УДК 621.642.37

ЗАХОРОНЕНИЕ ОТХОДОВ БУРЕНИЯ В ПОДЗЕМНЫХ РЕЗЕРВУАРАХ В МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОДАХ

С.Д. Сурин, О.И. Савич, Ю.Л. Филимонов

ООО «Газпром геотехнологии»[1]

Сведения об авторах

Сурин Степан Дмитриевич,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник

Савич Олег Игоревич,
кандидат технических наук,
начальник отдела

Филимонов Юрий Леонидович,
кандидат технических наук, директор
инженерно-технического центра

В статье представлено сравнение способов обращения с отходами, образующимися в процессе бурения эксплуатационных и разведочных скважин при освоении месторождений углеводородов в условиях Крайнего Севера. Приведено описание технологии строительства и эксплуатации подземных резервуаров, предназначенных для захоронения отходов бурения. В статье показана экономическая эффективность внедрения технологии подземного захоронения с учетом защиты окружающей среды.

Ключевые слова: отходы бурения, подземные резервуары, многолетнемерзлые породы, обращение с отходами, захоронение отходов, экономическая эффективность

1. АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

Открытие и освоение новых месторождений углеводородов в настоящее время происходит в удаленных регионах Крайнего Севера при полном или частичном отсутствии транспортной инфраструктуры. Следовательно, существует потребность в разработке комплекса мероприятий, обеспечивающих решение логистических задач: доставку материально-технических ресурсов, вывоз добытых полезных ископаемых, а также решение проблемы с образующимися промышленными отходами.

Следующей крупной проблемой хозяйственной деятельности человека при разработке северных месторождений является чрезвычайная чувствительность окружающей среды к техногенным воздействиям. Даже минимальное вмешательство в экосистему проявляется на земной поверхности и развивается в сторону ухудшения экологической обстановки. Особенно это воздействие проявляется в период сезонного паводка, когда до 80% осваиваемой территории затапливается.

Указанные особенности ставят перед недропользователем острую проблему, связанную с утилизацией большого количества отходов бурения, образующихся при строительстве разведочных и эксплуатационных скважин. В 2016 г. в системе ПАО «Газпром» согласно открытым данным [1] было образовано 4289 тыс. тонн промышленных отходов, что на 13,4% больше, чем в предыдущем году. Например, при освоении первой очереди Бованенковского НКГМ фактический объем только отходов бурения превысил 400000 м^3, а проектный объем отходов бурения первой очереди Харасавэйского ГКМ более 350000 м^3.

Вывоз такого объема отходов физически невозможен, поэтому требуется разработка технических решений, обеспечивающих экологически безопасную и экономически эффективную стратегию по обращению с отходами непосредственно «на месте». Буровые отходы, относящиеся к III-IV классу опасности, содержащие опасные для окружающей среды присадки и добавки, необходимо надежно изолировать от поверхностных сезонноталых, паводковых, ливневых и надмерзлотных вод, почвенно-растительного слоя, атмосферного воздуха, животного и растительного мира региона.

Существующие способы обезвреживания и утилизации буровых отходов трудоемки, не универсальны, требуют больших энергетических и финансовых затрат, связаны с перевозками буровых отходов на значительные расстояния, не гарантируют надежной долговременной защиты окружающей среды и изоляции вредных компонентов от ветров и поверхностных вод.

Хорошо известно, что мерзлые дисперсные грунты большой льдистости препятствуют фильтрации в породном массиве. Проницаемость грунтов падает при росте их дисперсности и уве-

[1] ООО «Газпром геотехнологии»
г. Москва, 1-я Магистральная улица, 11/2

личении общей льдистости массива. Так, согласно исследованиям Г.П. Кузьмина, проведенным в Якутске в 1970-х годах [2], показано, что мерзлые песчаные отложения при общей льдистости более 0.2 д.е. являются криогенным водоупором.

Многолетнемерзлый массив, покрывающий всю территорию Ямала на глубину свыше 100 м от поверхности, представлен песчано-глинистыми грунтами с линзами пластовых льдов. В интервале от 10 до 100 м среднее значение температуры мерзлых пород ниже минус 3°С, что, с учетом высокой льдистости, обеспечивает их непроницаемость для флюидов. Это позволяет рассматривать многолетнемерзлые породы как объект строительства подземных резервуаров с целью конечного размещения промышленных отходов или хранения жидких углеводородов в течение длительного срока.

Подземные резервуары в мерзлых грунтах для хранения незамерзающих жидкостей начали применяться с конца XIX века. Однако до 70-х годов XX века подземные хранилища в мерзлоте создавались исключительно шахтным методом или с помощью обваловки грунтом металлических конструкций, размещенных в траншеях и котлованах. Таким образом были построены подземные резервуарные парки на территории России (например, в Магаданской области [3]), в Финляндии, Франции (для хранения сжиженного газа в искусственно замороженном массиве), Канаде и т.д.

Развитие методов разрушения мерзлого массива через скважины в рамках технологии добычи полезных ископаемых, в основном россыпного золота и алмазов, позволило разработать способ формирования подземной выработки устойчивой формы [4].

Первые опытные скважинные подземные резервуары единичным объемом до 5000 м^3 были построены в 70–80-х годах XX века в районе г. Норильска [3] и Якутии для хранения дизельного топлива и газового конденсата [2].

Промышленное внедрение технологии строительства подземных резервуаров впервые произошло на Мастахском ГКМ, где с целью расширения наземного парка было создано три емкости суммарным объемом 10000 м^3.

Резервуары на Мастахском ГКМ были построены для хранения газового конденсата – побочного продукта, образующегося при добыче метан-пропановой газовой фракции. Подземные резервуары строились с помощью подачи воды в мерзлый массив и вытеснения на поверхность оттаявшего грунта в виде пульпы за счет избыточного давления, создаваемого воздухом. Более чем 30-тилетний опыт их эксплуатации свидетельствует о надежности, герметичности и устойчивости подобных сооружений.

В 1995–1996 гг. силами ООО «Подземгазпром» (в настоящее время ООО «Газпром геотехнологии») под руководством Смирнова В.И. и Скосаревой Т.В. выполнен комплекс экспериментальных исследований, в результате которых на Бованенковском НГКМ построен опытный резервуар объемом около 300 м^3 в отложениях пластовых льдов.

