НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ

Криосфера Земли, 2015, т. XIX, № 2, с. 75–80 **http://www.izdatgeo.ru**

НАДЕЖНОСТЬ ОСНОВАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ В КРИОЛИТОЗОНЕ

УДК 624.139.64

К ПРОБЛЕМЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ХЛАДОРЕСУРСА СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ ГРУНТОВ

И.А. Комаров, В.В. Ананьев*, Д.Д. Бек

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический ф-т, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; ilya_komarov@mail.ru
** ООО "РИВСМАШ", 129626, Москва, пр. Мира, 102, стр. 2, Россия; vvanord@yandex.ru*

Обсуждается возможность использования хладоресурса сжиженного газа для повышения надежности круглогодичного функционирования оснований инфраструктуры газовых месторождений, с последующей утилизацией газа. Приведены результаты математического моделирования температурного и водно-солевого режима грунтовых оснований с учетом наличия линз криопэгов в разрезе. Оценены возникающие при этом напряжения, что позволяет найти оптимальные значения входной в термостабилизатор температуры с целью минимизации процесса морозобойного растрескивания.

Термостабилизация грунтов, сжиженный газ, всесезонный термостабилизатор, засоленные грунты, криопэги, морозобойное растрескивание, температурный удар

PROBLEM OF UTILIZATION OF THE COOLING CAPACITY OF NATURAL LIQUID GAS FOR THE TERMOSTABILIZATION OF GROUND

I.A. Komarov, V.V. Ananiev*, D.D. Bek

Lomonosov Moscow State University, Department of Geology, 119991, Moscow, Leninskie Gory, 1, Russia; ilya_komarov@mail.ru
** JSC "RIVSMASH", 129626, Moscow, Mira av., 102, build. 2, Russia; vvanord@yandex.ru*

The possibility of using cooling capacity of liquid gas to increase the all-season operational reliability of the ground bases of the gas field infrastructure with possible subsequent gas utilization is discussed. The results of the mathematical modeling of the temperature and water-salt regime of ground bases in the presence of cryopegs are presented. The accompanying tensions are also assessed, which allows defining the optimum values of thermostabilizer inlet temperature for the purpose of minimization of the frost cracking process.

Thermostabilization of the ground, liquefied gas, all-season thermostabilizer, salted ground, cryopegs, frost cracking, temperature shock

ВВЕДЕНИЕ

Тепловое взаимодействие грунтов с инженерными сооружениями в районах распространения многолетнемерзлых пород (ММП) приводит к уменьшению несущей способности грунтовых оснований за счет перехода грунтов в пластичномерзлое состояние или их оттаивания. Существенное негативное влияние на этот процесс оказывает засоленность грунтов, которые могут вмещать криопэги, что характерно для шельфа северных морей, приморских равнин (п-ов Ямал и др.). Криопэги залегают на разной глубине в виде изолированных линз, не имеющих связи друг с другом, с поверхностными и подземными водами. По своему химическому составу криопэги близки к морским водам, их минерализация составляет, как правило, 10–250 г/л, а состав преимущественно хлоридно-натриевый с незначительным количеством сульфатов. Засоленность верхних придонных слоев шельфа северных морей сопоставима со степенью минерализации морской воды.

При проектировании и эксплуатации объектов инфраструктуры газоконденсатных месторождений, расположенных в районах распространения ММП, одним из способов минимизации такого негативного влияния является применение устройств для термостабилизации грунтов. При способе строительства с сохранением основания в мерзлом состоянии используются: хладопотенциал атмосферного воздуха в зимний период на базе сезонных охлаждающих парожидкостных

© И.А. Комаров, В.В. Ананьев, Д.Д. Бек, 2015

устройств вертикального и горизонтального типа естественной циркуляции; машинные методы охлаждения с принудительной вентиляцией хладагента.

Перспективным решением проблемы повышения надежности круглогодичного функционирования оснований инфраструктуры на пластично-мерзлых и засоленных грунтах может оказаться частичное использование хладоресурса целевого продукта – сжиженного природного газа (СПГ), а также продуктов его ректификации (этана и пропана), имеющих низкую в отрицательном диапазоне температуру кипения.

