

**СВОЙСТВА ОТХОДОВ БУРОВЫХ РАСТВОРОВ, ВЛИЯЮЩИЕ НА
ПРОЦЕСС ИХ ПРОМЕРЗАНИЯ ПРИ ЗАХОРОНЕНИИ
В МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПЕСКАХ**

А. А. Шахова¹, Е. А. Данченко², В. З. Хилимонюк³

¹ Магистрант, МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия,
shakhova.aleks@yandex.ru

² Аспирант, МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия,
[lena7dan@yandex.ru](mailto:lana7dan@yandex.ru)

³ Ведущий научный сотрудник, МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия,
vanda@geol.msu.ru

Аннотация

В данной статье рассмотрена проблема взаимодействия отходов буровых растворов (ОБР) с вмещающими многолетнемерзлыми породами при их захоронении в подземные резервуары. Определены свойства ОБР, влияющие на процесс их промерзания при захоронении в многолетнемерзлых песках. Приведена оценка времени промерзания подземного резервуара с ОБР путем решения тепловой задачи.

Ключевые слова: отходы буровых растворов, подземный резервуар, многолетнемерзлые породы, утилизация отходов буровых растворов, миграция влаги.

**FEATURES OF DRILLING FLUIDS WASTES, AFFECTING THE PRO-
CESS OF THEIR FREEZING IN PERMAFROST SANDS**

A. A. Shakhova, E. A. Danchenko, V. Z. Khilimonyuk

Abstract

In this article the authors considered the problem of interaction of the underground reserve of the drilling fluids wastes with the host gelisol of the Yamal Peninsula. The leading factors of formation of cryogenic structure and moisture concentration are substantiated in order to exclude possible environmental problems in the area of the location of reservoirs and various permafrost processes.

Keywords: drilling fluids wastes, underground reserve, permafrost, capillary, recycling of drilling fluids wastes.

Введение. Тема данной научной работы имеет особую *актуальность* в связи с разработкой месторождений в криолитозоне, возрастающими объемами буровых работ и, соответственно, оценкой экологических последствий. При строительстве буровых скважин образуется большое количество отходов бур-

вых растворов (далее – ОБР), подлежащие утилизации. Одним из последних современных методов утилизации ОБР в области криолитозоны, в том числе на Бованенковском и Харасавэйском месторождениях, является захоронение в подземных резервуарах, построенных в песчаной толще многолетнемерзлых пород (ММП). В дальнейшем прогнозируется постепенное полное промерзание ОБР в толще мерзлых пород (заполненных резервуарах), что должно исключить экологические проблемы, связанные с развитием деструктивных геокриологических процессов.

Поставленная проблема широко изучается в последние годы. Например, исследователи С. Д. Сурин, О. И. Савич и Ю. Л. Филимонов рассматривали данную тему как новый технологический способ утилизации, его перспективные возможности и экономическую обоснованность [6].

В рамках диссертации Мосиной А. С. был рассчитан прогноз изменения напряженно-деформированного состояния многолетнемерзлых грунтовых толщ под влиянием строительства подземных резервуаров [3].

Несмотря на актуальность проблемы, изучение свойств ОБР проведено не было. В данной статье представлены результаты экспериментальных лабораторных исследований процессов промерзания ОБР, *проведенных впервые*.

Целью настоящей работы является изучение криогенного строения загрязненных ОБР промороженных песков.

Для ее достижения были поставлены следующие задачи: сбор и знакомство с опубликованной литературой по этому вопросу; изучение физико-географических условий, геологического строения и геокриологических условий территории, где проводилось бурение и был отобран ОБР; определение физических свойств и состава ОБР; подготовка модельных образцов смеси ОБР с грунтом; постановка лабораторного эксперимента и его проведение; изучение криогенного строения ОБР и модельных образцов после промораживания; обработка и анализ полученных результатов.

Материалы и методы. Для изучения процесса промерзания ОБР была выбрана следующая программа лабораторных исследований:

1. Определение физических, химических, теплофизических характеристик ОБР. А именно:
 - ✓ определение минерального состава,
 - ✓ определение катионно-анионного состава,
 - ✓ определение температуры начала замерзания и конца оттаивания (криоскопический метод),
 - ✓ определение теплоемкости и теплопроводности в талом и мерзлом образцах для чистого ОБР.
2. Одностороннее промораживание снизу. Проводилось при разных градиентах температуры образцов разной загрязненности.
3. Изучение массопереноса в образцах по средствам изучения распределения засоленности и влажности от фронта промерзания.

