

ГАЗЫ И ГАЗОВЫЕ ГИДРАТЫ В КРИОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

УДК 551.345.3

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-2(40-47)

ВЛИЯНИЕ ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ
НА ИЗМЕНЕНИЕ ГАЗОПРОНИЦАЕМОСТИ МЕРЗЛЫХ ПЕСЧАНЫХ ПОРОДЕ.М. Чувиллин¹, С.И. Гребенкин¹, Д.А. Давлетшина^{1,2}, М.В. Жмаев²¹ Сколковский институт науки и технологий,
143026, Москва, Территория инновационного центра “Сколково”, ул. Нобеля, 3, Россия; e.chuvilin@skoltech.ru² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический ф-т,
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия

Для оценки изменения газопроницаемости мерзлых песчаных грунтов в условиях гидратообразования при отрицательной температуре проведено специальное экспериментальное моделирование. Эксперименты выполнены на оригинальной установке, позволяющей определить газопроницаемость дисперсных пород в условиях замораживания и гидратонасыщения. В ходе опытов получены данные по изменению газопроницаемости мерзлых песчаных грунтов, насыщенных метаном или диоксидом углерода, в условиях гидратообразования при температуре -5°C . Установлено, что при гидратообразовании в мерзлых песчаных образцах происходит снижение газопроницаемости, величина которой зависит от начального льдосодержания. Получена зависимость снижения газопроницаемости от степени перехода порового льда в гидрат. При этом тип газа-гидратообразователя влияет на интенсивность снижения газопроницаемости мерзлых песков во времени.

Мерзлые песчаные грунты, гидратообразование, газопроницаемость, льдонасыщенность, газовые гидраты, метан, диоксид углерода

INFLUENCE OF HYDRATE FORMATION
ON GAS PERMEABILITY VARIATIONS IN FROZEN SANDSE.M. Chuvilin¹, S.I. Grebenkin¹, D.A. Davletshina^{1,2}, M.V. Jmaev²¹ Skolkovo Institute of Science and Technology, Skolkovo Innovation Center,
build. 3, Nobil str., Moscow, 143026, Russia; e.chuvilin@skoltech.ru² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia

The study of gas permeability variations in frozen sand samples exposed to subfreezing temperatures during hydrate formation included experimental modeling with the experiments run on a specially designed system, which enabled determination of gas permeability of dispersed soils in a context of freezing and hydrate saturation. The experimentally obtained data on variations in gas permeability of frozen sand samples artificially saturated with methane or carbon dioxide under the conditions of hydrate formation at a temperature of -5°C has revealed that a decrease in gas permeability occurring during hydrate formation in frozen sand samples is controlled primarily by the initial ice content. The magnitude of gas permeability reduction dependent on the fraction of pore ice converted to hydrate has been calculated. At this, the behavior of reduced gas permeability in frozen sand samples is found to be largely influenced by the type of hydrate-forming agent.

Frozen sands, hydrate formation, gas permeability, ice saturation, gas hydrates, methane, carbon dioxide

ВВЕДЕНИЕ

Газовые гидраты в природе, как известно, существуют при определенных термобарических условиях в донных отложениях морей и океанов, а также в толщах многолетнемерзлых пород (ММП) и подмерзлотных горизонтах [Истомин, Якушев, 1992]. Благоприятные условия для существования газогидратов в криолитозоне связаны с аккумуляцией большого количества природного газа (преимущественно метана) и возникновением необходимых условий для гидратообразования в результате длительного охлаждения толщ горных пород.

Многочисленные случаи газопроявлений из ММП, которые могут быть связаны с внутримерзлотными газогидратными образованиями, отмечены еще в 1970-х гг. при освоении ряда месторождений в Западной Сибири [Черский и др., 1983; Гинсбург, Соловьев, 1990; Арэ, 1998; Якушев, 2009].

Образование газогидратов в промерзающих газонасыщенных толщах горных пород при возникновении зоны стабильности газогидратов (ЗСГ) происходит не только при положительных, но и при отрицательных температурах, когда не пе-

решедшая в газогидрат газовая залежь оказывается внутри мерзлой зоны [Черский и др., 1983; Гинсбург, Соловьев, 1990; Истомин, Якушев, 1992; Романовский, 1993; Chuvilin et al., 2000]. При этом гидраты газа образуются из ледяной составляющей.

Следует отметить, что при многолетнем промерзании пород может наблюдаться криогенное концентрирование газов и их последующее накопление в горизонтах с хорошими коллекторскими свойствами [Якушев, 1989, 2009; Chuvilin et al., 2000]. При дальнейшем промерзании в таких “газовых карманах” возможно возникновение избыточного давления, величина которого превышает равновесное давление гидратообразования, что ведет к переходу газа в газогидратную форму. Образование газовых гидратов в криолитозоне может происходить и при промерзании в замкнутых условиях насыщенных газом таликовых зон [Istomin et al., 2018]. Кроме криогенного концентрирования, необходимые условия для формирования газовых гидратов в породах криолитозоны возникают и в результате барического фактора, связанного с наличием вышележащих ледниковых покровов или с трансгрессиями арктической морей [Трофимук и др., 1986; Романовский, 1993]. Появление ледникового покрова на поверхности многолетнемерзлых толщ расширяет ЗСГ в криолитозоне, а ее кровля при этом находится вблизи поверхности.

