

## ВЛИЯНИЕ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ НА ГАЗОПРОНИЦАЕМОСТЬ ПЕСЧАНЫХ ПОРОД В МЕРЗЛОМ И ТАЛОМ СОСТОЯНИЯХ

Е.М. Чувиллин, С.И. Гребенкин, М. Сакле\*

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

*\*Total EP, пл. Жана Милье, 2, Курбевау, Ла Дефанс, 92400, Франция*

Представлены результаты экспериментальных исследований по оценке газопроницаемости песчаных пород с различным влагосодержанием в мерзлом состоянии и после оттаивания. Эксперименты были выполнены на специальной установке, позволяющей исследовать образцы диаметром 3 см и длиной 3–5 см при различных термобарических условиях. В ходе экспериментов получены зависимости газопроницаемости песчаных образцов в мерзлом и талом состояниях от степени заполнения пор льдом или водой. Выявлено критическое значение степени заполнения пор – 40–50 и 50–55 % для мерзлых и талых образцов соответственно, выше которого газопроницаемость снижается на несколько порядков. Характер зависимости газопроницаемости мерзлых песчаных пород от степени заполнения пор определяется их структурными особенностями и, прежде всего, зависимостью типа льда-цемента от влагосодержания. Показано, что при оттаивании происходит увеличение газопроницаемости песчаных образцов. С повышением степени заполнения пор это различие газопроницаемости мерзлых и талых образцов увеличивается.

*Газопроницаемость, песчаные породы, мерзлые грунты, талые грунты, влагосодержание, льдонасыщенность, степень заполнения пор*

## INFLUENCE OF MOISTURE CONTENT ON PERMEABILITY OF SANDY SOILS IN FROZEN AND UNFROZEN STATES

E.M. Chuvilin, S.I. Grebenkin, M. Sacleux\*

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

*\*Total EP exploration, Place Jean Millier, 2, Courbevoie, La Défense, 92400, France*

Results of experimental studies on the estimation of the permeability of sandy soils with different moisture content in frozen state and after thawing have been presented. The experiments have been performed in a specially designed device allowing the evaluation of gas permeability of samples (3 cm diameter and 3–5 cm length) at various temperature and pressure conditions. During the experiments, the dependencies of the permeability of the sand samples in frozen and thawed states from the degree of saturation by ice or porous water have been obtained. It has been revealed, that the gas permeability is reduced by several orders of magnitude above the critical degree of saturations (40–50 % and 50–55 % for frozen and thawed samples, respectively). The character of dependence of the gas permeability of sandy frozen soils on the degree of saturation is largely determined by their structural features, and first of all by the dependence of ice-cement type on the moisture content. It has been demonstrated that the gas permeability of the sandy samples goes up during thawing. The difference in permeability between the frozen and thawed samples increases proportionally to saturation.

*Gas permeability, sandy soil, frozen soil, unfrozen soil, thawing, moisture content, ice saturation, degree of saturation*

### ВВЕДЕНИЕ

Изучение газопроницаемости мерзлых и оттаивающих пород представляет огромный интерес при рассмотрении эмиссии природных газов в Арктических районах. Оно также важно при анализе результатов газогеохимической съемки в областях распространения многолетнемерзлых пород (ММП) при поиске и разведке месторождений углеводородов. Существовало мнение, что многолетнемерзлые породы, как правило, являются естественными флюидоупорами, где накопление газа маловероятно [Якушев, 2009]. Однако исследования показали, что промерзание не приводит к полному прекращению миграции и аккумуляции

углеводородных газов в толщах пород, а факт существования проницаемых зон в ММП неоднократно отмечался исследователями [Оловин, 1993]. При этом решающую роль в формировании коллекторских свойств породы играет льдистость или степень заполнения пор льдом. Этот же фактор (как главный) отмечает и В.И. Вожов, рассматривая экранирующую роль ММП по отношению к углеводородам в недрах Земли [Якушев, 2009].

Однако существуют данные геохимических исследований приповерхностных горизонтов пород криолитозоны, которые указывают на заметную миграцию углеводородов через ММП [Готов

и др., 1985; Арэ, 1998; Глотов, 2005]. Кроме того, появившиеся в последние годы данные об эмиссии метана в областях распространения мерзлоты на суше и арктическом шельфе свидетельствуют о необходимости проведения специальных экспериментальных работ по определению газопроницаемости мерзлых и оттаивающих пород [Арэ, 1998; Shakhova et al., 2010].

В литературе встречаются 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. Одними из первых исследователей, которые экспериментально оценили газопроницаемость мерзлых пород, были А.А. Ананян с соавторами [1972]. В ходе экспериментов они зафиксировали газопроницаемость мерзлых песчаных образцов при достаточно высокой степени заполнения пор льдом (65–75 %). Так, для образца мерзлого песка (фракция 0.1–0.25 мм) при степени заполнения пор 75 % была отмечена газопроницаемость около 0.36 мД.

И.С. Старобинец и Р.Н. Мурогова [1985] при исследовании экранирующей и проводящей роли пород криолитозоны по отношению к миграционным углеводородам установили, что проницаемость мерзлых доломитов с влагонасыщенностью 67 % при температуре –5...–7 °С на два порядка ниже, чем воздушно-сухих, и на порядок ниже немерзлых.

