НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ

Криосфера Земли, 2015, т. XIX, № 2, с. 67–74 **http://www.izdatgeo.ru**

ГИДРАТООБРАЗОВАНИЕ

УДК 551.345.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ГАЗОПРОНИЦАЕМОСТИ ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ ПОРОД ПРИ ГИДРАТООБРАЗОВАНИИ И ЗАМОРАЖИВАНИИ

Е.М. Чувилин, С.И. Гребенкин

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический ф-т, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; chuvilin@geol.msu.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований газопроницаемости песчаных образцов в условиях их гидратонасыщения и последующего замораживания. Эксперименты выполнены на специальной установке, позволяющей оценивать газопроницаемость влажных образцов дисперсных пород под давлением газа в процессе образования и разложения газогидратов в поровом пространстве, а также при замерзании и оттаивании гидратосодержащего образца. В ходе исследований установлено влияние степени перехода поровой влаги в гидрат на показатели газопроницаемости в различных песчаных образцах. Экспериментально показано, что газопроницаемость песчано-супесчаных пород при заданном влагосодержании (14–18 %) снижается на один-два порядка при переходе до 70–80 % поровой влаги в гидрат. При замораживании гидратонасыщенных образцов отмечено снижение их газопроницаемости в несколько раз, что обусловлено вымерзанием остаточной поровой влаги и связанным с этим дополнительным гидратообразованием.

Газопроницаемость, газовые гидраты, лед, дисперсные породы, гидратообразование, замерзание

EXPERIMENTAL ESTIMATION OF GAS PERMEABILITY OF GAS-SATURATED SEDIMENTS DURING HYDRATE FORMATION AND FREEZING

E.M. Chuvilin, S.I. Grebenkin

Lomonosov Moscow State University, Department of Geology, 119991, Moscow, Leninskie Gory, 1, Russia; chuvilin@geol.msu.ru

Results of experimental studies of gas permeability of sand samples in the conditions of hydrate saturation and freezing have been presented. The experiments were performed in a special device allowing the evaluation of the gas permeability of wet samples of the dispersed rocks under the gas pressure in the during formation and dissociation of gas hydrates in the pore space, as well as in the process of freezing and thawing of the hydrate bearing sample. In experimental studies it was revealed that the degree of pore water transition in the hydrate influences the parameters of gas permeability in various sand samples. It was demonstrated experimentally in sand and sandy loam rocks that their gas permeability is reduced by 1–2 orders at a given water content (14–18 %) during the transition to 70–80 % of pore water to hydrate. When hydrate bearing samples freeze, their permeability decreases several times due to the freezing processes of residual pore water and the related processes of additional hydrate formation.

Gas permeability, gas hydrates, ice, disperse rocks, hydrate formation, freezing

ВВЕДЕНИЕ

Разработка технологий добычи газа из природных газогидратных образований невозможна без детального изучения фильтрационных свойств гидратосодержащих пород. Это также важно при разработке традиционных газовых месторождений в арктических районах и областях распространения многолетнемерзлых пород (ММП), где продуктивные газовые горизонты залегают неглубоко от подошвы ММП и зон стабильности газовых гидратов и характеризуются низкой пластовой температурой. Добыча газа из этих горизонтов часто сопровождается снижением температур в призабойной части скважин до температурных условий гидратообразования, а в некоторых случаях и до льдообразования.

Параметры проницаемости по газу и воде – важные фильтрационные характеристики горных пород, в том числе гидратосодержащих.

© Е.М. Чувилин, С.И. Гребенкин, 2015

Знание фильтрационных свойств гидратосодержащих пород необходимо в первую очередь при анализе возможности добычи газа из гидратных залежей, а также исследовании образования газовых гидратов в нефте- и газосодержащих пластах в процессе их разработки. Существует два направления в изучении фильтрационных свойств: исследование проницаемости пород по газу и по воде.

Экспериментальные исследования проницаемости пород по газу были начаты в 1970-х гг. А.С. Схаляхо [*1974*] и А.В. Безносиковым [*1978*]. Ими получены зависимости относительной проницаемости песчаной породы по газу от коэффициента гидратонасыщенности порового пространства. Показано также, что проницаемость песчаных пород ухудшается с увеличением гидратонасыщенности образцов, а при коэффициенте гидратонасыщенности 0,65–0,70 порода становится практически не проницаемой для газа.

Первые данные о проницаемости гидратосодержащих пород по воде были представлены В.А. Ненаховым [*1982*]. Им получена нелинейная зависимость относительной проницаемости гидратосодержащего песка по воде от градиента давлений на торцах образца. Эту зависимость В.А. Ненахов объяснил тем, что вода в гидратонасыщенных средах ведет себя как вязкопластичная, а не как ньютоновская жидкость [*Истомин, 1992*].

