

Влияние газогидратной компоненты на свойства мерзлых пород

Е.М. Чувиллин^{1*}, Б.А. Буханов^{1,2}, С.И. Гребенкин¹, М.В. Жмаев^{1,2}

¹Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

²Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского, Москва, Россия

Одной из особенностей многолетнемерзлых пород является способность аккумулировать в себе крупные скопления природного газа, в том числе и в гидратной форме. Информация о наличии внутримерзлотных гидратосодержащих коллекторов была получена в результате исследования мерзлых кернов, поднятых в ходе параметрического бурения, а также на основе анализа многочисленных данных о газопроявлениях из интервалов многолетнемерзлых пород при бурении разведочных и добывающих скважин в Арктике. В настоящее время установлено, что газовые гидраты по ряду физических показателей очень сходны со льдом, поэтому их выявление в толще мерзлых пород при использовании стандартных геофизических методов (в первую очередь сейсмики) достаточно затруднительно. Однако, как показали результаты проведенных экспериментальных исследований, газогидратная компонента может оказывать существенное влияние на некоторые физические характеристики мерзлых пород и процессы, которые протекают в толщах мерзлых пород в ходе их существования и эволюции. Так, наличие поровых гидратов в мерзлых породах способствует с одной стороны снижению их теплопроводности и фильтрационных характеристик, а с другой – существенному повышению прочности льдосодержащего коллектора. Отдельно рассмотрено влияние газогидратной компоненты на некоторые геофизические характеристики мерзлых грунтовых сред. В частности, отмечено закономерное повышение удельного электрического сопротивления мерзлых пород при увеличении гидратосодержания.

В ходе исследования показано, что изменения основных физических характеристик мерзлых пород в условиях накопления поровых газогидратов связаны не только с изменением соотношения поровый лед – поровый гидрат, но и с содержанием жидкой фазы воды в льдо-, газо- и газогидратных грунтовых системах. В итоге сделан вывод, что появление газогидратной компоненты с одной стороны существенно упрочняет мерзлый коллектор, а с другой проявляет тенденцию к снижению способности к тепло- и массопереносу.

Ключевые слова: многолетнемерзлые породы, газовые гидраты, поровый лед, прочность, теплопроводность, газовая проницаемость, электрическое сопротивление, метан

Для цитирования: Чувиллин Е.М., Буханов Б.А., Гребенкин С.И., Жмаев М.В. (2025). Влияние газогидратной компоненты на свойства мерзлых пород. *Георесурсы*, 27(3), с. 101–110. <https://doi.org/10.18599/grs.2025.3.8>

Введение

Природные газовые гидраты (прежде всего гидраты метана) в настоящее время являются важным и перспективным источником нетрадиционных углеводородов. Это обусловлено высоким содержанием природного газа в газогидратах (1 м³ газогидрата содержит около 170 м³ метана), неглубоким залеганием (в основном до 1 км), а также большими ресурсами метана в гидратной форме, которые сопоставимы с ресурсами всех традиционных

углеводородов вместе взятых (Якушев и др., 2014; Chong et al., 2016; Вареничев и др., 2022). В этой связи последние 30 лет одной из главных целей газогидратных исследований являлась разработка эффективных технологий по добыче метана из природных газогидратных коллекторов. При этом стоит отметить, что основной акцент был направлен в первую очередь на изучение субаквальных газогидратов, находящихся в донных отложениях морей и океанов (Wei et al., 2024). Это обусловлено тем, что почти 95% газогидратных скоплений приурочены к донным отложениям морей и океанов, и они прежде всего рассматриваются как наиболее перспективные для разработки (Max, Johnson, 2016; Yamamoto et al., 2022).

Природные газогидратные образования (около 5%) могут быть приурочены также и к областям распространения многолетнемерзлых пород как на суше, так

* Ответственный автор: Евгений Михайлович Чувиллин
e-mail: e.chuvilin@skoltech.ru

© 2025 Коллектив авторов

Статья находится в открытом доступе и распространяется в соответствии с лицензией Creative Commons Attribution (CC BY) License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

и на арктическом шельфе (Черский и др., 1973; Макогон, 1985; Истомин, Якушев, 1992; Мах, 2000; Якушев, 2009; Ruppel, 2015; Матвеева и др., 2024). Эти гидратные скопления связаны с особенностями существования и распространения многолетнемерзлых пород и во многом зависят от ее эволюции. В криолитозоне газовые гидраты могут находиться в подмерзлотных горизонтах при низких положительных температурах (подмерзлотные газогидраты), а также во внутримерзлотных горизонтах при отрицательных температурах (внутримерзлотные газогидраты). Крупные подмерзлотные газогидратные коллектора были обнаружены в районе дельты р. Маккензи (Канада), на континентальном склоне Аляски (США), на территории Мессояхского газового месторождения (Россия), а также в криолитозоне Тибета (Китай) (Гинсбург, Новожилов, 1997; Агалаков, 1997; Dallimore et al., 1999; Collett et al., 2011; Макогон, Омельченко, 2012; Li et al., 2017; Boswell et al., 2022). Кроме того, имеются отдельные данные о существовании внутримерзлотных гидратных скоплений в районах дельты р. Маккензи (скважина *Taglu 92 GSC* на арктическом побережье Канады) (Dallimore, Collett, 1995) и в устье р. Оленек (арктическое побережье Средней Сибири) (Черский и др., 1973), где в результате бурения параметрических и разведочных скважин были подняты мерзлые гидратосодержащие керны. Дополнительно, на сегодняшний день накоплены многочисленные косвенные данные о возможном наличии внутримерзлотных газовых гидратов на территории нефтяных и газовых месторождений севера Западной Сибири и в криолитозоне арктического шельфа РФ (Chuvilin et al., 2000; Yakushev, Chuvilin, 2000; Якушев, 2009; Chuvilin et al., 2020).

Появление газогидратных образований в толщах многолетнемерзлых пород может быть связано как с переходом подмерзлотных газовых и газогидратных коллекторов в мерзлое состояние в результате многолетнего промерзания, так и с загирачиванием промерзающего коллектора в процессе восходящей миграции глубинного газа (или криогенного отжатага газа), который попадает в благоприятные термобарические условия (Якушев, 2009). Еще одной причиной, способствующей формированию газовых гидратов в породах криолитозоны, является барический фактор, связанный в основном с развитием покровных оледенений (Трофимук и др., 1986). Ледниковый покров на поверхности многолетнемерзлых толщ существенно расширяет зону стабильности гидратов в криолитозоне. Возможность гидратообразования в газонасыщенных промерзающих и мерзлых породах подтверждается и результатами экспериментального моделирования (Чувиллин, Гурьева, 2009; Chuvilin, Davletshina, 2018; Чувиллин и др., 2019; Давлетшина, Чувиллин, 2020).

Несмотря на то, что первые данные о существовании внутримерзлотных газогидратных скоплений были получены почти 50 лет назад (Черский и др., 1973), эти геологические объекты до сих пор остаются плохо изученными. В первую очередь это связано со сложностью выявления и диагностирования газогидратных скоплений в мерзлом разрезе с помощью традиционных геофизических методов (в первую очередь методов сейсморазведки) ввиду малого различия ряда физических характеристик (плотность, акустические скорости) для гидратных и ледяных образований. Однако существующие на сегодняшний день

немногочисленные литературные данные показывают, что появление газогидратной компоненты в поровом пространстве многолетнемерзлых пород может отражаться в значительном изменении их теплофизических, механических, фильтрационных и даже ряда геофизических характеристик. В этой связи рассмотрение влияния газогидратной компоненты на основные свойства мерзлых пород, с одной стороны, является важной фундаментальной задачей и несет новые знания о льдо- и гидратосодержащих соединениях в пористых средах, а с другой стороны, имеет важное значение для разработки нижележащих традиционных газовых месторождений, где устойчивость ствола добывающих скважин будет напрямую определяться их тепловым и механическим взаимодействиями с вмещающими льдо- и гидратосодержащими интервалами пород криолитозоны.