Технологическая норма хранения СПГ оценивается значением величины суточной испаряемости резервуара хранения, что составляет 0,1 % от массы сжиженного газа в одном резервуаре. Эта потеря образуется за счет теплопритоков из окружающей среды в резервуар, в котором находится СПГ при температуре –163 °С. По предварительным расчетам суточный расход СПГ на цели термостабилизации ММП составляет до 0,15 % от массы сжиженного газа. Предлагается использовать эти технологические утечки газа для целей термостабилизации грунтов. В отличие от обычных сезонных термостабилизаторов, применение холодильного потенциала комплекса СПГ позволяет: обеспечить надежную эксплуатацию сооружения круглогодично и независимо от климатических условий; утилизировать отбираемый газ для охлаждения грунтового основания путем его последующего сжатия и сжижения; обеспечить значительно более высокий темп промораживания грунта с минимизацией эффекта пучения грунта за счет уменьшения величины мигрирующего к фронту промерзания подтока воды; проморозить линзы криопэгов любых концентраций. Возможно использование хладоресурса СПГ для локальных целей термостабилизации грунтовых оснований при ликвидации форс-мажорных ситуаций. По сравнению с методами машинного охлаждения грунта применение отходящих потоков испарения СПГ с последующей их утилизацией даст экономический эффект. Источником повышения эффективности СПГ является потенциальная возможность введения в технологическую схему термостабилизации грунтовых оснований дополнительного контура для целей извлечения из газообразного потока редких инертных газов (ксенона и др.). Соответствующие установки в РФ имеются.

Однако использование СПГ в качестве хладагента в конструкции устройства всесезонного термостабилизатора (ТС) может привести и к негативным процессам: 1) трещинообразованию на границе “стенка термостабилизатора–грунт”, связанному с возникновением больших градиентов температуры (тепловой удар); 2) морозобойному растрескиванию грунта в междусвайном пространстве при различной в плане и по глубине геометрии компоновки кустов ТС и свай. В связи с чем необходимо особое внимание обратить на выбор оптимального значения величины входной в ТС температуры газа и конструктивных решений с целью недопущения (минимизации) процессов трещинообразования.

В отечественной практике отсутствует методика использования рекуперативных охлаждающих устройств на СПГ для промораживания грунтов. Имеется опыт применения жидкого азота для замораживания грунтов методом пролива в трубную систему при ликвидации аварийной ситуации в функционирующем метрополитене Ленинграда, а также методов решения проблем, связанных с низкотемпературным подземным хранением жидких углеводородов [*Рачевский, 2009*].

Методика прогноза взаимодействия всесезонного ТС с грунтом основания должна включать оценку температурного, а также водно-ионного режима грунтов и криопэгов, поскольку последний определяет температуру начала замерзания, содержание незамерзшей воды, теплофизические и механические характеристики мерзлого грунта.

РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ, МОДЕЛЬ И ПРОГРАММНЫЙ ПРОДУКТ

Рассмотрим несвязанную задачу термоупругости массива грунта, который может вмещать линзу криопэга.

Постановка задачи математического моделирования промерзания для нахождения температурных полей в породах сводится к следующему. В начальный момент времени температура на поверхности ТС радиусом R_S и длиной L_S, находящегося в массиве грунта с температурой поверхности T_{GS}, скачком понижается до температуры газа T_G и поддерживается постоянной во времени τ. При условии T_G ниже температуры начала замерзания поровой воды T_{bf} начинается образование зоны промерзания, мощность которой возрастает во времени. Фазовый переход влаги в лед начинается на условно выделенной подвижной границе – фронте промерзания $R_\xi = f(\tau)$, который разделяет массив на талую и мерзлую зоны и продолжается в последней, где действуют равномерно распределенные источники (стоки) тепла. Таким образом, рассматривается случай, когда в породах формируется массивная криогенная текстура. Тепло на фазовые переходы транспортируется через мерзлую и талую зоны кондуктивным путем. Теплофизические характеристики в выделенных зонах кусочно-постоянные и скачком изменяются на границе раздела зон: $\lambda_T \neq \lambda_F$, $C_T \neq C_F$ и $a_T \neq a_F$, где λ_T, λ_F – коэффициенты теплопроводности; C_T, C_F – объемные теплоемкости талых и мерзлых пород соответственно.