Зависимости проницаемости по воздуху от заполнения пор льдом и водой для песчаных образцов были получены М. Зифридом и М. Мёрдоком [Seufried, Murdock, 1997]. Они показали, что при равных степенях заполнения пор проницаемость мерзлых образцов оказывается ниже, чем талых.

Эксперименты по изучению газопроницаемости песков при промерзании проводили Т. Нифсей с соавторами [Kneafsey et al., 2008]. В результате было выявлено, что для образцов с начальным насыщением влагой 42 % и относительной проницаемостью 0.5–0.6 д.е. после заморозки газопроницаемость снизилась более чем в 2 раза (до 0.2). При меньшей влагонасыщенности относительная проницаемость образца при промерзании снижалась незначительно – менее 10 % (от 0.68 до 0.62).

Снижение газопроницаемости в несколько раз (до одного порядка) было зафиксировано при промерзании искусственно гидратонасыщенных песчаных и супесчаных образцов, что обусловлено фазовыми переходами остаточной поровой влаги в лед, а также дополнительным гидратообразованием при промерзании [Chuvilin et al., 2014].

Китайскими исследователями [Wang et al., 2014] были проведены эксперименты по изучению

проницаемости по метану мерзлых песчаных пород с различной льдонасыщенностью, в результате которых получена зависимость проницаемости по метану от льдонасыщенности.

Изменение проницаемости пород происходит не только после перехода поровой влаги в лед, но и после циклического промерзания–оттаивания. Е. Чемберлен и А. Гоу, исследуя изменение гидравлической проницаемости глинистых пород при циклическом промерзании–оттаивании установили ее повышение после одного цикла [Chamberlain, Gow, 1979]. Увеличение проницаемости они связывали с образованием микротрещин в результате оттаивания микрошлиров льда, сформировавшихся при промерзании. Следует ожидать, что проницаемость циклически промерзающих пород по газу также будет меняться.

В целом, несмотря на имеющиеся экспериментальные данные, влияние на проницаемость пород фазовых переходов поровой влаги, а также процессы, которые при этом происходят, остаются недостаточно изученными.

#### МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГАЗОПРЕНИЦАЕМОСТИ

Для исследования газопроницаемости мерзлых и талых пород была использована методика, разработанная авторами совместно с сотрудниками компании Шлюмберже, для гидратосодержащих пород [Чувиллин и др., 2013]. Эта методика основана на изучении фильтрации газа через образец грунта на специальной экспериментальной установке, позволяющей создать и поддерживать необходимые термобарические условия для искусственного замораживания и гидратонасыщения грунта [Чувиллин, Гребенкин, 2015]. Данная методика включала подготовку образца грунта заданной влажности, насыщение его газом в специальном кернодержателе, замораживание–оттаивание, проведение испытаний на газопроницаемость при различных давлениях газа и температурах и обработку экспериментальных данных.

Для изучения газопроницаемости мерзлых и оттаявших пород использовалась экспериментальная установка, разработанная в ООО “Эко-ГеосПром” (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).

Измерение газопроницаемости исследуемых образцов песчаных пород в установке проводили на каждом этапе охлаждения и нагревания, а регистрацию и запись температуры и давления осуществляли в течение всего эксперимента. Обжимное давление в установке задавали около 60 бар. Вначале измерение газопроницаемости грунтового образца проводили в мерзлом состоянии после его насыщения азотом при температуре –5 °С. Для

этого образец в экспериментальной установке первоначально замораживали при температуре  $-5^{\circ}\text{C}$ . После определения газопроницаемости песчаного образца в мерзлом состоянии кернодержатель с газонасыщенным образцом нагревали до комнатной температуры ( $20^{\circ}\text{C}$ ). При этом фиксировалось некоторое повышение обжимного давления в кернодержателе в результате термического расширения масла. После стабилизации давления и температуры проводили фильтрационные испытания образца в талом состоянии.

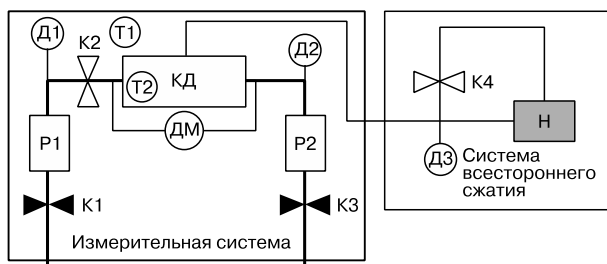
Расчет эффективной проницаемости образца ( $K$ ) в кернодержателе описываемой установки был основан на анализе падения давления в ресиверах с известными объемами газа. В ходе решения дифференциального уравнения массопереноса через образец под действием градиента давлений была получена следующая формула для расчета эффективной проницаемости [Чувилин и др., 2013]:

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

где  $\eta$  – динамическая вязкость газа, Па·с;  $L$  – длина образца, см;  $S_p$  – площадь поперечного сечения образца,  $\text{см}^2$ ;  $V_1$  – объем ресивера,  $\text{см}^3$ ;  $p_1$  – давление перед образцом в момент времени  $t_1$ , МПа;  $p_2$  – давление после образца в момент времени  $t_1$ , МПа;  $p_{10}$  – давление перед образцом в начальный момент, МПа;  $p_{1k}$  – давление перед образцом в конечный момент, МПа;  $t_1$  – время, с.