Методика экспериментальных исследований

Анализ влияния газогидратной компоненты на свойства промерзающих и мерзлых пород был основан на проведении экспериментального моделирования образования газогидратов в поровом пространстве грунтовых сред в специальных установках высокого давления и использовании комплекса специальных методов и технологий для дальнейшего исследования мерзлых гидратосодержащих грунтовых систем. В качестве объектов исследования были использованы природные грунты, преимущественно песчаного и супесчаного состава, отобранные из криолитозоны в пределах газовых месторождений на севере Западной Сибири и территории арктического шельфа, а также модельные песчаные среды и грунтовые смеси различного гранулометрического состава.

В исследованиях использовались специальные установки для изучения теплофизических, физико-механических, фильтрационных и геофизических параметров при различном фазовом составе поровых флюидов (газогидрат, лед, вода, газ), подробно описанные в работах (Чувиллин, Буханов, 2014; Chuvilin, Bukhanov, 2017; Чувиллин, Гребенкин, 2015; Yang et al., 2019) (табл. 1).

Подготовка мерзлых гидратосодержащих грунтовых образцов с высокой долей перехода поровой влаги в гидратное состояние (~50% и более) проводилась при давлении гидратообразующего газа выше равновесного по представленной ранее методике (Chuvilin, Davletshina, 2018). В качестве газа-гидратообразователя, для насыщения грунтовых образцов гидратами, использовались метан (99,998%) или двуокись углерода (99,995%), которые находились в баллонах под давлением 10,0 и 6,0 МПа, соответственно. Основные параметры гидратосодержания исследуемых образцов, а именно гидратонасыщенность (S_h) и коэффициент гидратности (K_h), определялись PVT-методом путем анализа данных температуры грунтовой системы и давления газовой компоненты (Chuvilin, Davletshina, 2018; Чувиллин и др., 2019).

Гидратонасыщенность (S_h , %) представляет собой процент порового пространства, заполненного гидратом, определяется по объемному содержанию гидрата H_v (%) и пористости n (д.ед.):

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

Свойства	Определяемые параметры	Оборудование	Ссылка на методику
Теплофизические	Теплопроводность (Вт/(м·К))	Оригинальная газогидратная установка со встроенной системой определения теплопроводности методом стационарного теплового режима, произведенная совместно с <i>Институтом природопользования НАН Беларуси</i> (Беларусь). Анализатор тепловых характеристик KD2 Pro с двойным цилиндрическим зондом (модель SH-1), произведенный <i>METER Group</i> (США).	Чувиллин, Буханов, 2014; Chuvilin, Bukhanov, 2017; Chuvilin et al., 2023
Физико-механические	Прочность (МПа)	Прибор трехосного сжатия Tri-Scan 250, произведенный <i>VJ Tech</i> (Великобритания) специально для газогидратных исследований.	Yang et al., 2019
Фильтрационные	Эффективная газовая проницаемость (мД)	Оригинальная фильтрационная установка, изготовленная ООО « <i>ЭкогеосПром</i> » (Россия).	Чувиллин, Гребенкин, 2015; Chuvilin et al., 2021
Геофизические	Удельное электрическое сопротивление (кОм·м)	Оригинальный газогидратный комплекс, проводящий измерения геофизического параметра на основе метода Веннера (четырёхэлектродная схема).	ASTM G57-20

Табл. 1. Основные физические характеристики гидратосодержащих пород, определяемые в ходе исследований

Коэффициент гидратности (K_h , д.ед.) характеризует долю поровой влаги, перешедшей в гидратное состояние:

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

где W_h влажность за счет гидратной компоненты (% от веса сухого образца) и W начальная влажность образца (%). W_h находится из веса порового гидрата M_h , который рассчитывается с учетом поглощенного газа по формулам $\text{CH}_4 \cdot 5.9\text{H}_2\text{O}$ и $\text{CO}_2 \cdot 6.1\text{H}_2\text{O}$ для гидрата метана и двуокиси углерода, соответственно.

Измерения теплопроводности (λ , Вт/(м·К)) мерзлых гидратосодержащих грунтов при давлении выше равновесного проводились в специальной газогидратной установке со встроенной системой определения теплофизического параметра методом стационарного теплового режима (изготовлена Институтом природопользования НАН Беларуси) (Бровка, Романенко, 2010), а также в автоклаве высокого давления с помощью двойного цилиндрического зонда и анализатора KD2 Pro (производства METER Group) (Chuvilin et al., 2023). В случае реализации метода стационарного теплового режима исследуемые образцы представляли собой полые цилиндры (высотой 100 мм, толщиной 10 мм) и располагались между двумя коаксивными цилиндрами. В случае применения зондового метода льдо- и гидратосодержащие образцы имели высоту 90 мм, а диаметр ~60–70 мм. Перегрев исследуемых образцов в обоих случаях составлял не более 0,5 °С. Погрешность измерений теплопроводности мерзлых гидратосодержащих пород оценивалась в пределах $\pm 5\%$, по аналогии с нашими более ранними исследованиями (Chuvilin, Bukhanov, 2019).

Исследования прочности (σ , МПа) мерзлых гидратосодержащих пород с разным соотношением лед – гидрат в поровом пространстве нами были проведены на приборе трехосного сжатия в рамках сотрудничества с коллегами из университета Хериот-Ватт (г. Эдинбург). В рамках

проведённых исследований под параметром прочности исследуемого грунтового образца понимается девиатор напряжений ($\sigma_1 - \sigma_2 = \sigma_3$), т.е. разница между максимальным осевым давлением и постоянным обжимным давлением. Используемый прибор Tri-Scan 250 был специально разработан для исследования прочностных и деформационных характеристик газонасыщенных и гидратосодержащих горных пород под давлением газа (Yang et al., 2019). В качестве объекта исследования использовалась искусственная песчано-пылевато-глинистая смесь, состоящая из кварцевого мелкозернистого песка с добавками пылеватых частиц и монтмориллонитовой глины. Механические испытания проводились на мерзлых гидратонасыщенных грунтовых образцах цилиндрической формы (высота 100 мм, диаметр 50 мм) с поровым давлением метана выше равновесного (около 5 МПа), т.е. в стабильных условиях для порового гидрата, и температурах –3 °С и –10 °С. Все испытания проводились в режиме деформирования исследуемых грунтовых образцов с постоянной скоростью 0,1 мм/мин.

Исследования газовой проницаемости (K , мД) льдо- и гидратосодержащих пород при различных термобарических исследованиях проводились на оригинальной экспериментальной установке, разработанной ООО «ЭкогеосПром» (Россия), которая позволяет создавать и поддерживать заданные термобарические условия в широком диапазоне температур (от –15 до +30 °С) и давлений (до 10 МПа) (Чувиллин, Гребенкин, 2015). Коэффициент эффективной газопроницаемости мерзлого гидратосодержащего грунта определялся по методу спада импульса. По результатам фильтрационного эксперимента рассчитывалась относительная газопроницаемость образца ($K_{\text{отн}}$, д.е.), которая представляла собой отношение эффективной газопроницаемости гидратосодержащего образца к начальной газопроницаемости мерзлого образца до гидратонасыщения. Исследования проводились

на образцах диаметром ~30 мм и высотой 30–40 мм. Температурные условия поддерживались с точностью $\pm 0,5$ °С с помощью климатической камеры Binder МК240.

Исследования геофизических характеристик гидратосодержащих горных пород проводились непосредственно под давлением газа 4–5 МПа в автоклавах высокого давления (производства *Top Industrie*, Франция), в которые были установлены латунные электроды (диаметром 3,5 мм) для определения удельного электрического сопротивления (ρ , кОм·м) на основе метода Веннера на постоянном токе (Гребенкин и др., 2024). Измерения проводились на цилиндрических образцах диаметром 38 мм и высотой ~80 мм. Температурные условия задавались с точностью $\pm 0,2$ °С с помощью жидкостного термостата Julabo FP40. Измерение удельного электрического сопротивления грунтов проводилось по четырехэлектродной схеме с равноудаленными электродами на постоянном токе.

Влияние газогидратной компоненты на свойства мерзлых пород

Появление газогидратной компоненты в поровом пространстве горных пород оказывает существенное влияние на их свойства. В первую очередь это отражается на механических, тепловых, фильтрационных и геофизических параметрах грунтов, т.к. их значения для гидрата и других поровых флюидов (прежде всего воды, льда и газа) могут существенно различаться. Кроме того, важным аспектом являются термобарические условия, при которых находятся поровые газогидратные образования, что также оказывает заметное влияние на физические характеристики гидратосодержащей породы.

