

ФРОНТАЛЬНАЯ СХЕМА ОБРАЗОВАНИЯ ГИДРАТА ПРИ НАГНЕТАНИИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В НАСЫЩЕННЫЙ МЕТАНОМ И ЛЬДОМ ПЛАСТ

Н.Г. Мусакаев, М.К. Хасанов*

*Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН, 625026, г.Тюмень, Россия*

**Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета, 453103,
г.Стерлитамак, Россия*

По мнению ряда исследователей одной причин потепления климата является рост техногенных выбросов, в частности, углекислого газа, который действует в атмосфере как одеяло, не пропуская тепло в космос. В числе возможных способов борьбы с парниковым эффектом предлагается вывод углекислого газа из атмосферы путем его захоронения в коллекторах. При таком подземном хранении диоксида углерода в виде флюида необходим комплекс мероприятий по недопущению эмиссии углекислого газа в атмосферу, поэтому более перспективным является его захоронение в газогидратной форме [1]. Еще одним аргументом в пользу газогидратного хранения диоксида углерода является то, что при одинаковых условиях в единице объема гидрата содержится значительно больше газа, чем в свободном состоянии [2].

В ряде работ предлагается инжекция диоксида углерода в породы криолитозоны [3, 4], для которых характерны слабая проницаемость вышележащих мерзлых толщ, низкие температуры и соответственно устойчивость газогидратных образований. Для промышленного использования технологии вывода углекислого газа из атмосферы путем его захоронения в мерзлых породах необходима теоретическая проработка проблемы, включающая в себя построение адекватной математической модели.

При математическом моделировании примем, что пористый пласт в начальный момент времени насыщен в исходном состоянии льдом и метаном. Начальные давление p_0 и температура T_0 пусть соответствуют термодинамическим условиям существования гетерогенной смеси метана и льда и изначально одинаковы во всем пласте. Положим, что через левую границу пласта ($x = 0$) закачивается углекислый газ, давление p_e и температура T_e которого соответствуют условиям существования гетерогенной смеси газообразного диоксида углерода и его газогидрата и поддерживаются на этой границе постоянными. При нагнетании углекислого газа пласт формируются две характерные области. В первой (ближней) области поры пласта насыщены углекислым газом и его гидратом, а во второй (дальней) области поры заполнены метаном и льдом. Образование гидрата углекислого газа в такой постановке происходит на фронтальной поверхности, разделяющей эти две области, и лимитируется процессом массопереноса в пористой среде.

Примем следующие допущения. Температуры пористой среды и насыщающего вещества (газа и гидрата) совпадают. Гидрат углекислого газа является двухкомпонентной системой с массовой концентрацией G . Скелет пористой среды и газогидрат несжимаемы, пористость m постоянна, метан и углекислый газ являются калорически совершенными газами.

Система основных уравнений, описывающая процессы фильтрации и теплопереноса при образовании газового гидрата в пористой среде, представляет собой законы сохранения масс и энергии, закон Дарси, уравнение состояния для газа и зависимость коэффициента проницаемости для газа k_g от газонасыщенности S_g [5, 6]. Значения температуры и давления в области образования гидрата связаны условием фазового равновесия: $T_s(p) = T_0 + T_* \ln(p/p_{s0})$, где p_{s0} – равновесное давление, соответствующее исходной

температуре, T_* – эмпирический параметр. На границе между ближней и дальней областями выполняются соотношения, следующие из условий баланса массы и тепла.

В работе для получения аналитических решений введена автомодельная переменная: $\xi = x/(\chi \cdot t)$ (χ – коэффициент температуропроводности пласта). Тогда уравнения пьезопроводности и температуропроводности можно представить в виде обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\xi \frac{dp_{(i)}^2}{d\xi} = -\frac{2\chi_{(i)}^{(p)}}{\chi} \frac{d}{d\xi} \left(\frac{dp_{(i)}^2}{d\xi} \right), \quad (i = 1, 2)$$

$$\xi \frac{dT_{(i)}}{d\xi} = -\frac{Pe_{(i)}}{p_0^2} \frac{dp_{(i)}^2}{d\xi} \frac{dT_{(i)}}{d\xi} - \frac{2d}{d\xi} \left(\frac{dT_{(i)}}{d\xi} \right),$$

где $\chi_{(i)}^{(p)} = \frac{k_{(i)}P_{(i)}}{mS_{g(i)}\mu_{g(i)}}$, $Pe_{(i)} = \frac{\rho_{g0}P_0c_{g(i)}k_{(i)}}{\lambda\mu_{g(i)}}$, $k_{(i)} = k_0S_{g(i)}^3$ ($i = 1, 2$), c_g и μ_g – удельная

теплоемкость и динамическая вязкость газовой фазы, λ – коэффициент теплопроводности системы; нижние индексы 1 и 2 относятся соответственно к параметрам в первой и второй областях.

На основе этих уравнений получены распределения давления и температуры в каждой из выделенных областей, а также выписаны уравнения для определения координаты границы фазовых переходов $\xi_{(s)}$ и значений параметров $p_{(s)}$ и $T_{(s)}$ на ней.

Расчетным путем показано, что при небольшой (по отношению к другим взятым при расчетах значениях) величине давления нагнетания газа температура пласта в ближней области ниже равновесной температуры разложения гидрата углекислого газа, а в дальней зоне ниже температуры плавления льда, т.е. можно говорить о том, что решение с фронтальной поверхностью фазовых переходов дает адекватное математическое описание процесса. При более высоком значении давления нагнетаемого газа температура пласта за границей фазовых переходов (во второй зоне) на некотором участке поднимается выше 273 К, что соответствует перегреву льда на этом участке, поэтому нужно вводить вторую границу фазовых переходов, на которой происходит плавления льда. При дальнейшем повышении давления нагнетаемого газа температура пласта в ближней зоне на некотором участке поднимается выше равновесной температуры разложения гидрата углекислого газа, что соответствует перегреву гетерогенной смеси диоксида углерода и его гидрата на этом участке. Т.е. нужно вводить еще одну (третью) межфазную границу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Jadhawar P., Mohammadi A., Yang J., Tohidi B.** Subsurface carbon dioxide storage through clathrate hydrate formation // *Advances in the Geological Storage of Carbon Dioxide*. NATO Science Series: IV: Earth and Environmental Sciences. 2006. Vol. 65. P. 111-126.
2. **Макогон Ю.Ф.** Гидраты природных газов, М., Недра, 1974.
3. **Чувиллин Е.М., Гурьева О.М.** Экспериментальное изучение образования гидратов CO₂ в поровом пространстве промерзающих и мерзлых пород // *Криосфера Земли*. 2009. Т. 13, № 3. С. 70-79.
4. **Дучков А.Д., Соколова Л.С., Аюнов Д.Е., Пермяков М.Е.** Оценка возможности захоронения углекислого газа в криолитозоне Западной Сибири // *Криосфера Земли*. 2009. Т. 13, № 4. С. 62-68.
5. **Шагапов В.Ш., Хасанов М.К., Мусакаев Н.Г.** Образование газогидрата в пористом резервуаре, частично насыщенном водой, при инъекции холодного газа // *Прикладная механика и техническая физика*. 2008. Т. 49, № 3. С. 462-472.
6. **Shagapov V.Sh., Musakaev N.G., Khasanov M.K.** Formation of gas hydrates in a porous medium during an injection of cold gas // *Int. J. of Heat and Mass Transfer*. 2015. Vol. 84. P.1030-1039.