

Experimental Modeling of Methane Recovery by Flue Gas Injection Into Frozen Hydrate-bearing Reservoir

E. Chuvilin (Skoltech), V. Istomin (VNIIGAZ, Skoltech), V. Ekimova (Skoltech), B. Bukhanov* (Skoltech), A. Hassanpouryouzband (Heriot-Watt University), J. Yang (Heriot-Watt University), B. Tohidi (Heriot-Watt University)

Summary

In the course of experimental study, an assessment was made of the methane recovery from hydrate-bearing sandy reservoirs by flue gas injection. The experiments used a flue gas consisting of 14.6 mole% carbon dioxide (CO₂) and 85.4 mole% % of nitrogen (N₂) which is similar in composition of combustion products of coal-fired power plants. Experiments were carried out in the temperature range from +0.2 to -12 C at a pressure around 5 MPa, to determine optimal conditions for methane recovery from subpermafrost and intrapermafrost hydrate-saturated reservoirs. The results show that, despite the differences in recovery kinetics of natural gas from hydrate phase under different temperature conditions (the high rate of decomposition of methane hydrate was observed at a temperatures above 0 oC than at temperatures below 0 oC), the total methane recovery rate was practically the same. Thus, it has been shown that the method of flue gas injection can be used for methane recovery from intrapermafrost gas hydrates.

Экспериментальное моделирование извлечения метана при закачке дымового газа в мерзлый газогидратный пласт

Е.М. Чувилин (Сколтех), В.А. Истомина (Газпром ВНИИГаз, Сколтех), В.В. Екимова (Сколтех), Б.А. Буханов* (Сколтех), А. Хасан-Поуразбан (Хериот-Ватт), Дж. Йанг (Хериот-Ватт), Б. Тохиди (Хериот-Ватт)

Введение

Природные газовые гидраты (прежде всего гидраты метана) являются важным и перспективным нетрадиционным источником углеводородов, интерес к которому в мире неуклонно растет. На это указывает наличие специальных государственных программ, которые реализуются в США, Канаде, Японии, Китае, Индии и других странах с целью разработки эффективных технологий добычи метана из природных газогидратных скоплений. Высокое содержание природного газа (1 м³ газогидрата содержит около 160 м³ газа), неглубокое залегание (до 1 км), а также большие ресурсы газа, которые сопоставимы по объему со всеми традиционными углеводородами вместе взятыми, обуславливают проведение целенаправленных исследований газогидратных образований во многих странах [1, 2]. В природных условиях газовые гидраты образуются и существуют в донных отложениях морей и океанов (субаквальные газовые гидраты), а также в зоне распространения многолетнемерзлых пород. Учитывая, что мощность мерзлоты достигает сотен метров (до 1 км), часть газогидратных образований может находиться непосредственно в толще мерзлых пород, занимая совместно со льдом часть порового пространства [3].

На сегодняшний день разработаны технологии извлечения метана из природных газогидратных коллекторов, основанные на термическом воздействии, закачке различных ингибиторов, а также снижении пластового давления [4]. Однако все они сопровождаются определенными техническими трудностями, особенно при разработке газовых гидратов в криолитозоне (оттаивание многолетнемерзлых осадочных пород, потеря устойчивости разрабатываемого коллектора, вторичное гидратообразование в призабойной зоне) [5]. В связи с этим предлагается использовать метод разработки газогидратных скоплений (применимый и для криолитозоны) основанный на закачке дымового газа (смеси азота и диоксида углерода) в гидратонасыщенный пласт [6] с целью разложения гидрата метана. Такая смесь (дымовой газ) может быть получена в результате работы теплоэлектростанций и других промышленных предприятий в районах газогидратных месторождений в Арктике [7, 8]. В этой связи разрабатываемые газогидратные горизонты могут рассматриваться как потенциальные объекты и для захоронения диоксида углерода как активного парникового газа. Таким образом, рассматриваемая технология закачки дымового газа в гидратосодержащий горизонт может стать экономически эффективной, поскольку в этом случае одновременно решаются три задачи: добыча метана, оптимизация процесса добычи метана из гидратосодержащих пластов и предотвращение распространения парниковых газов в атмосфере путём захоронения их в виде газовых гидратов. В настоящее время существует много работ, посвящённых вопросам добычи метана из гидратонасыщенных пластов при положительных по Цельсию температурах [7, 8]. Однако для мерзлых гидратонасыщенных пород эти исследования ещё практически не проводились.

Методика экспериментальных исследований

Для экспериментального моделирования извлечения метана из гидратонасыщенных осадочных отложений путём закачки дымового газа при отрицательных температурах была использована специальная установка [7].