Принимается, что условия вокруг ТС одинаковые. Поэтому задача может формулироваться как двумерная (осевая симметрия). Уравнение теплопроводности в энтальпийной постановке, где величина энтальпии (теплосодержания) H представляет непрерывную функцию во всем интервале температур и может включать тепловой эффект фазовых переходов, имеет вид

$$\frac{\partial H}{\partial \tau} = \frac{\partial}{r\partial r}\left[r\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial r}\right)\right] + \left(\lambda\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right),$$

$$\tau > 0,\ z \in (0, L_S),\ r \in (R_S, R_{CD}); \qquad (1)$$

$$C(T) = \begin{Bmatrix} C_{ef}(T), & T < T_{bf} \\ C_T, & T > T_{bf} \end{Bmatrix};$$

$$\lambda(T) = \begin{Bmatrix} \lambda_F(T), & T < T_{bf} \\ \lambda_T, & T > T_{bf} \end{Bmatrix};\ T = \begin{Bmatrix} T_F, & T < T_{bf} \\ T_T, & T > T_{bf} \end{Bmatrix};$$

$$H(T) = \begin{Bmatrix} H_F(T), & T < T_{bf} \\ H_T, & T > T_{bf} \end{Bmatrix},$$

где $H = \int_0^T C dT$; $C_{ef} = C_F + \psi\left(\frac{\partial \rho_0 W_{UW}}{\partial t}\right)$ – эффективная теплоемкость, учитывающая теплоту фазовых переходов; ψ – удельная теплота фазового перехода; ρ_0 – плотность скелета грунта; W_{UW} – содержание незамерзшей воды в грунте; ось Oz направлена вниз по оси термостабилизатора, ось Or – по поверхности грунта вдоль радиуса; L_S, R_{CD} – расчетная область.

Начальное условие: $T(r, z, 0) = T(z)$, $T(r, 0, 0) = T_{GS}$, $z \in [0, L_S]$.

Граничные условия: $T(r, 0, \tau) = T_{GS}(\tau)$, $\tau > 0$; $r \in (R_S,\ R_{CD}]$; $T(R_S, z, \tau) = T_G$, $\tau > 0$, $z \in [0, L_S]$; $\left.\frac{\partial T}{\partial r}\right|_{r=R_{CD}} = 0$; $\left.\frac{\partial T}{\partial z}\right|_{z=L_S} = 0$.

Особые условия на подвижной границе раздела зон $R_\xi = f(\tau)$ запишутся в виде условия неразрывности температуры на фронте и уравнения баланса тепла на подвижной границе:

$$T_F(R_\xi, \tau) = T_T(R_\xi, \tau) \equiv T_{bf},$$

$$\lambda_F \left.\frac{\partial T_F}{\partial r}\right|_{r=R_\xi(\tau)} - \lambda_T \left.\frac{\partial T_T}{\partial r}\right|_{r=R_\xi(\tau)} = q_{PT}\frac{dR_\xi}{d\tau},$$

где q_{PT} – теплота, идущая на фазовые переходы, пропорциональная объемной влажности породы.

Задача реализована с помощью программного продукта [*Программа..., 2014*]. Использованы явная конечно-разностная схема с регуляризацией, что позволяет в несколько раз увеличить шаг во времени и во столько же раз сократить время счета, а также энтальпийная форма представления и метод балансов. Это приводит к наглядной физической интерпретации результатов и существенно повышает точность определения границ промерзания–оттаивания.

Химический аспект моделирования поведения водно-солевых систем в области отрицательных температур сводится к расчету фазового состава образований различного валового химического состава, характеризующихся определенной температурой и давлением. Для оценки водно-солевого режима массива использовались данные по свойствам грунтов, взятые из нормативного документа СП 25.13330.2012, для криопэгов – опытные данные по химическому составу проб криопэгов п-ова Ямал, приведенные в работе Л.Н. Крицук [*2010*], обработанные с помощью программы “FREEZBRINE” [*Комаров и др., 2012*]. Были рассчитаны: температура начала замерзания; температурная зависимость фазового состава; плотность растворов, их теплоемкость и теплопроводность. Программа “FREEZBRINE” включает следующие химические компоненты системы:

– раствор (23 компонента), включающий катионы, анионы и нейтральные соединения: Na, K, Ca, Mg, Cl, SO_4, HCO_3, $H_2O(l)$, $CaCO_3(aq)$, $MgCO_3(aq)$, и др.;

– твердые фазы (56 компонентов): $H_2O(cr,I)$, $NaCl{\cdot}2H_2O$, $Na_2SO_4{\cdot}10H_2O$, $CaSO_4{\cdot}2H_2O$, сильвин, кальцит, магнезит, доломит, сидерит и др.;

– газы (8 компонентов): $H_2O(g)$, $CH_4(g)$, $CO_2(g)$ и др.