В рамках настоящего исследования сделан акцент на рассмотрении влияния газогидратной компоненты на свойства мерзлых грунтов при давлении газа выше равновесного, т.е. при $t < 0$ °С и термобарических условиях стабильного порового гидрата.

Теплопроводность

Появление газогидратной компоненты в мерзлых породах оказывает существенное влияние на их теплопроводность, что связано со значительным различием в значениях данного теплофизического параметра для ледяной и гидратной компонент. В ходе экспериментов установлено, что в процессе перехода порового льда в гидрат теплопроводность мерзлых пород заметно снижается (рис. 1). Так, в песке мелком ($W = 19\%$) при увеличении коэффициента гидратности (K_h) от 0 до 0,5 теплопроводность понизилась от 2,32 Вт/(м·К) до 1,80 Вт/(м·К), что составило около 22%. При значениях K_h более 0,5, как показали наши предыдущие исследования (Chuvilin, Bukhanov, 2017), изменения теплопроводности гидратонасыщенных мерзлых грунтов становятся менее выраженными, поскольку основной вклад в теплопроводность будет вносить минеральный скелет грунта. В целом, отмеченная тенденция снижения теплопроводности мерзлых пород при переходе порового льда в газогидрат связана с уменьшением доли ледяной компоненты, которая имеет высокую теплопроводность (2,22–2,35 Вт/(м·К)), и увеличением доли гидратной компоненты, теплопроводность которой почти в 4 раза меньше (~0,6 Вт/(м·К)). В итоге, на основе экспериментального моделирования можно

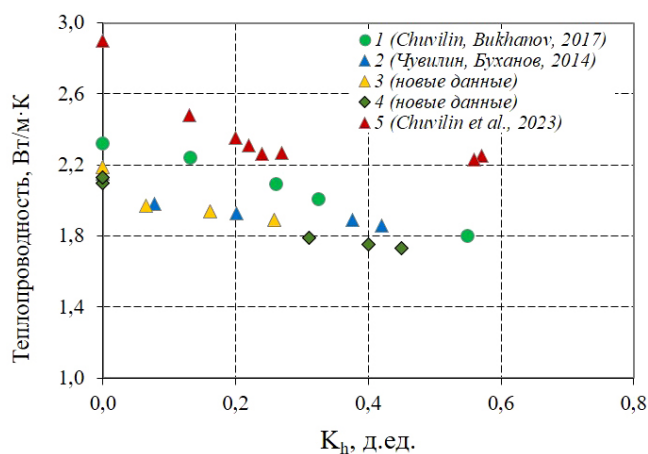


Рис. 1. Влияние доли порового льда, перешедшего в гидрат (K_h), на теплопроводность мерзлых песчаных и супесчаных пород при температуре -5 °С: 1 – песок мелкий (карьер вблизи г. Люберцы), $W = 19\%$, $n = 0,40$; 2 – песок пыл. (шельф моря Лаптевых, вблизи пос. Тикси), $W = 15\%$, $n = 0,38$; 3 – песок пыл. (Ямбургское ГКМ), $W = 16\%$, $n = 0,40$; 4 – Супесь (карьер вблизи г. Воркута), $W = 16\%$, $n = 0,40$; 5 – песок мелкий (Южно-Тамбейское НГКМ), $W = 16\%$, $n = 0,37$

ожидать, что в результате перехода до 40–50% порового льда в гидратное состояние (гидрат метана) можно ожидать снижение теплопроводности мерзлых песчаных и супесчаных коллекторов в среднем на 15–20% (Chuvilin, Bukhanov, 2017; Chuvilin et al., 2023).

Прочность

В результате выполненных физико-механических испытаний получены корреляционные зависимости прочности льдо-гидратосодержащих грунтовых образцов ($W = 15\%$; $\rho = 2,05$ г/см³ и $n = 0,34$) от параметров гидратосодержания: гидратонасыщенности (S_h , %) и коэффициента гидратности (K_h , д.ед.) при различных отрицательных температурах (рис. 2). Дополнительно стоит отметить, что общая степень заполнения порового пространства льдом и гидратом в исследуемых льдо- и гидратосодержащих грунтовых системах составляла около 75–80%.

В целом, полученные корреляции имеют хорошо выраженную линейную зависимость повышения прочности мерзлых грунтовых образцов при увеличении их гидратосодержания. Это прослеживается как для высокой (-3 °С), так и для низкой (-10 °С) отрицательных температур (рис. 2а). Отмеченная закономерность в целом указывает на определяющую роль гидратной фазы в формировании прочности льдо-гидратосодержащих пород, что обусловлено более высокой прочностью чистого гидрата по сравнению со льдом (Stern et al., 1996). Отдельно отмечено, что понижение температуры от -3 до -10 °С сопровождается увеличением прочности мерзлых гидратосодержащих образцов (при одинаковом $K_h \approx 0,2$) от 9,6 до 14,1 МПа, т.е. почти на 50% (рис. 2б). Такое существенное повышение параметра прочности для рассматриваемых грунтовых систем можно объяснить изменением фазового состава, а именно количеством жидкой компоненты в льдо- и гидратосодержащих пористых средах. Так недавние исследования, проведенные членами авторского коллектива с использованием прибора ЯМР (Bukhanov et al., 2022), показали, что для рассмотренных мерзлых

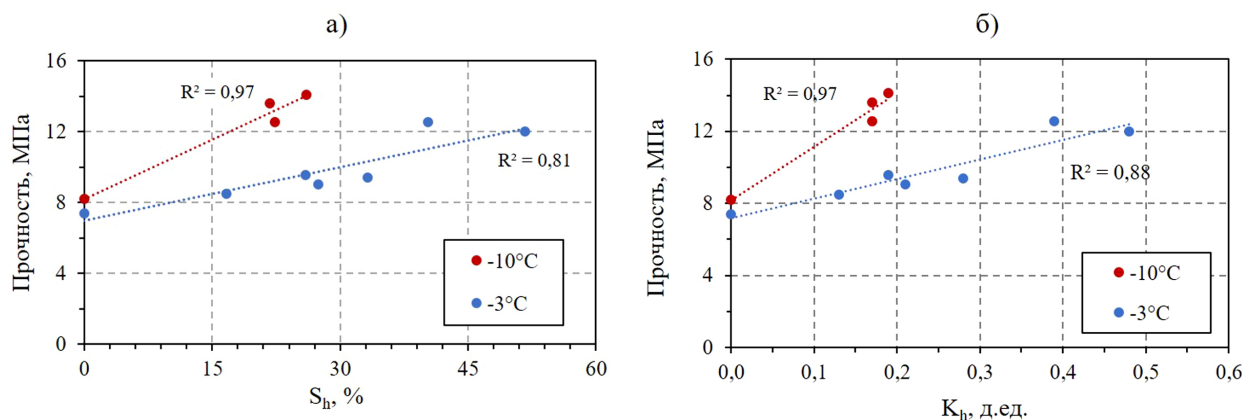


Рис. 2. Зависимость прочности льдо-гидратосодержащих образцов от параметров гидратонасыщенности (а) и коэффициента гидратности (б) при -3°C и -10°C

гидратосодержащих образцов (при поровом давлении метана около 5 МПа) при понижении температуры от -3 до -10°C содержание остаточной жидкой воды будет снижаться на 25% (от 1,2 до 0,9%). В этой связи, содержание жидкой компоненты может также рассматриваться как важный фактор в формировании прочностных показателей льдо-гидратосодержащих пород.

Газопроницаемость

Фильтрационные свойства газосодержащих мерзлых пород при частичном переходе порового льда в гидрат также изменяются. Приведенные фильтрационные эксперименты с образцами мерзлых пород с неполной степенью заполнения пор льдом (43–63%) в условиях гидратообразования показали, что при переходе порового льда в гидрат эффективная проницаемость исследуемых образцов снижается (Chuvilin et al., 2021). Анализ влияния доли порового льда, переходящего в гидрат (K_h), для мерзлых песчаных образцов с различной насыщенностью выявил, что чем выше начальная льдонасыщенность образцов (S_i), тем большее проявляется влияние перехода порового льда в гидрат на снижение газопроницаемости (рис. 3).