Методика экспериментального моделирования была разработана в Центре газогидратный исследований университета Хериот-Ватт совместно с Центром добычи углеводородов Сколковского института науки и технологий. Основными элементами экспериментальной установки являются: 1) барокамера объемом 800 см³ и рабочим давлением до 40 МПа; 2) термостат с рабочей температурой до -20 °С; 3) система регистрации температуры и давления в барокамере; 4) система подачи газа в барокамеру; 5) компьютерная система управления экспериментом. Давление и объем в барокамере в ходе эксперимента регулировались специальным поршнем, установленным на дне барокамеры, а также путем закачки/извлечения газа через гидравлический насос.

Объектом исследования являлся кварцевый песок, из которого готовились модельные образцы (диаметр 7,5 см и высота 30 см) с весовой влажностью 14% и пористостью около 40%.

Экспериментальное моделирование извлечения метана при закачке дымового газа (14,6 моль% CO₂ и 85,4% моль % N₂), проводилось по специально разработанной методике. Она включает подготовку образца грунта с определенным влагосодержанием и помещению его в барокамеру, герметизацию и вакуумирование, заполнение барокамеры гидратообразующим газом (CH₄ 99,9995 об%) до стабилизации давления при комнатной температуре с дальнейшим изменением температуры до значений, при которых происходит образование газовых гидратов в поровом пространстве образца. В ходе гидратообразования давление газа в барокамере уменьшалось, а завершение процесса гидратообразования фиксировалось по стабилизации давления. Затем дымовой газ закачивался в систему для смещения зоны стабильности гидратов. Часть метана, которая не перешла в гидрат, была вытеснена закачанным газом. Смесь метана и закачанного газа выводилась из системы. Следовательно, давление уменьшалось, но всегда поддерживалось выше равновесного давления закачиваемого газа (которое намного выше, чем давление стабильности гидратов метана, что полностью предотвращает возможную диссоциацию как гидратов метана, так и гидратов закачанной газовой смеси). На каждом этапе экспериментального моделирования отбирались пробы газа для анализа химического состава с интервалами 15 минут, 30 минут, 1 час 15 минут, 2 часа 15 минут после начала опыта, а затем - 1 раз в день. Анализ газа проводили с использованием газового хроматографа Varian 3600.

По окончании экспериментов рассчитывались основные характеристики исследованного гидратонасыщенного образца, такие как пористость, плотность, гидратонасыщенность (на основе метода PVT), а также изменение содержания метана в газовой фазе во время эксперимента.

Результаты и обсуждение

Закачка дымовых газов в гидратосодержащий пласт смещает зону стабильности гидратов в зону более низких давлений и более высоких температур. Этот процесс приводит к разложению гидрата метана, а также образованию гидратов диоксида углерода по схеме замещения. Для определения оптимальных условий добычи метана из охлажденных и многолетнемерзлых гидратонасыщенных коллекторов было проведено экспериментальное моделирование в диапазоне температур от 0,2 до -12 °С при давлении ~5 МПа. Каждый эксперимент длился более 10 часов. Условия экспериментов, физические параметры образцов и результаты (процент извлечения метана) приведены в таблице 1. На основе полученных экспериментальных данных можно проследить влияния температуры на эффективность извлечения метана при закачке дымового газа в песчаный насыщенный гидратом метана пласт (рис. 1). Экспериментальные исследования показали, что интенсивность извлечения метана при закачке дымового газа уменьшается при понижении температуры гидратосодержащего грунта. Так, если через 30 минут после начала эксперимента при температуре +0,2 °С содержание метана в газовой фазе составляло около 21 мол.%, то при температуре -12 °С эта величина была близка к 13 мол.%, т.е. почти в 2 раза меньше.

Таблица 1. Основные параметры эксперимента и физические характеристики исследованных образцов песка

	Давление P, МПа	Температура T, °C	Весовая влажность W, %	Плотность ρ , г/см ³	Пористость n, %	Гидратонасыщен- ность S _h , %	Степень извлечения гидрата CH ₄ (%)
1	4.2	+0.2	14.4	1.8	38	60	25
2	5.64	-4.5	14.4	1.8	38	66	23
3	4.35	-12	14.4	1.8	41	67	21