В 1990-е гг. были проведены эксперименты по измерению проницаемости при фильтрации минерализованной воды через образец породы до и после искусственного гидратообразования [*Ларионов, 1993*]. Результаты экспериментов показывали, что проницаемость гидратонасыщенной породы на три и более порядка меньше, чем проницаемость образцов без гидрата. Так, для образцов с пористостью 10 % и начальным влагонасыщением 30 % в результате гидратонасыщения проницаемость снизилась с 3,8 до $8 \cdot 10^{-3}$ мД, а для образцов с пористостью 15 % и начальным влагонасыщением 80 % – с 4,0 до $3{,}5 \cdot 10^{-3}$ мД [*Ларионов, 1993*].

Начиная с 2000-х гг. количество исследований проницаемости гидратонасыщенных пород в мире значительно возросло, что связано с появлением в ряде стран государственных программ по изучению газовых гидратов.

Т. Нифсей с соавт. [*Kneafsey et al., 2008*] экспериментально исследовали газо- и водопроницаемость песчаных образцов при их гидратонасыщении. Отмечено, что в образцах с начальной степенью заполнения пор водой 90 % образование поровых газовых гидратов приводило к снижению проницаемости до значения, которое уже невозможно зафиксировать на используемом оборудовании. В образцах с более низкой начальной степенью заполнения пор влагой (75–80 %) в результате гидратообразования резко снижалась проницаемость, но она фиксировалась инструментально.

А. Кума с соавт. [*Kumar et al., 2010*] экспериментально определяли зависимость газопроницаемости от гидратосодержания пород и характеристик диссоциации газовых гидратов в поровом пространстве. Результаты этих экспериментов сравнивались с расчетами по параллельно-капиллярной модели [*Kleinberg et al., 2003*], поровой модели Козени [*Ibid.*], а также модели Масуды [*Masuda et al., 2002*] при разных показателях снижения проницаемости. В результате сравнения экспериментальных данных получено, что при начальной влажности менее 35 % гидрат образуется на поверхности зерен, а при влажности более 35 % образуется поровый гидрат [*Masuda et al., 2002*]. Отмечено, что при гидратонасыщении порового пространства модельного грунта, состоящего из стеклянных шариков до 40 %, наблюдалось снижение газопроницаемости образцов на один порядок (с 50 до 5 мД). При этом наилучшая корреляция экспериментальных данных фиксируется при сравнении с моделью Масуды, которая отличается экспоненциальной зависимостью проницаемости от гидратонасыщения [*Masuda et al., 2002*].

Э. Джонсон с соавт. [*Johnson et al., 2011*] экспериментально исследовали относительные газо- и водопроницаемости гидратонасыщенных отложений из газогидратного стратиграфического разреза Элберт на северном склоне Аляски. Выявлено, что уже при гидратонасыщении 1,5 % наблюдался достаточно резкий спад проницаемости (относительная проницаемость при этом составила 0,65), а при увеличении гидратонасыщения до 36 % она уже не превышала 0,1. В эксперименте Т. Ана с соавт. [*Ahn et al., 2005*] значения относительной водопроницаемости изменялись от 0,05 до 0,6, что хорошо соответствует результатам Э. Джонсона [*Johnson et al., 2011*], однако значения газопроницаемости оказались гораздо ниже.

Рядом ученых были проведены экспериментальные исследования проницаемости для образцов пород, отобранных из скважин на газогидратном месторождении Маллик (дельта р. Маккензи, Канада). Так, японские ученые [*Minagawa et al., 2005*] описали эксперимент по фильтрации воды через гидратонасыщенный керн из исследовательской скважины на Маллике. Начальная водопроницаемость гидратонасыщенного керна составляла 1–2 мД, после вымывания глинистых частиц бурового раствора она приблизилась к 5–7 мД, а после разложения гидратов равнялась 7–17 мД. Для гидратосодержащих образцов с месторождения Маллик Д. Мюррей с соавт. [*Murray et al., 2006*] получили значения эффективной водопроницаемости порядка 1–6 мД при их гидратонасыщенности 10–20 %.

В работе [*Minagawa et al., 2008*] показана зависимость относительной водопроницаемости от гидратонасыщенности породы. Эксперименты проводились на песчаных образцах нарушенного сложения. Результаты сравнивались с расчетами по различным моделям. В ходе экспериментов наблюдалось резкое снижение газопроницаемости: при гидратонасыщении 5 % относительная газопроницаемость равна 0,1, дальнейшее падение проницаемости было более плавным, и при гидратонасыщении 34 % она составила лишь 0,03. Полученные данные хорошо коррелировали с параллельно-капиллярной моделью.