Для оценки точности определения газопроницаемости образцов ( $K$ ) по описанной выше методике была проведена тарировка установки на четырех эталонных керамических образцах, для которых известны значения коэффициентов абсолютной проницаемости [Чувилин и др., 2013].

В тарировочных экспериментах определялась эффективная газопроницаемость (по метану)  $K$ .



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

$K1-K3$  – мембранные клапаны системы подачи газа;  $K4$  – шаровой клапан гидравлической системы;  $P1, P2$  – ресиверы системы подачи газа;  $D1-D3$  – датчики давления;  $DM$  – датчик дифференциального давления;  $H$  – гидравлический насос с масляным резервуаром;  $KД$  – кернодержатель;  $T1, T2$  – датчики температуры.

Для сравнения наших данных с результатами, полученными для эталонных образцов в других лабораториях, была рассчитана проницаемость по Клинкенбергу ( $K_k$ ). Расхождение экспериментальных и эталонных данных не превышало 15 %.

### ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследований были песчаные грунты, отобранные в толще мерзлых пород морского генезиса ( $mQ_3$ ) в пределах Южно-Тамбейского газоконденсатного месторождения на Ямале. В экспериментах использовались как образцы естественного сложения (образцы fs-1 и ss-1), полученные выпиливанием из мерзлых кернов, так и нарушенного сложения, приготовленные из высушенного керна. Большинство экспериментов было проведено на образцах нарушенного сложения. Для их приготовления использовались те же керны ММП, для которых исследовалась газопроницаемость при естественном сложении. По дисперсности песчаные образцы (естественного и нарушенного сложения) были представлены двумя типами.

Первый тип песчаных образцов (fs) был представлен мелкозернистым песком (глубина отбора 36.5–46.0 м), второй тип (ss) – пылеватым песком (глубина отбора 27–48 м).

Минеральный состав определялся методом рентгеновской дифрактометрии (XRD), гранулометрический – ситовым методом. Физические характеристики образцов задавались согласно ГОСТ 5180-84 [2005] и СНиП 2.02.04-88 [1990] (табл. 1).

Песок мелкозернистый характеризовался преобладанием фракции с размером частиц 0.25–0.1 мм (62.3 %). Он состоял преимущественно из кварца (93.7 %). Среди других минералов в песке содержались альбит (5.1 %) и ортоклаз (1.2 %). Плотность твердой компоненты мелкозернистого песка составляла 2.69 г/см<sup>3</sup>, а засоленность – 0.06 %.

Для пылеватого песка также характерно преобладание фракции с размером частиц 0.25–0.1 мм (57.8 %), однако он отличался значительным содержанием частиц 0.1–0.05 мм (27.7 %) (см. табл. 1). Содержание кварца в пылеватом песке было заметно меньше, чем в песке мелкозернистом, и составляло 74.1 %, количество альбита и

**Таблица 1. Состав исследуемых песчаных пород**

Тип пород	Распределение фракций, %			
	1–0.5 мм	0.5–0.25 мм	0.25–0.1 мм	0.1–0.05 мм
Мелкозернистый песок	0.2	29.1	62.3	8.4
Пылеватый песок	0.1	14.4	57.8	27.7

Таблица 2. Характеристики образцов песчаных пород

Номер	Длина, мм	Диаметр, мм	Влажность, %	Пористость, д.е.
<i>Мелкозернистый песок</i>				
fs-1	30	30	18	0.43
fs-6	29	30	14	0.41
fs-2	30	30	13	0.41
fs-8	29	30	12	0.41
fs-7	30	30	10	0.40
fs-3	24	30	10	0.40
fs-4	34	30	6	0.39
fs-5	29	30	0	0.37
<i>Пылеватый песок</i>				
ss-1	30	30	16	0.38
ss-6	29	30	13	0.38
ss-2	30	30	12	0.38
ss-8	30	30	11	0.37
ss-7	28	30	10	0.37
ss-3	28	30	9	0.37
ss-4	29	30	5	0.36
ss-5	28	30	0	0.35

ортоклаза – 12.8 и 10.0 % соответственно. Плотность твердой компоненты пылеватого песка равнялась 2.68 г/см<sup>3</sup>, а засоленность – 0.13 %. Удельная поверхность пылеватого песка (1.37 м<sup>2</sup>/г) значительно выше, чем песка мелкозернистого (0.24 м<sup>2</sup>/г).

Образцы песчаных пород, приготовленные к экспериментальным исследованиям, имели диаметр 30 мм и длину 25–35 мм (табл. 2).

Весовая влажность мерзлых образцов природного сложения составляла 18 % для образца мелкозернистого (образец fs-1) и 16 % для образца пылеватого песка (образец ss-1).