Входные данные в программу: исходная общая минерализация и концентрация основных компонентов химического состава пробы криопэга, которые получены на основе химического анализа. Выходные данные: содержание воды, ионов и солей в жидкой, твердой и газообразной фазах; плотность и объемы фаз; pH растворов; масса в молях, химический потенциал и другие, рассчитанные для определенного интервала и заданного шага по температуре или давлению. Работа программы проверена на большом экспериментальном и тестовом материале. В частности, с ее помощью были обработаны натурные данные по составу 48 криопэгов п-ова Ямал, расположенных на различных геоморфологических уровнях (террасы, пойма, лайда) [*Komarov, Kiyashko, 2012*].

Высокая скорость промерзания грунта вокруг термостабилизатора, связанная с низкими температурами хладагента, приводит к возникновению больших градиентов температур в мерзлом слое вблизи его поверхности. Это вызывает образование трещин и отражается на несущей способности грунтовых оснований. В силу низких значений температуры хладагента задача в общем случае может рассматриваться в рамках теории линейной

термоупругости и модели массива в виде деформирующихся в неоднородном температурном поле слоев. Для данного случая ее в первом приближении можно сформулировать как несвязанную, т. е. температурный профиль в каждый момент времени является установившимся относительно изменения полей напряжений и деформаций. Анализ условия связанности уравнений термоупругости дан в работе [*Комаров, 2003*]. Согласно основным гипотезам теории тонких оболочек, величину максимальных температурных напряжений σ ("тепловой удар") приближенно можно оценить по формуле [*Коваленко, 1971*]

$$\sigma = -\frac{E\alpha_T \Delta T}{2}\left[1 + \frac{\sqrt{1-\nu^2}}{\sqrt{3(1-\nu)}}\right], \qquad (2)$$

где E – модуль упругости грунта; α_T – коэффициент линейного расширения грунта; ν – коэффициент Пуассона; ΔT – перепад температур в мерзлом или промерзающем слое грунта (в зависимости от начала включения ТС – в зимний или летний период), который расположен вблизи стенки ТС.

При решении вопроса о возможности образования трещины величину σ, рассчитанную из уравнения (2), следует сопоставить с величиной, равной пределу мгновенной прочности на разрыв σ_{TS}, а для грунтов, подвергающихся сезонным колебаниям температур, – с величиной, равной пределу длительной прочности на разрыв σ_{LS}.

РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В качестве термостабилизатора принято рекуперативное теплообменное устройство (трубка Фильда). Схема приведена на рис. 1.

Скорость газа в кольцевом зазоре трубки Фильда составляет 25 м/с. Климатические данные приняты по данным метеостанции для района Марре-Сале. Для оценочных расчетов была рассмотрена однослойная схема массива, сложенная незасоленным песком и засоленным суглинком, водно-физические и теплофизические свойства которых приведены в табл. 1, с учетом данных [*СП 25.13330.2012*].

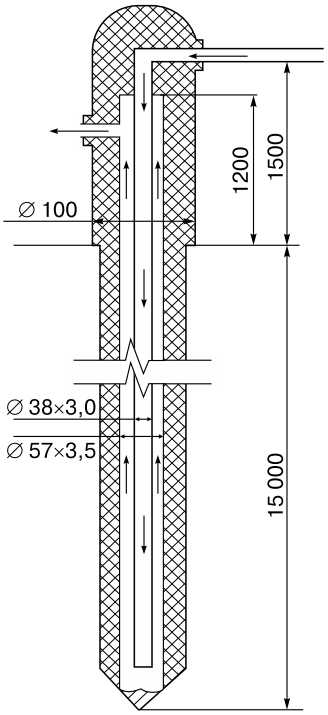

Рис. 1. Схема трубки Фильда.

Стрелки – направление движения хладоносителя в ТС; заштрихованные участки – материал стенки ТС; диаметр приемно-выпускной камеры ∅ = 100 мм; диаметр внешней трубки ∅ = 57 мм при толщине стенки 3,5 мм; диаметр внутренней трубки ∅ = 38 мм при толщине стенки 3 мм.

Начальное распределение температуры выбиралось на основании предварительных расчетов, моделирующих установление квазистационарного температурного поля. Были рассмотрены варианты для летнего и зимнего периода начала работы ТС при различной входной температуре хладагента T_{GS} = –40, –60, –80 °С. Прочностные и деформационные свойства пород для широкого диапазона отрицательных температур приведены в табл. 2. Они выбирались согласно данным по прочностным и деформационным характеристикам из работы [*Комаров, 2010*].