Таким образом, газовые гидраты в областях распространения многолетнемерзлых пород могут находиться под толщей ММП при низких положительных температурах, а также внутри ММП при отрицательных температурах, являясь важным компонентом мерзлых пород. Наличие газовых гидратов в толщах мерзлых пород оказывает существенное влияние на их теплофизические, фильтрационные и механические свойства.

Анализ литературных данных показал, что сегодня имеются лишь отдельные работы по исследованию теплофизических, механических и фильтрационных свойств мерзлых гидратонасыщенных пород [Чувиллин, Гребенкин, 2015; Ershov et al., 1996; Li et al., 2016; Chuvilin, Bukhanov, 2017; Chuvilin et al., 2018]. Изучение фильтрационных свойств гидратонасыщенных пород в основном проводилось при положительных температурах. Однако есть исследования фильтрационных свойств пород, содержащих либо поровый лед, либо поровый гидрат [Ананян и др., 1972; Старобинец, Мурозова, 1985; Чувиллин, Гребенкин, 2015; Seyfried, Murdock, 1997; Jaiswal et al., 2004; Minagawa et al., 2005; Murray et al., 2006; Kneafsey et al., 2008; Kumar et al., 2010; Johnson et al., 2011; Chuvilin et al., 2018], а также лед, сформированный при промерзании гидратонасыщенной породы. Несмотря на проведенные исследования, экспериментальных данных по изменению газопроницае-

мости мерзлых пород в результате формирования гидрата из порового льда фактически нет.

В этой связи были выполнены специальные эксперименты по изучению газопроницаемости мерзлых пород при гидратообразовании.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования газопроницаемости мерзлых гидратосодержащих песков была использована методика, разработанная авторами совместно с сотрудниками компании Шлюмберже для гидратосодержащих пород [Чувиллин, Гребенкин, 2015]. Она основана на изучении фильтрации газа через образец грунта на специальной экспериментальной установке, позволяющей создавать и поддерживать необходимые термобарические условия для искусственного замораживания и гидратонасыщения грунта. Эта методика включает подготовку образца грунта заданной влажности, замораживание, насыщение мерзлого образца газом-гидратообразователем в специальном кернодержателе, гидратонакопление, проведение испытаний на газопроницаемость при различных давлениях газа и температурах и обработку экспериментальных данных.

Для изучения газопроницаемости льдо- и гидратосодержащих пород использовалась экспериментальная установка, разработанная ООО “Эко-ГеосПром” (рис. 1). Данная установка позволяет создавать необходимые термобарические условия в образцах грунтов в широком диапазоне температур (от -15 до $+30$ °С) и давлений (до 100 бар).

В начале эксперимента приготавливали грунтовый образец с заданной влажностью. Для этого воздушно-сухую навеску грунта тщательно перемешивали с водой и выдерживали в течение полу-

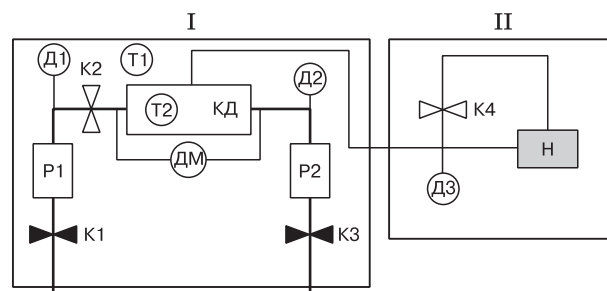


Рис. 1. Схема экспериментальной установки по измерению газопроницаемости грунтовых образцов:

I – измерительная система; II – система всестороннего сжатия; K1–K3 – мембранные клапаны системы подачи газа; K4 – шаровой клапан гидравлической системы; P1, P2 – ресиверы системы подачи газа; D1–D3 – датчики давления; ДМ – датчик дифференциального давления; Н – гидравлический насос с масляным резервуаром; КД – кернодержатель; T1, T2 – датчики температуры.

часа для равномерного влагонасыщения. После этого влажный грунт помещали в резиновую манжету диаметром 3 см с послынным уплотнением (длина образца 3–4 см). Затем образец помещали в кернодержатель установки, где он обжимался (до давления 60 бар) и замораживался. В ходе эксперимента осуществлялась запись температуры и давления в кернодержателе. Далее производили насыщение образца газом-гидратообразователем (CH₄ и CO₂) с одновременным определением проницаемости.

Параметры заполнения пор гидратом и льдом в ходе эксперимента рассчитывались с использованием PVT-метода [Чувиллин и др., 2019]. Были рассчитаны следующие основные параметры.

Коэффициент гидратности (K_h) – доля поровой воды, перешедшей в гидрат, от общего количества воды в образце – определялся по формуле

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

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

Степень заполнения пор гидратом или гидратонасыщенность (S_h , %):

$$S_h = \frac{H_v}{n},$$

где n – пористость грунта; H_v – объемное гидрато-содержание, %;

$$H_v = \frac{M_h \rho}{M_s \rho_h} \cdot 100 \%,$$

где M_h – масса порового гидрата, г; M_s – масса грунтового образца, г; ρ – начальная (до гидратонасыщения) плотность грунта, г/см³; ρ_h – плотность пустого каркаса кристаллической решетки гидрата метана, равная 0.794 г/см³ [Чувиллин, Вукханов, 2017].