Исходная весовая влажность песчаных образцов нарушенного сложения задавалась в пределах от 0 до 14 %, при этом пористость образцов составляла 0.37–0.43 для мелкозернистого песка и 0.36–0.38 для пылеватого.

### ИЗМЕНЕНИЕ ГАЗОПРОНИЦАЕМОСТИ ПЕСЧАНЫХ ПОРОД ПРИ ОТТАИВАНИИ

Во всех экспериментах начальное измерение газопроницаемости образцов проводилось в мерзлом состоянии при температуре около –5 °С. Эти исходные значения газопроницаемости мерзлых образцов представлены в табл. 3, из которой видно, что газопроницаемость мерзлых образцов в зависимости от степени заполнения пор льдом изменяется в широком диапазоне. При льдонасыщенности 23–24 % газопроницаемость песчаных образцов составляла десятки миллиардов. При льдонасыщенности образцов около 50 % газопроницаемость не превышала нескольких миллиардов

си, а при степени заполнения пор более 50 % становилась ниже предела измерений фильтративной установки (0.01 мД) (см. табл. 3).

После оценки газопроницаемости песчаных образцов в мерзлом состоянии проводилось ее определение в талом состоянии при комнатной температуре. Значения газопроницаемости образцов в талом состоянии представлены в табл. 4.

После оттаивания проницаемость образцов мелкозернистого песка в зависимости от влагосодержания фиксировалась в диапазоне 0.3–291.6 мД. По сравнению с проницаемостью в мерзлом состоянии после оттаивания она существенно возросла. Так, проницаемость образца мерзлого мелкозернистого песка естественного сложения fs-1 с начальной степенью заполнения пор льдом 74 % после оттаивания составила 0.27 мД (см. табл. 4, рис. 2, а). При этом его проницаемость в мерзлом состоянии была ниже предела точности (0.01 мД). Газопроницаемость образцов со степенью заполнения пор 51–55 % (для которых в мерзлом состоянии  $K < 0.01$  мД) после оттаивания достигла 50–60 мД. Проницаемость образцов fs-3 и fs-7 с начальной степенью заполнения пор 39 % увеличилась в 3.4 раза – с 25.17 до 84.80 мД. Увеличение проницаемости образца fs-4 с начальной степенью заполнения пор 23 % было ниже – в 2 раза (с 94.47 до 184.10 мД) (см. рис. 2, а). Таким образом с уменьшением степени заполнения пор льдом скорость роста проницаемости при оттаивании снижается. Проницаемость сухого образца fs-5 при положительных и отрицательных температурах принимала близкие значения – 288.5 и 291.6 мД соответственно (см. табл. 4).

Изменения газопроницаемости образцов пылеватого песка в зависимости от начальной степени заполнения пор имели сходный характер (см. табл. 4). Так, газопроницаемость образца ss-1 естественного сложения с начальной степенью заполнения пор 80 % после оттаивания составила 0.60 мД при исходной проницаемости в мерзлом состоянии менее 0.01 мД. Газопроницаемость практически непроницаемого образца ( $K < 0.01$  мД) нарушенного сложения ss-2 с начальной степенью заполнения пор 57 % увеличилась при оттаивании до 45.0 мД (см. рис. 2, б). Значение газопроницаемости образца ss-3 с начальной степенью заполнения пор 40 % возросло после оттаивания в 6.7 раза (с 10.36 до 69.90 мД). Проницаемость образца ss-4 с начальной степенью заполнения пор 24 % при переходе в талое состояние увеличилась лишь в 2 раза (с 74.3 до 151.3 мД). Проницаемость сухого образца ss-5 при положительных и отрицательных температурах практически не изменилась (см. рис. 2, б).

Исследование зависимости газопроницаемости от степени заполнения пор мелкозернистого песка показало, что при степени заполнения пор

Таблица 3. Газопроницаемость песчаных образцов в мерзлом состоянии

Номер	W, %	S <sub>г</sub> , %	K, мД
<i>Мелкозернистый песок</i>			
fs-1	18	74	<0.01
fs-6	14	55	<0.01
fs-2	13	51	<0.01
fs-8	12	51	0.53
fs-3	10	39	25.17
fs-7	10	39	5.13
fs-4	6	23	94.47
fs-5	0	0	288.50
<i>Пылеватый песок</i>			
ss-1	16	80	<0.01
ss-6	13	62	<0.01
ss-2	12	57	<0.01
ss-8	11	52	0.03
ss-7	10	48	2.40
ss-3	9	40	10.36
ss-4	5	24	74.30
ss-5	0	0	177.70

Примечание. W – влажность; S<sub>г</sub> – степень заполнения пор льдом; K – коэффициент эффективной газопроницаемости.

Таблица 4. Газопроницаемость песчаных образцов в талом состоянии

Номер	W, %	S, %	K, мД
<i>Мелкозернистый песок</i>			
fs-1	18	68	0.27
fs-6	14	50	50.52
fs-2	13	46	59.97
fs-8	12	43	68.64
fs-7	10	36	78.38
fs-3	10	36	84.80
fs-4	6	21	184.10
fs-5	0	0	291.60
<i>Пылеватый песок</i>			
ss-1	16	69	0.60
ss-6	13	57	3.87
ss-2	12	52	45.00
ss-8	11	48	38.46
ss-7	10	44	59.38
ss-3	9	37	69.90
ss-4	5	22	151.30
ss-5	0	0	181.40

Примечание. W – влажность; S – степень заполнения пор водой; K – коэффициент эффективной газопроницаемости.

