

УДК 551.345.3

## Влияние гидрато- и льдообразования на газопроницаемость песчаных пород

Е.М. Чувилин<sup>1,2\*</sup>, С.И. Гребенкин<sup>1</sup>, М.В. Жмаев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Российская Федерация, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1

<sup>2</sup> Сколковский институт науки и технологий, Российская Федерация, 143026, г. Москва, ул. Нобеля, д. 3

\* E-mail: chuviline@msn.com

**Ключевые слова:** газопроницаемость, песчаные породы, газовые гидраты, лед, промерзание, гидратообразование, льдосодержание, гидратосодержание.

**Тезисы.** Фильтрационные свойства дисперсных пород криолитозоны во многом определяются фазовым состоянием поровой влаги, которая в зависимости от термобарических и геохимических условий может принимать формы льда, незамерзшей воды, газогидратных образований (реликтовых и стабильных). В нижних горизонтах криолитозоны (под толщей многолетнемерзлых пород) фазовый состав поровой влаги обычно представлен жидкой водой, а также газогидратом при наличии газонасыщенных пород и зоны стабильности газогидратов. В этой связи для анализа газопроницаемости дисперсных пород криолитозоны необходимо проведение фильтрационных экспериментов на образцах пород с различными фазовыми состояниями поровой влаги: вода – лед, вода – лед – гидрат, вода – гидрат.

В данной работе представлены результаты экспериментального изучения газопроницаемости модельных неконсолидированных коллекторов (влажных песчаных пород) в условиях образования в поровом пространстве льда и гидрата метана. Методика исследований включала технологии подготовки экспериментальных образцов, формирования необходимого фазового состава влаги в грунтовых образцах путем поддержания заданных термобарических условий для гидрато- и льдообразования, определения газопроницаемости, а также контроля физических параметров образцов. Эксперименты выполнены на оригинальной установке, позволяющей создавать условия, необходимые для промерзания и/или гидратонасыщения образцов пород.

В ходе опытов получены экспериментальные данные о газопроницаемости песчаных пород при различном фазовом составе поровой влаги (вода, лед, гидрат), выявлено влияние содержания и минерального состава глинистой компоненты, а также соотношения фаз влаги на газопроницаемость песчаных пород при различных термобарических условиях.

Разработка месторождений углеводородов в северных регионах страны и в арктической зоне невозможна без знания свойств и характеристик толщ многолетнемерзлых пород (ММП) и насыщенных гидратами прослоев, залегающих над продуктивными газовыми и нефтяными горизонтами. Это также важно и для анализа поведения разрабатываемых газовых коллекторов, залегающих неглубоко по отношению к подошве ММП и зонам стабильности газовых гидратов и характеризующихся 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.

Протекающие в горных породах фазовые переходы вода – лед и вода/лед – газогидрат существенно изменяют их физические свойства, в частности фильтрационные. В породах криолитозоны в зависимости от термобарических и геохимических условий вода может находиться в нескольких фазовых состояниях – в виде льда, незамерзшей воды, а также в виде газогидратных образований (реликтовых и стабильных). Под толщей ММП фазовый состав влаги обычно распределяется между жидкой водой и гидратом при наличии зоны стабильности газогидратов.

Для анализа фильтрационных свойств пород криолитозоны необходимо рассмотреть в экспериментальном плане породы с поровой влагой в различных фазовых состояниях: вода – лед, вода – лед – гидрат и вода – гидрат. На сегодняшний день опубликованы отдельные экспериментальные данные по оценке изменения газопроницаемости влажных горных пород при промерзании, которые показывают, что, несмотря

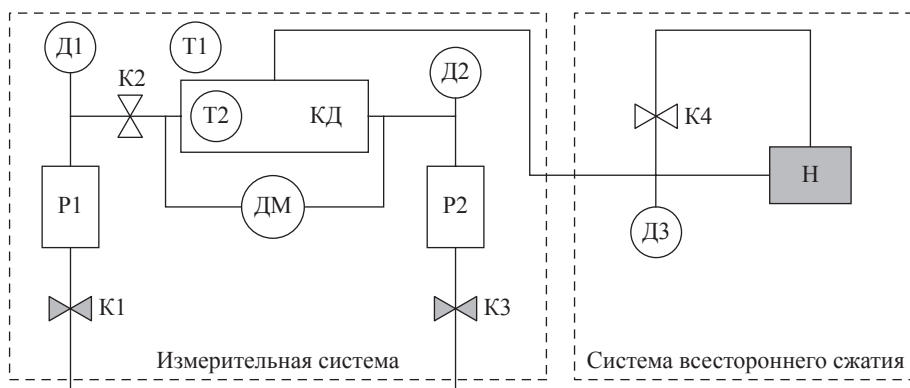
на значительное снижение проницаемости пород после промерзания, она остается экспериментально определяемой. Рядом исследователей [1–6] показано, что проницаемость дисперсных пород с увеличением льдонасыщенности снижается.

Экспериментальные исследования проницаемости гидратосодержащих пород были начаты в 1970-х гг. А.С. Схаляко и А.В. Безносиковым, которые получили зависимости относительной проницаемости песчаной породы по газу от коэффициента гидратонасыщенности порового пространства [7, 8]. Позже эти экспериментальные данные нашли подтверждение и в ходе экспериментального определения водопроницаемости [9, 10].