В 2007 году в рамках проведения научно-исследовательских работ на кустовой площадке №65 Бованенковского НГКМ был сооружен первый на Ямале скважинный подземный резервуар для захоронения отходов бурения объемом 5000 м^3. На технологию захоронения отходов бурения в подземных резервуарах получены патенты и авторские свидетельства [5, 6].

В 2000–2010 гг. специалисты ООО «Газпром геотехнологии» разработали и успешно внедрили на месторождениях группы Ямал технологию по захоронению промышленных отходов в подземных резервуарах. Конечное размещение буровых отходов, образующихся от строительства эксплуатационных и разведочных скважин, в подземных выработках позволяет надежно их изолировать от поверхностных водотоков и водоносных горизонтов, что исключает возможность фильтрации опасных компонентов в окружающий массив.

2. ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ПОДЗЕМНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ

Технология основана на разрушении многолетнемерзлых грунтов при оттаивании с их дальнейшим подъемом на поверхность оттаявшего материала в виде пульпы.

В отличие от технологии добычи полезных ископаемых – при строительстве подземных резервуаров основной акцент делается не столько на скорости разрушения мерзлого пласта и полноте выемки разрушенного грунта, сколько на управляемости процессом отработки выработки-емкости. Основным критерием, влияющим на ход процесса строительства, является формирование устойчивой геометрической формы подземной выработки. Разработанная технология позволяет осуществлять строительство подземных резервуаров через скважины в любых породах, поддающихся водно-тепловому разрушению, и способных сохранять устойчивость в течение длительного времени.

При создании резервуара в многолетнемерзлых породах выделяются два основных технологических процесса:

– ввод тепла в создаваемую выработку-емкость;
– отбор оттаявшего грунта и избыточной воды.

Ввод тепла может осуществляться от точечного источника, находящегося в выработке, или через теплоноситель, подаваемый по скважине. Вариант ввода теплоносителя в выработку-емкость через скважину является более экономичным и не требует сложной конструкции оборудования технологической скважины. Подъем оттаявшего грунта возможен при создании противодавления в резервуаре или с помощью методов скважинной гидродобычи [7].

Технологические схемы строительства могут корректироваться в зависимости от геологических условий. При строительстве в дисперсных грунтах или пластах льда схемы строительства сходны по принципу подачи тепла, но различаются в части подъема оттаявшего грунта и оборотной воды. Ниже приведены основные принципы строительства подземных резервуаров в зависимости от применяемого оборудования и геологических факторов.

2.1. Строительство подземных резервуаров в дисперсных грунтах

Строительство подземных резервуаров в дисперсных грунтах в основном ведется в пластах песков. Однако с некоторыми ограничениями описываемая технология может быть использована даже для строительства резервуаров в глинистых грунтах [8].

Перед началом строительства резервуара в технологической скважине монтируется скважинный снаряд, состоящий из секционированных по длине труб для подачи воды, сжатого воздуха и подъема гидросмеси песка на поверхность. Создание подземного резервуара производится ступенями с последовательным изменением уровня раздела «вода-воздух» снизу вверх, что позволяет сформировать выработку устойчивой формы.

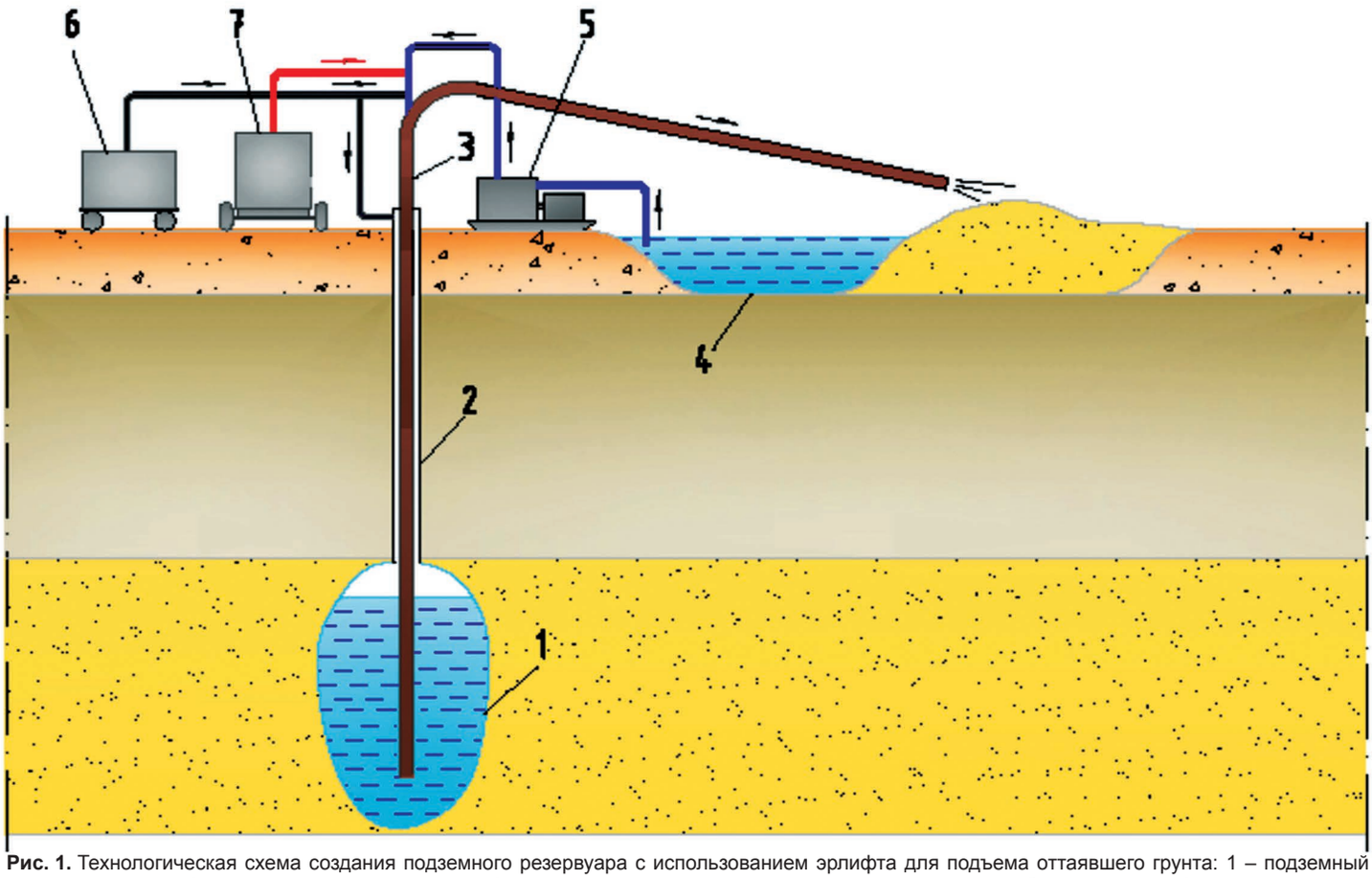

Рис. 1. Технологическая схема создания подземного резервуара с использованием эрлифта для подъема оттаявшего грунта: 1 – подземный резервуар, 2 – технологическая скважина, 3 – скважинный снаряд, 4 – карта намыва, 5 – насос оборотной воды, 6 – компрессор, 7 – передвижная парогенераторная установка

Технологическая схема создания подземного резервуара с использованием эрлифта для подъема оттаявшего грунта приводится на *рис 1*.