от 0 до 40 % в мерзлом и от 0 до 50 % в талом состоянии снижение газопроницаемости имеет ярко выраженный характер. При увеличении степени заполнения пор выше 40 % в мерзлом и выше 50 % в талом состоянии происходит более резкое снижение проницаемости образцов, вплоть до значений ниже предела измерения экспериментальной установки (0.01 мД) (см. рис. 2, а).

Сравнительный анализ газопроницаемости песчаных образцов (мелкозернистый песок и песок пылеватый) в мерзлом и талом состояниях

при близких значениях степени заполнения пор влагой показал, что различие в проницаемости увеличивается с повышением степени заполнения пор (S). Для исследованных песков при степени заполнения пор до 40 % разница величин газопроницаемости мерзлого и талого образцов менее одного порядка, при S = 40–80 % газопроницаемость мерзлых и талых образцов различается на несколько порядков (3–5), а при S > 80 % образцы в мерзлом и талом состояниях практически непроницаемы.

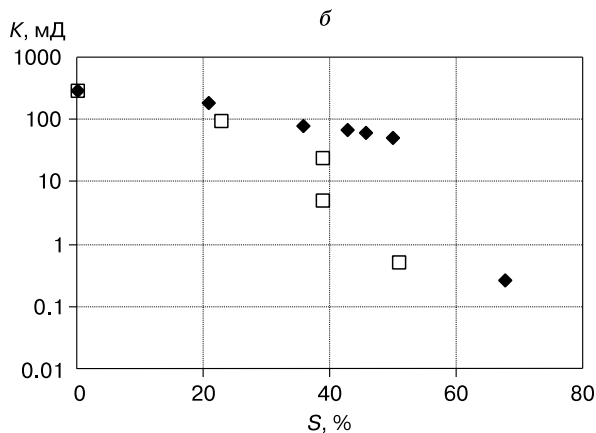
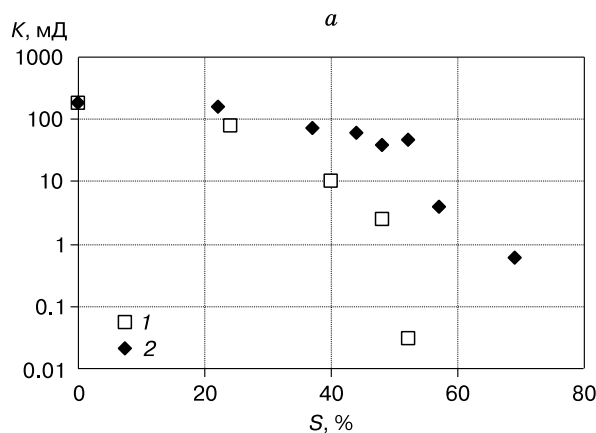


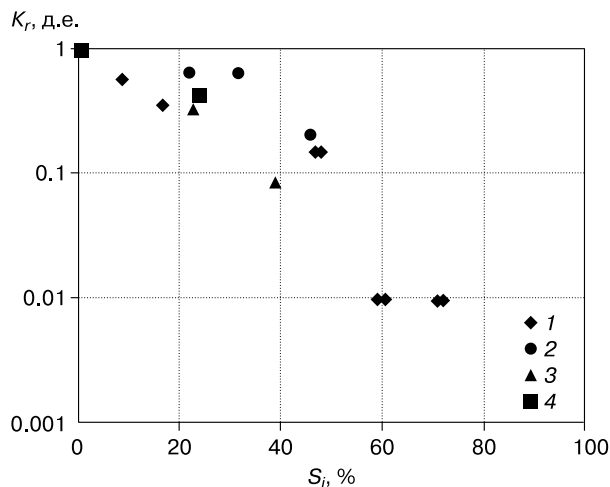
Рис. 2. Зависимость газопроницаемости (K) мерзлых (1) и талых (2) образцов мелкозернистого (а) и пылеватого (б) песка от степени заполнения пор (S).

Таким образом, в ходе исследования получено, что при одинаковых степенях заполнения пор газопроницаемость песчаных образцов в мерзлом состоянии ниже, чем в талом. С понижением степени заполнения пор разница величин газопроницаемости песчаных образцов в мерзлом и талом состояниях уменьшается.

### ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ЗАПОЛНЕНИЯ ПОР НА ГАЗОПРОНИЦАЕМОСТЬ ПЕСЧАНЫХ ПОРОД

Полученные в ходе экспериментальных работ данные по проницаемости были использованы для расчета относительной проницаемости исследуемых пород. Результаты по оценке относительной проницаемости песчаных льдосодержащих образцов в целом хорошо согласуются с данными других авторов. Некоторое отклонение, по-видимому, обусловлено различным составом и строением мерзлых песчаных образцов (рис. 3).