Степень заполнения пор льдом или льдонасыщенность (S_i , %) определялась в виде

$$S_i = \frac{\rho_d W}{0.92n},$$

где ρ_d – плотность скелета грунта.

Таблица 1. Характеристики исследуемых песчаных образцов до гидратонасыщения

Номер образца	Влажность, %	Плотность скелета грунта, г/см ³	Плотность, г/см ³	Пористость, д.е.
1	8.5	1.69	1.84	0.37
2	9.5	1.72	1.88	0.36
3	10	1.73	1.91	0.35
4	11	1.69	1.87	0.37
5	10	1.57	1.73	0.41
6	10	1.68	1.83	0.39
7	12	1.54	1.73	0.42
8	14	1.63	1.86	0.39

Для расчетов параметров гидратосодержания грунтов, содержащих гидрат CH₄, использовалось гидратное число 5.9, для CO₂ – 6.1.

Коэффициент эффективной газопроницаемости (K_g , мД) мерзлого гидратосодержащего грунта рассчитывался из дифференциального уравнения массопереноса газа, приведенного в работе [Чувиллин, Гребенкин, 2015]:

$$K_g = \frac{2\eta L V_1 \rho_1 (p_{10} - p_{1k})}{S p_{10} (p_1^2 - p_2^2) t_1},$$

где η – динамическая вязкость газа, Па·с; L – длина образца, см; S – площадь поперечного сечения образца, см²; V_1 – объем ресивера, см³; 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.

В расчетах использовалась также величина относительной проницаемости (K_r , д.е.), представляющая собой отношение эффективной проницаемости гидратонасыщенного образца к проницаемости мерзлого образца в начале эксперимента.

Объектом исследования служил песчаный грунт морского генезиса (mQ₃) нарушенного сложения, отобранный в толще мерзлых пород в пределах Южно-Тамбейского газоконденсатного месторождения на п-ове Ямал (глубина отбора 36–46 м). Согласно ГОСТ 12536-2014 [2014], определялся гранулометрический состав мелкозернистого песка (по классификации Е.М. Сергеева):

Распределение частиц по фракциям, %	0.2	29.1	62.3	8.4
Диаметр частиц, мм	1–0.5	0.5–0.25	0.25–0.1	0.1–0.05

Минеральный состав грунта определялся методом рентгеновской дифрактометрии. Песок мелкозернистый состоял преимущественно из кварца (93.7 %), среди других минералов в песке содержались альбит (5.1 %) и ортоклаз (1.2 %). Плотность твердого компонента мелкозернистого песка равна 2.69 г/см³, а засоленность по данным химического анализа водной вытяжки – 0.06 %. Удельная поверхность песка составляла 0.24 м²/г. Физические характеристики образца определялись согласно ГОСТ 5180-2015 [2015] и СНиП 2.02.04-88 [1990]. Влажность образцов задавалась в диапазоне 8.5–14 %, плотность грунтового скелета образцов менялась от 1.54 до 1.73 г/см³, а их плотность – от 1.73 до 1.91 г/см³, при этом пористость грунтовых образцов составляла 0.35–0.42 д.е. (табл. 1).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Газопроницаемость мерзлых песчаных образцов до гидратонасыщения. Данные по исход-

Таблица 2. Исходная газопроницаемость мерзлых песчаных образцов (до гидратонасыщения)

Номер образца	S_i , %	K_g , мД
1	38.0	23.3
2	41.6	20.6
3	49.2	21.5
4	50.1	19.6
5	40.5	14.6
6	42.9	21.5
7	51.8	5.7

ной газопроницаемости мерзлых негидратосодержащих песчаных образцов представлены в табл. 2. Из этих данных следует, что наибольшая газопроницаемость до гидратонасыщения ($K_g = 23.3$ мД) характерна для образца 1 с льдонасыщенностью 38 %, а наименьшая ($K_g = 1.5$ мД) – для образца 8 с льдонасыщенностью 62.8 %. Видно, что для приготовленных песчаных образцов с увеличением льдонасыщенности порового пространства льдом от 38 до 50 % газопроницаемость мерзлых образцов изменяется в пределах 15–23 мД (рис. 2).

При увеличении льдонасыщенности свыше 50 % наблюдается закономерное снижение газопроницаемости вследствие блокировки порового пространства льдом и уменьшение эффективной пористости.

Изменение проницаемости мерзлых песчаных образцов при гидратонасыщении. После определения начальной газопроницаемости песчаных образцов в мерзлом состоянии производилось их насыщение газом-гидратообразователем (CH_4 или CO_2). Насыщение образцов гидратом происходило при постоянной отрицательной температуре ($-5\text{ }^\circ C$) при давлении газа выше равновесного (50–60 бар для CH_4 и 25–30 бар для CO_2).

Из анализа полученных данных следует, что при переходе порового льда в гидрат эффективная проницаемость исследуемых образцов снижается от 1.5 до 30 раз (табл. 3).