Теплоноситель (пар) от парогенераторной установки (7) подается в скважинный снаряд (3). В результате теплообмена поданного теплоносителя с мерзлыми породами происходит их оттаивание и разрушение. Оттаявший грунт опускается на дно образующейся подземной выработки (1). Вода от насоса (5) подается в нижнюю часть скважинного снаряда (3), взвешивает оседающий на дне выработки грунт и поднимает его в виде трехфазной гидросмеси на поверхность. Подъем гидросмеси осуществляется эрлифтом, для чего в скважинный гидродобычной снаряд подается сжатый воздух от компрессора (6). Поднятая скважинным снарядом гидросмесь направляется на карту намыва (4), где производится отделение песка от воды. Далее вода с помощью насоса оборотной воды направляется в скважинный снаряд, а осушенный песок бульдозером или экскаватором транспортируется в отвал.

Управление процессом сооружения выработки-емкости заключается в синхронизации работы следующих технологических систем:

– подачи теплоносителя в строящуюся выработку и отвода пульпы на поверхность земли;
– управления формообразованием сооружаемой выработки-емкости путем подачи в скважину или отбора из нее воздуха;
– регулирования положения скважинного снаряда и его перемещения по вертикали в соответствии с регламентом сооружения выработки-емкости.

Представленная технология строительства подземных резервуаров в дисперсных грунтах реализована на территории полуострова Ямал. В период с 2008 по 2019 г. на Бованенковском и Харасавэйском месторождениях в мерзлых песках построено более 50 резервуаров суммарным объемом свыше 130000 м^3.

Отдельно можно отметить, что при строительстве подземных резервуаров поднятый грунт (песок) можно использовать для отсыпки дорог и других участков строительства.

2.2. Строительство подземных резервуаров в пластовых льдах

Подземный лед обладает ярко выраженными упруго-пластическими свойствами, предъявляющими достаточно жесткие требования к форме и размерам выработок. Специалистами ООО «Газпром геотехнологии» разработана технология строительства подземных резервуаров в пластовых льдах, имеющих ось симметрии, а также резервуаров тоннельного типа. Тоннельные резервуары создаются через одиночные наклонно-горизонтальные скважины или систему вертикальных скважин. [9].

Технология строительства предусматривает бурение скважины чуть ниже отметки дна будущего резервуара, монтаж в скважине колонны труб для подачи теплоносителя и отбора воды, образующейся в результате плавления льда. Управление процессом формообразования производится с помощью понижения уровня раздела «вода-воздух» внутри строящейся выработки (*рис. 2*).

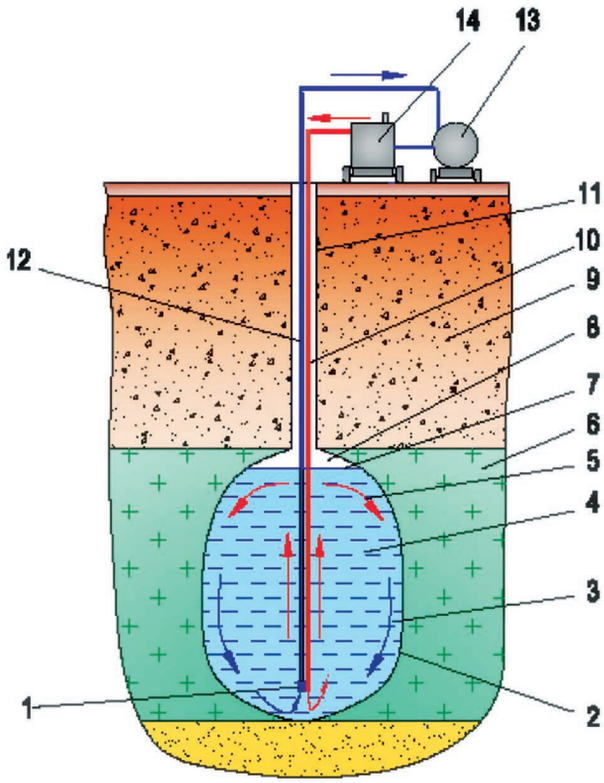

Рис. 2. Схема создания вертикального подземного резервуара в отложениях льда: 1– погружной насос; 2 – выработка-емкость; 3 – направление движения холодной воды; 4 – затопленная часть выработки; 5 – направление движения водяного пара (теплой воды); 6 – ледяной пласт; 7 – уровень раздела воздух-вода; 8 – воздух; 9 – покрывающие породы; 10 – подвесная колонна для подачи пара; 11 – обсадная колонна; 12 – подвесная колонна для отбора воды; 13 – наземный резервуар воды; 14 – парогенератор

Производительность оттаивания определяется на основании экспериментальных данных и характеризует КПД передачи тепла от парогенераторной установки к породному массиву. Исходя из существующего опыта одна тонна пара, подаваемая от парогенераторной установки в выработку-емкость, позволяет провести оттаивание 2–3 кубометров льда.

На *рис. 3* приводится трехмерная форма одного из подземных резервуаров, созданных на территории Бованенковского НГКМ.

Динамика развития подземного резервуара во льдах определяется объемом подачи теплоносителя, что влияет на распределение температуры воды внутри строящейся выработки. На первом этапе преобладает развитие верхней части подземного резервуара. В дальнейшем (с условием сохранения начальных объемов подачи тепла) происходит понижение средней температуры воды в создаваемой выработке с увеличением поверхности теплообмена воды с ледяным массивом. В этом случае темп подвода тепла к верхней части выработки существенно замедляется за счет его поглощения в нижней и средней части, что приводит к росту радиуса вблизи дна выработки (*рис. 4*).

