

## ГАЗЫ И ГАЗОВЫЕ ГИДРАТЫ В КРИОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

УДК 551.345.3

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-1(57-63)

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА И ДАВЛЕНИЯ ГАЗА НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
ГАЗОНАСЫЩЕННОГО ПЕСЧАНОГО ГРУНТА  
В МЕРЗЛОМ И ТАЛОМ СОСТОЯНИЯХЕ.М. Чувилин<sup>1</sup>, Д.А. Давлетшина<sup>1,2</sup>, Б.А. Буханов<sup>1</sup>, С.И. Гребенкин<sup>1</sup>,  
М.В. Огиенко<sup>1</sup>, К. Бадец<sup>3</sup>, Ю.В. Станиловская<sup>3</sup><sup>1</sup> Сколковский институт науки и технологий,  
143026, Москва, Территория инновационного центра “Сколково”, ул. Нобеля, 3, Россия; e.chuvilin@skoltech.ru<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический ф-т,  
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия<sup>3</sup> Тоталь, 92078, Париж, Жан Миллер 2, Ла Дефанс, Франция

Представлены результаты экспериментального изучения влияния газового давления на теплопроводность и теплоемкость мерзлого и талого песчаного грунта, насыщенного различными газами: азотом, метаном, диоксидом углерода, а также смесью газов (50 % CH<sub>4</sub> + 50 % CO<sub>2</sub>). В экспериментах максимальное давление газа в грунтовых средах задавалось ниже давления образования газовых гидратов. Эксперименты проводились на специальной установке – в барокамере, позволяющей измерять теплопроводность и теплоемкость грунта под давлением газа при положительных и отрицательных температурах. Впервые получены экспериментальные данные по влиянию газового давления на теплопроводность и теплоемкость в промерзающей песчаной породе, насыщенной различными газами. В ходе экспериментов выявлено, что теплофизические характеристики газонасыщенного песчаного образца в талом состоянии практически не зависят от состава и давления газа. Установлено, что в мерзлом песчаном образце с повышением давления газа в ряду: N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, смесь газов CH<sub>4</sub> + CO<sub>2</sub> и CO<sub>2</sub> – теплопроводность снижается, а теплоемкость увеличивается. Наибольшее влияние на изменение теплофизических параметров оказывает диоксид углерода, что связано с достаточно высокой растворимостью данного газа в поровой воде и его влиянием на содержание незамерзшей воды в мерзлых породах.

*Газонасыщенный грунт, промерзание под давлением, экспериментальное моделирование, теплопроводность, теплоемкость, метан, диоксид углерода, азот*

INFLUENCE OF THE COMPOSITION AND PRESSURE OF GAS ON THERMOPHYSICAL PROPERTIES  
OF GAS-SATURATED FROZEN AND THAWED SANDSE.M. Chuvilin<sup>1</sup>, D.A. Davletshina<sup>1,2</sup>, B.A. Bukhanov<sup>1</sup>, S.I. Grebenkin<sup>1</sup>,  
M.V. Ogienko<sup>1</sup>, Ch. Badetz<sup>3</sup>, J.V. Stanilovskaya<sup>3</sup><sup>1</sup> Skolkovo Institute of Science and Technology,  
3, Nobil str., Skolkovo Innovation Center, Moscow, 143026, Russia; e.chuvilin@skoltech.ru  
<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia  
<sup>3</sup> Total S.A., 92078, Paris, 2 place Jean Millier, La Défense, France

Results of the experimental study of effects of the composition and pressure of gas on thermal conductivity and heat capacity of frozen and thawed sand saturated with different gases (nitrogen, methane, carbon dioxide, and a mixture of gases (50 % CH<sub>4</sub> + 50 % CO<sub>2</sub>)) have been presented. In the experiments, the maximum gas pressure was set below the pressure of formation of gas hydrate. The experiments were carried out in a specially designed system with a pressure chamber, which enabled measurements of thermophysical characteristics of the pressurized sediments at temperatures below and above freezing. The first ever data on the effect of gas pressure on thermal conductivity and heat capacity in the freezing sand saturated with different gases were obtained. The experiment results revealed that thermophysical characteristics of the unfrozen gas-saturated sand samples are practically independent of the composition and pressure of gas. It has been established that a pressure increase in some saturating gases (N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, a mixture of gases CH<sub>4</sub> + CO<sub>2</sub>, and CO<sub>2</sub>) was responded by a reduction in thermal conductivity of the frozen sand sample, against an increase in heat capacity. Carbon dioxide as highly soluble gas affecting the composition of unfrozen pore water, has the greatest influence on changes in the thermophysical parameters.