С 2000-х гг. в связи с увеличением интереса к возможности добычи газа из природных газогидратных месторождений исследования газопроницаемости гидратосодержащих пород значительно активизировались. Появились работы, посвященные экспериментальному определению проницаемости гидратосодержащих образцов как природного происхождения, так и искусственно приготовленных [4, 11–17]. Полученные данные показали, что с ростом гидратосодержания проницаемость образцов снижается нелинейно. Существует также достаточно много работ, описывающих математическое моделирование относительной проницаемости гидратонасыщенных пород [18–22], однако корреляция экспериментальных и модельных данных недостаточна для разработки универсальных зависимостей и формул.

### Экспериментальное изучение газопроницаемости влажных песчаных пород в условиях образования в поровом пространстве льда и гидрата метана

**Методика.** Несмотря на проведенные исследования, фильтрационные характеристики пород в зависимости от фазовых переходов влаги в лед и гидрат остаются изученными не в полной мере. С целью дальнейшего изучения газопроницаемости мерзлых и гидратосодержащих пород авторы разработали оригинальную методику исследования газопроницаемости, включающую описание технологий подготовки экспериментальных образцов, формирования необходимого фазового состава влаги в грунтовых образцах путем поддержания заданных термобарических условий для гидрато- и льдообразования, определения газопроницаемости, а также контроля физических параметров образцов. Испытания проводились на оригинальной установке, разработанной ООО «ЭкоГеосПром» (рис. 1). Установка позволяет создавать заданные термобарические условия в образцах грунтов в широком диапазоне температур (от  $-15$  до  $+30$  °С) и давлений (до 100 бар) и состоит: из специального кернодержателя, в который помещается образец грунта диаметром 30 мм и длиной до 5 см; 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 (см. рис. 1).



**Рис. 1. Схема экспериментальной установки для определения газопроницаемости мерзлых, талых и гидратонасыщенных образцов:** Д1...Д3 – датчики давления;

ДМ – датчик дифференциального давления; К1... К3 – мембранные клапаны системы подачи газа; К4 – шаровой клапан гидравлической системы; КД – кернодержатель; Н – гидравлический насос с масляным резервуаром; P1, P2 – ресиверы системы подачи газа; Т1...Т2 – датчики температуры

Для получения однородных образцов грунта, которые в дальнейшем использовались в ходе экспериментальных исследований газопроницаемости в условиях гидратонасыщения и замораживания, применялась следующая процедура, разработанная авторами. Вначале приготавливался грунтовой образец с заданной влажностью. Для этого воздушно-сухая навеска грунта тщательно перемешивалась с водой и выдерживалась в течение получаса для равномерного влагонасыщения. После этого влажный грунт помещался в резиновую манжету диаметром 3 см с послойным уплотнением (длина образца 3...4 см). Затем образец помещался в кернодержатель установки, где он обжимался (до давления 60 бар), замораживался, а затем насыщался гидратами (в экспериментах с гидратонасыщением). В ходе эксперимента осуществлялась запись температуры и давления в кернодержателе. Определение газопроницаемости проводилось на каждом этапе нагревания и охлаждения образца. Измерение газопроницаемости мерзлого, насыщенного гидратом метана образца в установке проводилось при давлении выше равновесного (более 25 бар). В экспериментах использовались образцы с неполной степенью заполнения пор влагой, что способствовало равномерному распределению порового льда в образцах. При этом насыщение образцов газогидратами начиналось при отрицательных температурах. Это подавляло перераспределение влаги в образцах в процессе гидратообразования и в конечном итоге приводило к формированию однородных гидратонасыщенных образцов, что важно для оценки газопроницаемости мерзлых и гидратосодержащих пород.

Параметры заполнения пор гидратом и льдом в ходе эксперимента рассчитывались с использованием PVT-метода [23]. Для образцов были рассчитаны следующие основные параметры: коэффициент гидратности ( $K_{гид}$ ), характеризующий долю поровой воды, перешедшей в гидрат, от общего количества воды в образце; степень заполнения пор гидратом, или гидратонасыщенность ( $S_{гид}$ ); степень заполнения пор льдом, или льдонасыщенность ( $S_{л}$ ); степень заполнения пор водой, или влагонасыщенность ( $S_{в}$ ). При расчетах параметров гидратосодержания грунтов использовалась следующая формула гидрата метана:  $CH_4 \cdot 5,9 H_2O$ .

Коэффициент эффективной газопроницаемости ( $K_e$ ) мерзлого гидратосодержащего грунта рассчитывался с использованием дифференциального уравнения массопереноса газа, детально описанного ранее [15]. По окончании фильтрационного эксперимента проводился контроль влажности и плотности экспериментального образца.

На основе отработанной методики изучения газопроницаемости влажных дисперсных пород в условиях гидратонасыщения и замораживания получены новые экспериментальные данные о газопроницаемости льдо- и гидратосодержащих дисперсных пород.

**Характеристика объекта исследований.** Объектом исследования при экспериментальной оценке газопроницаемости служили природные песчаные грунты, а также модельные грунтовые смеси, приготовленные из люберецкого кварцевого песка с добавлением глинистой компоненты (каолина и бентонита) (табл. 1).