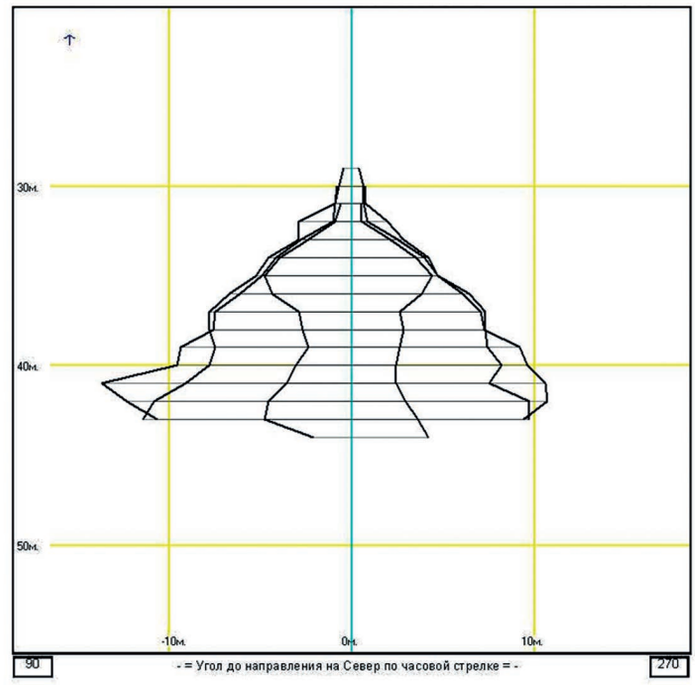

Рис. 4. Изменение формы подземного резервуара в пластовых льдах в процессе размыва по данным трех звуколокационных съемок

Единичный объем скважинных подземных резервуаров, создаваемых в пластовых льдах через вертикальную скважину, может достигать 3000 м^3. Для увеличения полезного объема воз-

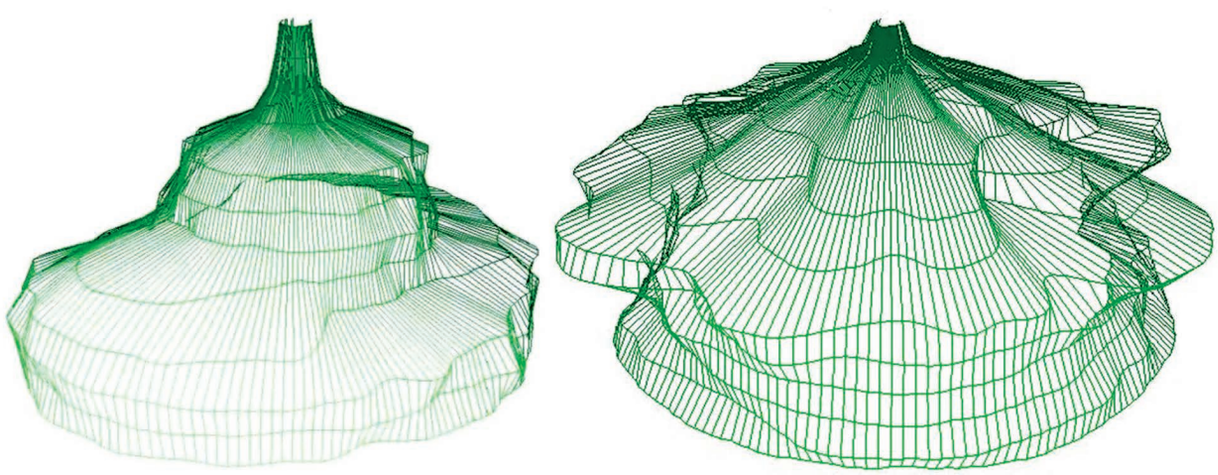

Рис. 3. Геометрическая форма резервуара, созданного в отложениях пластового льда на территории Бованенковского НГКМ: слева – после промежуточной съемки (объем 1000 м^3); справа – после окончания строительства (объем 2060 м^3)

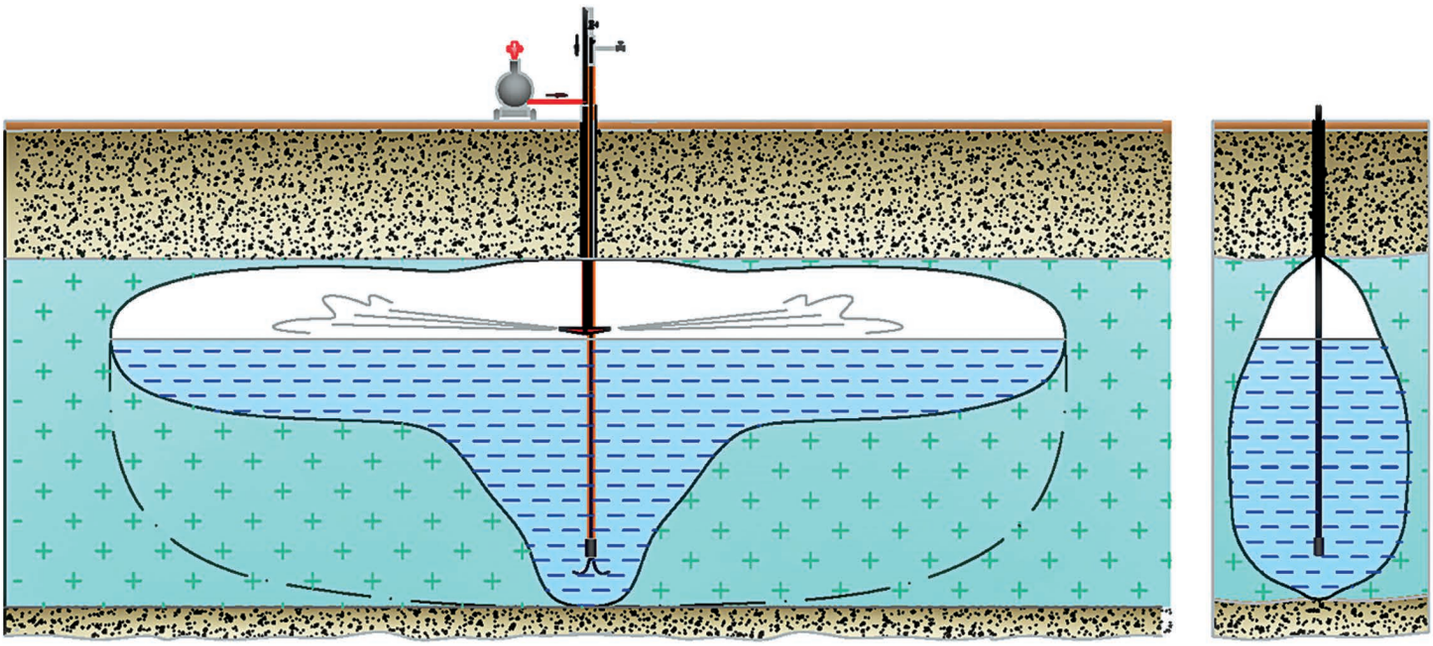

Рис. 5. Схема создания тоннельного резервуара через вертикальную скважину

можно строительство емкостей тоннельного типа через центральную вертикальную скважину (*рис. 5*).