Среди комплекса методов изучения минерального состава грунтов (особенно дисперсных) рентгеноструктурный является наиболее информативным. В

анализе используется излучение с длиной волны, соизмеримой с расстояниями между атомами в минералах. В силу того, что межатомное расстояние для определенного кристалла является основной характеристикой вещества, то отражение лучей может происходить только при определенных значениях угла падения. Это и является основой метода.

В результате были получены дифрактограммы порошковых образцов ОБР, отобранных с Харасавэйского и Бованенковского месторождений, по которым определялся минеральный состав образца.

Изучение ионного состава ОБР проводилось при помощи химического анализа водной вытяжки. После стандартной пробоподготовки полученная водная вытяжка титровалась различными реактивами. По расходу используемых химических соединений рассчитывалось содержание интересующих катионов и анионов.

Температура начала замерзания и конца оттаивания определялась криоскопическим методом в установке ООО «Криолаб». Проводились испытания в двух режимах – замерзания и оттаивания. В процессе испытания записывается изменение температуры грунта во времени.

По полученным термограммам определялись интересующие параметры.

Для определения теплофизических характеристик использовался прибор KD2 PRO, который применялся на мерзлых грунтах известной температуры.

Количество незамерзшей воды определялось контактным методом как с промежуточным взвешиванием (улучшенная методика Чеверева В. Г., сотрудника кафедры геокриологии МГУ, доктора геолого-минералогических наук), так и без него [ГОСТ Р 59537 – 2021].

Одностороннее промораживание проводилось при разных температурах, задававшихся на охлаждающую плиту (-2, -4, -6 градусов). Также было изучено криогенное строение песков, загрязненных ОБР на 25%, 50%, 75%.

После промораживания образцы послойно разделялись по 1 см. После этого определялась влажность (весовым методом) и засоленность (кондуктометрическим методом) подготовленных проб.

Результаты и обсуждение. Результаты определения температуры начала замерзания, полученные криоскопическим методом, приведены в таблице 1.

Анализируя данные, можно сделать вывод, что отходы по сравнению с начальным буровым раствором имеют в разы выше температуры начала замерзания и оттаивания. Это связано с изменением засоленности и дисперсности образцов.

Таблица 1 – Температуры переохлаждения, начала замерзания, конца оттаивания

Наименование	Температура начала замерзания $t_z, \text{ }^{\circ}\text{C}$	Температура конца оттаивания $t_{отт}, \text{ }^{\circ}\text{C}$	Температура переохлаждения $t_{пер}, \text{ }^{\circ}\text{C}$
Общие данные			
Буровой раствор	-8 (по литературным данным)	Не исследовано	Не исследовано
Кварцевый песок при $W=20\%$	0 (по литературным данным)	0 (по литературным данным)	0 (по литературным данным)

Наименование	Температура начала замерзания $t_3, ^\circ\text{C}$	Температура конца оттаивания $t_{\text{отт}}, ^\circ\text{C}$	Температура переохлаждения $t_{\text{пер}}, ^\circ\text{C}$
Бованенковское НГКМ			
ОБР 100%	-0,52	-0,77	-0,65
Песок 75%, ОБР 25%	-0,37	-0,56	-3,25
Харасавэйское ГКМ			
ОБР 100%	-0,66	-0,66	-
ОБР 75% Дист.вода 25%	-0,54	-0,54	-0,73
ОБР 50% Дист.вода 50%	-0,3	-0,3	-0,49
ОБР 25% Дист.вода 75%	-0,25	-0,17	-0,87

В таблице 2 представлены результаты рентгеноструктурного анализа. Можно утверждать, что в минеральном составе отходов буровых растворов преобладают кварц, слюдистые минералы, которые, предположительно, являются остатками выбуренной породы (песков). Содержание смектитов, которые используются при подготовке буровых растворов, варьирует от 6,6 до 19,9 %.