*Gas-saturated ground, freezing under gas pressure, experimental modeling, thermal conductivity, heat capacity, methane, carbon dioxide, nitrogen*

## ВВЕДЕНИЕ

Теплофизические свойства являются важными характеристиками промерзающих и протаивающих пород. Тепловое моделирование процессов промерзания газонасыщенных таликовых зон невозможно без знания закономерностей изменения теплофизических параметров газосодержащих отложений. Как известно, при промерзании газонасыщенных дисперсных пород часто происходит отжатие газовой компоненты фронтом промерзания (криогенное концентрирование), в результате чего в талой газонасыщенной зоне может создаваться избыточное поровое давление [Якушев, 2009; Чувиллин *et al.*, 2000; Краев *et al.*, 2017; Чувиллин, Давлетшина, 2018]. Так, благоприятным условием возникновения газового давления является промерзание газосодержащих пород таликовых зон в замкнутых условиях, например, подозерных несквозных таликов. При этом могут развиваться напорные процессы, выраженные в значительном повышении порового давления в промерзающем массиве и приводящие к грунтовым деформациям на поверхности, формированию бугров пучения и развитию трещинообразования [Геворкян, Корейша, 1993; Гречищев *et al.*, 2012], а также в ряде случаев к взрывному разрушению верхней части мерзлого грунта (с разбросом обломков и вывалов породы на несколько десятков метров от взорвавшейся структуры) и к образованию воронок газового выброса [Богоявленский, 2014; Богоявленский, Гарагаш, 2015; Кизяков *et al.*, 2015; Лейбман *et al.*, 2017; Хименков *et al.*, 2017; Buldovicz *et al.*, 2018]. Последнее можно рассматривать как источник риска для близлежащих инженерных сооружений. В этой связи разработка рекомендаций по прогно-

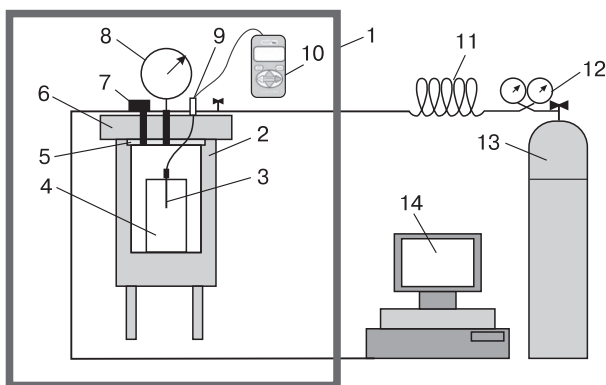
зированию возникновения и своевременному выявлению подобных “взрывоопасных” промерзающих газонасыщенных структур в районах хозяйственного освоения территории на севере Западной Сибири – актуальная и практически важная задача. Однако в настоящее время решение этой задачи невозможно без проведения теплового и геомеханического моделирования замкнутого промерзающего газовлагонасыщенного массива с учетом влияния нарастающего порового давления на фазовый состав вещества в порах, а также на теплофизические и физико-механические характеристики исследуемых пород.

Несмотря на актуальность и прикладную значимость, тепловые характеристики газосодержащих пород, тем более находящихся под давлением, на сегодня практически не изучены. Для промерзающих пород имеются лишь данные по влиянию степени заполнения пор водой или льдом при давлении, близком к атмосферному [Ершов *et al.*, 1987; Комаров, 2003; Чеверев, 2004]. В последние годы появились публикации, в которых представлены значения теплопроводности газонасыщенных донных отложений арктического шельфа [Чувиллин *et al.*, 2013; Чувиллин *et al.*, 2015], а также данные по теплопроводности газонасыщенных пород в талом состоянии в зависимости от состава газовой компоненты [Чувиллин, Bukhanov, 2017].

В целом имеющиеся экспериментальные данные не позволяют оценить влияние компонентного состава и давления газа на теплофизические характеристики промерзающих газонасыщенных пород с учетом изменения количества жидкой фазы в газонасыщенных грунтовых средах в условиях увеличения давления [Истомин *et al.*, 2018]. Предлагаемая постановка экспериментальных исследований теплофизических характеристик газонасыщенных дисперсных пород под давлением является пионерной не только в России, но и за рубежом.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальное определение теплофизических характеристик в газонасыщенной дисперсной породе под давлением газа проводилось на специально созданной экспериментальной установке (рис. 1), состоящей из климатической камеры (объемом 0.5 м<sup>3</sup>), при помощи которой задавалась необходимая температура, оригинальной барокамеры, оснащенной системой подачи газа и регистрации температуры и давления в грунтовой образце и специальным датчиком измерения теплопроводности и теплоемкости. Запись изменения термобарических условий в барокамере с образцом осуществлялась с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП), который подключался к компьютеру.



**Рис. 1. Схема экспериментальной установки:**

1 – климатическая камера; 2 – барокамера; 3 – датчик теплопроводности и теплоемкости; 4 – контейнер с грунтом; 5 – тefлоновые прокладки; 6 – стальная крышка; 7 – датчик давления; 8 – цифровой манометр; 9 – разъем для вывода датчика теплопроводности; 10 – прибор KD-2 Pro; 11 – газопроводная трубка; 12 – редуктор; 13 – баллон с газом; 14 – компьютер с АЦП.