Природные песчаные грунты отобраны из толщи мерзлых пород морского генезиса

Таблица 1

## Краткая характеристика грунтов

Тип грунта	Содержание частиц в каждой фракции, %, для частиц диаметром, мм								Минеральный состав, %	Степень засоленности, %
	1...0,5	0,5...0,25	0,25...0,1	0,1...0,05	0,05...0,01	0,01...0,005	0,005...0,001	< 0,001		
Песок-1	0,2	29,1	62,3	8,4	–	–	–	–	Кварц > 90	0,06
Песок-2	0,1	14,4	57,8	27,7	–	–	–	–	Кварц 74,1; альбит 12,8; ортоклаз 10	0,13
Песок-3	6,5	6,5	79,6	2,2	2,4	0,4	0,3	2,1	Кварц > 90	0,01
Бентонит	0,0	0,0	0,2	0,1	18,8	7,3	20,1	53,5	Монтмориллонит > 90	1,99
Каолин	0,7	0,5	0,4	2,9	19,5	11,2	40,2	24,6	Каолинит >90	0,04

( $mQ_3$ ) в пределах Южно-Тамбейского газоконденсатного месторождения на Ямале. Соответствующие образцы представляли грунты двух типов дисперсности: песок-1 – мелкозернистый (глубина отбора 36,5...46 м); песок-2 – пылеватый (глубина отбора 27...48 м). Основой модельных образцов служил песок позднеюрского возраста ( $mJ_3$ ), морского генезиса, отобранный вблизи г. Люберцы (песок-3). Каолинистая глина (каолин) палеогенового возраста элювиального генезиса ( $eP_{2ogl}$ ) отобрана на месторождении вблизи г. Новокаолиновый Челябинской области; монтмориллонитовая глина (бентонит) оглантинской свиты палеогенового возраста элювиального генезиса ( $eP_{2ogl}$ ) – вблизи ст. Джембел Ашхабадской железной дороги.

**Изменение газопроницаемости песчаных грунтов при промерзании.** Влияние промерзания на изменение газопроницаемости песчаных грунтов изучалось на образцах песков и песчано-глинистых смесей. При приготовлении образцов весовая влажность задавалась  $\approx 10\%$ , плотность минерального скелета ( $\rho_{ск}$ ) образцов варьировалась в диапазоне 1,57...1,60 г/см<sup>3</sup>, а пористость – в пределах 0,38...0,41. Влагонасыщенность образцов до промораживания –  $S_b$  – изменялась от 30,9 до 46,2 %; после перехода поровой воды в лед степень заполнения пор –  $S_l$  – закономерно повышалась (табл. 2). В результате экспериментально установлено, что при промерзании проницаемость грунтовых образцов снижалась (см. табл. 2).

Так, образец кварцевого песка (песок-3) влажностью 10,2 % ( $S_b = 42,1\%$ ) в талом состоянии демонстрировал газопроницаемость 110,5 мД, в мерзлом состоянии его газопроницаемость снижалась почти в 2 раза до 60,1 мД (см. табл. 2). Для большинства песчаных

образцов с начальной влажностью  $\approx 10\%$  проницаемость в талом и в мерзлом состояниях различалась в пределах 1,5...4 раза, однако для некоторых образцов, представленных пылеватым песком, газопроницаемость в талом и мерзлом состояниях отличалась более чем на порядок. Так, в исходном состоянии (до промерзания) газопроницаемость образца пылеватого песка (песок-2) составляла 59,38 мД, а в мерзлом – 2,4 мД (см. табл. 2). Данный факт, по-видимому, связан со структурообразовательными процессами, которые протекают в промерзающих песчаных грунтах, содержащих тонкодисперсный материал. Их результатом являются локальная миграция поровой влаги в крупные поры и ее замерзание в них. Это приводит к блокированию образующимся льдом крупных пор и резкому падению проницаемости.

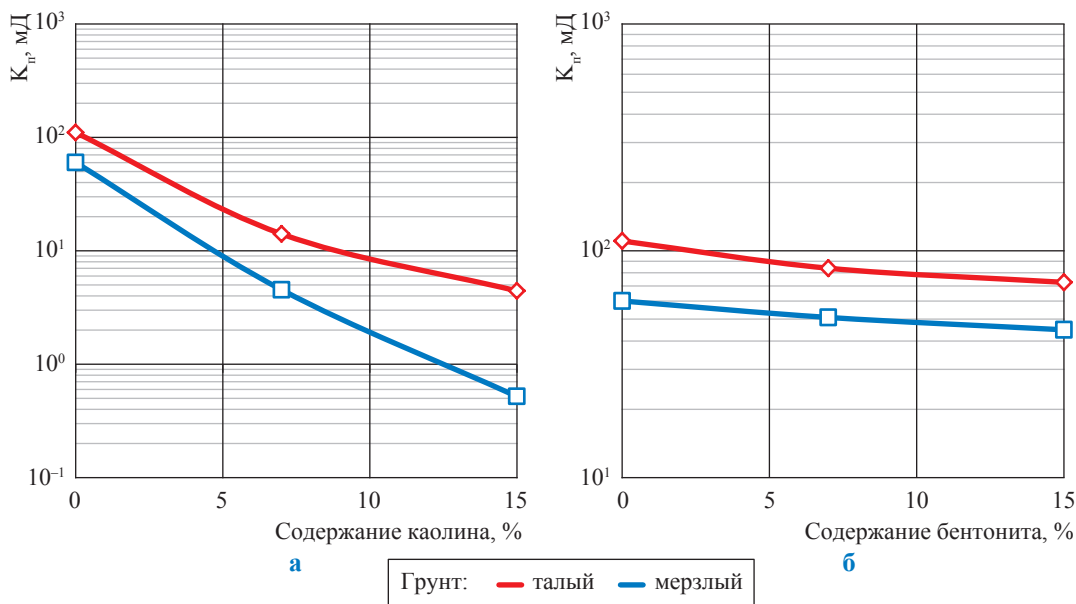
Для оценки влияния состава и содержания глинистых частиц на проницаемость промерзающих песчаных пород проведены специальные эксперименты на песчано-глинистых смесях, которые позволили проследить изменения газопроницаемости талых и мерзлых песчано-глинистых смесей в зависимости от содержания и минерального состава глинистой компоненты (рис. 2).