Согласно расчетам, переход порового льда в газовый гидрат приводит к увеличению совокупной степени заполнения пор за счет разницы их удельных объемов, достигающей порядка 15%. Это приводит к снижению пустотности (доли порового пространства, не занятого льдом и гидратом), а следовательно и газопроницаемости.

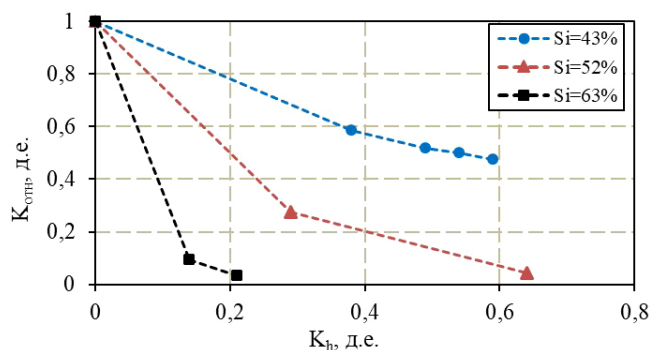


Рис. 3. Изменение относительной газопроницаемости ($K_{отн}$) мерзлых песчаных пород с различной льдонасыщенностью (S_i) от степени перехода порового льда в гидрат метана (K_h) при постоянной температуре -5°C

При достаточно высокой начальной степени заполнения пор льдом (около 63%) даже незначительные изменения пустотности вызывают более резкое снижение проницаемости, чем при невысокой начальной льдонасыщенности (43%). Таким образом, в мерзлых газонасыщенных песчаных породах с более чем 60%-ной льдонасыщенностью переход порового льда в гидрат может снизить газопроницаемость в десятки раз, тогда как в мерзлых породах с невысокой льдонасыщенностью (около 40%) проницаемость будет уменьшаться незначительно (менее чем в два раза).

Снижение относительной газопроницаемости мерзлых песчаных пород с неполной степенью заполнения пор льдом в процессе образования гидрата метана, а также CO_2 при отрицательной температуре (-5°C), можно проследить и в зависимости от гидратонакопления. Повышение гидратонасыщенности песчаных образцов в ходе перехода порового льда в гидрат вызывает снижение их относительной газопроницаемости. Так, в песчаных образцах с начальной пористостью (0,35–0,36 д.е.) и степенью заполнения пор льдом 49–54% при насыщенности гидратом CO_2 около 25% порового пространства относительная газопроницаемость снижается до 0,7 мД. Для песчаных образцов с пористостью (0,46–0,48 д.е.) и степенью льдонасыщенности 31–34% снижение относительной газопроницаемости достигает 0,5–0,6 при насыщении гидратом метана около 17% (рис. 4).

Для данных образцов в описываемом диапазоне изменения гидратонасыщения отмечается практически линейная зависимость изменения относительной газопроницаемости от пустотности (рис. 5).

Электрические свойства

Экспериментальная оценка изменения удельного электрического сопротивления (УЭС) мерзлых пород при появлении газогидратной компоненты проводилась в условиях фазового перехода порового льда в газогидрат в песчаных образцах кварцевого состава.

Они готовились из песка фракции 0,1–0,5 мм (RS1), а также из природного мелкозернистого песка (RS2). Их влажность составляла 12–13%, а пористость около 37%. Значения УЭС мерзлых песчаных образцов RS1 и RS2 (до закачки гидратообразующего газа) были равны 19,77 и 28,81 кОм·м соответственно, при значениях начальной льдонасыщенности 64% для обоих образцов.

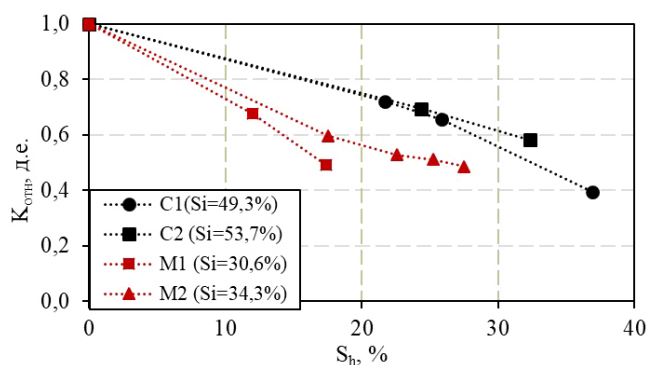


Рис. 4. Влияние насыщенности порового пространства (S_h) мерзлых образцов гидратом CO_2 (C1 и C2, черный цвет) и CH_4 (M1 и M2, красный цвет) на изменение их относительной газопроницаемости ($K_{\text{опт}}$)

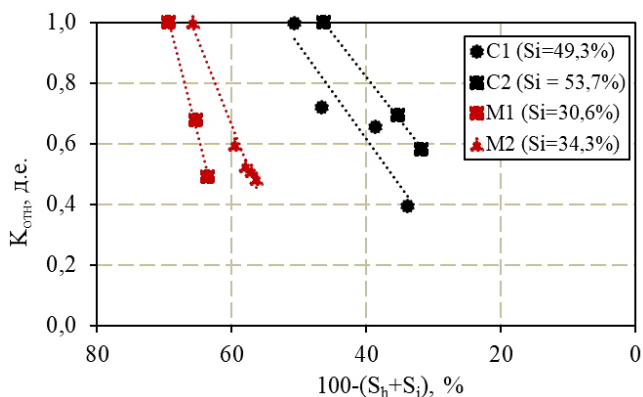


Рис. 5. Зависимость изменения относительной газопроницаемости ($K_{\text{опт}}$) от пустотности порового пространства ($100-(S_h+S_i)$, %) мерзлых образцов при гидратообразовании CO_2 (черный цвет) и CH_4 (красный цвет)

В качестве гидратообразующего газа в эксперименте RS1 использовался метан, а в эксперименте RS2 – двуокись углерода. На первом этапе оценивалось влияние насыщения мерзлых образцов гидратообразующим газом. При насыщении мерзлого песчаного образца метаном до давления 6 МПа отмечено незначительное повышение (менее 10%) УЭС до 21,72 кОм·м (рис. 6), тогда как при закачке CO_2 до давления 2,9 МПа произошло существенное снижение УЭС мерзлого образца более чем в 3 раза от 28,81 до 8,8 кОм·м (рис. 6). Это снижение обусловлено активным взаимодействием CO_2 с поверхностным слоем порового льда, в результате чего происходит его частичное растворение и повышение содержания незамерзшей воды в мерзлом образце.

На следующем этапе эксперимента производились измерения УЭС в мерзлом образце в процессе гидратообразования при постоянной температуре -6°C (рис. 6).

В эксперименте RS1 отмечен рост УЭС на 2 кОм·м уже после перехода 2% порового льда в гидрат метана (рис. 6). При дальнейшем переходе порового льда в гидрат наблюдалась практически линейная зависимость УЭС от коэффициента гидратности. Так, при повышении K_h до 0,17 УЭС мерзлого образца увеличилось в полтора раза и составило 31,85 кОм·м, а в конце эксперимента при переходе 27% порового льда в гидрат метана УЭС увеличилось практически в два раза по сравнению с начальным после закачки CH_4 и составило 41 кОм·м.

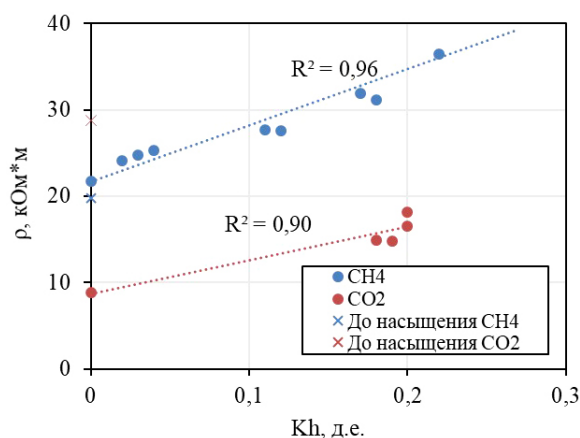


Рис. 6. Изменение УЭС мерзлых песчаных образцов (RS1 и RS2) в ходе перехода порового льда в гидрат CH_4 и гидрат CO_2 при температуре -6°C

В эксперименте RS2, где наблюдался более интенсивный темп перехода порового льда в гидрат CO_2 , была получена сходная зависимость УЭС от K_h . При переходе 18% порового льда в гидрат УЭС увеличилось в 1,7 раза и составило 14,8 кОм·м, а при переходе еще 2% поровой влаги в гидрат УЭС составило 18,1 кОм·м.