Специальные исследования зависимости относительной водопроницаемости от гидратосодержания пород с использованием установки комбинированного магнитного резонанса были выполнены Р. Клайнбергом с соавт. [*Kleinberg et al., 2005*]. В экспериментах они использовали образцы керна с месторождения Маллик с гидратонасыщенностью от 10 до 70 %.

Несмотря на проведенные исследования, фильтрационные характеристики гидратосодержащих пород, в частности газопроницаемость гидратонасыщенных грунтов, подверженных промерзанию, остаются недостаточно изученными.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Методика исследования газопроницаемости гидратосодержащих пород разработана авторами совместно с сотрудниками компании Шлюмберже [*Чувилин и др., 2013*]. Данная методика основана на изучении фильтрации газа через образец грунта на специальной экспериментальной установке, позволяющей создать необходимые термобарические условия для искусственного замораживания и гидратонасыщения грунта. Она включала подготовку образца грунта заданной влажности, насыщение его газом-гидратообразователем в специальном кернодержателе, создание термобарических условий для гидратообразования и(или) замораживания, проведение испытаний на газопроницаемость при различных давлениях газа и температурах и обработку экспериментальных данных.

Для изучения газопроницаемости гидратосодержащих пород использовалась экспериментальная установка, разработанная ООО “ЭкоГеосПром” (рис. 1). Установка позволяет создавать термобарические условия в образцах грунтов в широком диапазоне температур (от –15 до +30 °С) и давлений (до 100 бар). Установка состояла из специального кернодержателя-барокамеры, где можно испытывать образцы пород диаметром 30 мм и длиной до 50 мм; устройства управления, контроля и регистрации; холодильного шкафа для поддержания температурного режима; компрессора и масляного насоса для создания обжимного давления; аналого-цифрового преобразователя (АЦП); баллона с газом; компьютера (рис. 2, 3).

В качестве объекта исследования в экспериментах использовались искусственно приготовленные образцы дисперсных пород различного состава: песок кварцевый мелкозернистый, песчано-глинистые смеси, состоящие из песка и глинистого материала (песок с 7 % каолина и песок с 7 % бентонита), а также супесь пылевая (табл. 1).

Для каждого приготовленного образца определялись физические характеристики: влажность, плотность, пористость, влагонасыщенность.

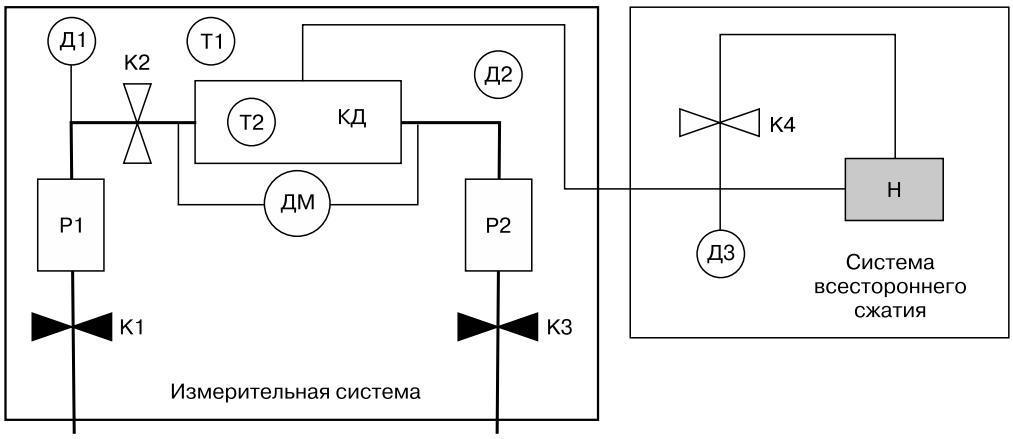

Рис. 1. Схема экспериментальной установки для определения газопроницаемости искусственно гидратонасыщенных образцов.

К1–К3 – мембранные клапаны системы подачи газа; К4 – шаровой клапан гидравлической системы; Р1, Р2 – ресиверы системы подачи газа; Д1–Д3 – датчики давления; ДМ – датчик дифференциального давления; Н – гидравлический насос с масляным резервуаром; КД – кернодержатель; Т1, Т2 – датчики температуры.