При строительстве тоннельных резервуаров теплоноситель подается в верхнюю часть строящейся выработки через две горизонтальные насадки, направленные в противоположные стороны. Уровень воды в резервуаре поддерживается ниже насадок. Исследования показали, что при дальности полета горизонтальной струи 10 м за счет образования поверхностного потока общая длина тоннельного резервуара может превышать диаметр осесимметричного скважинного резервуара в 3–5 раз. При соединении серии таких резервуаров в одну выработку может достигаться суммарный объем в десятки тысяч кубометров.

3. ЗАХОРОНЕНИЕ ОТХОДОВ БУРЕНИЯ В ПОДЗЕМНЫХ РЕЗЕРВУАРАХ

После окончания строительства подземного резервуара производится подготовка к его эксплуатации для приема и размещения отходов бурения. Отходы бурения размещаются в подземных резервуарах сразу же после их доставки от мест образования. В качестве технических решений рекомендуются следующие схемы транспорта буровых отходов: гидротранспорт, автотранспорт до приемного бункера и выгрузка напрямую из кузова автомобиля.

3.1. Гидротранспорт твердых и жидких буровых отходов от буровой установки до подземного резервуара

Технологическая схема транспортировки и захоронения отходов по данному варианту предусматривает накопление бурового шлама в бункере, находящемся в непосредственной близости от подземных резервуаров. Отходы от буровой установки с помощью гидротранспорта подаются в бункер, где перемешиваются с водой до получения однородной массы, после чего перекачиваются в подземный резервуар для захоронения. Избыток воды из подземного резервуара возвращается в блок приема исходного продукта и повторно используется для гидротранспорта (*рис. 6*).

После заполнения одного резервуара бункер легко транспортируется к следующему. Максимальное расстояние транспортировки отходов бурения данным способом может достигать 500 м.

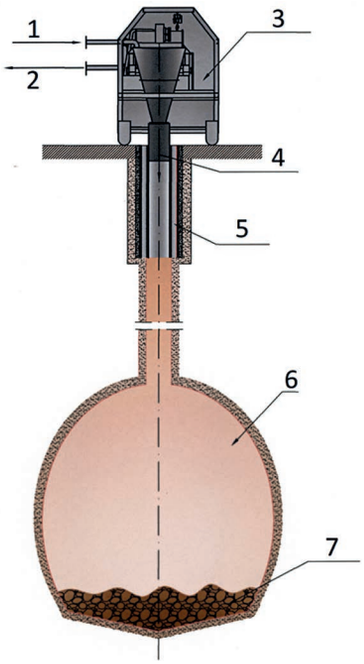

Рис. 6. Схема захоронения буровых отходов в подземный резервуар с использованием гидротранспортного комплекса
1 – направление подачи буровых отходов; 2 – выход осветленной пульпы; 3 – ситовибрационная установка; 4 – подача отходов в скважину; 5 – двойная обсадная колонна; 6 – подземный резервуар; 7 – отходы бурения

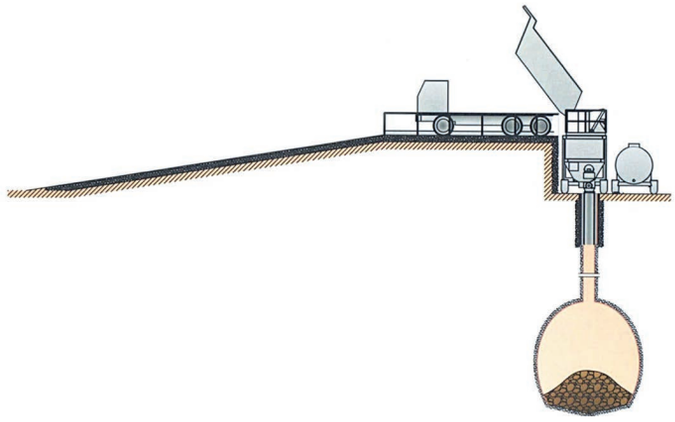

Рис. 7. Схема захоронения буровых отходов с использованием установки приема и закачки буровых отходов в подземный резервуар

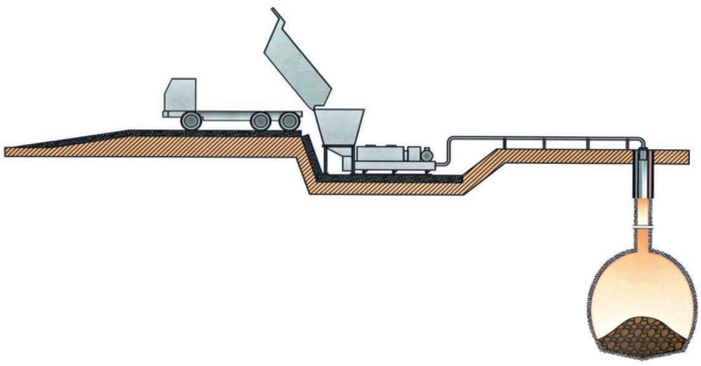

Рис. 8. Схема захоронения буровых отходов с использованием установки приема и закачки буровых отходов в подземные резервуары, оборудованной шламовым насосом

3.2. Вывоз буровых отходов автотранспортом с выгрузкой их в специальный бункер над подземным резервуаром

При данном варианте над подземным резервуаром монтируется установка приема и закачки буровых отходов (*рис. 7*), что позволяет размещать буровые отходы, доставляемые автомобильным транспортом с удаленных кустовых площадок.