В барокамеру рабочим объемом около 0.7 л (высота 100 мм, диаметр 91 мм) помещали в контейнер (высота 100 мм, диаметр 45 мм) с образцом влажного грунта. Внутри образца устанавливали датчик (зонд SH-1) портативного прибора KD-2 Pro для измерения теплофизических характеристик. Размеры зонда (длина и диаметр): 30 × 1.3 мм. Точность измерения теплопроводности и объемной теплоемкости составляет до 10 %, время одного замера около 2 мин. Опыт использования прибора KD-2 Pro для исследования мерзлых, талых и гидратосодержащих пород при атмосферном давлении описан в работах Е.М. Чувилина и Б.А. Буханова [Чувилин, Буханов, 2013; Chuvilin et al., 2015; Chuvilin, Bukhanov, 2019].

Объектом исследования был природный песчаный грунт нарушенного сложения, ледово-морского генезиса ( $gmQ_{II}^{2-4}$ ), отобранный при бурении параметрических скважин в пределах Харасавэйского нефтегазоконденсатного месторождения. Минеральный состав грунта определялся методом рентгеновской дифрактометрии. Согласно ГОСТ 12536-2014 [2014], определялся гранулометрический состав мелко- и среднезернистого песка (по классификации Е.М. Сергеева):

|                                     |       |          |          |          |           |            |             |        |
|-------------------------------------|-------|----------|----------|----------|-----------|------------|-------------|--------|
| Распределение частиц по фракциям, % | 1.7   | 44.5     | 40.5     | 5.2      | 4.1       | 1.0        | 1.0         | 2.0    |
| Диаметр частиц, мм                  | 1–0.5 | 0.5–0.25 | 0.25–0.1 | 0.1–0.05 | 0.05–0.01 | 0.01–0.005 | 0.005–0.001 | <0.001 |

Согласно ГОСТ 5180-2015 [2015] и СНиП 2.02.04-88 [1990], физические характеристики исследуемого образца: влажность 16 %, плотность 2.05 г/см<sup>3</sup>, пористость 0.34, степень заполнения пор водой 0.83, удельная поверхность 0.3 м<sup>2</sup>/г. Песок состоит преимущественно из кварца (94 %), также содержится каолинит и хлорит (3 %), микроклин (2 %), иллит (0.5 %) и незначительные следы амфибола. Засоленность по данным химического анализа водной вытяжки составляет 0.07 %.

Сводный состав солей водной вытяжки (мг-экв./100 г):  $HSO_3^-$  0.09,  $Cl^-$  0.27,  $SO_4^{2-}$  0.12,  $Ca^{2+}$  0.09,  $Na^+ + K^+$  0.35,  $Mg^{2+}$  0.04; сухой остаток (сумма всех солей) 67.5 мг; pH 7.1.

Методика экспериментального определения теплопроводности и теплоемкости исследуемой породы под давлением газа включала подготовку грунтового образца с заданной влажностью. Влажность достигалась перемешиванием воздушно-сухого грунта с дистиллированной водой. Полученная грунтовая масса выстаивалась в течение 0.5 ч при комнатной температуре для равномерного распределения воды. Затем готовили образец методом послойного уплотнения этого грунта в контейнер [Чувилин, Гурьева, 2009].

Подготовленный грунтовой образец помещали в барокамеру, которая герметизировалась и вакуумировалась, после чего барокамера с образцом

заполнялась определенным газом до давления ниже давления гидратообразования. Барокамера устанавливалась в климатическую камеру.

В начале эксперимента теплофизические характеристики грунтового образца измерялись в условиях атмосферного давления при положительной и затем отрицательной (–6 °С) температуре. В дальнейшем в барокамеру подавали холодный газ (–6 °С) до максимального для данного газа давления и проводили цикл нагревания–охлаждения (–6...+10 °С) с непосредственным измерением теплопроводности и теплоемкости на стадии до и после промерзания. Затем давление газа в барокамере при температуре +10 °С ступенчато снижали, при этом для каждой ступени производили цикл нагревания и охлаждения с замерами теплофизических характеристик.