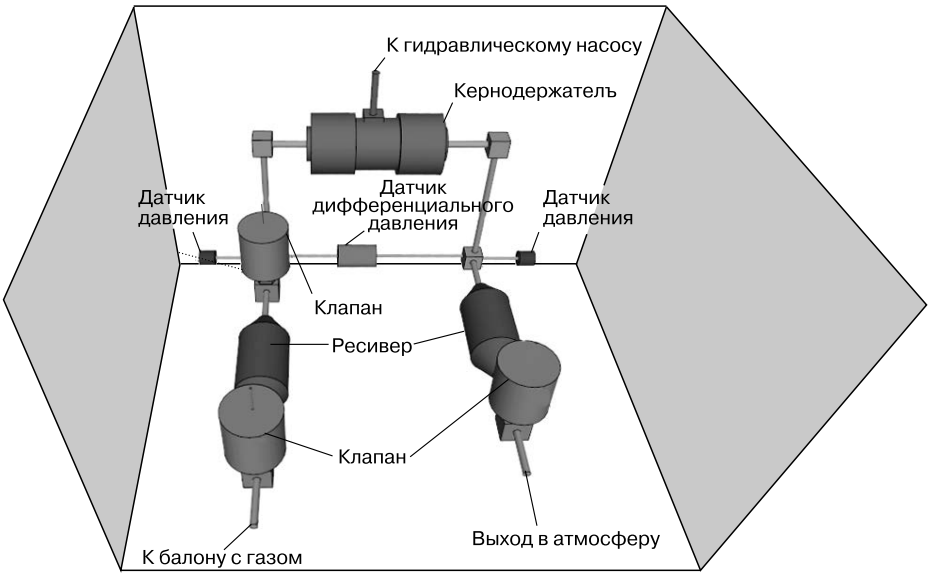

Рис. 2. Схема измерительной системы экспериментальной установки.

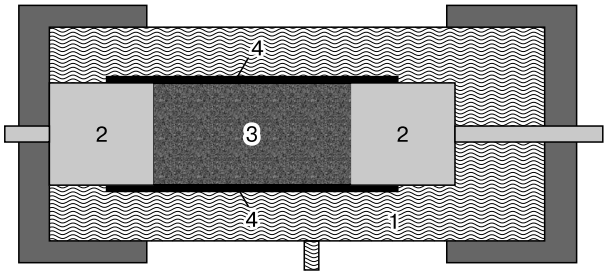

Рис. 3. Схема кернодержателя:

1 – гидравлическая камера; 2 – система подачи газа; 3 – образец грунта; 4 – резиновая манжета.

Исходная пористость образцов пород изменялась от 0,38 до 0,44, весовая влажность – от 14 до 18 % (табл. 2). В качестве газа-гидратообразователя использовался углекислый газ (99,99 %). Газ находится в баллоне под давлением около 3–4 МПа.

Методика проведения экспериментов по изучению газопроницаемости образцов пород при гидратообразовании и замораживании включала следующие этапы: подготовку образца с заданной влажностью и его помещение в кернодержатель, герметизацию и вакуумирование барокамеры с образцом, наполнение барокамеры гидратообразующим газом (CO_2) и создание условий для гид-

Таблица 1. **Краткая характеристика грунтов, использованных для приготовления образцов**

Тип грунта	Распределение частиц по фракциям, %			Минеральный состав, %		Засоленность, %
	1–0,05 мм	0,05–0,001 мм	<0,001 мм			
Песок	94,8	3,1	2,1	Кварц	>90	0,012
Каолин	4,5	70,9	24,6	Каолинит	92	0,043
Бентонит	0,3	46,2	53,5	Монтмориллонит	93	1,988
Супесь	41,8	53,7	4,5	Кварц	38	0,075
				Микроклин + альбит	55	

Таблица 2. **Основные характеристики грунтовых образцов, использованных в экспериментах**

Тип образца	Влажность, %	Плотность скелета грунта, г/см^3	Пористость	Влагонасыщенность, %
Песок с 7 % бентонита	18	1,48	0,44	60
Супесь	16	1,66	0,39	70
Песок	14	1,58	0,41	51
Песок с 7 % каолина	15	1,64	0,39	59

рато- и льдообразования в поровом пространстве образцов.

Газопроницаемость образца пород в установке измерялась на каждом этапе охлаждения и нагревания, а регистрация и запись температуры и давления осуществлялись в течение всего эксперимента. Вначале газопроницаемость грунтового образца измерялась до гидратообразования после его насыщения газом CO_2 при температуре около +20 °С. Затем определение ее происходило в процессе гидратонакопления при охлаждении барокамеры до температуры +1...+2 °С. После затухания гидратонакопления барокамера с образцом охлаждалась до температуры –4...–5 °С, в результате не перешедшая в гидрат влага замерзала. Для замороженного гидратосодержащего образца также оценивалась газопроницаемость. Для каждого образца породы проводилось несколько циклов охлаждения и нагревания.