При захоронении отходов с использованием установки приема и закачки применяются автосамосвалы или автоцистерны, которые загружаются отходами от буровой установки. Из автомашин отходы выгружаются в приемный бункер, где могут быть разбавлены водой до текучей консистенции. Установка приема и закачки буровых отходов может быть оборудована шламовым насосом для их транспорта на расстояние до 300 м, что сокращает затраты на монтаж/демонтаж в пределах одного полигона (*рис. 8*).

3.3. Вывоз буровых отходов с перекачкой их из бункера автомобиля шламовым насосом в подземный резервуар

Буровые отходы вывозятся автотранспортом от буровой установки до подземного резервуара. В кузов автосамосвала с помощью погрузочного механизма опускается шламовый насос для перекачки отходов в подземный резервуар (*рис. 9*).

Один из перспективных вариантов данной схемы заключается в использовании мультилифтовых установок грузоподъемностью до 25 тонн (*рис. 10*). Накопление отходов производится при загрузке в съемные бункера, которые по мере заполнения доставляются специализированной автомашиной к подземным резервуарам.

Преимущества указанного варианта заключаются в использовании серийно выпускаемого оборудования и возможности существенного сокращения задействованного автотранспорта и численности обслуживающего персонала.

4. СУЩЕСТВУЮЩИЕ СПОСОБЫ ОБРАЩЕНИЯ С ОТХОДАМИ БУРЕНИЯ

Буровые отходы включают в себя следующие фракции: буровой шлам, отработанные буровые растворы и буровые сточные воды.

Для анализа способов обращения с буровыми отходами с точки зрения оптимизации технологической схемы были рассмотрены следующие основные технологии и их комбинации, применяемые на северных месторождениях.

1. Захоронение твердых отходов в наземных полигонах. При этом твердая фракция отходов, представляющая собой в основном буровой шлам, должна быть изначально отделена от жидкой.

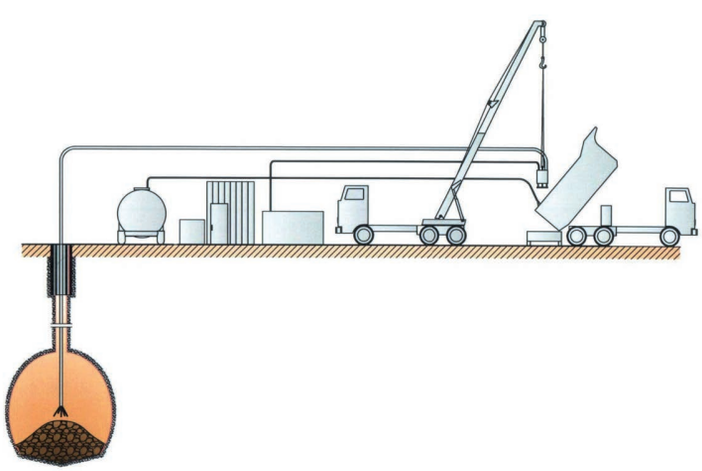

Рис. 9. Схема захоронения буровых отходов в подземный резервуар с выгрузкой их из кузова самосвала с помощью шламового насоса

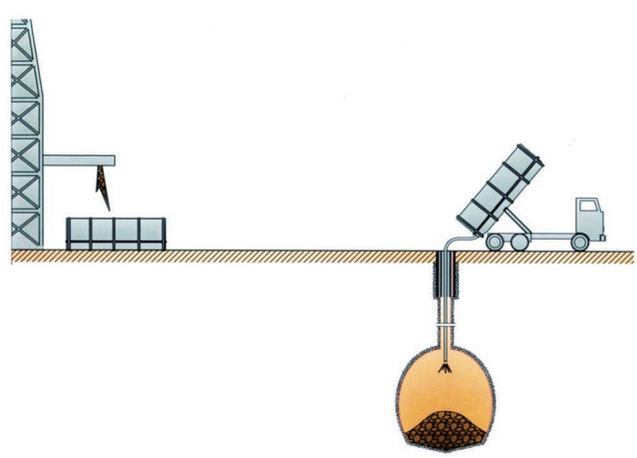

Рис. 10. Схема захоронения буровых отходов с использованием сменных кузовов и мультилифтной установки

2. Захоронение жидких отходов после их отделения от твердой фракции с помощью закачки в поглощающие скважины.
3. Обезвоживание жидкой фракции отходов бурения на газофакельных установках.
4. Захоронение жидких и твердых отходов бурения в подземных резервуарах, создаваемых в многолетнемерзлых породах.
5. Захоронение твердых и жидких отходов (после их предварительной подготовки в цехе нейтрализации) в глубокие скважины с гидроразрывом пласта-коллектора.

Сравнение действующих способов обращения с отходами бурения проводилось как по экономическим показателям, так и при оценке качественного воздействия на окружающую среду. По воздействию на экологию окружающей среды наименее благоприятными являются варианты размещения буровых отходов в наземных полигонах и термического обезвоживания их жидкой фазы на газофакельной установке, так как имеет место длительный контакт отходов с земной поверхностью, поверхностными водами и воздухом без возможности каким-либо образом исключить это воздействие.

Закачка в глубокие скважины отходов бурения с использованием гидроразрыва пласта приводит к загрязнению подземных вод и нарушению гидрогеологической обстановки, так как, кроме изменения фильтрационных свойств подземного коллектора, не исключает миграции опасных реагентов, находящихся в подвижном состоянии, в водоносные горизонты.

Способ захоронения твердых и жидких отходов бурения в подземных резервуарах с учетом непроницаемости мерзлых пород обеспечивает наибольшую степень изоляции отходов от окружающей природной среды. Средняя температура замерзания буровых отходов составляет около минус 1,5°С, что при температуре вмещающих многолетнемерзлых пород ниже минус 3°С будет приводить к постепенному переходу отходов бурения в твердомерзлое состояние.

Таким образом, с точки зрения обеспечения экологической безопасности, вариант захоронения отходов бурения в мерзлом массиве исключает какое-либо воздействие на окружающую среду при обеспечении сохранности мерзлого состояния породного массива.

Для анализа экономической эффективности затрат были рассмотрены варианты по предполагаемым технологическим схемам (пп. 4.1-4.4), использование которых рассматривалось на территории Бованенковского НГКМ (*рис. 11*).