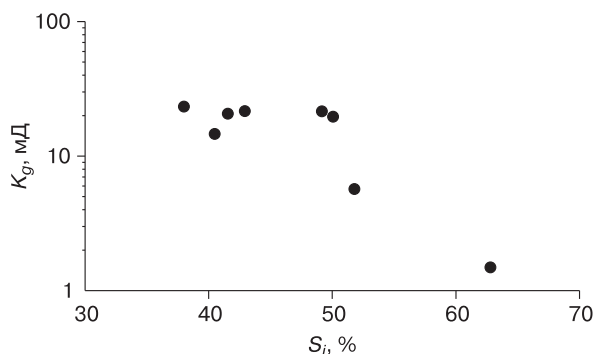


Рис. 2. Влияние льдонасыщенности (S_i) на газопроницаемость (K_g) мерзлых песчаных образцов до гидратонасыщения при $T = -5\text{ }^\circ C$.

Наименьшее снижение проницаемости (менее чем в 2 раза) фиксировалось в образце 2 с невысокой исходной льдонасыщенностью (41.6 %). При его насыщении гидратом CO_2 газопроницаемость уменьшилась от 20.6 до 12.66 мД. В гидрат перешло 32 % порового льда, а доля свободного порового пространства – пустотность ($1 - (S_i + S_h)$) – снизилась с 58.8 до 44 %.

Наибольшее снижение проницаемости было зафиксировано в образце 8 с максимальной для экспериментов исходной льдонасыщенностью (62.8 %). При переходе в гидрат метана лишь 21 % порового льда проницаемость образца снизилась почти в 30 раз – с 1.5 до 0.05 мД, а пустотность изменилась незначительно – от 37.2 до 30.8 %.

Таким образом, наибольшее снижение газопроницаемости мерзлых песчаных пород при гидратонасыщении наблюдается в образцах с высокой степенью заполнения пор льдом, несмотря на то что доля порового льда, переходящего в гидрат, для них уменьшается.

При анализе кинетики гидратообразования на снижении газопроницаемости образцов при переходе порового льда в гидрат отмечено некоторое различие для гидрата CH_4 и CO_2 (рис. 3).

При насыщении образцов гидратом CO_2 переход льда в гидрат происходил быстрее. Так, в образце 4 за первые 5 часов в гидрат перешло 13.9 % льда, а при насыщении метаном образца 6 – около 6 % льда. В следующие сутки скорость перехода

Таблица 3. Изменение эффективной газопроницаемости песчаных образцов до (числитель) и после (знаменатель) гидратонасыщения при температуре $T = -5\text{ }^\circ C$

Газ	Номер образца	S_i	S_h	$1 - (S_i + S_h)$	K_h	K_g	
CO_2	1	38.0	0	62.0	0	23.3	
		18.5	35.7	45.8	0.62	4.04	
	2	41.6	0	58.8	0	20.6	
		32.4	23.6	44.0	0.32	12.66	
	3	49.2	0	50.8	0	21.5	
		35.9	32.4	31.7	0.37	10.44	
	4	50.1	0	49.9	0	19.6	
		23.5	56.6	19.9	0.64	5.47	
	CH_4	5	40.5	0	59.5	0	14.6
			21.1	26.6	52.3	0.47	2.04
		6	42.9	0	57.1	0	21.5
			24.1	35.0	40.9	0.59	10.25
7		51.8	0	48.2	0	5.7	
		26.3	54.7	19.0	0.64	0.24	
8		62.8	0	37.2	0	1.5	
		51.3	17.9	30.8	0.21	0.05	

Примечание. S_i – льдонасыщенность, %; S_h – гидратонасыщенность, %; K_h – коэффициент гидратности, д.е.; K_g – коэффициент эффективной газопроницаемости, мД.

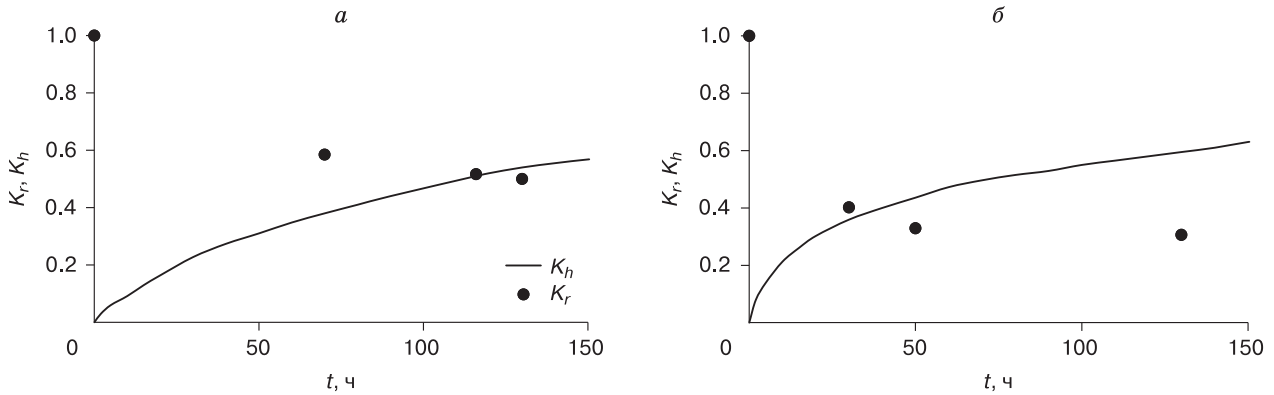


Рис. 3. Изменение коэффициента гидратности (K_h) и относительной газопроницаемости (K_r) во времени (t) при насыщении образца 6 гидратом CH_4 (а) и образца 4 гидратом CO_2 (б).