По изменению термобарических условий в ходе экспериментов с использованием PVT-метода определялся коэффициент гидратности (доля поровой влаги, перешедшей в гидрат) [*Чувилин, Гурьева, 2009*]:

$$K_h = \frac{W_h}{W},$$

где W_h – количество влаги, перешедшей в гидрат (% по отношению к массе сухого образца); W – весовая влажность образца, %.

Расчет эффективной проницаемости образца в кернодержателе установки основан на анализе падения давления в ресиверах с известными газовыми объемами.

В ходе решения дифференциального уравнения массопереноса через образец под действием градиента давлений получена следующая формула для расчета эффективной проницаемости:

$$k = \frac{2\eta L V_1 p_1 \left(p_{10} - p_{1k}\right)}{S p_{10}\left(p_1^2 - p_2^2\right) t_1},$$

где η – динамическая вязкость газа, Па·с; L – длина образца, см; S – площадь поперечного сечения образца, см^2; V_1 – объем ресивера, см^3; p_1 – давление перед образцом в момент времени t_1, бар; p_2 – давление после образца в момент времени t_1, бар; p_{10} – давление перед образцом в начальный момент, бар; p_{1k} – давление перед образцом в конечный момент, бар; k – газопроницаемость, мД.

Для оценки точности определения газопроницаемости образцов по представленной методике была проведена тарировка установки на четырех эталонных керамических образцах, для которых известны значения коэффициентов абсолютной проницаемости [*Чувилин и др., 2013*]. Результаты тарировки показали, что погрешность измерений не превышала 15 %.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Влияние гидратообразования. При исследовании газопроницаемости образцов песчаных и супесчаных пород с заданной начальной влажностью (14–18 %) были получены экспериментальные данные о влиянии коэффициента гидратности K_h (или доли поровой влаги, переходящей в гидрат) на их газопроницаемость.

Экспериментально показано, что при начальной влагонасыщенности образцов 50–60 % и переходе до 70–80 % поровой влаги в газогидрат (K_h = 0,7–0,8) снижение газопроницаемости достигало одного-двух порядков (рис. 4).

При K_h < 0,3–0,4 интенсивность снижения проницаемости была меньше, чем при больших значениях K_h (см. рис. 3). В частности, это отмечается для образца песка. При повышении K_h от 0 до 0,36 газопроницаемость снизилась лишь в 1,5 раза, при дальнейшем повышении K_h до 0,76 она уменьшилась в 25 раз. Влажный образец песка с 7 % каолина уже в исходном состоянии имел проницаемость значительно ниже, чем образец песка, что обусловлено несколько меньшими пористостью, степенью заполнения пор влагой и наличием глинистых частиц. При переходе 70 % поровой влаги в гидрат это различие увеличилось в несколько раз. Газопроницаемость песка с 7 % каолина при K_h = 0,7 составляла 0,09 мД, в то время как для чистого песка эта величина равна 1,8 мД (см. рис. 4).

Наибольшее снижение газопроницаемости зафиксировано в образцах, имеющих высокую пористость. Так, проницаемость образцов песка с глинистыми заполнителями изменялась следующим образом: для песка с 7 % бентонита и начальной влажностью 18 % проницаемость изменилась

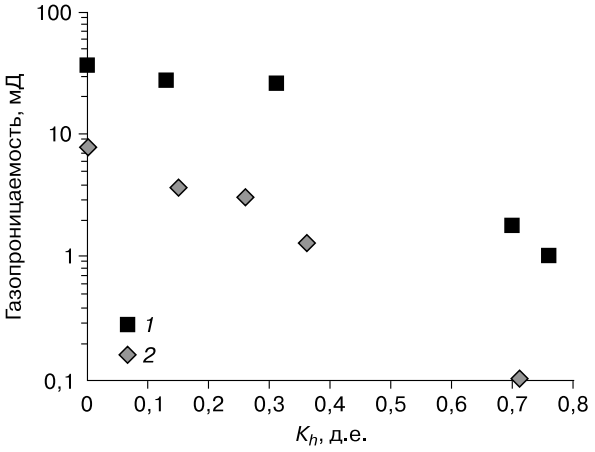

Рис. 4. Зависимость газопроницаемости песчаных образцов от коэффициента гидратности (K_h).

1 – песок; *2* – песок с 7 % каолина.