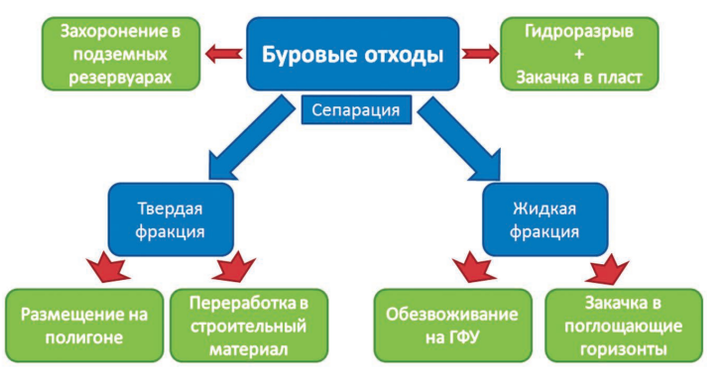

Рис. 11. Способы обращения с отходами на Бованенковском НГКМ

4.1. Технологическая схема с закачкой жидкой фракции отходов бурения в поглощающие горизонты и размещением твердой фракции на поверхностном полигоне

Данная технологическая схема подразумевает разделение отходов бурения на фракции: твердую и жидкую. В глубокие поглощающие горизонты закачивается только жидкая фаза отходов бурения. Твердая фракция размещается на отдельном полигоне на поверхности. Рассмотрим два возможных варианта обращения с твердой фракцией отходов: с захоронением на полигоне (вариант 4.1.1); химического или теплового отверждения с дальнейшим использованием в качестве строительного материала (вариант 4.1.2).

4.1.1. После разделения буровых отходов твердая фракция вывозится на централизованный полигон для захоронения, а жидкая транспортируется в специализированный цех и далее закачивается в поглощающие скважины.

В капитальные затраты включена стоимость обустройства полигона захоронения и оборудования, необходимого для выгрузки, размораживания твердой фракции отходов и их размещения в специально обустроенных картах. Также учтена стоимость цеха утилизации отработанных буровых растворов с набором необходимого оборудования, стоимость поглощающей скважины и стоимость подвижного состава, осуществляющего транспортировку жидкой фракции отходов.

4.1.2. После разделения буровых отходов твердая фракция вывозится у специализированный цех, где производится ее нейтрализация и отверждение. Жидкая фаза отходов бурения закачивается в поглощающие скважины.

В капитальные затраты включена стоимость обустройства полигона (меньшего размера, чем в варианте 4.1.1) и оборудования необходимого для выгрузки и размещения твердой фракции на полигоне. Там же на полигоне ставится установка отверждения шлама с целью его дальнейшего использования для отсыпки кустовых площадок и дорог. Кроме того, учтена стоимость цеха утилизации жидкой фракции буровых растворов, стоимость поглощающей скважины и подвижного состава, осуществляющего транспортировку жидкой фазы.

4.2. Технологическая схема с термическим обезвреживанием жидкой фракции отходов бурения

Предлагаемая схема подразумевает разделение отходов по фракциям с дальнейшим размещением твердой части на централизованном полигоне и термическим обезвоживанием флюида. В рамках данной схемы возможно рассмотреть два принципиальных варианта: с захоронением твердой фазы отходов (вариант 4.2.1) или их отверждение с дальнейшим использованием в качестве строительного материала (вариант 4.2.2).

4.2.1. Твердая фракция буровых отходов, после их разделения, вывозится и размещается на централизованном полигоне. Жидкая фаза отходов бурения подается на газофакельную установку и обезвоживается, а оставшуюся зольную часть вывозят на централизованный полигон.

В капитальные затраты для данного варианта включена стоимость обустройства полигона и оборудования, необходимого для выгрузки и размещения твердой фракции на полигоне, а также стоимость цеха нейтрализации буровых отходов, газофакельная установка и стоимость подвижного состава, осуществляющего транспортировку.

4.2.2. Твердая фракция буровых отходов после разделения вывозится в цех нейтрализации, где обрабатывается с целью получения строительного материала. Жидкая фаза отходов бурения подается на газофакельную установку и обезвоживается.

Капитальные затраты учитываются аналогично варианту 4.1.2 за исключением хозяйства поглощающих скважин, вместо которых учтена стоимость факельной установки.

4.3. Размещение отходов бурения в подземных резервуарах

В зависимости от наличия благоприятных геологических условий, подземные резервуары можно располагать в непосредственной близости от кустовых площадок – мест образования буровых отходов. В этом случае расходы на транспорт отходов снижаются. Однако, при отсутствии благоприятных геологических условий, может возникнуть необходимость строительства единого полигона для захоронения отходов бурения от всего месторождения.

Возможно рассмотреть два варианта экономической оценки технологии с точки зрения размещения подземных резервуаров на территории месторождения:

4.3.1. Отходы бурения без разделения по фракциям захораниваются в подземных резервуарах на каждой кустовой площадке.

В капитальные затраты включена стоимость бурения скважин для строительства резервуаров, монтаж скважинного и наземного оборудования, закупка техники для строительства и эксплуатации, непосредственно затраты на строительство подземных резервуаров. Также учитывается их эксплуатация с транспортом отходов бурения от мест образования до площадки захоронения.

4.3.2. Отходы бурения без разделения по фракциям захораниваются на централизованном полигоне

В капитальные затраты включена стоимость бурения скважин для строительства резервуаров, монтаж скважинного и наземного оборудования, закупка техники для строительства и эксплуатации, создание подземных резервуаров. Также учитываются затраты на транспортировку отходов бурения от мест образования до полигона и затраты на их размещение в резервуарах.

4.4. Технология совместной закачки отходов бурения в глубокие горизонты под давлением методом ГРП

В этом варианте отходы бурения закачиваются в поглощающие горизонты, для чего в породном массиве создаются полости с помощью гидроразрыва пласта.

В капитальные затраты включена стоимость отапливаемого помещения для размещения установки по закачке отходов под давлением, стоимость бункеров для накопления отходов бурения, стоимость поглощающей скважины и автотранспорта для доставки отходов бурения от кустовых площадок до установки закачки, подстанции водозаборной для технологических нужд. Аренда установки по закачке отходов в глубокие горизонты учтена в эксплуатационных затратах.

5. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕХНОЛОГИИ ПО ОБРАЩЕНИЮ С ОТХОДАМИ БУРЕНИЯ

Обоснование выбора технологии обращения с отходами бурения с точки зрения экономической эффективности выполнено в рамках НИР силами ООО «Тюменниигипрогаз» [10]. Количество вводимых скважин по годам и объемы бурового раствора взяты в расчет из «Проекта обустройства сеноман-аптских залежей Бованенковского НГКМ. Основные технические решения и «Обоснование инвестиций» – ОАО «ВНИПИгаздобыча».