Таблица 2 – Результаты обработки дифрактограммы ОБР

Минеральный состав	вес. %	Минеральный состав	вес. %
Бованенковское НГКМ			
Кварц	24.7	Смектит	6.5
Слюдистые минералы	19.9	Анкерит	3.3
Плагиоклаз	16.0	Хлорит	2.3
Сидерит	10.2	Кальцит	1.6
КПШ (микроклин)	7.7	Пирит	0.4
Харасавэйское ГКМ			
Смектит	19,9	КПШ (микроклин)	7,3
Кварц	21,9	Каолинит	4,0
Иллит	15,3	Хлорит	3,6
Сидерит	11,7	Доломит	2,7
Плагиоклазы	11,7	Кальцит	1,9

Химический состав играет огромную роль на промерзание горных пород, так как влияет на протекание химико-физических процессов. Соли и влага могут как мигрировать от фронта промерзания, так и кристаллизоваться на месте без массопереноса. По результатам химического анализа (табл.3) в ОБР преобладают HCO_3 , Na^+ и Cl^- .

Таблица 3 – Катионно-анионный состав водных вытяжек ОБР

№ пробы	Минерализация М, г/л	мг/л						
		Cl	SO ₄	HCO ₃	Na	K	Mg	Ca
Бованенково	9,55	1413	13,3	5116	2942	5,0	41,7	22,3
Харасавэй	4,22	530,3	-	2177,7	966	-	199,2	76

В таблице 4 представлены теплофизические характеристики ОБР. При лабораторных исследованиях были определены значения характеристик в немерзлом и мерзлом (-8,2) состоянии. Так как -8 градусов не соответствует природным условиям, данные значения были пересчитаны через количество незамерзшей воды.

Некоторые их различия связаны с неоднородностью отходов буровых растворов. Однородность выражена как в разности минералогического, ионного составов, различной влажности образцов, разной температуре мерзлых образцов и прочее.

Таблица 4 – Теплофизические характеристики ОБР

Источник	Состояние	λ , Вт/м*К	C_v , МДж/м ³ *К	Qф
Экспериментальные данные	немерзлое состояние	1,014	3,394	-
Расчетные данные	мерзлое состояние (-6 градусов)	1,783	2,313	38,87 МДж/кг
Экспериментальные данные	мерзлое состояние (-8,2 градусов)	1,988	2,432	-
Аксютин и др., 2013	талое состояние	1,16	3,30	2,09*10 ⁵ Дж/м ³
	мерзлое состояние	1,57	2,430	

На рисунке 1 представлены криогенные текстуры образцов № 2, № 3. В образце 2 загрязнение ОБР составляет 25%, заморожен при температуре -2 градуса. Образец 3 имеет такой же состав, но заморожен при -6 градусов.

Как видно из сформированной криогенной структуры, при увеличении градиента температур в образцах с одинаковым процентным содержанием ОБР и песка мощность шлиров и расстояние между ними уменьшается, при этом миграция влаги (рис. 2) происходила более интенсивно в образце 2, что связано с закономерным увеличением плотности миграционного потока.