Сравнение представленных на рис. 3 экспериментальных данных позволяет проследить общую зависимость изменения относительной проницаемости для песчаных грунтов от льдонасыщения. Относительная проницаемость мерзлых песчаных пород при повышении льдонасыщенности ( $S_i$ ) от 0 до 40–50 % снижается на один порядок, при дальнейшем повышении  $S_i$  до 60–70 % эта величина снижается еще на один порядок. По данным китайских исследователей, при степени заполнения пор 60–70 % относительная проницаемость мерзлых песчаных образцов не превышала 0.01 [Wang et al., 2014]. При анализе экспериментальных данных, представленных на рис. 3, можно выделить



**Рис. 3. Результаты экспериментальной оценки относительной проницаемости ( $K_r$ ) песчаных пород в зависимости от льдонасыщенности ( $S_i$ ) по данным разных авторов:**

1 – П. Ванг [Wang et al., 2014]; 2 – Т. Нифсей [Kneafsey et al., 2008]; 3, 4 – данные настоящей работы (3 – мелкозернистый песок, 4 – пылеватый песок).

два участка. Первый участок (при  $S_i < 40–50$  %) характеризуется плавным понижением относительной проницаемости при увеличении льдонасыщенности. Второй участок (при  $S_i > 40–50$  %) отличается более резким снижением относительной проницаемости, ее спад превышает два порядка (см. рис. 3).

Характер общей зависимости газопроницаемости от льдонасыщения для песчаных пород обусловлен структурными особенностями мерзлых образцов, в первую очередь зависимостью типа льда-цемента от влагосодержания. В зависимости от начального влагосодержания в песчаных породах образуются контактный, пленочный, поровый и базальный типы льда-цемента [Микростроение..., 1988].

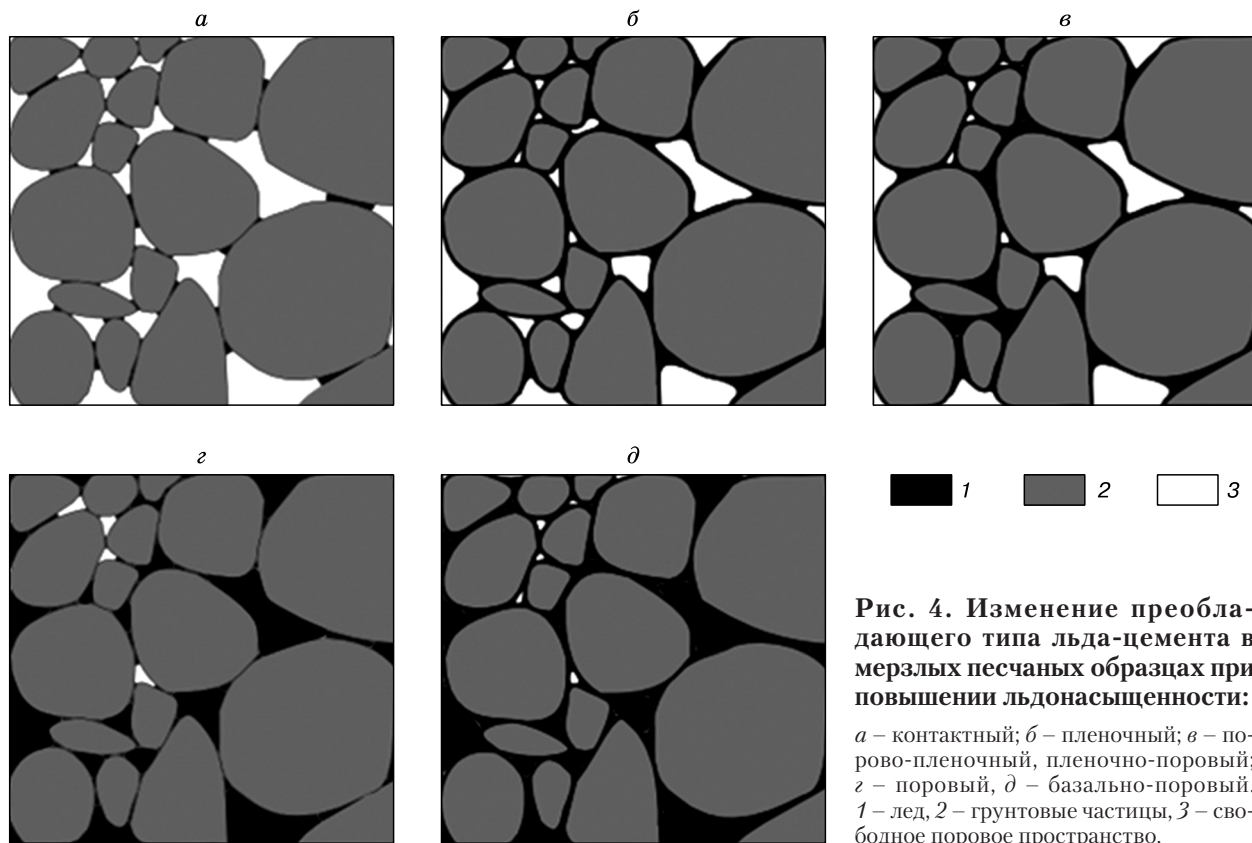
В сухом песчаном образце при отсутствии льда-цемента все поры и каналы открыты, проницаемость образца практически не меняется при повышении температуры от  $-5$  до  $20$  °С.