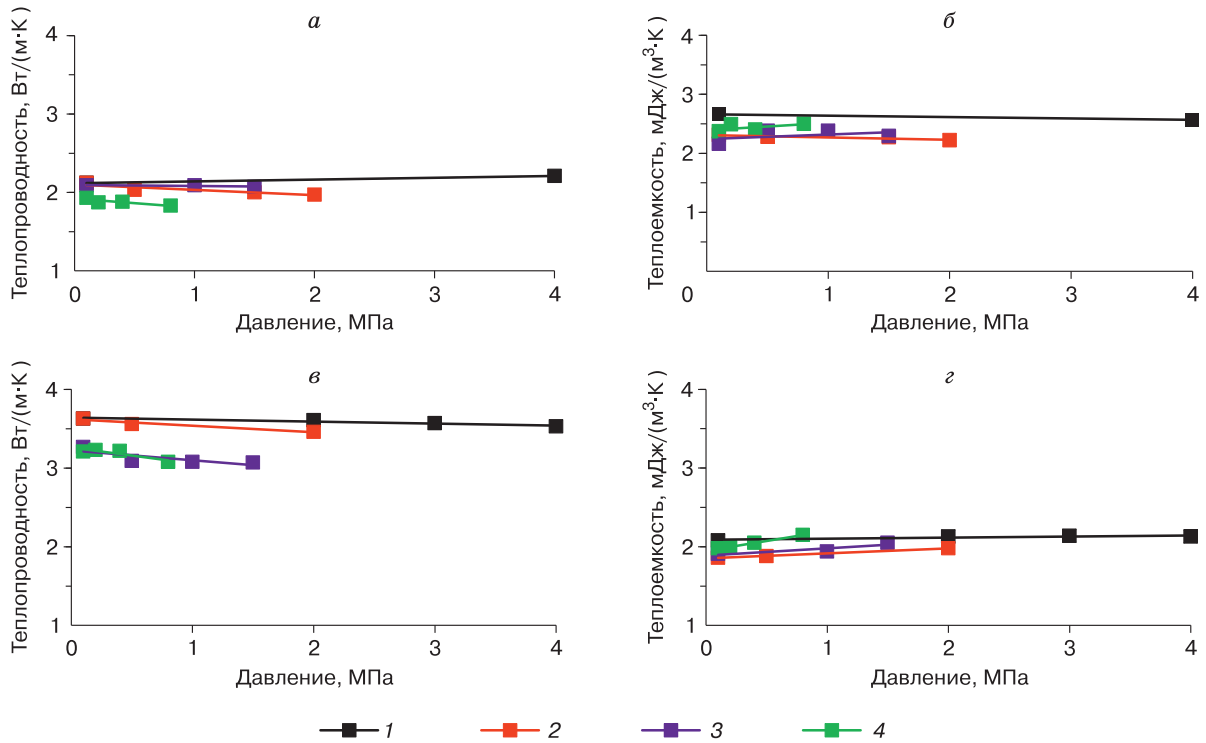
В экспериментах использовали газы в следующем порядке: азот N<sub>2</sub>, метан CH<sub>4</sub>, смесь метана и диоксида углерода (CH<sub>4</sub> + CO<sub>2</sub>) в соотношении (%) 50:50 и диоксид углерода CO<sub>2</sub>. Перед подачей нового типа газа барокамера с образцом вакуумировалась. В зависимости от типа газа величина газового давления задавалась в диапазоне: от 0.1 до 4 МПа для N<sub>2</sub>, от 0.1 до 2 МПа для CH<sub>4</sub>, от 0.1 до 0.8 МПа для CO<sub>2</sub> и от 0.1 до 1.5 МПа для смеси 50 % CH<sub>4</sub> + 50 % CO<sub>2</sub>. Давление для всех типов газов задавалось ниже равновесного давления гидратообразования.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты экспериментального исследования влияния газового давления на теплопроводность и теплоемкость газонасыщенного грунта приведены на рис. 2 и в таблице.

Полученные экспериментально значения теплофизических характеристик песчаного образца, насыщенного разными газами, показывают, что теплопроводность влажного песчаного образца после промораживания закономерно повышается (см. рис. 2, а, в), а удельная теплоемкость понижается (см. рис. 2, б, г). Влияние газового давления и типа газа на теплофизические свойства песчаного образца наиболее отчетливо проявляется для мерзлого состояния образца (см. таблицу).

В случае насыщения азотом образца песка (влажность  $W = 16\%$ ) при его переходе из талого состояния в мерзлое (–6 °С) наблюдается увеличение теплопроводности на 60–70% и снижение теплоемкости на 15–20%. При этом в мерзлом состоянии с повышением давления N<sub>2</sub> до 4 МПа отмечена слабая тенденция снижения теплопроводности на 2–3%. Коэффициент понижения теплопроводности  $\lambda$  от давления газа определялся как отношение теплопроводности к заданному диапазону газового давления. В насыщенном газом мерзлом образце ( $W = 16\%$ ) коэффициент  $\lambda$  со-



**Рис. 2.** Изменение теплопроводности и теплоемкости газонасыщенного песка ( $W = 16\%$ ) в талом (а, б) и мерзлом (в, г) состоянии от газового давления.

Состав газа: 1 –  $N_2$ ; 2 –  $CH_4$ ; 3 –  $CH_4 + CO_2$ ; 4 –  $CO_2$ .

ставляет [(Вт/(м·К))/МПа]:  $N_2 - 0.03$ ,  $CH_4 - 0.08$ ,  $CH_4 + CO_2 - 0.13$ ,  $CO_2 - 0.2$ .