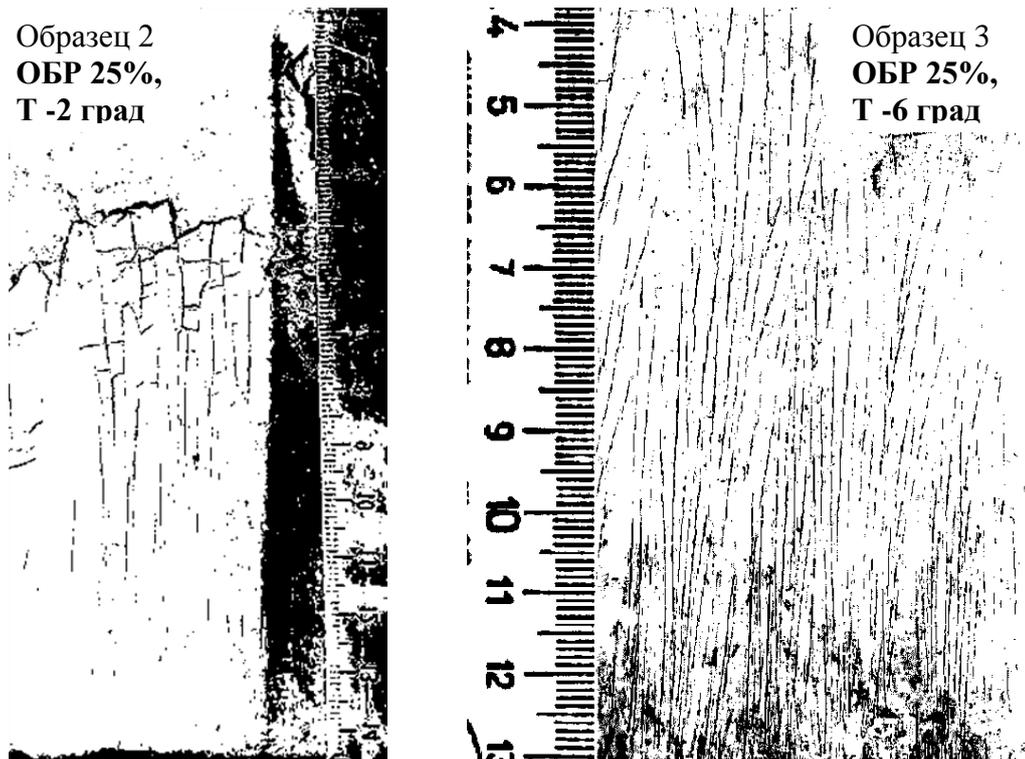


Рисунок 1 - Криогенное строение образцов № 2, № 3

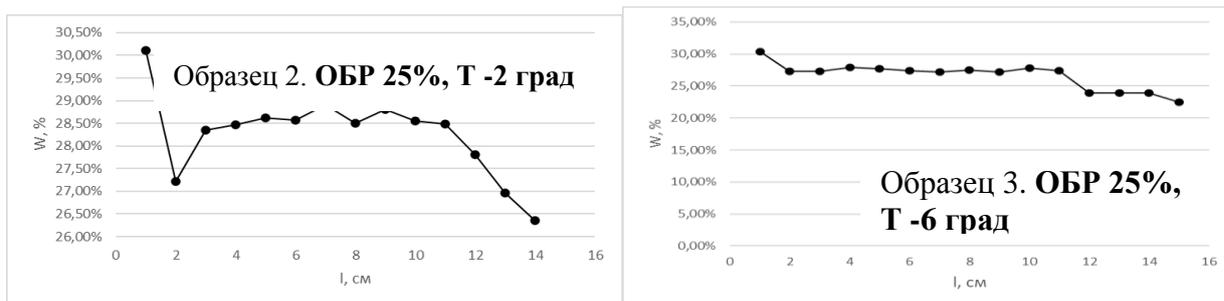


Рисунок 2 - Распределение влажности в образцах № 2, № 3 по высоте

В образцах 5, 4 и 6 загрязнение отходами составляет 25, 50 и 75% соответственно (проморожены при -6 градусах). Из предложенных криогенных текстур можно выявить, что при увеличении дисперсности полученных смесей уменьшается среднее расстояние между шлирами и их мощность. Миграции влаги к фронту промерзания не наблюдается, что связано со средней зернистостью используемого песка.



Рисунок 3 - Криогенное строение образцов № 4, № 5, № 6

Образцы 5 и 7 (рис. 4) содержат 25% ОБР. При этом они должны иметь массивную криогенную текстуру, но в образце 7 шлиры и миграция влаги есть. Это связано с тем, что использовался при изготовлении смеси пылеватый песок, а в образце 5 – среднезернистый. А также важным фактором является минералогический состав ОБР: образец 7 был загрязнен ОБР со значительно меньшим содержанием смектитов (Бованенковское месторождение).

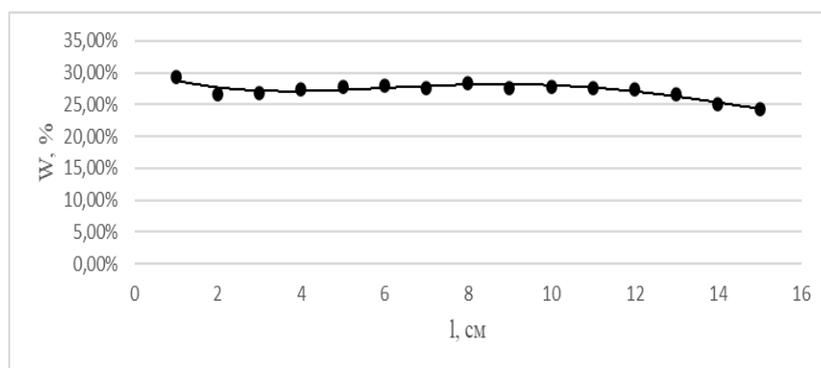


Рисунок 4 - Криогенное строение образца № 7 (слева), распределение влажности по высоте (справа)

Для оценки времени промерзания подземного резервуара с ОБР была решена тепловая задача с использованием программы Qfrost [Песоцкий, 2016].