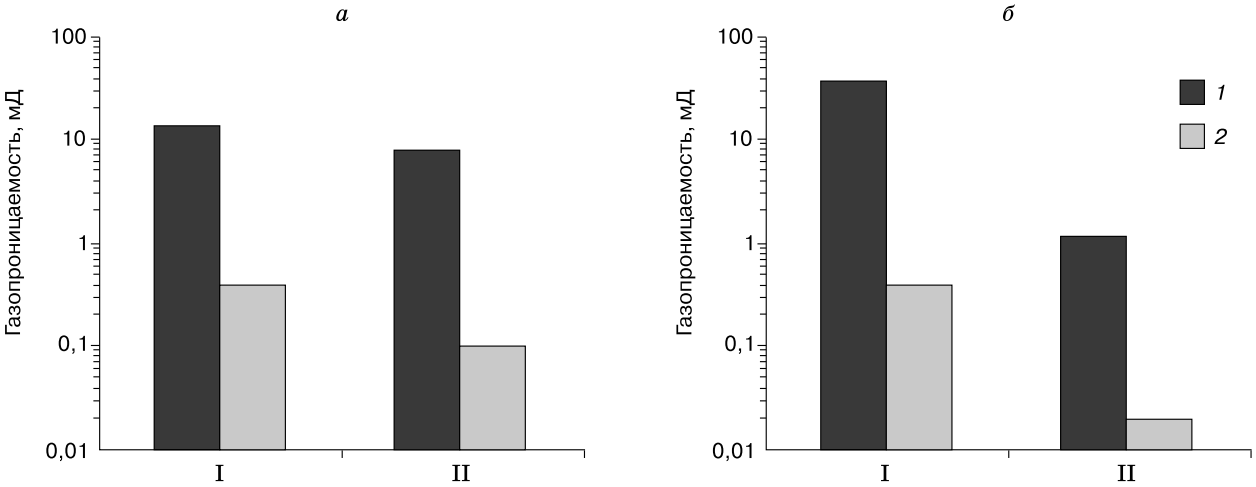

Рис. 5. Изменение газопроницаемости образцов дисперсных пород при гидратонасыщении:

а: I – песок с 7 % каолина (W = 15 %), после гидратонасыщения K_h = 0,70; II – песок с 7 % бентонита (W = 18 %), после гидратонасыщения K_h = 0,74; *б*: I – песок (W = 14 %), после гидратонасыщения K_h = 0,90; II – супесь (W = 16 %), после гидратонасыщения K_h = 0,75. Образцы: *1* – до промерзания, *2* – после промерзания.

с 14 до 0,4 мД (при K_h = 0,74), а для песка с 7 % каолина и начальной влажностью 15 % – с 7,92 до 0,1 мД (при K_h = 0,70) (рис. 5, *а*).

Сравнение газопроницаемости образцов песка с различным глинистым заполнителем показало некоторое различие, которое может быть связано как с влиянием минерального состава глин на исходные характеристики образцов, так и с условиями гидратообразования в поровом пространстве образцов.

Проницаемость образца газонасыщенного песка с начальной влажностью 14 % при гидратонасыщении K_h = 0,9 изменилась с 37,07 до 0,4 мД (см. рис. 5, *б*). Проницаемость супеси с влажностью 16 % снизилась с 1,2 до 0,02 мД (при K_h = 0,75) (см. рис. 5, *б*).

Низкая проницаемость образца супеси обусловлена высоким содержанием пылевато-глинистых частиц, а также более высокой исходной влагонасыщенностью (70 %).

Различное снижение проницаемости при гидратообразовании объясняется рядом факторов, среди которых внутренние изменения микростроения грунта, неконтролируемое изменение актив-