Экспериментально показано, что при фиксированной весовой влажности ( $W$ ) около 10 % и влагонасыщенности  $\approx 30\text{...}40\%$  в песчаных грунтах с повышением содержания глинистых частиц каолинистового и монтмориллонитового состава (до 15 % масс.) газопроницаемость закономерно понижается для образцов, находящихся как в талом, так и в мерзлом состояниях. При этом отмечено, что для образцов, содержащих глинистые частицы каолинистового состава, это снижение проявляется более сильно и в мерзлом, и в талом состояниях.

Таблица 2

Газопроницаемость песчаных образцов до и после промерзания

№ образца (тип грунта)	До промерзания		После промерзания	
	$S_b$ , %	$K_p$ , мД	$S_l$ , %	$K_p$ , мД
П-1 (песок-1)	40,3	78,38	44	25,17
П-2 (песок-2)	42,8	59,38	47,1	2,4
П-3 (песок-3)	42,1	110,5	46,3	60,1
Пк-7 (песок 93 % + каолин 7 %)	38,3	14,08	41,6	4,53
Пб-7 (песок 93 % + бентонит 7 %)	30,9	83,8	34	50,85
Пк-15 (песок 85 % + каолин 15 %)	40,2	4,43	44,3	0,52
Пб-15 (песок 85 % + бентонит 15 %)	46,2	72,6	51	44,85



**Рис. 2. Зависимость газопроницаемости песчано-каолинитовых (а) и монтмориллонитовых (б) образцов от содержания глинистого материала**

Так, для талых образцов при увеличении содержания каолина от 0 до 7 % проницаемость снизилась почти в 8 раз (от 110,5 до 14,1 мД) (см. рис. 2а), а при увеличении до 15 % проницаемость уменьшилась еще в 3 раза (от 14,1 до 4,4 мД) (см. табл. 2). Для образцов в мерзлом состоянии было установлено, что добавление в кварцевый песок 7 % каолина снижает проницаемость мерзлого грунта в 14 раз (от 60,1 до 4,5 мД) (см. рис. 2а), а при увеличении содержания каолина до 15 % проницаемость снижается еще в 9 раз (до 0,52 мД) (см. табл. 2).

Эксперименты с песчаными образцами, содержащими монтмориллонитовые частицы, показали, что для талых образцов при добавлении 7 % бентонита фиксируется снижение проницаемости менее чем в 1,5 раза (от 110,5 до 83,8 мД) (см. рис. 2б), а при добавлении 15 % бентонита – в 1,6 раза (до 72,6 мД) (см. табл. 2). Для образцов в мерзлом состоянии это снижение было также незначительным: от 60,1 мД для образцов, не содержащих бентонита (см. рис. 2б), до 44,9 мД для образцов с содержанием бентонита 15 % (см. табл. 2).

Таким образом, на снижение газопроницаемости в промерзающих песчаных грунтах огромное влияние оказывает не только содержание, но и минеральный состав глинистой компоненты.

**Изменение газопроницаемости песчаных грунтов при гидратообразовании.** В экспериментах по исследованию процессов

гидратообразования на газопроницаемость песчаных пород использовались образцы мелкозернистого песка (песок-1) начальной весовой влажностью в диапазоне  $W = 6...18\%$ , пористостью  $\approx 0,40$  д.е., диаметром 30 мм и длиной ( $L$ ) в диапазоне 29...40 мм,  $\rho_{ск} = 1,62$  г/см<sup>3</sup>, плотность ( $\rho$ ) влажных образцов находилась в диапазоне 1,66...1,88 г/см<sup>3</sup> (табл. 3). Эксперимент проходил в три этапа. Каждый образец исследовался: 1) до гидратонасыщения в мерзлом состоянии при температуре минус 5 °С; 2) после гидратонасыщения в немерзлом состоянии при температуре плюс 1 °С; 3) после гидратонасыщения в мерзлом состоянии при температуре минус 5 °С (табл. 4).

