривые 1 и 2 на диаграмме соответствуют трехфазному равновесию « $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-гидрат CO}_2$ » и « $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{O-гидрат CH}_4$ »; кривая 3 – двухфазному равновесию «жидкость-пар» для CO_2 .

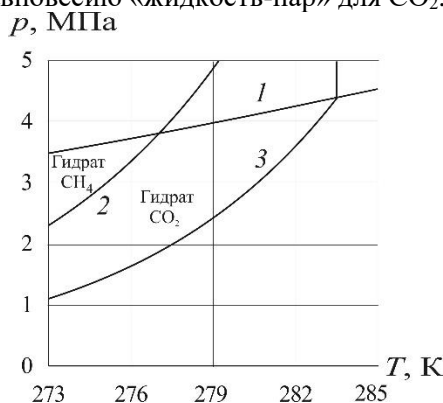


Рис. 1. Фазовые диаграммы систем

Рассмотрим горизонтальный пористый пласт протяженности L ($0 \leq x \leq L$), который в начальный момент времени насыщен метаном и его газогидратом (с объемным содержанием $S_h = v$). Схема пласта представлена на рисунке 2. Термобарические характеристики пласта соответствуют условиям стабильного существования гидрата метана. Через левую границу пористого пласта ($x = 0$) начинает закачиваться углекислый газ с температурой T_e и давлением p_e , соответствующим условиям существования диоксида углерода в газообразном состоянии и его газогидрата. Рассматривая мгновенное изменение температуры и давления на левой границе $x = 0$ до значений T_e и p_e будем полагать, что в пласте образуются две характерные области. Первая область насыщена углекислым газом и его газогидратом, а вторая область – метаном и его гидратом. При этом возникает разделяющая между собой указанные области подвижная граница $x = x_{(n)}$, на которой происходит замещение метана в газогидрате на углекислый газ.

При описании процессов тепломассопереноса примем следующие допущения: скелет пористой среды и газогидрат несжимаемы, пористость постоянна, метан и углекислый газ являются калорически совершенными газами. Температуры пористой среды и насыщающего вещества совпадают. Газогидраты диоксида углерода и метана являются двухкомпонентными системами с массовыми концентрациями углекислого газа и метана соответственно G_c и G_m .

Система основных уравнений, описывающая процессы фильтрации и теплопереноса в пористой среде и представляющая собой законы сохранения масс и энергии, закон Дарси и уравнение состояния,

в прямолинейно-параллельном случае при отмеченных выше допущениях в каждой из областей имеет вид [5-7]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_i \phi S_i) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_i \phi S_i v_i) = 0,$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C T) + \rho_i C_i \phi S_i v_i \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \rho_i \phi S_i C_i \eta_i \frac{\partial p}{\partial t} = 0,$$

$$\phi S_i v_i = - \frac{k_i}{\mu_i} \frac{\partial p}{\partial x},$$

$$\rho_i = p / R_{gi} T.$$

Здесь индексы $i = c, m$ относятся к параметрам углекислого газа и метана; ϕ – пористость; $\rho_i, S_i, v_i, C_i, \eta_i, k_i, \mu_i$ и R_{gi} – соответственно истинная плотность, насыщенность пор, скорость, удельная массовая теплоемкость, коэффициент адиабатического расширения, проницаемость, динамическая вязкость и газовая постоянная i -й фазы; p и T – давление и температура; λ – коэффициент теплопроводности системы; ρC – удельная объемная теплоемкость.

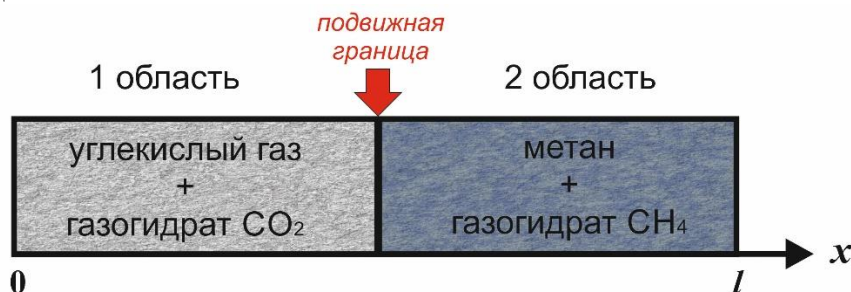


Рис. 2. Схема пористого пласта

В работе получена математическая модель и проведено численное исследование закачки диоксида углерода в пористый пласт, который изначально насыщен метаном и гидратом метана. Получено, что процесс замещения газогидрата сопровождается незначительным понижением давления и повышением температуры среды. Установлено, что температура на границе фазового перехода зависит от давления закачиваемого газа. При этом, при высоких значениях давления нагнетаемого газа она стремится к своему предельному значению, зависящему от исходной гидратонасыщенности пласта. Исследованы зависимости времени полного вытеснения метана из пласта в зависимости от его проницаемости и давления нагнетаемого газа.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-79-20001)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhou X.T.; Fan S.S.; Liang, D.Q. Advancement in research on replacement of CH₄ from hydrate with CO₂ // Chem. Ind. Eng. Process. – 2006. – V.25. – P.524–527.
2. Goel N. In situ methane hydrate dissociation with carbon dioxide sequestration: Current knowledge and issues // J. Petrol. Sci. Eng. – 2006. – V. 51. – P. 169–184.
3. Jung J. W., Espinoza D. N., Santamarina J. C. Properties and phenomena relevant to CH₄ - CO₂ replacement in hydrate - bearing sediments // Journal of Geophysical Research. – 2010. – Vol. 115.
4. Воронов В.П., Городецкий Е.Е., Григорьев Б.А., Муратов А.Р. Экспериментальное исследование процесса замещения метана в газовом гидрате диоксидом углерода // Вести газовой науки. – 2011. – №2 (7). – С.235-248
5. Цыпкин Г.Г. Математическая модель инъекции углекислого газа в пласт с образованием гидрата // Доклады Академии наук. – 2014. – Т. 458. – № 4. – С. 422-425
6. Шагапов В.Ш., Хасанов М.К., Гималтдинов И.К., Столповский М.В. Особенности разложения газовых гидратов в пористых средах при нагнетании теплого газа // Теплофизика и аэромеханика. 2013. – Т. 20. – № 3. – С. 347-354.
7. Shagapov V.Sh., Musakaev N.G., Khasanov M.K. Formation of gas hydrates in a porous medium during an injection of cold gas. International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2015. – V. 84. – P.1030–1039