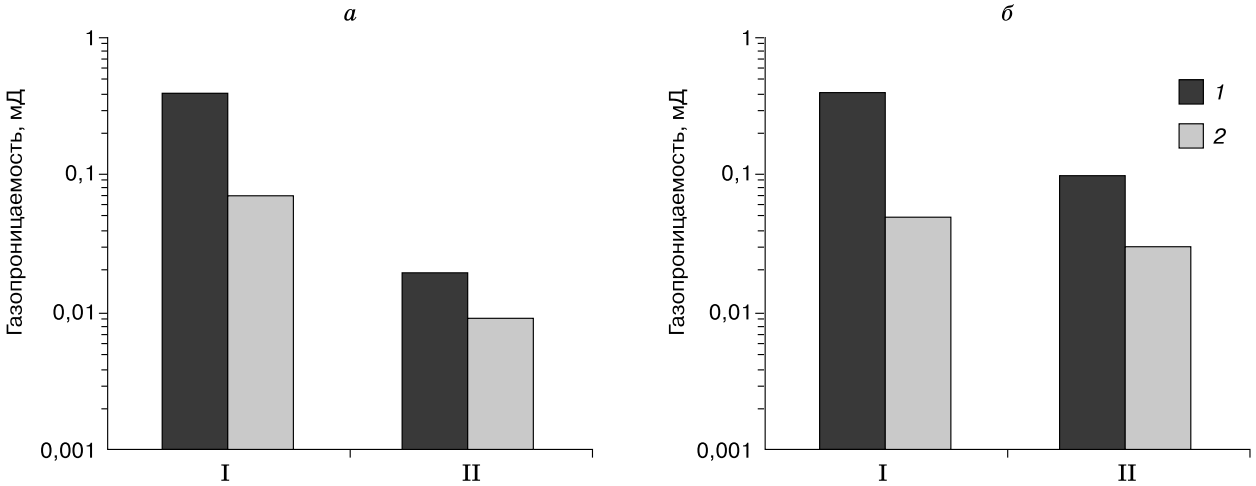

Рис. 6. Изменение газопроницаемости образцов дисперсных пород при промерзании:

а: I – песок (W = 14 %), K_h до промерзания 0,90, после – 0,91; II – супесь (W = 16 %), K_h до промерзания 0,75, после – 0,81; *б*: I – песок с 7 % каолина (W = 15 %), K_h до промерзания 0,74, после – 0,79; II – песок с 7 % бентонита (W = 18 %), K_h до промерзания 0,71, после – 0,81. Образцы: *1* – до промерзания, *2* – после промерзания.

ной пористости грунта при образовании гидрата в поровом пространстве, образование гидрата в поровом пространстве по различным механизмам, зависящим от размера пор, и др.

Влияние промерзания. В результате гидратонасыщения и замораживания проницаемость образцов снижается почти на два порядка, что в природных условиях приводит к почти полной потере проницаемости пласта. Следует отметить, что при замораживании гидратонасыщенных образцов происходит некоторое повышение K_h, что обусловлено дополнительным гидратообразованием при вымерзании остаточной поровой влаги [*Чувилин, Гурьева, 2009; Chuvilin et al., 2007*].

Газопроницаемость гидратонасыщенного песка после заморозки снизилась с 0,4 до 0,07 мД (рис. 6, *а*). Проницаемость супеси при вымерзании остаточной поровой воды изменилась с 0,02 до 0,01 мД.

Проницаемость образцов песка с глинистыми заполнителями изменялась в пределах 0,40–0,05 мД и 0,1–0,03 мД для песка с 7 % бентонита и 7 % каолита соответственно (см. рис. 6, *б*). Наибольшее снижение газопроницаемости в 8 раз отмечено при замораживании песка с 7 % бентонита.

В целом снижение газопроницаемости гидратосодержащих образцов грунтов после заморозки зависит от многих факторов: остаточного влагосодержания и объема льдообразования, а также дополнительного гидратообразования при вымерзании остаточной влаги и структурно-текстурных изменений, которые необходимо исследовать специально.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследований разработана технология экспериментальной оценки газопроницаемости образцов песчаных и супесчаных грунтов при гидратонасыщении и замораживании. Она включает адаптацию экспериментальной установки к задачам исследования, создание расчетной схемы для количественной оценки газопроницаемости, отладку процедуры подготовки образцов для эксперимента, а также оценку грунтовых параметров.

На основе разработанной методики оценивалось влияние степени перехода поровой влаги в гидрат на газопроницаемость песчаных и супесчаных образцов, а также влияния вымерзания остаточной (не перешедшей в гидрат) поровой влаги на изменение газопроницаемости гидратонасыщенных образцов.

Экспериментально показано, что газопроницаемость песчано-супесчаных пород при заданном влагосодержании (W = 14–18 %) снижается на один-два порядка при переходе до 70–80 % поровой влаги в гидрат. При этом наименьшие величины газопроницаемости фиксируются в образцах с повышенным содержанием пылевато-глинистого материала. Так, в образце супеси (W = 16 %) при переходе 75 % поровой влаги в гидрат газопроницаемость образца составила лишь 0,02 мД.

Выявлено, что при замораживании гидратонасыщенных образцов их газопроницаемость снижается в несколько раз. Это обусловлено вымерзанием остаточной поровой влаги, а также дополнительным гидратообразованием при фазовых переходах вода–лед.

Литература

Безносиков А.Ф. Газогидратные залежи и исследование некоторых особенностей их разработки (на примере Мессояхского месторождения): Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Тюмень, 1978, 155 с.