Как показывают экспериментальные данные, газопроницаемость образцов при гидратонасыщении снижается (см. табл. 4). Проницаемость образца П-1а снизилась с 0,05 мД до значений ниже предела измерений, при этом степень перехода влаги в гидрат

**Таблица 3**

**Характеристика образцов песчаных пород, использованных в экспериментах по гидратонасыщению**

№ образца	$L$ , мм	$W$ , %	$\rho/\rho_{ск}$ , г/см <sup>3</sup>
П-1а	29	17,8	1,88/1,62
П-1б	35	10,3	1,72/1,62
П-1в	31	6,7	1,66/1,62
П-1г	40	13,0	1,87/1,62

Таблица 4

**Газопроницаемость песчаных образцов на различных этапах эксперимента по гидратонасыщению**

Этап	Образец	$S_d, \%$	$S_{в}, \%$	$S_{гидр}, \%$	$K_{гидр}, \text{д.е.}$	$K_p, \text{мД}$
1	П-1а	93	0	0	0	0,05
	П-1б	49	0	0	0	1,1
	П-1в	31	0	0	0	1,4
	П-1г	68,6	0	0	0	0,5
2	П-1а	0	76,8	8,2	0,83	< 0,01
	П-1б	0	36,1	13,4	0,26	0,8
	П-1в	0	13,3	18,8	0,56	1,0
	П-1г	0	36,3	35,3	0,48	0,1
3	П-1а	29,1	0	65,4	0,83	< 0,01
	П-1б	4,9	0	63,8	0,91	0,03
	П-1в	2,3	0	32,9	0,98	1,0
	П-1г	34,7	0	41,8	0,57	0,02

(т.е.  $K_{гидр}$ ) составила 83 %. Проницаемость образца П-1б влажностью 10,3 % до гидратообразования в мерзлом состоянии равнялась 1,1 мД (см. табл. 4). После гидратонасыщения в талом состоянии снизилась до 0,8 мД, при этом степень заполнения пор влагой составила 36,1 %, а гидратом – 13,4 % (степень перехода влаги в гидрат 0,26).

Снижение проницаемости образца П-1в с влажностью 6,7 % было достаточно малым, при этом в гидрат перешло 56 % воды, и на момент испытания степень заполнения пор составляла 13,3 и 18,8 % для воды и гидрата соответственно. Проницаемость образца П-1г снизилась в 5 раз (с 0,5 до 0,1 мД) при переходе 48 % влаги в гидрат.

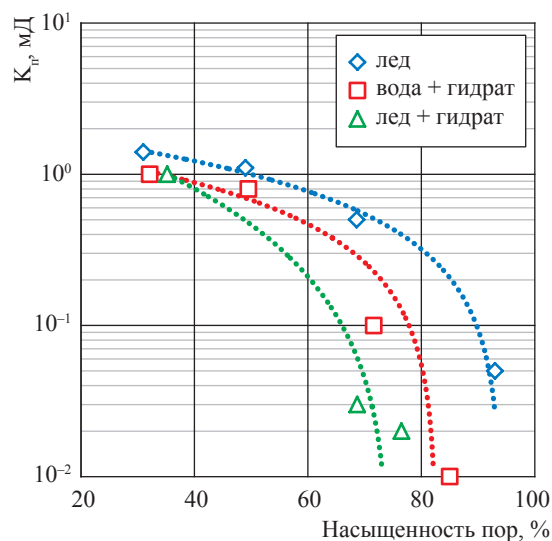
После заморозки гидратонасыщенного образца П-1б его газопроницаемость не превышала 0,03 мД. Проницаемость образца П-1г снизилась с 0,1 до 0,02 мД, при этом дополнительно перешло в гидрат 8,7 % влаги, и конечное гидратонасыщение составило 41,8 %.

Значительное снижение газопроницаемости при заморозке объясняется вымерзанием остаточной поровой влаги, а также дополнительным гидратообразованием при вымерзании остаточной воды. Данные показывают, что при замерзании остаточной поровой влаги происходит увеличение доли влаги, перешедшей в гидрат во всех гидратосодержащих образцах. Причем для образцов начальной влажностью менее 13 % после замерзания остаточной влаги  $K_{гидр}$  достигал 0,9 и более.

Для образца влажностью 6,7 % отмечены наименьшие изменения проницаемости при гидратонасыщении: исходная

проницаемость образца в мерзлом состоянии при гидратонасыщении в талом состоянии снизилась с 1,1 до 1,0 мД и при дальнейшей заморозке практически не изменялась, поскольку в основном вся вода перешла в гидрат до заморозки. Кроме того, в условиях невысокой влажности некоторое изменение гидрато- и льдонасыщенности слабо влияет на снижение газопроницаемости.

Полученные экспериментальные данные позволяют проследить изменение газопроницаемости песчаных образцов в зависимости от степени заполнения пор различными флюидами, льдом, водой и гидратами, а также гидратом и льдом (рис. 3).



**Рис. 3. Влияние типа порового флюида на газопроницаемость песчаных образцов: тип грунта – песок-1**

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод о том, что при фиксированной влажности переход поровой влаги в гидрат сильнее снижает проницаемость песчаных пород, чем переход поровой влаги в лед.

\*\*\*

В ходе экспериментов установлено, что при влагонасыщенности  $\approx 30\text{...}40\%$  и пористости  $\approx 40\%$  газопроницаемость образцов мелкозернистого песка при промерзании снижается в пределах 1,5...4 раза, а для образцов пылеватого песка снижение достигает кратности 10 и более.

Показано, что на снижение газопроницаемости промерзающих песчаных грунтов оказывает большое влияние не только содержание глинистых частиц в песчаной матрице, но и их минеральный состав. Так,

проницаемость песчаных образцов, содержащих глинистые частицы в количестве 15 %, может меняться на порядок в зависимости от их минерального состава.