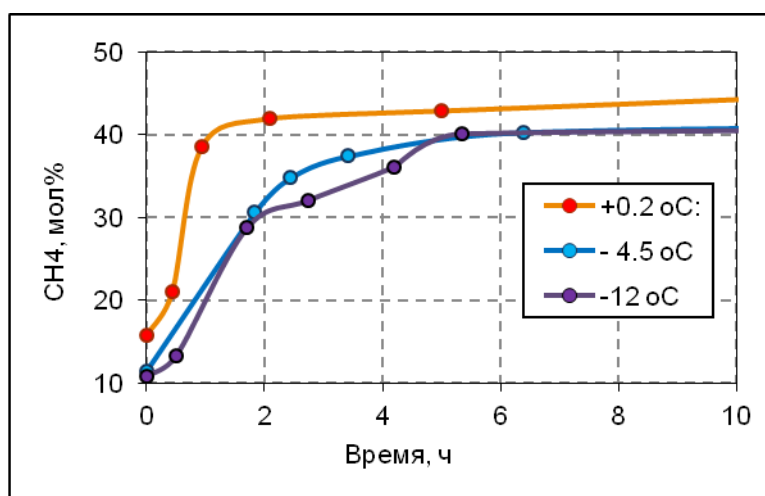


Рисунок 1. Динамика извлечения метана из гидратонасыщенного песчаного грунта при закачке дымового газа в зависимости от температуры

В дальнейшем (через 1,5 часа) интенсивность извлечения метана из гидратной фазы при положительной температуре (+0,2°C) резко снизилась, тогда как при температуре -12 °C это снижение наблюдалось лишь через 5 часов после начала эксперимента. Однако в конце опыта содержание метана в газовой фазе практически одинаково при данных температурах (Рис.1). Таким образом общее извлечение метана из гидратной фазы сопоставимо при низких положительных и отрицательных температурах и составило при температуре +0,2 °C 25%, а при температуре -12 °C - 21%. Несмотря на снижение интенсивности извлечения метана из гидратной фазы при понижении температур до отрицательных значений общее извлечение метана остается достаточно высоким. Это позволяет рассматривать метод закачки дымового газа как перспективный метод разработки газогидратных месторождений, находящихся в толщах мерзлых пород.

Выводы

Проведено экспериментальное моделирование извлечения метана путем закачки дымовых газов в гидратонасыщенные образцы песка при различных температурах. Результаты исследования влияния температуры на процесс извлечения метана показывают, что несмотря на различия в кинетике извлечения метана из гидратной фазы при различных температурах (большая интенсивность при положительной температуре, чем при отрицательных), общий процент добычи метана был практически одинаков, а значит вне зависимости от температуры может быть достигнут высокий процент извлечения метана из гидратонасыщенных пластов.

Таким образом, экспериментально показано, что метод закачки дымового газа может быть использован для добычи метана из гидратонасыщенных пластов в зоне распространения многолетнемерзлых пород.

Благодарности

Исследования выполнены при сотрудничестве Сколковского Института Науки и Технологии и университета Хериот-Ватт (Великобритания) и частичной поддержки РФФ (грант № 16-17-00051).

Литература / References

1. Grace J., Collett T., Colwell F., Englezos P., Jones E., Mansell R., Meekison J.P., Ommer R., Pooladi-Darvish M., Riedel M., Ripmeester J.A. 2008. Energy from gas hydrates—assessing the opportunities and challenges for Canada. Report of the Expert Panel on Gas Hydrates, Council of Canadian Academies.
2. Johnson A.H. 2011. ‘Global resource potential of gas hydrate – a new calculation
3. Max M.D. (ed.). 2003. Natural gas hydrate in oceanic and permafrost environments. Vol. 5. Springer Science & Business Media.
4. Moridis G., Collett, T., 2003. Strategies for gas production from hydrate accumulations under various geologic conditions.
5. Moridis G.J., Collett T.S., Pooladi-Darvish M., Hancock S., Santamarina C., Boswell R., Kneafsey T., Rutqvist J., Kowalsky M.B., Reagan M.T., Sloan E.D., Sum A.K., Koh C.A. 2011. Challenges, uncertainties, and issues facing gas production from gas-hydrate deposits. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 14: 76-112.
6. ConocoPhillips-University of Bergen Hydrate Team. 2008. Laboratory investigation of hydrate production through CO₂-CH₄ exchange, Fire in the Ice, 8 (4): 1-4.
7. Yang, J., Okwananke, A., Tohidi, B., Chuvilin, E., Maerle, K., Istomin, V., Bukhanov, B. and Cheremisin, A., 2017. Flue gas injection into gas hydrate reservoirs for methane recovery and carbon dioxide sequestration. Energy conversion and management, 136: 431-438.
8. Lee B. R., Sloan E. D., Koh C. A., Sum A. K.. 2013. Energy production from gas hydrate system using CO₂ and CO₂/N₂ injection. SPE 168883. 2013. Unconventional Resources Technology Conference 2013