Таким образом, в обоих случаях, несмотря на различие в абсолютных значениях УЭС образцов, относительное повышение их значений при переходе порового льда в гидрат было близким. При переходе 20% порового льда в гидрат УЭС мерзлого образца повысилось примерно в 1,6 раз для гидрата метана и порядка 2 раз для гидрата CO_2 .

Обсуждение результатов экспериментального моделирования

Полученные экспериментальные данные, а также опубликованные материалы показывают, что газогидратная компонента оказывает заметное влияние на ряд физических характеристик мерзлых пород. В основном это обусловлено существенным различием в значениях рассмотренных параметров (прочность, теплопроводность, газовая проницаемость и удельное электрическое сопротивление) для порового льда и гидрата, однако в ряде случаев отмеченные тенденции обусловлены особенностями фазового состава (в первую очередь количеством остаточной жидкой воды) льдосодержащих и гидратонасыщенных пород. Поэтому тенденции изменения рассматриваемых физических параметров мерзлых грунтов при увеличении гидратосодержания при давлении выше равновесного будут различными, в зависимости от типа параметра, как по направлению, так и по величине (табл. 2).

В целом увеличение доли порового гидрата будет сопровождаться закономерным повышением прочности мерзлых гидратосодержащих пород. Так, переход в гидратное состояние около половины порового льда будет сопровождаться увеличением прочности льдо- и гидратосодержащей песчаной породы примерно на 50%, что обусловлено более высокой прочностью газогидратной компоненты при сравнении со льдом. Кроме того, газовые гидраты слабо проявляют реологические свойства (т.е. характерно хрупкое разрушение) в отличие от льда, для которого характерны пластические деформации под действием постоянной нагрузки.

Параметр	Доля перехода порового льда в гидрат	Тенденция	Порядок изменения
Прочность	~0,5	+	~50%
Теплопроводность	0,5	–	15-20%
Газовая проницаемость	0,6	–	От нескольких раз до нескольких порядков
Удельное электрическое сопротивление	до 0,25	+	В 1,5-2 раза

Табл. 2. Влияние гидратной компоненты на изменение физических параметров мерзлых грунтов, где «–» снижение параметра и «+» – повышение параметра.

Теплопроводность мерзлых грунтов в процессе гидратообразования будет снижаться, что вызвано увеличением содержания гидратной компоненты с низкой теплопроводностью и уменьшением содержания ледяной компоненты с высокой теплопроводностью. При этом для рассмотренных мерзлых гидратосодержащих песчаных и супесчаных грунтовых сред можно ожидать снижение теплофизического параметра до 15–20% даже при переводе 50% поровой влаги (т.е. льда) в гидрат.

Изменения газовой проницаемости в мерзлых породах в условиях накопления поровых гидратов в первую очередь будут определяться исходной степенью заполнения пор. Так, переход порового льда в газовый гидрат приводит к увеличению совокупной степени заполнения пор за счет разницы их удельных объемов, достигающей порядка 15%, что в итоге сопровождается снижением пустотности порового пространства и эффективных путей фильтрации газа. В результате, в мерзлых газовых коллекторах с высокой начальной льдонасыщенностью (60% и более) в ходе гидратонакопления можно ожидать существенного снижения (в несколько десятков раз) газовой проницаемости, в отличие от внутримерзлотных песчаных горизонтов с невысокой льдонасыщенностью порового пространства (40% и менее).

Отмеченное повышение удельного электрического сопротивления мерзлых пород при фазовом переходе лед – газовый гидрат в поровом пространстве, с одной стороны, связано с некоторым различием исследуемого геофизического параметра для гидрата и льда, а с другой – может быть обусловлено снижением содержания жидкой фазы воды (незамерзшая вода) в мерзлых породах в условиях гидратообразования. При фазовом переходе порового льда в гидрат содержание жидкой фазы воды в породе стремится к равновесному ее содержанию в гидратонасыщенных породах (неклатратная вода). А содержание неклатратной воды, как показывают эксперименты, значительно ниже, чем содержание незамерзшей воды в мерзлых породах без гидратов, причем содержание неклатратной воды, в отличие от незамерзшей, закономерно понижается с повышением газового давления (Chuvilin, Istomin, 2012).

Поэтому можно ожидать повышения удельного электрического сопротивления мерзлого гидратосодержащего песчаного коллектора примерно в 1,5–2 раза при увеличении коэффициента гидратности до 0,25. Следует также отметить, что снижение содержания жидкой фазы воды в мерзлых породах в условиях гидратонакопления будет способствовать повышению их прочностных характеристик.

Анализ полученных данных подтверждает, что изменения основных физических характеристик мерзлых грунтов в условиях накопления поровых газогидратов связаны не только с изменением соотношения поровый лед – поровый гидрат, но и с содержанием жидкой фазы воды в льдо-, газо- и газогидратосодержащих грунтовых системах. В итоге можно отметить, что появление газогидратной компоненты, с одной стороны, существенно упрочняет мерзлый коллектор, а с другой – проявляет тенденцию к снижению способности к тепло- и массопереносу.

Выводы

Как показывает анализ условий существования газогидратных образований в природе, криолитозона является благоприятной средой, где возможно образование и длительное нахождение газогидратов в качестве компоненты мерзлых пород. Несмотря на определенную схожесть со льдом, газогидратные образования оказывают и специфическое влияние на некоторые физические характеристики мерзлых пород и процессы, которые протекают в толщах мерзлых пород в ходе их существования и эволюции. Проведенная на основе экспериментальных исследований оценка влияния газогидратной компоненты на некоторые физические свойства мерзлых пород показала, что появление газогидратов в поровом пространстве мерзлых пород существенно снижает их теплопроводность, фильтрационные характеристики, а также вызывает повышение прочностных характеристик. Кроме того, наличие газогидратной компоненты в мерзлых породах оказывает определенное влияние на некоторые их геофизические характеристики, в частности может вызывать повышение удельного электрического сопротивления мерзлых пород при гидратонакоплении.

Финансирование/Благодарности

Авторы благодарят Российский научный фонд за финансовую поддержку проведенных исследований (грант № 22-67-00025).

Публикация статьи поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации по соглашению № 075-10-2022-011 в рамках программы развития НЦМУ.

Авторский коллектив выражают благодарность коллегам из ООО «ЭкогеосПром» (г. Тверь, Россия) за помощь в проектировании и изготовлении лабораторного комплекса для исследования фильтрационных и геофизических характеристик мерзлых и гидратосодержащих пород.