При малой льдонасыщенности образца (до 30 %) имеет место контактный лед-цемент, который, располагаясь в приконтактных областях частиц, блокирует лишь отдельные каналы, а поры в основном остаются открытыми (рис. 4).

При преобладании контактного типа льда-цемента в песчаном образце с увеличением льдонасыщенности происходит явное снижение газопроницаемости, но не более чем на порядок. При дальнейшем увеличении льдонасыщенности появляется пленочный лед-цемент, при этом в мелких порах может присутствовать уже и поровый лед-цемент. Резкий перегиб на кривой газопроницаемости происходит при льдонасыщенности более 45 %, когда начинает преобладать поровый лед-цемент, в том числе и в крупных порах. Доля пленочного льда-цемента резко снижается, в результате пленочный и поровый лед блокируют большинство каналов и существенно уменьшают объем открытых пор. При дальнейшем увеличении доли порового льда-цемента и при появлении базального льда-цемента газовый компонент в порах становится изолированным и не способным проводить газ. При анализе зависимости относительной газопроницаемости талых песчаных образцов от водонасыщенности выделяется два участка: плавное снижение проницаемости при степени заполнения пор до 50–55 %, при котором падение относительной проницаемости составляет менее одного порядка, и резкое снижение относительной проницаемости при водонасыщенности более 50–55 % (рис. 5).

Таким образом, для талых песчаных образцов можно также выделить критическую степень заполнения пор водой (50–55 %), при которой происходит резкое снижение проницаемости.

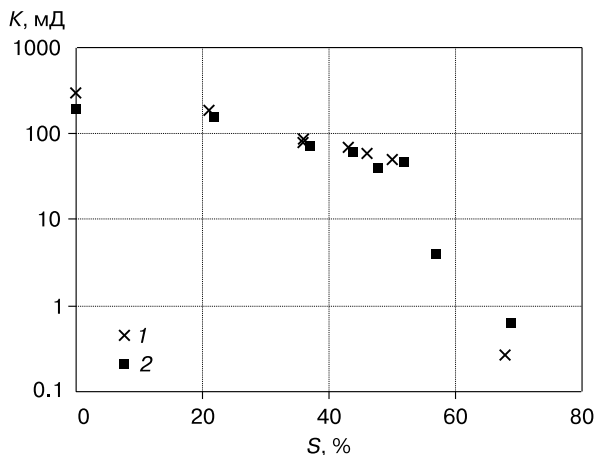
Некоторое различие в критическом значении водонасыщенности для мелкозернистого и пылеватого песков, по-видимому, связано со структу-



**Рис. 4.** Изменение преобладающего типа льда-цемента в мерзлых песчаных образцах при повышении льдонасыщенности:

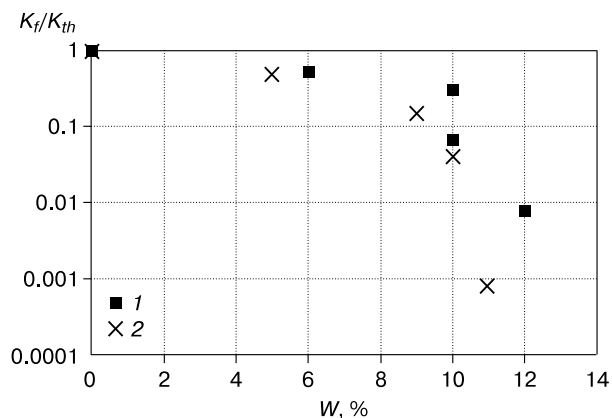
*a* – контактный; *б* – пленочный; *в* – порово-пленочный, пленочно-поровый; *г* – поровый, *д* – базально-поровый. 1 – лед, 2 – грунтовые частицы, 3 – свободное поровое пространство.

рой порового пространства, пористостью и размерами пор, что влияет на возможность перераспределения влаги в поровом пространстве образца при оттаивании и действии градиента давлений газа, проходящего через образец. Однако это требует специальных исследований, которые не проводились в рамках данной работы.



**Рис. 5.** Зависимость эффективной газопроницаемости ( $K$ ) от степени заполнения пор влагой ( $S$ ) талых образцов мелкозернистого (1) и пылеватого (2) песка.

При сравнении отношений эффективных проницаемостей песчаных образцов в мерзлом и талом состояниях ( $K_f/K_{th}$ ) с их влажностью была установлена следующая закономерность (рис. 6). При влажности менее 10 % наблюдается плавное снижение отношения  $K_f/K_{th}$  от 1 до 0.1, при влажности более 10 % снижение этого параметра дости-



**Рис. 6.** Зависимость отношения эффективных проницаемостей песчаных образцов в мерзлом и талом состояниях ( $K_f/K_{th}$ ) от влажности ( $W$ ).