Таблица 1. **Водно-физические и теплофизические свойства грунтов**

Грунт	ρ, кг/м³	W_{tot}, д.е.	D_{sol}, %	T_{bf}, °С	C, МДж/(м³·К)		λ, Вт/(м·К)		Q_f, МДж/м³
					талый грунт	мерзлый грунт	талый грунт	мерзлый грунт	
Песок незасоленный	1880	0,23	0,07	–0,02	2,58	1,95	1,7	2,5	144,9
Суглинок засоленный	1320	0,30	2,10	–4,30	0,657	0,492	1,2	1,4	70,3

Примечание. ρ – плотность скелета; W_{tot} – суммарная влажность; D_{sol} – степень засоленности; T_{bf} – температура начала замерзания; C – теплоемкость; λ – теплопроводность; Q_f – теплота фазовых переходов.

Таблица 2. **Сопоставление рассчитанных по формуле (2) и экспериментальных значений мгновенной прочности на разрыв при различных температурах хладоносителя**

Грунт	T_{GS}, °C	E, МПа	$\alpha \cdot 10^5$, К$^{-1}$	σ_r, МПа	ΔT, °C		σ_r^*, МПа	
					ПОТ	ППТ	ПОТ	ППТ
Песок незасоленный	–40	25 000	2,2	3,3	8,0	26	3,18	10,34
	–60	25 000	2,2	3,5	19,0	39	7,23	14,83
	–80	25 000	2,3	3,6	30,0	62	11,40	23,59
Суглинок засоленный	–40	5000	2,4	6,2	7,5	32	1,90	7,98
	–60	5000	2,6	7,0	20,0	45	5,40	12,10
	–80	5000	1,6	7,0	30,5	56	5,06	9,30

Примечание. T_G – температура хладагента; E – модуль упругости; α – коэффициент линейного расширения; σ_r – мгновенная прочность на разрыв; ΔT – перепад температур на границе ТС–грунт; σ_r^* – расчетная мгновенная прочность на разрыв; ПОТ – период отрицательных температур; ППТ – период положительных температур; коэффициент Пуассона $\nu = 0{,}15$.

Динамика температурных полей вокруг ТС для летнего и зимнего периода начала эксплуатации приведена на рис. 2. Оценка величины температурных напряжений показала, что в зимний период допустимая температура хладагента для незасоленных песков лежит в интервале от –40 до –50 °С. Для суглинистых сильнозасоленных грунтов допустима установка ТС во всем рассмотренном диапазоне отрицательных температур. В летний период градиенты температур на границе ТС–грунт могут приводить к возникновению напряжений выше значения мгновенной прочности на разрыв для обоих грунтов в данном температурном диапазоне. Ввод в эксплуатацию ТС в летний период целесообразно проводить при более высоких температурах хладоносителя, известных из практики эксплуатации сезонных охлаждающих устройств [*Хрусталев, 2005; Аникин, Спасенникова, 2014; Долгих и др., 2014*].

Несомненным преимуществом приведенного способа низкотемпературной термостабилизации является потенциальная возможность вымораживания криопэгов самой высокой минерализации. Например, по предварительным расчетам, линзы криопэгов с минерализацией от 81,1 до 91,9 г/л при температуре хладагента, равной –40, –60, –80 °С, за месяц вымораживаются до 0,6, 0,75, 0,9 м соответственно, а за год промороженная термостабилизатором область увеличивается до 2,1, 2,6 и 3,0 м. Температурная зависимость фазового состава криопэгов и динамика их теплофизических свойств были рассчитаны по методике из [*Комаров и др., 2012*].