Экспериментально установлено, что при фиксированной влажности переход влаги в гидрат сильнее снижает проницаемость песчаных пород, чем переход влаги в лед. Также выявлено, что значительное снижение газопроницаемости при заморозке гидратонасыщенных песчаных образцов объясняется не только вымерзанием остаточной (не перешедшей в гидрат) поровой влаги, но и дополнительным гидратообразованием при ее вымерзании.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект 17-05-00995) и проекта МГУ-Тоталь.*

## Список литературы

1. Ананян А.А. О проницаемости мерзлых пород / А.А. Ананян, Н.А. Арутюнян, В.А. Мазуров и др. // Мерзлотные исследования. – 1972. – № 12. – С. 205–209.
2. Chamberlain E.J. Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils / E.J. Chamberlain and A.J. Gow // Engineering Geology. – 1979. – № 13. – С. 73–92.
3. Старобинец И.С. Экранирующая и проводящая роль пород криолитозоны по отношению к миграционным углеводородам / И.С. Старобинец, Р.Н. Мурогова // Геология нефти и газа. – 1985. – № 1. – С. 24–27.
4. Kneafsey T.J. Permeability of laboratory-formed methane hydrate-bearing sand / T.J. Kneafsey, A. Gupta, Y. Seol et al. // OTC-19536-PP, SPE. Offshore Technology conf. – Houston, TX, USA, May 7. – 2008. – С. 21–34.
5. Wang P. Effect of permafrost properties on gas hydrate petroleum system in the Qilian Mountains, Qinghai, Northwest China / P. Wang, X. Zhang, Y. Zhu et al. // Environmental Science: Processes & Impacts. – 2014. – № 16. – С. 2711–2720.
6. Чувиллин Е.М. Влияние влагосодержания на проницаемость песчаных пород в мерзлом и талом состояниях / Е.М. Чувиллин, С.И. Гребенкин, М. Сакле // Криосфера Земли. – 2016. – Т. XX. – № 3. – С. 71–78.
7. Схаляхо А.С. Исследование условий образования гидратов природных газов в пористых средах и их влияние на продуктивную характеристику скважин: автореф. дис. ... к.т.н. / А.С. Схаляхо. – М.: МИНХиГП им. И.М. Губкина, 1974. – 24 с.
8. Безносиков А.Ф. Газогидратные залежи и исследование некоторых особенностей их разработки (на примере Мессояхского месторождения): автореф. дис. ... к.т.н. / А.Ф. Безносиков. – Тюмень: ТИИ, 1978. – 155 с.
9. Ненахов В.А. Особенности фильтрации воды через гидратонасыщенные пористые среды / В.А. Ненахов // Экспресс информация ВНИИЭГазпром. – 1982. – № 10. – С. 9–10. – (Геология, бурение и разработка газовых месторождений).
10. 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.
11. Jaiswal N.J. Phase behavior and relative permeability of gas-water-hydrate system / N.J. Jaiswal, J.V. Westervelt, S.L. Patil et al. // AAPG Hedberg conf. «Gas hydrates: energy resource potential and associated geologic hazards», September 12–16. – Vancouver, BC, Canada, 2004. – С. 26–35.

12. Johnson 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 / A. Johnson, S. Patil, A. Dandekar // *Marine and Petroleum Geology*. – 2011. – № 28. – С. 419–426.
13. Kumar A. Experimental determination of permeability in the presence of hydrates and its effect on the dissociation characteristics of gas hydrates in porous media / A. Kumar, B. Maini, P.R. Bishnoi // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2010. – № 70. – С. 114–122.
14. Minagawa H. Relation between permeability and pore-size distribution of methane-hydrate-bearing sediments / H. Minagawa, Y. Nishikawa, I. Ikeda et al. // *OTC-19305-MS Offshore Technology Conference*. – Texas, USA, 2008. – С. 1–6.
15. Чувиллин Е.М. Экспериментальная оценка газопроницаемости газонасыщенных пород при гидратообразовании и замораживании / Е.М. Чувиллин, С.И. Гребенкин // *Криосфера Земли*. – 2015. – Т. XIX. – № 2. – С. 67–74.
16. Li D. Dynamic behavior of hydrate dissociation for gas production via depressurization and its influencing factors / D. Li, S. Ren, L. Zhang et al. // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2016. – № 146. – С. 552–560.
17. Murray D. Permeability estimates in gas hydrate reservoirs of the Nankai trough / D. Murray, M. Fukuhara, C.K. Khong et al. // *SPWLA 47<sup>th</sup> Annual logging symposium*, June 4–7, 2006. – С. 25–31.
18. Masuda Y. A field-scale simulation study on gas productivity of formations containing gas hydrates / Y. Masuda, M. Kurihara, H. Ohuchi et al. // *Proc. of Int. Conf. on Gas Hydrates*. – Yokohama, Japan, 19–23 May, 2002. – С. 40–46.
19. Minagawa H. Water permeability measurements of gas hydrate-bearing sediments / H. Minagawa, R. Ohmura, Y. Kamata et al. // *Proc. of the 5<sup>th</sup> Int. Conf. on Gas Hydrates (ICGH-2005)*. – Trondheim, Norway, June 13–16, 2005. – С. 398–401.
20. Kleinberg R.L. Deep sea NMR: Methane hydrate growth habit in porous media and its relationship to hydraulic permeability, deposit accumulation, and submarine slope stability / R.L. Kleinberg, C. Flaum, D.D. Griffin et al. // *Journal of Geophysical Research*. – 2003. – № 108 (B10). – С. 2508.
21. Rezaee R. Tight gas sands permeability estimation from mercury injection capillary pressure and nuclear magnetic resonance data / R. Rezaee, A. Saeedi, B. Clennell // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2012. – № 88–89. – С. 92–99.
22. Hauge L.P. Pore-level hydrate formation mechanisms using realistic rock structures in high-pressure silicon micromodels / L.P. Hauge, J. Gauteplass, M.D. Høyland et al. // *International Journal of Greenhouse Gas Control*. – 2016. – № 53. – С. 178–186.
23. Чувиллин Е.М. Экспериментальное образование гидратов CO<sub>2</sub> в поровом пространстве промерзающих и мерзлых пород / Е.М. Чувиллин, О.М. Гурьева // *Криосфера Земли*. – 2009. – Т. XIII. – № 3. – С. 70–79.