льда в гидрат также различалась: в образце 4 за первые 30 часов в гидрат перешло 35 % льда, в образце 6 – 23 %. Далее скорости гидратообразования снижались и были примерно равными: через 50 ч после начала эксперимента с CO_2 в гидрат перешло 43.6 % льда, а в эксперименте с метаном – 31 %. При дальнейшем переходе льда в гидрат скорость гидратообразования в эксперименте с углекислым газом была ниже, чем в эксперименте с метаном. Так, через 120 ч после начала экспериментов в образце 4 в гидрат перешло 58 % льда, а в образце 6 – 52 %.

Проницаемость образцов в ходе экспериментов менялась обратно пропорционально коэффициенту гидратности – в эксперименте с CO_2 наибольшее снижение проницаемости фиксировалось в первые часы, а далее газопроницаемость менялась незначительно. В эксперименте с метаном также основное снижение проницаемости было в

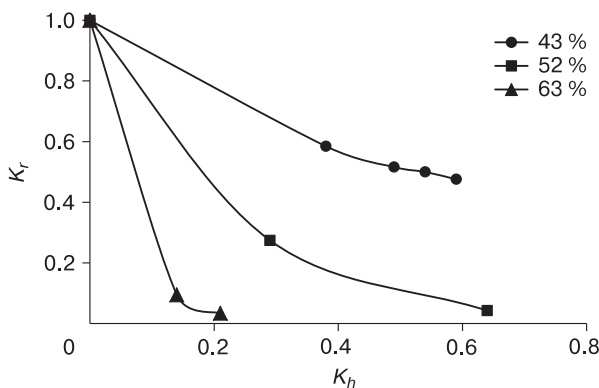


Рис. 4. Влияние степени перехода порового льда в гидрат метана (K_h) на снижение относительной газопроницаемости (K_r) мерзлых песчаных образцов при $T = -5^\circ\text{C}$ с различной начальной льдонасыщенностью.

первые часы после гидратообразования, однако и далее проницаемость значительно снижалась.

Таким образом, процесс образования гидрата CO_2 из льда имеет большую интенсивность в начале гидратообразования и достаточно сильно замедляется после перехода 50 % льда в гидрат. В то же время переход льда в гидрат метана происходит с меньшим снижением скорости гидратообразования во времени.

В ходе исследования был проведен анализ влияния коэффициента гидратности (K_h) для всех экспериментальных образцов на снижение газопроницаемости при отрицательной температуре -5°C (рис. 4).

Результаты показывают, что чем выше начальная льдонасыщенность образцов, тем большее влияние коэффициент гидратности оказывает на

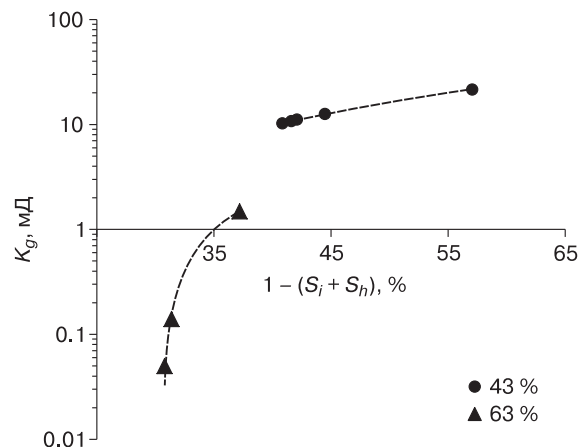


Рис. 5. Зависимость газопроницаемости (K_g) мерзлых образцов песка с различной начальной степенью заполнения пор льдом (43 и 63 %) от изменения пустотности ($1 - (S_i + S_h)$) в процессе гидратообразования.