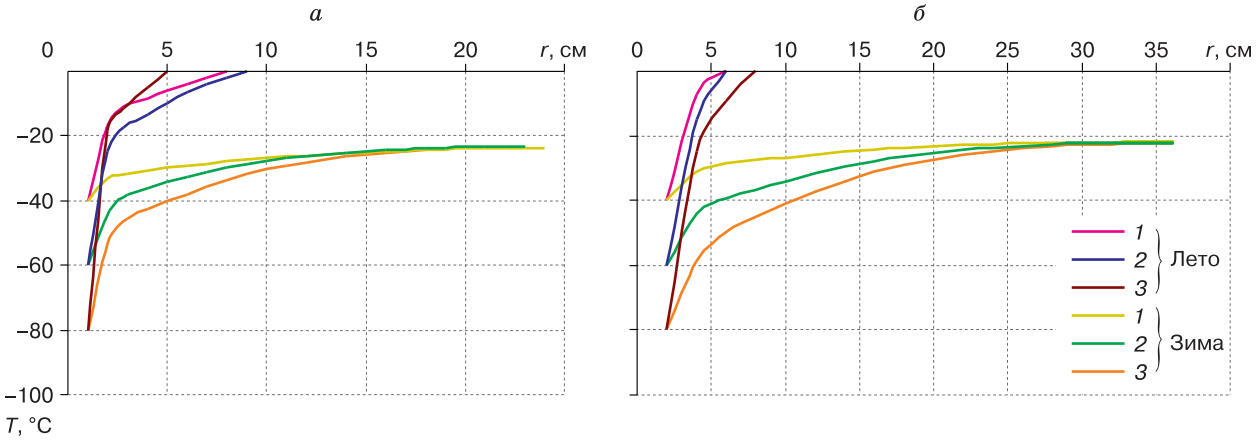

Рис. 2. Профиль температуры (T) вблизи границы термостабилизатор–грунт в периоды с отрицательными (зима) и положительными (лето) температурами для незасоленного песка (*а*) и засоленного суглинка (*б*) при различных температурах хладоносителя:

1 – T_{GS} = –40 °С, *2* – T_{GS} = –60 °С, *3* – T_{GS} = –80 °С. r – расстояние от стенки термостабилизатора.

ВЫВОДЫ

1. Использование хладоресурса сжиженных природных газов и продуктов его ректификации (этан, пропан) для целей термостабилизации грунтовых оснований объектов инфраструктуры газовых месторождений при эксплуатации в сложных геокриологических условиях представляется перспективным за счет: круглогодичного функционирования, высокой интенсивности промораживания с минимизацией процесса пучения грунтов, возможности вымораживания криопэгов с большой степенью минерализации. Данная технология позволяет утилизировать газообразный продукт СПГ, используемый для термостабилизации, путем направления обратного потока в технологическую схему для последующего сжатия и сжижения.

2. Расчетные оценки показывают, что наиболее благоприятные условия введения ТС в эксплуатацию с точки зрения устойчивости грунтов оснований на границе со стенкой ТС складываются в зимний сезон. В летний период введения ТС в эксплуатацию температуру хладоносителя нужно изменять ступенчато. В начале образования ледогрунтового цилиндра вокруг ТС она должна соответствовать значениям, известным из практики эксплуатации сезонных охлаждающих устройств.

3. При низкой отрицательной температуре хладагента ореол промерзания линз криопэгов даже с минерализацией 92 г/л за месяц может достигать 1 м, а за год – до 3 м.

Литература

Аникин Г.В., Спасенникова К.А. О выборе хладагента для сезонных охлаждающих устройств типа “ГЕТ” // Криосфера Земли, 2014, т. XVIII, № 2, с. 31–34.

Долгих Г.М., Окунев С.Н., Аникин Г.В., Спасенникова К.А., Залесский К.В. Сравнение экспериментальных данных и численного моделирования работы охлаждающей системы “ГЕТ” на примере пожарного депо Ванкорского месторождения // Криосфера Земли, 2014, т. XVIII, № 1, с. 65–69.

Коваленко А.Д. Термоупругость пластин и оболочек / А.Д. Коваленко. Киев, Наук. думка, 1971, 125 с.

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

Комаров И.А. Криология Марса и других планет Солнечной системы / И.А. Комаров, В.С. Исаев. М., Науч. мир, 2010, 232 с.

Комаров И.А., Мироненко М.В., Кияшко Н.В. Совершенствование нормативной базы по расчетной оценке теплофизических свойств пород и криопэгов // Основания, фундаменты и механика грунтов, 2012, № 2, с. 25–30.

Крицук Л.Н. Подземные льды Западной Сибири / Л.Н. Крицук. М., Науч. мир, 2010, 351 с.

Программа расчета процесса промерзания–оттаивания пород / Пустовойт Г.П., Венкстерн А.А., Барке В.В.; Свидетельство о гос. регистрации № 2014611743, 2014.

Рачевский Б.С. Сжиженные углеводородные газы / Б.С. Рачевский. М., Нефть и газ, 2009, 640 с.

СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Строительные нормы и правила (СНИП-2012). М., Изд-во стандартов, 2012.

Хрусталев Л.Н. Основы геотехники в криолитозоне / Л.Н. Хрусталев. М., Изд-во Моск. ун-та, 2005, 542 с.

Komarov I.A., Kiyashko N.V. Method for estimating properties of cryopegs from the Yamal Peninsula // Tenth Intern. Conf. on Permafrost. Salekhard, 2012, vol. 2, p. 169–174.

Поступила в редакцию
9 сентября 2014 г.