Теплоемкость мерзлого песчаного образца, насыщенного азотом, с увеличением давления

**Влияние состава и давления газа на теплопроводность ( $\lambda$ ) и теплоемкость ( $C$ ) газонасыщенного песчаного грунта ( $W = 16\%$ ) до и после промерзания**

| Тип газа      | Давление, МПа | До промерзания       |                  | После промерзания    |                  |
|---------------|---------------|----------------------|------------------|----------------------|------------------|
|               |               | $\lambda$ , Вт/(м·К) | $C$ , мДж/(м³·К) | $\lambda$ , Вт/(м·К) | $C$ , мДж/(м³·К) |
| $N_2$         | 0.1           | 2.12                 | 2.66             | 3.63                 | 2.08             |
|               | 2.0           | –                    | –                | 3.61                 | 2.13             |
|               | 3.0           | –                    | –                | 3.57                 | 2.14             |
|               | 4.0           | 2.21                 | 2.57             | 3.53                 | 2.13             |
| $CH_4$        | 0.1           | 2.12                 | 2.31             | 3.63                 | 1.86             |
|               | 0.5           | 2.03                 | 2.28             | 3.56                 | 1.88             |
|               | 1.5           | 2.00                 | 2.27             | –                    | –                |
|               | 2.0           | 1.97                 | 2.22             | 3.46                 | 1.98             |
| $CH_4 + CO_2$ | 0.1           | 2.09                 | 2.16             | 3.27                 | 1.91             |
|               | 0.5           | –                    | 2.38             | 3.09                 | –                |
|               | 1.0           | 2.09                 | 2.38             | 3.08                 | 1.94             |
|               | 1.5           | 2.07                 | 2.29             | 3.07                 | 2.05             |
| $CO_2$        | 0.1           | 1.93                 | 2.37             | 3.21                 | 1.98             |
|               | 0.2           | 1.87                 | 2.49             | 3.23                 | 1.99             |
|               | 0.4           | 1.88                 | 2.40             | 3.22                 | 2.05             |
|               | 0.8           | 1.83                 | 2.50             | 3.08                 | 2.15             |

до 4 МПа незначительно повышается (около 0.02 мДж/(м³·К) на 1 МПа).

Теплопроводность насыщенного метаном мерзлого песка при повышении давления газа до 2 МПа понижается на 2–5 %. Коэффициент понижения теплопроводности от давления в насыщенном  $CH_4$  образце составил 0.08 (Вт/(м·К))/МПа. Теплоемкость данного песчаного образца в мерзлом состоянии с повышением давления газа до 2 МПа меняется слабо ( $\leq 6\%$ ). Коэффициент повышения теплоемкости составляет 0.05 (мДж/(м³·К))/МПа.

Теплопроводность насыщенного смесью газов 50 %  $CH_4 + 50\%$   $CO_2$  песка при переходе из талого состояния в мерзлое увеличивается на 45–55 %. При увеличении давления этой смеси газов от 0.1 до 1.5 МПа величина теплопроводности мерзлого образца закономерно понижается примерно на 6–7 %, коэффициент понижения теплопроводности составил 0.13 (Вт/(м·К))/МПа. При этом повышение теплоемкости мерзлого песка в заданном диапазоне давлений достигает 7 % (около 0.08 мДж/(м³·К) на 1 МПа).

При насыщении песчаного образца чистым  $CO_2$  увеличение теплопроводности при переходе его из талого состояния в мерзлое составляет 65–75 %. В исследуемом диапазоне давлений (0.1–0.8 МПа) коэффициент понижения теплопро-

водности составляет  $0.2 \text{ (Вт/(м}\cdot\text{К))}/\text{МПа}$ , коэффициент повышения теплоемкости равен  $0.26 \text{ (мДж/(м}^3\cdot\text{К))}/\text{МПа}$ . Такие тенденции в первую очередь связаны со снижением температуры начала замерзания и увеличением содержания незамерзшей воды в мерзлых породах при повышении давления диоксида углерода [Истомин и др., 2018; Чувилин и др., 2019].

Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что теплопроводность исследуемого песчаного образца в мерзлом состоянии под давлением различных газов закономерно выше, чем в талом. Это объясняется прежде всего большим различием значений теплопроводности воды в жидком и твердом состояниях.

Теплопроводность и теплоемкость песчаного образца, насыщенного газами в мерзлом состоянии, в большей степени зависят от величины давления и химического состава газа, чем в талом. Влияние давления на снижение теплопроводности и повышение теплоемкости газонасыщенного мерзлого образца увеличивается в следующем ряду:  $\text{N}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CH}_4 + \text{CO}_2$ ,  $\text{CO}_2$ . При этом коэффициент понижения теплопроводности от давления меняется практически на порядок – от 0.03 до 0.2  $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}/\text{МПа}$ . Значительное влияние  $\text{CO}_2$  на теплофизические свойства мерзлого песка связано с достаточно высокой растворимостью данного газа в поровой воде [Истомин и др., 2018] и его способностью повышать содержание незамерзшей воды в мерзлом грунте при увеличении давления. Кроме того, на теплофизические свойства мерзлого газонасыщенного песка под газовым давлением оказывают влияние другие факторы, такие как теплофизические свойства газов [Варгафтик, 1972; Варгафтик и др., 1990; Бабичев и др., 1991]. Так, по данным А.П. Бабичева с соавт. [1991], теплопроводность в ряду  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}_2$  снижается и составляет 0.0342, 0.0257 и 0.016  $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$  соответственно при 0.1 МПа и комнатной температуре. Отмечено, что с увеличением газового давления до 4 МПа теплопроводность используемых газов повышается незначительно [Варгафтик, 1972]. Определенное влияние оказывают также структурно-текстурные характеристики мерзлого образца, связанные с особенностями кристаллизации поровой воды при замораживании. На теплофизические свойства газонасыщенного грунта при отрицательных температурах будет оказывать особое влияние содержание незамерзшей воды, зависящее от давления, величины отрицательной температуры и типа газа, однако это требует специального исследования.