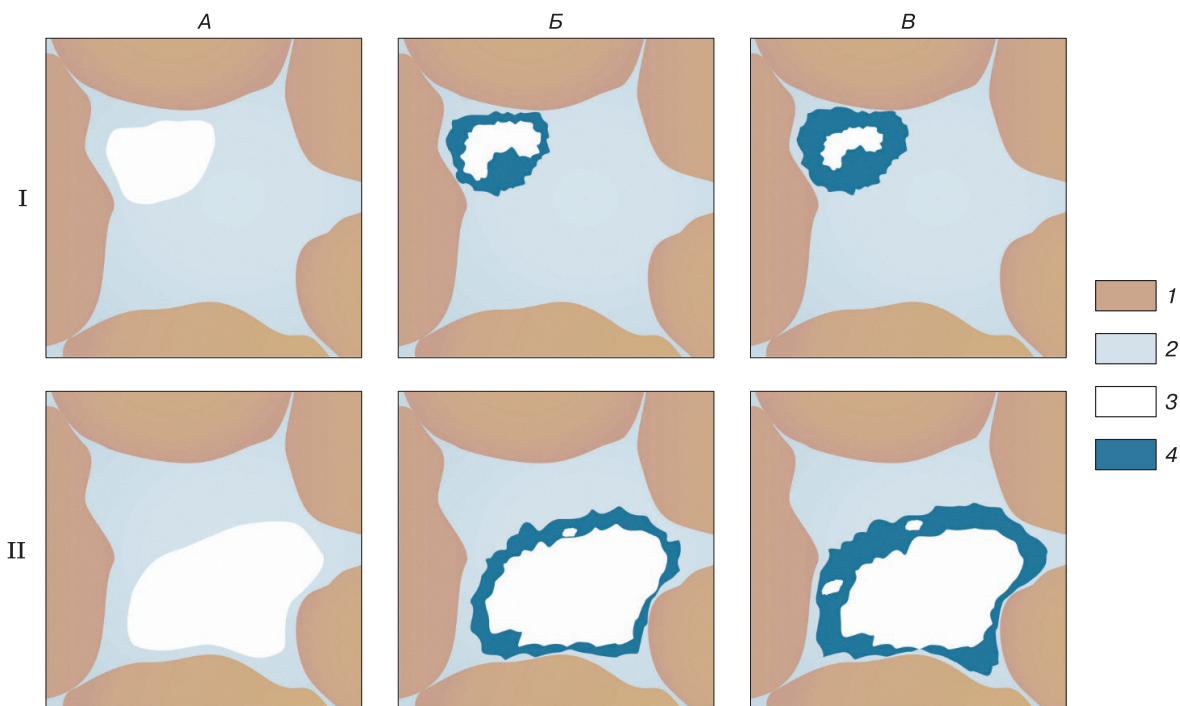


Рис. 6. Схема изменения пустотности порового пространства газонасыщенного мерзлого песка при высокой (I) и низкой (II) степени заполнения пор льдом в процессе гидратообразования.

A, Б, В – до, в начале и после гидратообразования; 1 – песчаные частицы; 2 – лед; 3 – газ; 4 – газовый гидрат.

газопроницаемость, при этом максимальное снижение проницаемости фиксируется в начале процесса гидратообразования. При уменьшении степени заполнения пор льдом изменение проницаемости при переходе порового льда в гидрат носит более плавный характер.

Влияние процесса гидратообразования на изменение пустотности порового пространства песчаных образцов при их различной начальной степени заполнения пор льдом (43 и 63 %) представлено на рис. 5.

Как показывают расчеты, в процессе перехода порового льда в гидрат суммарная степень заполнения пор льдом и гидратом повышается за счет разницы в их удельном объеме (около 15 %). В результате пустотность порового пространства уменьшается. При высокой степени заполнения пор льдом (63 %) небольшие изменения пустотности вызывают более резкое снижение проницаемости, чем при низкой исходной льдонасыщенности (43 %) (см. рис. 5). Схематично изменение пустотности порового пространства газонасыщенного мерзлого песка при различной степени заполнения пор льдом представлено на рис. 6.

Таким образом, одним из главных факторов, влияющих на изменение газопроницаемости мерзлых песчаных образцов в процессе гидратообразования, является изменение пустотности поро-

вого пространства при переходе порового льда в гидрат.

ВЫВОДЫ

Проведена экспериментальная оценка влияния процесса гидратообразования на эффективную газопроницаемость мерзлых песчаных образцов. Установлено, что в результате гидратообразования при отрицательных температурах газопроницаемость льдосодержащих образцов песка снижается. Причем величина снижения газопроницаемости зависит от начального льдосодержания. Так, для образца с высокой суммарной степенью заполнения пор льдом (около 63 %) газопроницаемость уменьшилась в 30 раз, а в образце с меньшей исходной льдонасыщенностью (42 %) она снизилась менее чем в 2 раза. В ходе экспериментальных исследований показано влияние типа гидратообразующего газа (CH_4 , CO_2), которое проявляется прежде всего через кинетику гидратообразования и интенсивность снижения газопроницаемости во времени. Газопроницаемость мерзлых песчаных образцов изменялась обратно пропорционально коэффициенту гидратности.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-05-00995), РНФ (грант 18-77-10063).

Литература

Ананян А.А., Арутюнян Н.А., Мазуров В.А., Сильвестров Л.К. О проницаемости мерзлых пород // Мерзлотные исслед., 1972, № 12, с. 205–209.

Арэ Ф.Э. Проблема эмиссии глубинных газов в атмосферу // Криосфера Земли, 1998, т. II, № 4, с. 42–50.

Гинсбург Г.Д., Соловьев В.А. Геологические модели газогидратообразования // Литология и полез. ископаемые, 1990, № 2, с. 76–87.

ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. М., Изд-во стандартов, 2014, 24 с.

ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. М., Стандартинформ, 2015, 23 с.

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

Романовский Н.Н. Основы криогенеза литосферы. М., Изд-во Моск. ун-та, 1993, 336 с.

СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. М., АПП ЦИТП, 1990, 52 с.

Старобинец И.С., Мурогова Р.Н. Экранирующая и проводящая роль пород криолитозоны по отношению к миграционным углеводородам // Геология нефти и газа, 1985, № 1, с. 24–27.