При решении тепловой задачи были использованы следующие характеристики пород из литературы (табл. 5) [Аксютин и др., 2013]. Для всего массива пород задавались одинаковая температура $-5,7$ градусов, соответствующая среднегодовой, и граничные условия второго рода с нулевым теплотокмом на всех ограничивающих поверхностях расчетной области (рис. 5). Были приняты следующие условия: 1) что ОБР обладают однородными теплофизическими характеристиками; 2) захоронение отходов производилось сразу после разработки резервуара в песчаную толщу единоразово, а температура подаваемых отходов принималась $8,1$ градус.

Таблица 5. Характеристики пород и параметры, использованные при моделировании температурных полей

Наименование породы	Интервал глубин, м	$H_{\text{ММП}}$, м	T_0 , °C на h_0 , м	Теплопроводность, Вт/м°C		Объемная теплоемкость кДж/м³°C		T_{bf} , °C	Qф, кДж/кг
				талой фазы	мерзлой фазы	талой фазы	мерзлой фазы		
Верхнеплейстоценовые мерзлые легкие суглинки третьей террасы	0-20	12	-5,7	1,4	1,7	3031,0	2148,0	-0,9	127,279
Верхнеплейстоценовые мерзлые пески казанцевской свиты	20-37,5			1,7	2,1	2600	1863,0	-0,05	80,387
Среднеплейстоценовые мерзлые тяжелые суглинки салехардской свиты	37,5-80			1,4	1,6	2822	2386	-1,2	125,604

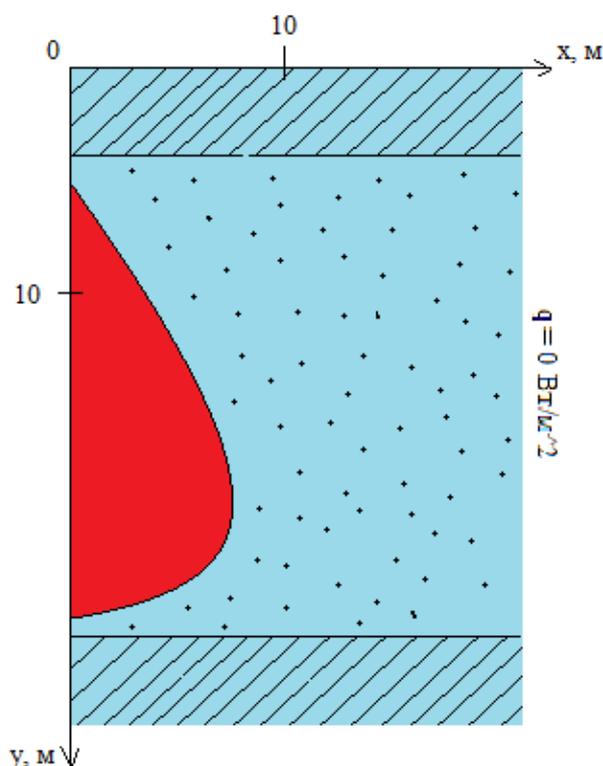


Рисунок 5 - Фрагмент расчетной схемы математического моделирования теплового воздействия захораниваемых отходов бурения (цветом: красный – температура +8,1 градусов, голубой -5,7 градусов штриховкой: вертикальной наклонной – суглинок, точечный крап - песок)

По результатам было получено, что для промерзания резервуара требуется 27 лет и 5 месяцев, а для восстановления поверхностных природных условий – 121 год.

При этом, наибольшее изменение температуры претерпевали породы, находящиеся в ореоле 0,5 м от стенок резервуара. Тепловое влияние распространялось на глубину около 26 м от дна резервуара (рис. 6).

Отсюда можно сделать вывод, что ОБР, захороненные в подземном резервуаре, наиболее активно взаимодействуют с вмещающими их породами в радиусе 3 м.