## Impact of hydrate and ice formation on gas permeability of sandy soils

Ye.M. Chuvilin<sup>1,2\*</sup>, S.I. Grebenkin<sup>1</sup>, M.V. Zhmayev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Bld. 1, Leninskiye gory, Moscow, 119991, Russian Federation

<sup>2</sup> Skolkovo Institute of Science and Technology, Bld. 3, Nobelya street, Moscow, 143026, Russian Federation

\* E-mail: chuviline@msn.com

**Abstract.** Permeability and porosity of dispersive rocks in the permafrost well depends on a phase of a pore moisture, which subject to thermobaric and geochemical conditions can take the forms of ice, unfrozen water, gas hydrates (relict and stable). In the lower horizons of the cryolitozone (under the permafrost) a phase composition of pore moisture is usually represented by liquid water, and a gas hydrate in case of either gas-saturated rocks, or a zone of gas hydrates stability occur. In that context to analyze gas permeability of dispersive rocks of the criolitozone it is necessary to carry over filtration tests using soil samples with different phases of a pore moisture: water–ice, water–ice–hydrate, water–hydrate.

In this paper presents the experimental results related to studying gas permeability of modelling unconsolidated reservoirs wet (sandy soils) in conditions when ice and methane hydrate form in voids. Test procedure included schedules for sample preparation, building-up of necessary moisture phases in pores of the soil samples by keeping given thermobaric provisions for hydrate and ice generation, determination of gas permeability, and controle of physical parameters of the samples. Tests were performed using an original experimental apparatus enabling provisions for freezing and/or hydrate saturation of rock samples.

The named tests gave experimental data about gas permeability of sandy soils for various phases of moisture in their pores (water, ice, hydrate). Also, a fact that the sandy soils' gas permeability in different thermobaric



conditions responds to the composition and mineral assemblage of a clay component, as well as to the phases of the pore moisture is proved.

**Keywords:** gas permeability, sandy soils, gas hydrates, ice, freezing, hydrate formation, ice content, hydrates content.