Трофимук А.А., Макогон Ю.Ф., Якушев В.С. Влияние динамики зон гидратообразования на температурный режим горных пород в области распространения криолитозоны // Геология и геофизика, 1986, № 11, с. 3–10.

Черский Н.В. Исследование и прогнозирование условий накопления ресурсов газа в газогидратных залежах / Н.В. Черский, В.П. Царев, С.П. Никитин. Якутск, Изд-во ЯФ СО АН СССР, 1983, 156 с.

Чувиллин Е.М., Гребенкин С.И. Экспериментальная оценка газопроницаемости газонасыщенных пород при гидратообразовании и замораживании // Криосфера Земли, 2015, т. XIX, № 2, с. 67–74.

Чувиллин Е.М., Давлетшина Д.А., Лупачик М.В. Гидратообразование в мерзлых и оттаивающих метанонасыщенных породах // Криосфера Земли, 2019, т. XXIII, № 2, с. 50–61.

Якушев В.С. Одна из возможных причин газовых выбросов в толщах ММП // Геология нефти и газа, 1989, № 14, с. 45–46.

Якушев В.С. Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. М., ВНИИГАЗ, 2009, 192 с.

Chuvilin E.M., Bukhanov V.A. Effect of hydrate formation conditions on thermal conductivity of gas-saturated sediments // Energy and Fuels, 2017, No. 31, p. 5246–5254.

Chuvilin E.M., Bukhanov V.A., Grebenkin S.I. et al. Shear strength of frozen sand with dissociating pore methane hydrate: An experimental study // Cold Regions Sci. and Technol., 2018, vol. 153, p. 101–105.

Chuvilin E.M., Yakushev V.S., Perlova E.V. Gas and gas hydrates in the permafrost of Bovanenkovo gas field, Yamal Peninsula, West Siberia // Polarforschung, 1998 (erschienen 2000), vol. 68, p. 215–219.

Ershov E.D., Yakushev V.S., Chuvilin E.M. Laboratory studies of frozen natural and artificial hydrate-containing rock samples // Proc. 2nd Intern. Conf. on Natural Gas Hydrates (Toulouse, France, June 2–6, 1996), Toulouse, 1996, p. 609–615.

Istomin V.A., Chuvilin E.M., Sergeeva D.V. et al. Thermodynamic calculation of freezing temperature of gas-saturated pore water in talik zones // 5th European Conf. on Permafrost

(Chamonix, France, June 23–July 1, 2018), Chamonix, 2018, p. 480–481.

Jaiswal N.J., Westervelt J.V., Patil S.L. et al. Phase behavior and relative permeability of gas-water-hydrate system // Aapg. Hedberg. Conf. “Gas Hydrates: Energy Resource Potential and Associated Geologic Hazards” (Vancouver, BC, Canada, Sept. 12–16, 2004), Vancouver, 2004, p. 26–35.

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 // Marine and Petroleum Geol., 2011, No. 23, p. 419–426.

Kneafsey T.J., Gupta A., Seol Y., Tomutsa L. Permeability of laboratory-formed methane hydrate-bearing sand, OTC19536-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. Petroleum Sci. and Eng., 2010, No. 70, p. 114–122.

Li Y., Liu W., Zhu Y. et al. Mechanical behaviors of permafrost-associated methane hydrate-bearing sediments under different mining methods // Appl. Energy, 2016, vol. 162, p. 1627–1632.

Minagawa H., Ohmura R., Takahashi T. et al. Water permeability measurements of natural gas hydrate-bearing sediments obtained from Mallik 5L-38 // Abstr. of Mallik Intern. Symposium – from Mallik to the Future. Technol. Res. Center Jap. National Oil Corporation, 2005, p. 398–401.

Murray D., Fukuhara M., Khong C.K. et al. Permeability estimates in gas hydrate reservoirs of the Nankai trough // SPWLA 47th Ann. Logging Symposium (Veracruz, June 4–7, 2006), Veracruz, Mexico, 2006, p. 1–6.

Seyfried M.S., Murdock M.D. Use of air permeability to estimate infiltrability of frozen soil // J. Hydrology, 1997, vol. 202, p. 95–107.

References

Ananyan A.A., Arutyunyan N.A., Mazurov V.A., Silvestrov L.K. On permeability of permafrost. Merzlotnue Issledovaniya [Permafrost Studies], 1972, No. 12, p. 205–209 (in Russian).

Are F.E. Problem of deep gas emission into the atmosphere. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 1998, vol. II, No. 4, p. 42–50 (in Russian).

Ginsburg G.D., Soloviev V.A. Geological models of gas hydrate formation. Litologiya i Poleznye Iskopaemye [Lithology and Mineral Resources], 1990, No. 2, p. 76–87 (in Russian).

State Standard GOST 12536-2014. Soils. Methods of Laboratory Analysis of Granulometric (grain-size) and Microaggregate Distribution. Moscow, Standards Publishing, 2014, 24 p. (in Russian).

State Standard GOST 5180-2015. Soils. Laboratory Methods for Determination of Physical Characteristics. Moscow, Standardinform, 2015, 23 p. (in Russian).

Istomin V.A., Yakushev V.S. Gazovye gidraty v prirodnykh usloviyakh [Naturally Occurring Gas Hydrates]. Moscow, Nedra, 1992, 235 p. (in Russian).