## ВЫВОДЫ

В ходе экспериментального исследования разработана методика определения теплофизических параметров газонасыщенного грунта при по-

ложительных и отрицательных температурах под газовым давлением ниже давления гидратообразования. На ее основе впервые получены экспериментальные данные по влиянию газового давления на теплопроводность и теплоемкость мерзлого и талого песчаного грунта, насыщенного азотом, метаном, смесью газов (50 %  $\text{CH}_4 + 50 \text{ % CO}_2$ ), а также диоксидом углерода.

Показано, что теплопроводность и теплоемкость газонасыщенного песчаного образца в талом состоянии практически не зависят от состава и давления газа. При этом при переходе из талого состояния в мерзлое теплопроводность газонасыщенной песчаной породы, находящейся под газовым давлением, повышается на 35–70 %, а удельная теплоемкость понижается на 10–20 %.

Выявлено, что в мерзлом состоянии теплофизические характеристики песчаного образца, насыщенного газами, зависят от величины давления и химического состава газа. Установлено, что в ряду  $\text{N}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , смесь газов ( $\text{CH}_4 + \text{CO}_2$ ) и  $\text{CO}_2$  с повышением давления теплопроводность газонасыщенного мерзлого образца снижается, а его теплоемкость увеличивается. Коэффициент понижения теплопроводности от давления в этом ряду меняется от 0.03 до 0.2  $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$  на 1 МПа, а коэффициент повышения теплоемкости – от 0.02 до 0.26  $\text{мДж/(м}^3\cdot\text{К)}$ .

Показано, что при появлении в грунте газа  $\text{CO}_2$  величина теплопроводности мерзлого песка снижается примерно на 10 % по сравнению с данными, полученными при насыщении песчаного образца азотом и метаном. Такой эффект связан со снижением температуры начала замерзания и увеличением содержания незамерзшей воды в мерзлых породах при повышении давления  $\text{CO}_2$ .

*Работа выполнена в результате сотрудничества Сколковского института науки и технологии (Сколтех) и компании Тоталь (Франция). Часть исследований выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант 16-17-00051).*

## Литература

- Бабичев А.П.** Физические величины. Справочник / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др. М., Энергоатомиздат, 1991, 1232 с.
- Богоявленский В.И.** Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала и Таймыра. Часть 2 // Бурение и нефть, 2014, № 10, с. 4–8.
- Богоявленский В.И., Гарагаш И.А.** Обоснование процесса образования кратеров газового выброса в Арктике математическим моделированием // Арктика: экология и экономика, 2015, № 3 (19), с. 12–17.
- Варгафтик Н.Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. 2-е изд. М., Наука, 1972, 720 с.
- Варгафтик Н.Б.** Справочник по теплопроводности жидкостей и газов / Н.Б. Варгафтик, Л.П. Филипов, А.А. Тарзиманов, Е.Е. Тоцкий. М., Энергоатомиздат, 1990, 352 с.

**Геворкян С.Г., Корейша М.М.** Взрывы бугров пучения // *Материалы гляциол. исслед.*, 1993, вып. 77, с. 120–130.

**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.

**Гречищев С.Е., Брушков А.В., Павлов Арк.В., Гречищева О.В.** Экспериментальное изучение криогенного давления в промерзающих влагонасыщенных засоленных грунтах // *Криосфера Земли*, 2012, т. XVI, № 1, с. 33–36.

**Ершов Э.Д.** Петрография мерзлых пород / Э.Д. Ершов, И.Д. Данилов, В.Г. Чеверев. М., Изд-во Моск. ун-та, 1987, 311 с.

**Истомин В.А., Чувилин Е.М., Сергеева Д.В. и др.** Влияние компонентного состава и давления газа на льдо- и гидратообразование в газонасыщенных поровых растворах // *Нефтегазохимия*, 2018, № 2, с. 33–42.

**Кизяков А.И., Солюшкин А.В., Лейбман М.О. и др.** Геоморфологические условия образования воронки газового выброса и динамика этой формы на Центральном Ямале // *Криосфера Земли*, 2015, т. XIX, № 2, с. 15–25.

**Комаров И.А.** Термодинамика и тепломассообмен в дисперсных мерзлых породах. М., Науч. мир, 2003, 608 с.

**Лейбман М.О., Дворников Ю.А., Хомутов А.В. и др.** Водно-химические особенности воды озер и воронок газового выброса, вложенных в морские отложения севера Западной Сибири // *Геология морей и океанов: Материалы XXII Междунар. науч. конф. (школы) по морской геологии*. М., ИО РАН, 2017, т. 4, с. 117–121.