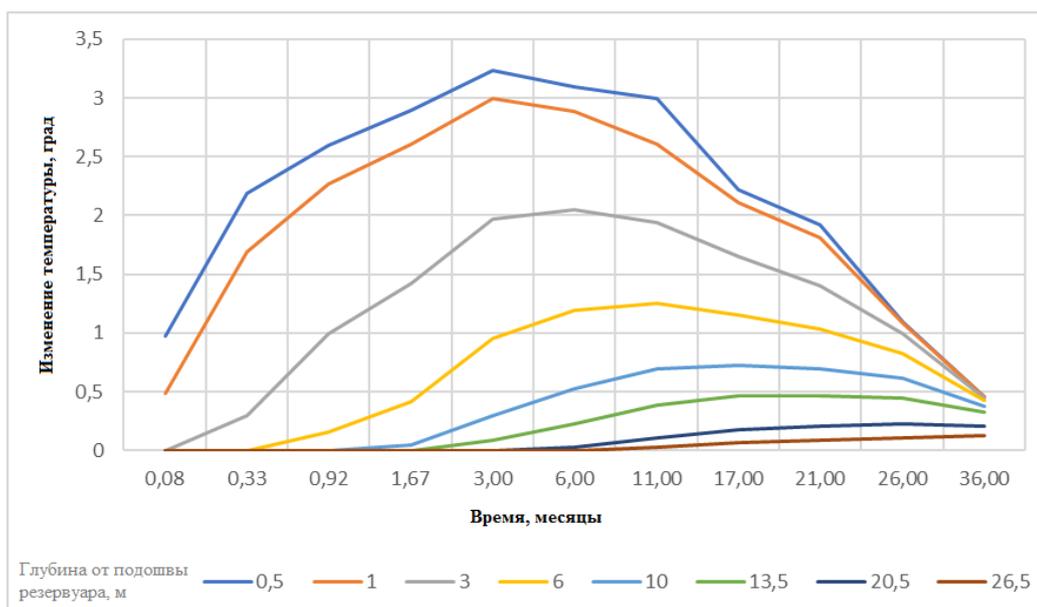


Рисунок 6 - Изменение температуры вмещающих многолетнемерзлых пород (под резервуаром) во времени

Заключение. По результатам проведенных исследований были сформулированы следующие выводы:

1. При загрязнении отходами менее 25% замороженные образцы имеют массивную криогенную текстуру.

2. При добавлении ОБР толщина шлиров и частота расположения прослоев увеличивается.

3. При уменьшении температуры мощность шлиров и расстояние между ними уменьшается.

4. Миграция влаги в образцах протекала при медленной скорости промерзания и высоком загрязнении ОБР.

5. Миграция воды протекала более интенсивно при использовании ОБР Бованенковского НГКМ в связи с большим содержанием смекититов.

6. Образование вертикальной тонкослоистой криогенной текстуры можно объяснить наличием ПАВов [Рядинский, 2004] в отходах буровых растворов.

7. Теплофизические характеристики объекта разнятся при сравнении литературных, экспериментальных и расчетных значений. Это связано с точностью и погрешностью каждого из методов, а также с изменчивым составом и влажностью ОБР.

8. При расчете тепловой задачи было установлено, что зоны растепления нет, однако породы в радиусе 3 метров претерпевают изменения температуры больше, чем на 2 градуса. С момента промерзания подземного резервуара до перехода полностью в мерзлое состояние требуется 27 лет и 5 месяцев, до восстановления природных геокриологических условий – 121 год.

Список цитированных источников

1. Аксютин, О. Е., Казарян, В. А., Ишков, А. Г., Теплов, М. К., Хрулев, А. С., Савич, О. И., Сурин, С. Д. Строительство и эксплуатация резервуаров в многолетнемерзлых осадочных породах. – М.-Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2013. – 432 с.
2. ГОСТ Р 59537 – 2021.
3. Мосина, А. С. Прогноз изменения напряженно-деформированного состояния многолетнемерзлых грунтовых толщ под влиянием строительства подземных резервуаров для захоронения отходов бурения (на примере Харасавэйского месторождения): дис. док. геол.-мин. наук В. Т. Трофимов, кан. тех. наук А.Ю. Мирный: 1.6.7. – Моск. гос. университет, Москва, 2022. – 325 с.
4. Программа расчета теплового взаимодействия сооружений с многолетнемерзлыми грунтами QFrost / Песоцкий Д. Г. Свидетельство № 2016614404. Гос. реестр программ для ЭВМ; 22.04.2016.
5. Рядинский, В. Ю., Соромотин, А. В., Денeko, Ю. В. Состав и свойства буровых отходов Западной Сибири // Вестник Тюменского государственного университета. – 2004. – №. 3. – С. 51–54.
6. Сурин, С. Д., Савич, Ю. Л., Филимонов. Захоронение отходов бурения в подземных резервуарах в многолетнемерзлых породах// Научный журнал газового сообщества. – 2020. – № 2[25]. – С. 36–47