### References

1. ANANYAN, A.A., N.A. ARUTYUNYAN, V.A. MAZUROV et al. On permeability of permafrost [O pronitsayemosti merzlotnykh porod]. *Merzlotnyye Issledovaniya*. 1972, no. 12, pp. 205–209. (Russ.).
2. CHAMBERLAIN, E.J., and A.J. GOW. Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils. *Engineering Geology*. 1979, no. 13, pp. 73–92. ISSN 0013-7952.
3. STAROBINETS, I.S., R.N. MUROGOVA. Screen and conductive role of cryolithic rocks in respect to migrating hydrocarbons [Ekraniruyushchaya i provodyashchaya rol porod kriolitozony po otnosheniya k migratsionnym uglevodorodam]. *Geologiya Nefti i Gaza*. 1985, no. 1, pp. 24–27. ISSN 0016-7894. (Russ.).
4. KNEAFSEY, T.J., A. GUPTA, Y. SEOL et al. Permeability of laboratory-formed methane hydrate-bearing sand. In: *OTC-19536-PP, SPE. Offshore Technology conf.* Houston, TX, USA, May 7, 2008, pp. 21–34.
5. WANG, P., X. ZHANG, Y. ZHU et al. Effect of permafrost properties on gas hydrate petroleum system in the Qilian Mountains, Qinghai, Northwest China. *Environmental Science: Processes & Impacts*. 2014, no. 16, pp. 2711–2720. ISSN 2050-7887.
6. CHUVILIN, Ye.M., S.I. GREBENKIN, M. SAKLE. Correslation of moisture content and permeability of sandstons in frozen and thawed states [Vliyaniye vlagosoderzhaniya na pronitsayemost peschanykh porod v merzlom i talom sostoyaniyakh]. *Kriosfera Zemli*. 2016, vol. XX, no. 3, pp. 71–78. ISSN 1560-7496. (Russ.).
7. SKHALYAKHO, A.C. *Studying provisions for generation of hydrates of natural gases in porous media and their impact on productive record of a well* [Issledovaniye usloviy obrazovaniya gidratov prirodnykh gazov v poristykh sredakh i ikh vliyaniye na produktivnyuyu kharakteristiku skvazhin]: synopsis of candidate thesis (engineer.). Moscow, Gubkin Moscow Institute of Oil and Gas Industry, 1974. (Russ.).
8. BEZNOSIKOV, A.F. *Gas-hydrate deposits and study of few peculiarities concerning their development (on example of Messoyakha field)* [Gazogidratnyye zalezhi i issledovaniye nekotorykh osobennostey ikh razrabotki (na primere Messoyakhskego mestorozhdeniya)]: synopsis of candidate thesis (engineer.). Tyumen: Tyumen Industrial Institute, 1978. (Russ.).
9. NENEKHOV, V.A. Special aspects of water filtration through hydrate-saturated porous media [Osobennosti filtratsii vody cherez gidratonasyshchennyye poristyye sredi]. *Geologiya, Bureniye i Razrabotka Gazovykh Mestorozhdeniy: express information*. Moscow: VNIIEGazprom, 1982, no. 10, pp. 9–10. (Russ.).
10. LARIONOV, V.R., S.M. FEDOSEYEV, B.D. IVANOV. *Prospects for practical application of gas hydrates in mining* [Perspektivy prakticheskogo ispolzovaniya gazovykh gidratov v gornom dele]. Yakutsk: Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS, 1993. (Russ.).
11. JAISWAL, N.J., J.V. WESTERVELT, S.L. PATIL et al. Phase behavior and relative permeability of gas-water-hydrate system. In: *AAPG Hedberg conf. «Gas hydrates: energy resource potential and associated geologic hazards»*, September 12–16. Vancouver, BC, Canada, 2004, pp. 26–35.
12. JOHNSON, A., S. PATIL, A. DANDEKAR. Experimental investigation of gas-water relative permeability for gas-hydrate-bearing sediments from the Mount Elbert Gas Hydrate Stratigraphic Test Well, Alaska North Slope. *Marine and Petroleum Geology*. 2011, no. 28, pp. 419–426. ISSN 0264-8172.
13. KUMAR, A., B. MAINI, P.R. BISHNOI. Experimental determination of permeability in the presence of hydrates and its effect on the dissociation characteristics of gas hydrates in porous media. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2010, no. 70, pp. 114–122. ISSN 0920-4105.
14. MINAGAWA, H., Y. NISHIKAWA, I. IKEDA et al. Relation between permeability and pore-size distribution of methane-hydrate-bearing sediments. In: *OTC-19305-MS Offshore Technology Conference*. Texas, USA, 2008, pp. 1–6.
15. CHUVILIN, Ye.M., S.I. GREBENKIN. Testing gas permeability of gas-saturated rocks at hydrating and freezing [Eksperimentalnaya otsenka gazonasyshchennykh porod pri gidratoobrazovanii i zamorazhivani]. *Kriosfera Zemli*. 2015, vol. XIX, no. 2, pp. 67–74. ISSN 1560-7496. (Russ.).
16. LI, D., S. REN, L. ZHANG et al. Dynamic behavior of hydrate dissociation for gas production via depressurization and its influencing factors. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2016, no. 146, pp. 552–560. ISSN 0920-4105.
17. MURRAY, D., M. FUKUHARA, C.K. KHONG et al. Permeability estimates in gas hydrate reservoirs of the Nankai trough. In: *SPWLA 47<sup>th</sup> Annual logging symposium*. June 4–7, 2006, pp. 25–31.
18. MASUDA, Y., M. KURIHARA, H. OHUCHI et al. A field-scale simulation study on gas productivity of formations containing gas hydrates. In: *Proc. of Int. Conf. on Gas Hydrates*, Yokohama, Japan, 19–23 May, 2002, pp. 40–46.
19. MINAGAWA, H., R. OHMURA, Y. KAMATA et al. Water permeability measurements of gas hydrate-bearing sediments. In: *Proc. of the 5<sup>th</sup> Int. Conf. on Gas Hydrates (ICGH-2005)*. Trondheim, Norway, June 13–16, 2005, pp. 398–401.

20. KLEINBERG, R.L., C. FLAUM, D.D. GRIFFIN et al. Deep sea NMR: Methane hydrate growth habit in porous media and its relationship to hydraulic permeability, deposit accumulation, and submarine slope stability. *Journal of Geophysical Research*. 2003, no. 108 (B10), pp. 2508. ISSN 0148-0227.
21. REZAEI, R., A. SAEEDI, B. CLENNELL. Tight gas sands permeability estimation from mercury injection capillary pressure and nuclear magnetic resonance data. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2012, no. 88–89, pp. 92–99. ISSN 0920-4105.
22. HAUGE, L.P., J. GAUTEPLASS, M.D. HØYLAND et al. Pore-level hydrate formation mechanisms using realistic rock structures in high-pressure silicon micromodels. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2016, no. 53, pp. 178–186. ISSN 1750-5836.
23. CHUVILIN, Ye.M., O.M. GURYEVA. Experimental formation of CO<sub>2</sub> hydrates in the void space of freezing rocks and permafrost [Eksperimentalnoye obrazovaniye gidratov CO<sub>2</sub> v porovom prostranstve promerzayushchikh i merzlykh porod]. *Kriosfera Zemli*. 2009, vol. XIII, no. 3, pp. 70–79. ISSN 1560-7496. (Russ.).