Истомин В.А. Газовые гидраты в природных условиях / В.А. Истомин, В.С. Якушев. М., Недра, 1992, 235 с.

Ларионов В.Р. Перспективы практического использования газовых гидратов в горном деле / В.Р. Ларионов, С.М. Федосеев, Б.Д. Иванов. Якутск, ЯНЦ СО РАН, 1993, 226 с.

Ненахов В.А. Особенности фильтрации воды через гидратонасыщенные пористые среды // Экспресс-информ. ВНИИЭГазпрома. Сер. Геология, бурение и разраб. газ. месторождений, 1982, № 10, с. 9–10.

Схаляхо А.С. Исследование условий образования гидратов природных газов в пористых средах и их влияние на продуктивную характеристику скважин: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1974, 24 с.

Чувилин Е.М., Гребенкин С.И., Пименов В.С. Методика экспериментальной оценки газопроницаемости кернов при гидратонасыщении и замораживании // III Междунар. науч.-практ. конф. “Мировые ресурсы и запасы газа и перспективные технологии их освоения”. М., ВНИИГАЗ, 2013, с. 86.

Чувилин Е.М., Гурьева О.М. Экспериментальное образование гидратов CO_2 в поровом пространстве промерзающих и мерзлых пород // Криосфера Земли, 2009, т. XIII, № 3, с. 70–79.

Ahn T., Lee J., Huh D.-G., Kang J.M. Experimental study on two-phase flowin artificial hydrate-bearing sediments // Geosystems Eng., 2005, vol. 84 (4), p. 101–104.

Chuvilin E.M., Petrakova S.Yu., Guryeva O.M., Istomin V.A. Formation of carbon dioxide gas hydrates in freezing sediments and decomposition kinetics // Physics and Chemistry of Ice / Ed. W.F. Kuhs. Cambridge, UK, Royal Soc. Chemistry, 2007, p. 147–154.

Johnson A., Patil S., Dandekar A. Experimental investigation of gas-water relative permeability for gas-hydrate-bearing sediments from the Mount Elbert Gas Hydrate Stratigraphic Test Well, Alaska North Slope // Mar. and Petrol. Geol., 2011, vol. 28, p. 419–426.

Kleinberg R.L., Flaum C., Griffin D.D. et al. Deep sea NMR: Methane hydrate growth habit in porous media and its relationship to hydraulic permeability, deposit accumulation, and submarine slope stability // J. Geophys. Res., 2003, vol. 108 (B10), p. 2508.

Kleinberg R.L., Flaum C., Collett T.S. Magnetic resonance log of JAPEX/JNOC/GSC et al. Mallik 5L-38 gas hydrate production research well: gas hydrate saturation, growth habit, and relative permeability // Scientific Results from the Mallik 2002

Gas Hydrate Production Research Well Program, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada / S.R. Dallimore, T.S. Collett (ed.). Geol. Surv. Canada, 2005, Bull. 585, 10 p.

Kneafsey T.J., Gupta A., Seol Y., Tomutsa L. Permeability of Laboratory-Formed Methane Hydrate-Bearing Sand, OTC-19536-PP, SPE // Offshore Technology Conf. (Houston, TX, USA, May 7, 2008). Houston, 2008, p. 21–34.

Kumar A., Maini B., Bishnoi P.R. et al. Experimental determination of permeability in the presence of hydrates and its effect on the dissociation characteristics of gas hydrates in porous media // J. Petrol. Sci. and Eng., 2010, vol. 70, p. 114–122.

Masuda Y., Kurihara M., Ohuchi H., Sato T. A field-scale simulation study on gas hydrate productivity of formations containing gas hydrates // Fourth Intern. Conf. on Gas Hydrates (Yokohama, Japan, 19–23 May, 2002). Yokohama, 2002, p. 218–230.

Minagawa H., Ohmura R., Kamata Y. et al. Water permeability measurements of gas hydrate-bearing sediments // Fifth Intern. Conf. on Gas Hydrates. Trondheim, Norway, Tapir Acad., 2005, p. 398–401.

Minagawa H., Nishikawa Y., Ikeda I. et al. Relaition between permability and pore-size distribution of methane-hydrate-bearing sediments. OTC-19305-PP, SPE // Offshore Technology Conf. (Houston, TX, USA, May 7, 2008). Houston, 2008, p. 11–21.

Murray D., Fukuhara M., Khong C.K., Namikawa T., Yamamoto K. Permeability estimates in gas hydrate reservoirs of the Nankai trough // SPWLA 47th Annual Logging Symp., Veracruz, Mexico, 2006, p. 16–29.

Поступила в редакцию
16 октября 2014 г.