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

**Хименков А.Н., Сергеев Д.О., Станюковская Ю.В. и др.** Газовые выбросы в криолитозоне, как новый вид геологических опасностей // *Геориск*, 2017, № 3, с. 58–65.

**Чеверев В.Г.** Природа криогенных свойств грунтов. М., Науч. мир, 2004, 234 с.

**Чувилин Е.М., Буханов Б.А.** Экспериментальное изучение теплопроводности мерзлых гидратосодержащих грунтов при атмосферном давлении // *Криосфера Земли*, 2013, т. XVII, № 1, с. 69–79.

**Чувилин Е.М., Буханов Б.А., Тумской В.Е. и др.** Теплопроводность донных отложений в районе губы Буор-Хая (шельф моря Лаптевых) // *Криосфера Земли*, 2013, т. XVII, № 2, с. 32–41.

**Чувилин Е.М., Гурьева О.М.** Экспериментальное изучение образования гидратов CO<sub>2</sub> в поровом пространстве промерзающих и мерзлых пород // *Криосфера Земли*, 2009, т. XIII, № 3, с. 70–79.

**Чувилин Е.М., Давлетшина Д.А., Буханов Б.А. и др.** Экспериментальное изучение влияния состава и давления газа на температуру замерзания поровой воды в газонасыщенных породах // *Криосфера Земли*, 2019, т. XXIII, № 5, с. 49–57.

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

**Buldovitz S.N., Khilimonuk V.Z., Vyckov A.Y. et al.** Cryovolcanism on the Earth: Origin of a spectacular crater in the Yamal Peninsula (Russia) // *Sci. Repts.*, 2018, vol. 8 (1), <https://doi.org/10.1038/s41598-018-31858-9>.

**Chuvilin E.M., Bukhanov B.A.** Effect of hydrate accumulation conditions on thermal conductivity of gas-saturated soils // *Energy Fuels*, 2017, No. 31, p. 5246–5254.

**Chuvilin E.M., Bukhanov B.A.** Thermal conductivity of frozen sediments containing self-preserved pore gas hydrates at atmospheric pressure: An experimental study // *Geosciences*, 2019, vol. 9, No. 2, p. 65, <https://doi.org/10.3390/geosciences9020065>.

**Chuvilin E.M., Bukhanov B.A., Grebenkin S.I. et al.** Thermal conductivity of bottom sediments in the East Siberian Arctic seas: a case study in the Buor-Khaya Bay // *Conf. GEOQuebec2015 (Quebec, Canada, Sept. 20–23, 2015)*, Quebec, 2015, p. 7.

**Chuvilin E.M., Davletshina D.A.** Formation and accumulation of pore methane hydrates in permafrost: experimental modeling // *Geosciences*, 2018, vol. 8, No. 12, p. 467, <https://doi.org/10.3390/geosciences8120467>.

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

**Kraev G., Schulze E.-D., Yurova A. et al.** Cryogenic displacement and accumulation of biogenic methane in frozen soils // *Atmosphere*, 2017, No. 8, p. 105, <https://doi.org/10.3390/atmos8060105>.

## References

Babichev A.P., Babushkin N.A., Bratkovskii A.M. et al. *Fizicheskie velichiny [Physical Values. Reference book]*. Moscow, Energoatomizdat, 1991, 1232 p. (in Russian).

Bogoyavlenskiy V.I. Threat of catastrophic gas blowouts from the Arctic permafrost zone. Yamal and Taimyr Craters, Part 2. *Burenie i Neft' [Oil Drill]*, 2014, No. 10, p. 4–8.

Bogoyavlenskiy V.I., Garagash I.A. Justification of the gas emission craters formation process in the Arctic by mathematical modeling. *Arktika: Ekologiya i Ekonomika [Arctic: Ecology and Economics]*, 2015, No. 3 (19), p. 12–17.

Vargaftik N.B. *Spravochnik po teplofizicheskim svoistvam gazov i zhidkostei [Reference Book on Thermophysical Properties of Gases and Liquids]*. Moscow, Nauka, 1972, 720 p. (in Russian).

Vargaftik N.B., Filipov L.P., Tarzimanov A.A., Tot'skiy E.E. *Spravochnik po teploprovodnosti zhidkostei i gazov [Reference Book on Thermal Conductivity of Liquids and Gases]*. Moscow, Energoatomizdat, 1990, 352 p. (in Russian).

Gevorkyan S.G., Koreisha M.M. Explosive failure of frost heave mounds. *Materialy glyaciologicheskikh issledovaniy [Materials of Glaciological Studies]*, 1993, vol. 77, p. 120–130.

State Standard, 2014. Working Document GOST 12536-2014. Soils. Methods of Laboratory Grain-Size and Microaggregate Determination. Moscow, Standards Publishing, 24 p. (in Russian).