1 – мелкозернистый песок; 2 – пылеватый песок.

гает нескольких порядков (см. рис. 6). Эту особенность можно объяснить различием физических свойств флюидов в талом и мерзлом состояниях, а также различными механизмами заполнения порового пространства при фазовых переходах.

Снижение проницаемости мерзлого песчаного грунта по отношению к талому при той же степени заполнения пор М. Зифрид и М. Мёрдок объяснили тем, что вода в крупных порах замерзает в первую очередь, и это приводит к подтягиванию воды из мелких пор [Seyfried, Murdock, 1997]. После того как начинается образование льда, вода будет замерзать в больших порах, в результате эти поры будут более льдонасыщенны. При отсутствии внешнего источника воды эта влага должна поступать из более мелких пор. Таким образом, поры с более высокой проводимостью заполняются льдом за счет меньших, менее проводящих пор, и образование льда сильнее влияет на снижение проницаемости, чем в случае изменения только объема при фазовом переходе. Можно предположить, что при оттаивании мерзлого грунта вода из крупных пор будет частично возвращаться в мелкие и тем самым уменьшать степень заполнения влагой крупных пор, что в результате приведет к значительному повышению проницаемости при оттаивании.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе экспериментальных работ по оценке газопроницаемости песчаных пород получены данные о влиянии влагосодержания на газопроницаемость песчаных пород в мерзлом и талом состояниях.

Выявлено, что в мерзлых песчаных породах при увеличении степени заполнения пор льдом от 0 до 40 % газопроницаемость снижалась на порядок, при увеличении льдонасыщенности песчаных образцов от 40 до 50 % снижение составляло несколько порядков. При льдонасыщенности образцов около 50 % газопроницаемость не превышала нескольких миллиардари. При дальнейшем увеличении льдонасыщенности (более 60 %) газопроницаемость снижалась ниже предела измерения экспериментальной установки (0.01 мД).

Экспериментально показано, что при оттаивании газопроницаемость песчаных пород повышается. Это различие в газопроницаемости увеличивается с повышением степени заполнения пор. Для исследованных песков при степени заполнения пор до 40 % разница величин газопроницаемости мерзлого и талого образцов составляла менее одного порядка, при степени заполнения пор более 40 % различие составляло несколько (3–5) порядков.

Характер изменения газопроницаемости песчаных пород от степени заполнения пор влагой во многом обусловлен их структурными особенностями и, прежде всего, зависимостью типа льда-цемента от влагосодержания.

Авторы выражают благодарность компании Тоталь за финансовую поддержку данных экспериментальных исследований.

Авторы выражают благодарность компании Тоталь за финансовую поддержку данных экспериментальных исследований.

### Литература

- Ананян А.А., Арутюнян Н.А., Мазуров В.А., Сильвестров Л.К. О проницаемости мерзлых пород // Мерзлотные исслед., 1972, № 12, с. 205–209.
- Арз Ф.Э. Проблема эмиссии глубинных газов в атмосферу // Криосфера Земли, 1998, т. II, № 4, с. 42–50.
- Глотов В.Е. Естественные источники атмосферного метана в криолитозоне // Материалы Третьей конференции геокриологов России. М., МГУ, 2005, т. 1, с. 236–240.
- Глотов В.Е., Иванов Б.Б., Шило Н.А. Миграция углеводородов через подземную толщу многолетнемерзлых пород // Докл. АН СССР, 1985, т. 285, № 6, с. 1443–1446.
- ГОСТ 5180-84. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. М., Стандартиформ, 2005, 19 с.
- Микростроение мерзлых пород / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Изд-во Моск. ун-та, 1988, 183 с.
- Оловин Б.А. Фильтрационная проницаемость вечномерзлых грунтов / Б.А. Оловин. Новосибирск, Наука, 1993, 257 с.
- СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. М., Госстройиздат, 1990, 54 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.
- 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., 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.
- Якушев В.С. Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне / В.С. Якушев. М., ВНИИГАЗ, 2009, 192 с.
- Chamberlain E.J., Gow A.J. Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils // Eng. Geology, 1979, vol. 13, p. 73–92.
- Chuvilin E.M., Grebenkin S.I., Tkacheva E.V. Change of gas permeability of gas-saturated sediments during hydrate formation and freezing // Proc. of the 8th Intern. Conf. on Gas Hydrates. Beijing, China, 2014, с. 1–6.
- 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, May 7, 2008). Houston, USA, 2008, p. 21–34.
- Seyfried M.S., Murdock M.D. Use of air permeability to estimate infiltrability of frozen soil // J. Hydrology, 1997, vol. 202, p. 95–107.
- Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A., Yusupov V., Kosmach D., Gustafsson Ö. Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic Shelf // Science, 2010, vol. 327, p. 1246–1250.
- Wang P., Zhang X., Zhu Y., Li B., Huang X., Pang S., Zhang S., Lua C., Xiaod R. Effect of permafrost properties on gas hydrate petroleum system in the Qilian Mountains, Qinghai, Northwest China // Environ. Science: Processes Impacts, 2014, vol. 16, p. 2711–2720.

Поступила в редакцию  
15 сентября 2015 г.