Литература

- Агалаков С.Е. (1997). Газовые гидраты в Туронских отложениях на севере Западной Сибири. *Геология Нефти и Газа*, 3, с. 16–21.
- Бровка А.Г., Романенко И.И. (2010). Приборы для исследования теплофизических характеристик и фазового состава воды горных пород при повышенных статических нагрузках. *Горная Механика и Машиностроение*, 1, с. 83–88.
- Вареничев А.А., Громова М.П., Потапов И.И. (2022). Прогнозные ресурсы метана газогидратных залежей. *Проблемы Окружающей Среды и Природных Ресурсов*, 8, с. 3–44. <https://doi.org/10.36535/0235-5019-2022-08-1>
- Гинсбург Г.Д., Новожилов А.А. (1997). О гидратах в недрах Мессояхского месторождения. *Газовая Промышленность*, 2, с. 19–21.
- Гребенкин С.И., Чувилин Е.М., Жмаев М.В., Малик А.А. (2024). Экспериментальная оценка изменения геофизических характеристик газонасыщенных песчаных пород при льдо- и гидратообразовании. *Сборник тезисов: Газовые гидраты — энергия будущего: материалы Первой Российской газогидратной конференции (РГК I)*. 26–31 августа 2024 г. Пос. Листвянка, Байкал. <https://doi.org/10.24412/cl-37274-2024-1-99-103>
- Давлетшина Д.А., Чувилин Е.М. (2020). Экспериментальная оценка возможности газогидратообразования в тонкодисперсных грунтах при отрицательных температурах. *Криосфера Земли*, 24(4), с. 25–33.
- Истомин В.А., Якушев В.С. (1992). Газовые гидраты в природных условиях. М.: Недра, 235 с.
- Макогон Ю.Ф. (1985). Газовые гидраты, предупреждение их образования и использование. М.: Недра, 232 с.
- Макогон Ю.Ф., Омельченко Р.Ю. (2012). Мессояха — газогидратная залежь, роль и значение. *Геология и Полез. Ископаемые Мирового океана*, 3, с. 5–19.
- Матвеева Т.В., Логвина Е.А., Назарова О.В. (2024). Газовые гидраты акваторий: методы и результаты ресурсных оценок. *Геология Нефти и Газа*, 3, с. 81–96. <https://doi.org/10.47148/0016-7894-2024-3-81-96>
- Трофимук А.А., Макогон Ю.Ф., Якушев В.С. (1986). Влияние динамики зон гидратообразования на температурный режим горных пород в области распространения криолитозоны. *Геология и Геофизика*, 11, с. 3–10.
- Черский Н.В., Куренчанин В.К., Скуба В.Н., Царев В.П. (1973). Исследования и рекомендации по совершенно разработке полезных ископаемых северных и восточных районов СССР. Ч.1. Перспективы поисков газогидратных залежей. Якутск: Якутское книжное издательство, 116 с.
- Чувилин Е.М., Буханов Б.А. (2014). Изменение теплопроводности газонасыщенных пород при гидратообразовании и замораживании-оттаивании. Часть 1. Методика исследований. *Криосфера Земли*, 18(1), с. 70–76.
- Чувилин Е.М., Гребенкин С.И. (2015). Экспериментальная оценка газопроницаемости газонасыщенных пород при газонасыщенных пород при гидратообразовании и замораживании. *Криосфера Земли*, 19(2), с. 67–74.
- Чувилин Е.М., Гурьева О.М. (2009). Экспериментальное изучение образования гидратов CO₂ в поровом пространстве промерзающих и мерзлых пород. *Криосфера Земли*, 13(3), с. 70–79.
- Чувилин Е.М., Давлетшина Д.А., Лупачик М.В. (2019). Гидратообразование в мерзлых и оттаивающих метанонасыщенных породах. *Криосфера Земли*, 23(2), с. 50–61.
- Якушев В.С. (2009). Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. М.: ВНИИГАЗ, 192 с.
- Якушев В.С., Гафаров С.М., Карнаухов Н.А. и др. (2014). Газовые гидраты в Арктике и Мировом Океане: Особенности залегания и перспективы освоения. М.: Недра, 251 с.
- ASTM G57-20 (2020). Standard Test Method for Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method. <https://doi.org/10.1520/G0057-20>
- Boswell R., Collett T.S., Yamamoto K., Okinaka N., Hunter R., Suzuki K., Tamaki M., Yoneda J., Iiter D., Haines S.S., Myshakin E., Moridis G. (2022). Scientific results of the Hydrate-01 Stratigraphic Test Well Program, Western Prudhoe Bay Unit, Alaska North Slope. *Energy & Fuels*, 36(10), pp. 5167–5184. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.2c00327>
- Bukhanov B. A., Chuvilin E.M., Mukhametdinova A.Z., Sokolova N.S., Afonin M.Y., Istomin V.A. (2022). Estimation of residual pore water content in hydrate-bearing sediments at temperatures below and above 0 °C by NMR. *Energy & Fuels*, 36(24), pp. 14789–14801. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.2c03089>
- Chong, Z.R., Yang, S.H.B., Babu, P., Linga, P., Li, X.-S. (2016). Review of natural gas hydrates as an energy resource: Prospects and challenges. *Applied Energy*, 162, pp. 1633–1652.
- Chuvilin E., Bukhanov B. (2017). Effect of hydrate formation conditions on thermal conductivity of gas-saturated sediments. *Energy & Fuels*, 31(5), pp. 5246–5254. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b02726>
- Chuvilin E., Bukhanov B. (2019). Thermal conductivity of frozen sediments containing self-preserved pore gas hydrates at atmospheric pressure: An experimental study. *Geosciences*, 9(2), 65. <https://doi.org/10.3390/geosciences9020065>
- Chuvilin E., Davletshina D. (2018). Formation and Accumulation of Pore Methane Hydrates in Permafrost: Experimental Modeling. *Geosciences*, 8(12). <https://doi.org/10.3390/geosciences8120467>
- Chuvilin E., Davletshina D., Bukhanov B., Grebenkin S., Pankratova E. (2023). Thermal conductivity variations in frozen hydrate-bearing sand upon heating and dissociation of pore gas hydrate. *Geosciences*, 13, 316. <https://doi.org/10.3390/geosciences13100316>
- Chuvilin E., Ekimova V., Davletshina D., Sokolova N., Bukhanov B. (2020). Evidence of gas emissions from permafrost in the Russian Arctic. *Geosciences*, 10, 383. <https://doi.org/10.3390/geosciences10100383>
- Chuvilin E.M., Grebenkin S.I., Zhmaev M.V. (2021). Gas permeability of sandy sediments: effects of phase changes in pore ice and gas hydrates. *Energy and Fuels*, 8, pp. 7874–7882. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c00366>
- Chuvilin E.M., Istomin V.A. (2012). Temperature dependence of the equilibrium pore water content in gas hydrate contained sediments. In: *Proc. 10th Int. Conf. on Permafrost* (Salekhard, June 25–29, 2012). Yamal-Nenets Autonomous District, Russia, vol. 2, p. 57–60.
- Chuvilin E.M., Yakushev V.S., Perlova E.V. (2000). Gas and possible gas hydrates in the permafrost of Bovankovo gas field, Yamal Peninsula, West Siberia. *Polarforschung*, 68, pp. 215–219.
- Collett T.S., Lee M.W., Agena W.F., Miller J.J., Lewis K.A., Zyrianova M.V., Boswell R., Inks T.L. (2011). Permafrost associated natural gas hydrate occurrences on the Alaskan North Slope. *Mar. Pet. Geol.*, 28, pp. 279–294. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2009.12.001>
- Dallimore S.R., Collett T.S. (1995). Intrapermafrost gas hydrates from a deep core hole in the Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada. *Geology*, 23, pp. 527–530. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1995\)023<0527:IGHFAD>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1995)023<0527:IGHFAD>2.3.CO;2)
- Dallimore S.R., Uchida T., Collett T.S. (1999). Scientific Results from JAPEX/JNOC/GSC Mallik 2L-38 Gas Hydrate Research Well, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada. Ottawa – Ontario: Natural Resources Canada, 403 p. <https://doi.org/10.4095/210723>
- Li B., Sun Y., Guo W., Shan X., Wang P., Pang Sh., Jia R., Zhang G. (2017). The mechanism and verification analysis of permafrost-associated gas hydrate formation in the Qilian Mountain, Northwest China. *Marine and Petroleum Geology*, 86, pp. 787–797. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.05.036>
- Max D.M., Johnson A.H., Dillon W.P. (2013). Natural gas hydrate – Arctic Ocean deepwater resource potential. Dordrecht: Springer, 113 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-02508-7>
- Max M. (2000). Natural Gas Hydrate: In Oceanic and Permafrost Environments. Dordrecht: Springer, 419 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-4387-5>
- Ruppel C. (2015). Permafrost-associated gas hydrate: Is it really approximately 1% of the global system? *J. Chem. Eng. Data*, 60(2), pp. 429–436. <https://doi.org/10.1021/je500770m>
- Stern L.A., Kirby S.H., Durham W.B. (1996). Peculiarities of methane clathrate hydrate formation and solid-state deformation, and the associated superheating of water ice. *Science*, 273, pp. 1843–1848. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.273.5283.1843>
- Wei N., Pei J., Li H., Zhou Sh., Zhao, J., Kvamme B., Coffin R.B., Zhang L., Zhang Y., Xue J. (2024). Classification of natural gas hydrate resources: Review, application and prospect. *Gas Science and Engineering*, 124, 205269. <https://doi.org/10.1016/j.jgsce.2024.205269>
- Yakushev V.S., Chuvilin E.M. (2000). Natural gas and hydrate accumulation within permafrost in Russia. *Cold Regions Science and Technology*, 149, pp. 46–50. [https://doi.org/10.1016/S0165-232X\(00\)00012-4](https://doi.org/10.1016/S0165-232X(00)00012-4)
- Yamamoto K., Boswell R., Collett T., Dallimore S., Lu H. (2022). Review of past gas production attempts from subsurface gas. *Energy & Fuels*, 36(10), pp.5047–5062. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c04119>
- Yang J., Hassanpouryouzband A., Tohidi B., Chuvilin E., Bukhanov B., Istomin V., Cheremisin A. (2019). Gas hydrates in permafrost: distinctive effect of gas hydrates and ice on the geomechanical properties of simulated hydrate-bearing permafrost sediments. *JGR Solid Earth*, 124, pp. 2551–2563. <https://doi.org/10.1029/2018JB016536>