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

Grechishchev S.E., Brushkov A.V., Pavlov Ark.V., Grechishcheva O.V. Experimental study of cryogenic pressure in the frozen moisture-saturated saline soils. *Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere]*, 2012, vol. XVI, No. 1, p. 33–36.

Ershov E.D., Danilov I.D., Cheverev V.G. *Petrography of Frozen Soils*. Moscow, Moscow University Press, 1987, 311 p. (in Russian).

Istomin V.A., Chuvilin E.M., Sergeeva D.V. et al. Influence of component composition and pressure of gas on ice and hydrate formation in gas-saturated pore solutions. *Neftegazokhimiya [Oil and Gas Chemistry]*, 2018, No. 2, p. 33–42.

Kizyakov A.I., Sonyushkin A.V., Leibman M.O. et al. Geomorphological conditions of the gas-emission crater and its dynamics in Central Yamal. *Earth's Cryosphere*, 2015, vol. XIX, No. 2, p. 13–22.

- Komarov I.A. Thermodynamics and Heat and Mass Exchange in Dispersive Frozen Soils. Moscow, Nauchnyi Mir, 2003, 608 p. (in Russian).
- Leibman M.O., Dvornikov Y.A., Khomutov A.V. et al. Hydrochemical features of water in lakes and gas-emission craters embedded in the marine deposits of West-Siberian North. In: Proc. of the XXII Intern. Conference on Marine Geology (Moscow, Nov. 20–24, 2017), Moscow, 2017, p. 117–121 (in Russian).
- SNIP 2.02.04-88. Foundation Beds and Foundations in Permafrost Soils. Moscow, Gosstroy, 1990, 52 p. (in Russian).
- Khimenkov A.N., Sergeev D.O., Stanilovskaya Yu.V., Vlasov A.N., Volkov-Borodskiy D.B. Gas emissions in the cryolithozone as a new type of geocryological hazards. Georisk, 2017, No. 3, p. 58–65.
- Cheverev V.G. The Nature of the Cryogenic Properties of Soils. Moscow, Nauchnyi Mir, 2004, 234 p. (in Russian).
- Chuvilin E.M., Bukhanov B.A. Experimental study of the thermal conductivity of frozen hydrate-saturated sediments at atmospheric pressure. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2013, vol. XVII, No. 1, p. 69–79.
- Chuvilin E.M., Bukhanov B.A., Tumskoy V.E. et al. Thermal conductivity of bottom sediments in the region of Buor-Khaya Bay (shelf of the Laptev Sea). Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2013, vol. XVII, No. 2, p. 32–41.
- Chuvilin E.M., Guryeva O.M. Experimental investigation of CO<sub>2</sub> gas hydrate formation in porous media of frozen and freezing sediments. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2009, vol. XIII, No. 3, p. 70–79.
- Chuvilin E.M., Davletshina D.A., Bukhanov B.A. et al. Effect of gas composition and pressure on pore water freezing point in gas-saturated sediments: An experimental study. Earth's Cryosphere, 2019, vol. XXIII, No. 5, p. 49–57.
- Yakushev V.S. Prirodnyi gaz i gazovye gidraty v kriolitozone [Natural Gas and Gas Hydrates in Cryolithozone]. Moscow, VNIIGAZ, 2009, 192 p. (in Russian).
- Buldovits S.N., Khilimonyuk V.Z., Bychkov A.Y. et al. Cryovolcanism on the Earth: Origin of a spectacular crater in the Yamal Peninsula (Russia). Sci. Repts., 2018, vol. 8 (1), <https://doi.org/10.1038/s41598-018-31858-9>.
- Chuvilin E.M., Bukhanov B.A. Effect of hydrate accumulation conditions on thermal conductivity of gas-saturated soils. Energy Fuels, 2017, No. 31, p. 5246–5254.
- Chuvilin E.M., Bukhanov B.A. Thermal conductivity of frozen sediments containing self-preserved pore gas hydrates at atmospheric pressure: An experimental study. Geosciences, 2019, vol. 9, No. 2, p. 65, <https://doi.org/10.3390/geosciences9020065>.
- Chuvilin E.M., Bukhanov B.A., Grebenkin S.I. et al. Thermal conductivity of bottom sediments in the East Siberian Arctic seas: a case study in the Buor-Khaya Bay. In: Conf. GEOQuebec2015 (Quebec, Canada, Sept. 20–23, 2015), Quebec, 2015, p. 7.
- Chuvilin E.M., Yakushev V.S., Perlova E.V. Gas hydrates in the permafrost of Bovanenkovo gas field, Yamal Peninsula, West Siberia. Polarforschung, 2000, vol. 68, p. 215–219.
- Chuvilin E.M., Davletshina D.A. Formation and accumulation of pore methane hydrates in permafrost: experimental modeling. Geosciences, 2018, vol. 8, No. 12, p. 467, <https://doi.org/10.3390/geosciences8120467>.
- Kraev G., Schulze E.-D., Yurova A. et al. Cryogenic displacement and accumulation of biogenic methane in frozen soils. Atmosphere, 2017, No. 8, p. 105, <https://doi.org/10.3390/atmos8060105>.

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