Romanovskiy N.N. Osnovy kriogeneza litosfery [Fundamentals of Cryogenesis in the Lithosphere]. Moscow, Moscow University Press, 1993, 336 p. (in Russian).

Building Codes and Regulations SNiP 2.02.04-88. Foundation Beds and Foundations in Permafrost Soils. Moscow, Gosstroy (USSR), 1990, 52 p. (in Russian).

- Starobinets I.S., Murogova R.N. Screen and conductive role of permafrost in respect to migrating hydrocarbons. *Geologiya Nefti i Gaza* [Oil and Gas Geology], 1985, No. 1, p. 24–27 (in Russian).
- Trofimuk A.A., Makogon Yu.F., Yakushev V.S. Influence of hydrate formation zones on the temperature regime of rocks in permafrost. *Geologiya i Geofizika* [Soviet Geology and Geophysics], 1986, No. 11, p. 3–10 (in Russian).
- Cherskiy N.V., Tsarev V.P., Nikitin S.P. Issledovanie i prognozirovanie uslovii nakopleniya resursov gaza v gazogidratnykh zalezakh [Conditions for Gas Accumulation in Gas Hydrate Deposits: Investigation and Prediction], Yakutsk, Izd. Yakut. fil. SO AN SSSR, 1983, 156 p. (in Russian).
- Chuvilin E.M., Grebenkin S.I. Gas permeability variations in gas-filled soils upon hydrate formation and freezing: an experimental study. *Earth's Cryosphere*, 2015, vol. XIX, No. 2, p. 59–64 (in Russian).
- Chuvilin E.M., Davletshina D.A., Lupachik M.V. Hydrate formation in frozen and thawing methane-saturated sediments. *Earth's Cryosphere*, 2019, vol. XXIII, No. 2, p. 42–52.
- Yakushev V.S. One possible cause of gas bursts in permafrost. *Geologiya Nefti i Gaza* [Oil and Gas Geology], 1989, No. 14, p. 45–46 (in Russian).
- Yakushev V.S. Prirodnyi gaz i gazovye gidraty v kriolitozone [Natural Gas and Gas Hydrates in Permafrost]. Moscow, VNIIGAZ, 2009, 192 p. (in Russian).
- Chuvilin E.M., Bukhanov B.A. Effect of hydrate formation conditions on thermal conductivity of gas-saturated sediments. *Energy and Fuels*, 2017, No. 31, p. 5246–5254.
- Chuvilin E.M., Bukhanov B.A., Grebenkin S.I. et al. Shear strength of frozen sand with dissociating pore methane hydrate: An experimental study. *Cold Regions Sci. and Technol.*, 2018, vol. 153, p. 101–105.
- Chuvilin E.M., Yakushev V.S., Perlova E.V. Gas and gas hydrates in the permafrost of Bovanenkov gas field, Yamal Peninsula, West Siberia. *Polarforschung*, 1998 (erschienen 2000), vol. 68, p. 215–219.
- Ershov E.D., Yakushev V.S., Chuvilin E.M. Laboratory studies of frozen natural and artificial hydrate-containing rock samples. In: Proc. 2nd Intern. Conf. on Natural Gas Hydrates (Toulouse, France, June 2–6, 1996), Toulouse, 1996, p. 609–615.
- Istomin V.A., Chuvilin E.M., Sergeeva D.V. et al. Thermodynamic calculation of freezing temperature of gas-saturated pore water in talik zones. In: 5th European Conf. on Permafrost (Chamonix, France, June 23–July 1, 2018), Chamonix, 2018, p. 480–481.
- Jaiswal N.J., Westervelt J.V., Patil S.L. 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” (Vancouver, BC, Canada, Sept. 12–16, 2004), Vancouver, 2004, p. 26–35.
- 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. In: *Marine and Petroleum Geol.*, 2011, No. 23, p. 419–426.
- Kneafsey T.J., Gupta A., Seol Y., Tomutsa L. Permeability of laboratory-formed methane hydrate-bearing sand, OTC19536-PP, SPE. In: 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. Petroleum Sci. and Eng.*, 2010, No. 70, p. 114–122.
- Li Y., Liu W., Zhu Y. et al. Mechanical behaviors of permafrost-associated methane hydrate-bearing sediments under different mining methods. *Appl. Energy*, 2016, vol. 162, p. 1627–1632.
- Minagawa H., Ohmura R., Takahashi T. et al. Water permeability measurements of natural gas hydrate-bearing sediments obtained from Mallik 5L-38. In: Abstr. of Mallik Intern. Symposium – from Mallik to the Future. Technol. Res. Center Jap. National Oil Corporation, 2005, p. 398–401.
- Murray D., Fukuhara M., Khong C.K. et al. Permeability estimates in gas hydrate reservoirs of the Nankai trough. In: SPWLA 47th Ann. Logging Symposium (Veracruz, June 4–7, 2006), Veracruz, Mexico, 2006, p. 1–6.
- Seyfried M.S., Murdock M.D. Use of air permeability to estimate infiltrability of frozen soil. *J. Hydrology*, 1997, vol. 202, p. 95–107.

*Поступила в редакцию 4 июля 2019 г.,
после доработки – 21 сентября 2019 г.,
принята к публикации 1 октября 2019 г.*