Сведения об авторах

Евгений Михайлович Чувилин – кандидат геол.-минерал. наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Центр науки и технологий добычи углеводородов, Сколковский институт науки и технологий

Россия, 121205, Москва, территория ИЦ “Сколково”, ул. Сикорского, д. 11
e-mail: e.chuvilin@skoltech.ru

Борис Александрович Буханов – кандидат геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник, Центр науки и технологий добычи углеводородов, Сколковский институт науки и технологий

Россия, 121205, Москва, территория ИЦ “Сколково”, ул. Сикорского, д. 11
e-mail: b.bukhanov@skoltech.ru

Сергей Игоревич Гребенкин – кандидат геол.-минерал. наук, научный сотрудник, Центр науки и технологий добычи углеводородов, Сколковский институт науки и технологий

Россия, 121205, Москва, территория ИЦ “Сколково”, ул. Сикорского, д. 11
e-mail: grebenkin.sergei@mail.ru

Максим Владиславович Жмаев – кандидат тех. наук, инженер, Центр науки и технологий добычи углеводородов, Сколковский институт науки и технологий

Россия, 121205, Москва, территория ИЦ “Сколково”, ул. Сикорского, д. 11
e-mail: maksim.zhmaev@skoltech.ru

Статья поступила в редакцию 15.12.2024;

Принята к публикации 25.03.2025; Опубликовано 20.09.2025

IN ENGLISH

ORIGINAL ARTICLE

Effect of gas hydrates on physical properties of permafrost

E.M. Chuvilin^{1}, B.A. Bukhanov^{1,2}, S.I. Grebenkin¹, M.V. Zhmaev^{1,2}*

¹Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russian Federation

²Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

*Corresponding author: Evgeny M. Chuvilin, e-mail: e.chuvilin@skoltech.ru

Abstract. Permafrost stores large amounts of natural gas in free and hydrate (clathrate) forms. Intrapermafrost gas hydrates were revealed in frozen core samples recovered from test, exploration, and production wells in the Arctic oil and gas fields. Being similar to ice in many respects, gas hydrates can be mute for geophysical surveys. Meanwhile, laboratory experiments show that the presence of a gas hydrate component in pore moisture affects considerably some parameters of frozen sediments, as well as processes in evolving permafrost. Hydrate-bearing permafrost has a lower thermal conductivity and permeability but a higher geomechanic strength than hydrate-free frozen ground. Gas hydrates also influence some geophysical variables, such as electrical resistivity which becomes higher at higher hydrate contents.

Accumulation of gas hydrates changes the relative percentages of pore moisture components (ice-hydrate-liquid water) in systems comprising ice, free gas, and gas hydrates, which has bearing on the physical properties of permafrost. The presence of gas hydrates increases the strength and resistivity of permafrost and, on the other hand, tends to reduce its permeability and the rates of heat and mass transfer.

Keywords: permafrost, gas hydrates, pore ice, strength, thermal conductivity, gas permeability, electrical resistance, methane

Acknowledgements

The authors thank the Russian Science Foundation for financial support of the conducted research (grant No. 22-67-00025).

The publication of the article was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under agreement No. 075-10-2022-011 within

the framework of the development program for a world-class Research Center.

The authors gratitude to colleagues from EcogeosProm LLC (Tver city, Russia) for assistance in designing and manufacturing a laboratory complex for studying the filtration and geophysical characteristics of frozen and hydrate-bearing soils.

Recommended citation: Chuvilin E.M., Bukhanov B.A., Grebenkin S.I., Zhmaev M.V. (2025). Effect of gas hydrates on physical properties of permafrost. *Georesursy = Georesources*, 27(3), pp. 101–110. <https://doi.org/10.18599/grs.2025.3.8>

References

- Agalakov S.E. (1997). Gas hydrates in the Turonian deposits in the north of Western Siberia. *Geologiya Nefii i Gaza*, 3, pp. 16–21. (In Russ.)
- ASTM G57-20 (2020). Standard Test Method for Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method. <https://doi.org/10.1520/G0057-20>
- Boswell R., Collett T.S., Yamamoto K., Okinaka N., Hunter R., Suzuki K., Tamaki M., Yoneda J., Itter D., Haines S.S., Myshakin E., Moridis G. (2022). Scientific results of the Hydrate-01 Stratigraphic Test Well Program, Western Prudhoe Bay Unit, Alaska North Slope. *Energy & Fuels*, 36(10), pp. 5167–5184. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.2c00327>
- Brovka A.G., Romanenko I.I. (2010). Devices for studying thermophysical characteristics and phase composition of water in rocks under increased static loads. *Gornaya Mekhanika i Mashinostroenie*, 1, pp. 83–88. (In Russ.)
- Bukhanov B. A., Chuvilin E.M., Mukhametdinova A.Z., Sokolova N.S., Afonin M.Y., Istomin V.A. (2022). Estimation of residual pore water content in hydrate-bearing sediments at temperatures below and above 0 °C by NMR. *Energy & Fuels*, 36(24), pp. 14789–14801. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.2c03089>
- Chersky N.V., Kurenchanin V.K., Skuba V.N., Tsarev V.P. (1973) Research and recommendations for the development of mineral resources in the northern and eastern regions of the USSR. Part 1. Prospects for Searching for Gas Hydrate Deposits. Yakutsk: Yakut Book Publishing, 116 p. (In Russ.)
- Chong, Z.R., Yang, S.H.B., Babu, P., Linga, P., Li, X.-S. (2016). Review of natural gas hydrates as an energy resource: Prospects and challenges. *Applied Energy*, 162, pp. 1633–1652.

- Chuvilin E., Bukhanov B. (2017). Effect of hydrate formation conditions on thermal conductivity of gas-saturated sediments. *Energy & Fuels*, 31(5), pp. 5246–5254. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b02726>
- Chuvilin E., Bukhanov B. (2019). Thermal conductivity of frozen sediments containing self-preserved pore gas hydrates at atmospheric pressure: An experimental study. *Geosciences*, 9(2), 65. <https://doi.org/10.3390/geosciences9020065>
- Chuvilin E., Davletshina D. (2018). Formation and Accumulation of Pore Methane Hydrates in Permafrost: Experimental Modeling. *Geosciences*, 8(12). <https://doi.org/10.3390/geosciences8120467>
- Chuvilin E., Davletshina D., Bukhanov B., Grebenkin S., Pankratova E. (2023). Thermal conductivity variations in frozen hydrate-bearing sand upon heating and dissociation of pore gas hydrate. *Geosciences*, 13, 316. <https://doi.org/10.3390/geosciences13100316>
- Chuvilin E., Ekimova V., Davletshina D., Sokolova N., Bukhanov B. (2020). Evidence of gas emissions from permafrost in the Russian Arctic. *Geosciences*, 10, 383. <https://doi.org/10.3390/geosciences10100383>
- Chuvilin E.M., Bukhanov B.A. (2014). Changes in thermal conductivity of gas-saturated sediments during hydrate formation and freezing-thawing. Part 1. Research methods. *Earth's Cryosphere*, 18(1), pp. 70–76. (In Russ.)
- Chuvilin E.M., Davletshina D.A., Lupachik M.V. (2019). Hydrate formation in frozen and thawing methane-saturated sediments. *Earth's Cryosphere*, 23(2), pp. 50–61. (In Russ.)
- Chuvilin E.M., Grebenkin S.I. (2015). Experimental assessment of gas permeability of gas-saturated sediments during hydrate formation and freezing. *Earth's Cryosphere*, 19(2), pp. 67–74. (In Russ.)
- Chuvilin E.M., Grebenkin S.I., Zhmaev M.V. (2021). Gas permeability of sandy sediments: effects of phase changes in pore ice and gas hydrates. *Energy and Fuels*, 8, pp. 7874–7882. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c00366>
- Chuvilin E.M., Guryeva O.M. (2009). Experimental study of CO₂ hydrate formation in the pore space of freezing and frozen sediments. *Earth's Cryosphere*, 13(3), pp. 70–79. (In Russ.)
- Chuvilin E.M., Istomin V.A. (2012). Temperature dependence of the equilibrium pore water content in gas hydrate contained sediments. In: *Proc. 10th Int. Conf. on Permafrost* (Salekhard, June 25–29, 2012). Yamal-Nenets Autonomous District, Russia, vol. 2, p. 57–60.
- Chuvilin E.M., Yakushev V.S., Perlova E.V. (2000). Gas and possible gas hydrates in the permafrost of Bovanenkovo gas field, Yamal Peninsula, West Siberia. *Polarforschung*, 68, pp. 215–219.
- Collett T.S., Lee M.W., Agena W.F., Miller J.J., Lewis K.A., Zyrianova M.V., Boswell R., Inks T.L. (2011). Permafrost associated natural gas hydrate occurrences on the Alaskan North Slope. *Mar. Pet. Geol.*, 28, pp. 279–294. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2009.12.001>
- Dallimore S.R., Collett T.S. (1995). Intrapermast gas hydrates from a deep core hole in the Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada. *Geology*, 23, pp. 527–530. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1995\)023<0527:IGHFAD>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1995)023<0527:IGHFAD>2.3.CO;2)
- Dallimore S.R., Uchida T., Collett T.S. (1999). Scientific Results from JAPEx/JNOC/GSC Mallik 2L-38 Gas Hydrate Research Well, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada. Ottawa – Ontario: Natural Resources Canada, 403 p. <https://doi.org/10.4095/210723>
- Davletshina D.A., Chuvilin E.M. (2020). Experimental assessment of the possibility of gas hydrate formation in fine-grained soils at negative temperatures. *Earth's Cryosphere*, 24(4), pp. 25–33. (In Russ.)
- Ginsburg G.D., Novozhilov A.A. (1997). On hydrates in the depths of the Messoyakha field. *Gazovaya Promyshlennost*, 2, pp. 19–21. (In Russ.)
- Grebenkin S.I., Chuvilin E.M., Zhmaev M.V., Malik A.A. (2024). Experimental assessment of changes in geophysical characteristics of gas-saturated sandy rocks during ice and hydrate formation. *Proc. First Russian Gas Hydrate Conference “Gas hydrates – the energy of the future”*, Listvyanka, Baikal, pp. 99–103. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/cl-37274-2024-1-99-103>
- Istomin V.A., Yakushev V.S. (1992). Gas hydrates in natural conditions. Moscow: Nedra, 235 p. (In Russ.)
- Li B., Sun Y., Guo W., Shan X., Wang P., Pang Sh., Jia R., Zhang G. (2017). The mechanism and verification analysis of permafrost-associated gas hydrate formation in the Qilian Mountain, Northwest China. *Marine and Petroleum Geology*, 86, pp. 787–797. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.05.036>
- Makogon Yu.F. (1985). Gas hydrates, prevention of their formation and use. Moscow: Nedra, 232 p. (In Russ.)
- Makogon Yu.F., Omelchenko R.Yu. (2012). Messoyakha – gas hydrate deposit, role and significance. *Geologiya i Polez. Iskopaemye Mirovogo okeana*, 3, pp. 5–19. (In Russ.)
- Matveeva T.V., Logvina E.A., Nazarova O.V. (2024). Gas hydrates of water areas: methods and results of resource assessments. *Geologiya Nefti i Gaza*, 3, pp. 81–96. (In Russ.) <https://doi.org/10.47148/0016-7894-2024-3-81-96>
- Max D.M., Johnson A.H., Dillon W.P. (2013). Natural gas hydrate – Arctic Ocean deepwater resource potential. Dordrecht: Springer, 113 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-02508-7>
- Max M. (2000). Natural Gas Hydrate: In Oceanic and Permafrost Environments. Dordrecht: Springer, 419 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-4387-5>
- Ruppel C. (2015). Permafrost-associated gas hydrate: Is it really approximately 1% of the global system? *J. Chem. Eng. Data*, 60(2), pp. 429–436. <https://doi.org/10.1021/je500770m>
- Stern L.A., Kirby S.H., Durham W.B. (1996). Peculiarities of methane clathrate hydrate formation and solid-state deformation, and the associated superheating of water ice. *Science*, 273, pp. 1843–1848. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.273.5283.1843>
- Trofimuk A.A., Makogon Yu.F., Yakushev V.S. (1986). Influence of the dynamics of hydrate formation zones on the temperature regime of rocks in the permafrost area. *Geologiya i Geofizika*, 11, pp. 3–10. (In Russ.)
- Varenichev A.A., Gromova M.P., Potapov I.I. (2022). Forecast resources of methane from gas hydrate deposits. *Problemy Okruzhayushchey Sredy i Prirodnikh Resursov*, 8, pp. 3–44. (In Russ.) <https://doi.org/10.36535/0235-5019-2022-08-1>
- Wei N., Pei J., Li H., Zhou Sh., Zhao, J., Kvamme B., Coffin R.B., Zhang L., Zhang Y., Xue J. (2024). Classification of natural gas hydrate resources: Review, application and prospect. *Gas Science and Engineering*, 124, 205269. <https://doi.org/10.1016/j.jgsce.2024.205269>
- Yakushev V.S. (2009). Natural gas and gas hydrates in the cryolithozone. Moscow: VNIIGAZ, 192 p. (In Russ.)
- Yakushev V.S., Chuvilin E.M. (2000). Natural gas and hydrate accumulation within permafrost in Russia. *Cold Regions Science and Technology*, 149, pp. 46–50. [https://doi.org/10.1016/S0165-232X\(00\)00012-4](https://doi.org/10.1016/S0165-232X(00)00012-4)
- Yakushev V.S., Gafarov, S.M., Karnaukhov N.A. et al. (2014). Gas Hydrates in the Arctic and the World Ocean: Occurrence features and development prospects. Moscow: Nedra, 251 p. (In Russ.)
- Yamamoto K., Boswell R., Collett T., Dallimore S., Lu H. (2022). Review of past gas production attempts from subsurface gas. *Energy & Fuels*, 36(10), pp.5047–5062. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c04119>
- Yang J., Hassanpouryouzband A., Tohidi B., Chuvilin E., Bukhanov B., Istomin V., Cheremisin A. (2019). Gas hydrates in permafrost: distinctive effect of gas hydrates and ice on the geomechanical properties of simulated hydrate-bearing permafrost sediments. *JGR Solid Earth*, 124, pp. 2551–2563. <https://doi.org/10.1029/2018JB016536>

About the Authors

Evgeny M. Chuvilin – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Associate Professor, Leading Research Scientist, Center for Petroleum Science and Engineering, Skolkovo Institute of Science and Technology

11, Sikorskogo st., Skolkovo Information Center, Moscow, 121205, Russian Federation
e-mail: e.chuvilin@skoltech.ru

Boris A. Bukhanov – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Senior Research Scientist, Center for Petroleum Science and Engineering, Skolkovo Institute of Science and Technology

11, Sikorskogo st., Skolkovo Information Center, Moscow, 121205, Russian Federation

Sergey I. Grebenkin – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Research Scientist, Center for Petroleum Science and Engineering, Skolkovo Institute of Science and Technology

11, Sikorskogo st., Skolkovo Information Center, Moscow, 121205, Russian Federation

Maksim V. Zhmaev – Cand. Sci. (Engineering), Engineer, Center for Petroleum Science and Engineering, Skolkovo Institute of Science and Technology

11, Sikorskogo st., Skolkovo Information Center, Moscow, 121205, Russian Federation

Manuscript received 15 December 2024;

Accepted 25 March 2025; Published 20 September 2025

© 2025 The Authors. This article is published in open access under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)