Для выполнения расчётов экономической эффективности по каждому варианту обращения с отходами бурения были приняты исходные данные, приведенные в *табл. 1*.

В качестве методической основы определения экономических показателей обращения с отходами бурения приняты «Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов и их отбору для финансирования» (вторая редакция), утвержденные Госстроем России, Министерством экономики РФ, Министерством финансов РФ, Госкомпромом России, № ВК 477 от 21 июня 1999 года. Расчеты произведены по каждому году в период утилизации в ценах, действующих на 01.01.2007 г. Расчет экономического эффекта произведен в динамике по годам за период эксплуатации.

Табл. 1. Исходные данные для расчета экономической эффективности

Наименование	Един. измерения	Годы			Всего
		1	2	3	
Количество кустов	шт.	9	9	9	27
Количество скважин	шт.	69	96	93	258
Количество буровых бригад	шт.	9	9	9	9
Общий объем отходов	тыс. м³	39,46	54,91	53,19	147,56
– буровой шлам	тыс. м³	8,22	11,44	11,09	30,75
– жидкая фаза отходов бурения	тыс. м³	31,24	43,46	42,11	116,81
в т. ч.					
– осветленная вода	тыс. м³	25,68	35,73	34,61	96,03
– пульпа	тыс. м³	5,56	7,73	7,49	20,78

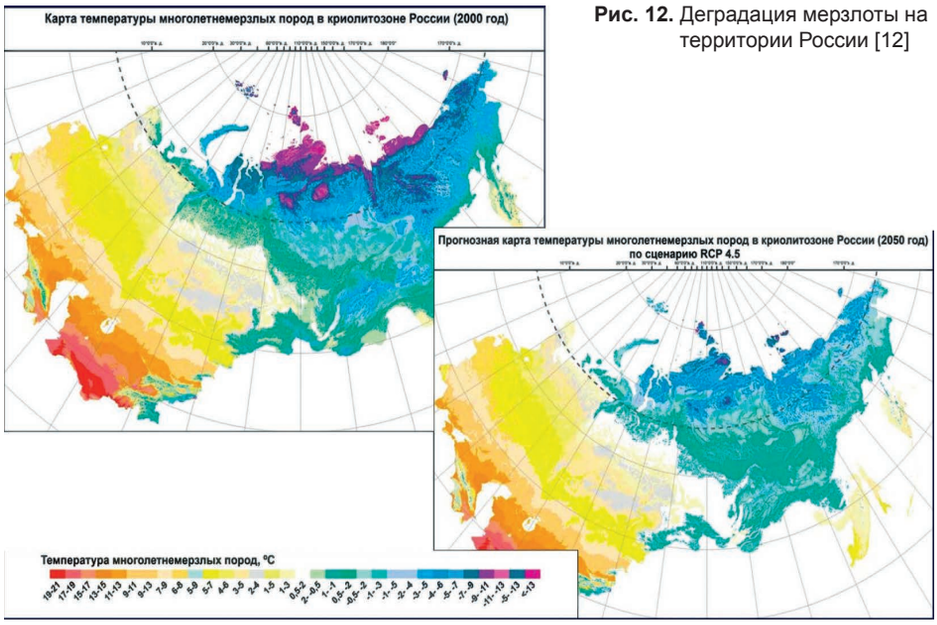

Рис. 12. Деградация мерзлоты на территории России [12]

В вариантах 4.1.1 и 4.2.1 капитальные вложения и амортизационные отчисления выше. Анализ показателей семи рассматриваемых вариантов обращения с отходами бурения (согласно *рис. 11*) показал, что вариант 4.1.1 имеет наибольшие капитальные вложения, тогда как наименьшие имеет вариант 4.4. Выбор оптимального варианта произведен по оттоку денежных средств, представляющих собой сумму капитальных вложений, эксплуатационных затрат, налога на имущество, увеличения налога на прибыль, т.е. по минимуму суммарных дисконтированных затрат. Эксплуатационные расходы рассчитаны по элементам затрат: материалы, электроэнергия, водоснабжение, расходы на оплату труда, единый социальный налог, амортизация, прочие расходы.

Результаты расчетов сведены в таблицу, показывающую себестоимость обращения с отходами бурения для каждого варианта (*табл. 2*).

Таким образом, в условиях Бованенковского НГКМ варианты захоронения отходов бурения в подземных резервуарах имеют наименьшую себестоимость и обладают наибольшей экономической эффективностью по сравнению с другими способами.

Себестоимость захоронения буровых отходов в подземных резервуарах в 1,56 раза, а капитальные затраты в 2,82 раза ниже, чем при захоронении в наземный полигон твердых отходов и поглощающую скважину жидких отходов. Интегральный эффект от внедрения технологии подземного захоронения отходов бурения в многолетнемерзлых породах на Бованенковском НГКМ составляет более 3 миллиардов рублей.

Табл. 2. Себестоимость по обращению с отходами бурения

Наименование объектов, работ, затрат	Всего	Годы		
		1	2	3
Вариант 4.1.1 Твердая фракция вывозится на централизованный полигон; Жидкая фракция закачивается в поглощающие горизонты				
Себестоимость, рубль/м^3	17614,42	21671,25	15899,22	16375,05
Вариант 4.1.2 Твердая фракция перерабатывается в строительный материал; Жидкая фракция в поглощающие горизонты				
Себестоимость, рубль/м^3	16267,95	19725,06	14804,84	15213,29
Вариант 4.2.1 Твердая фракция вывозится на централизованный полигон; Жидкая фракция термически обезвоживается на ГФУ				
Себестоимость, рубль/м^3	17934,03	21933,82	16242,95	16712,09
Вариант 4.2.2 Твердая фракция перерабатывается в строительный материал; Жидкая фракция термически обезвоживается на ГФУ				
Себестоимость, рубль/м^3	16587,56	19987,63	15148,57	15550,33
Вариант 4.3.1 Твердая и жидкая фракция захораниваются в подземных резервуарах на кустовых площадках				
Себестоимость, рубль/м^3	5924,65	7384,35	5307,50	5478,71
Вариант 4.3.2 Твердая и жидкая фракция захораниваются в подземных резервуарах на централизованном полигоне				
Себестоимость, рубль/м^3	5740,56	7154,90	5142,59	5308,48
Вариант 4.4 Твердая и жидкая фракция закачиваются в глубокие поглощающие горизонты без разделения на фракции				
Себестоимость, рубль/м^3	12735,69	15896,05	11404,98	11764,53

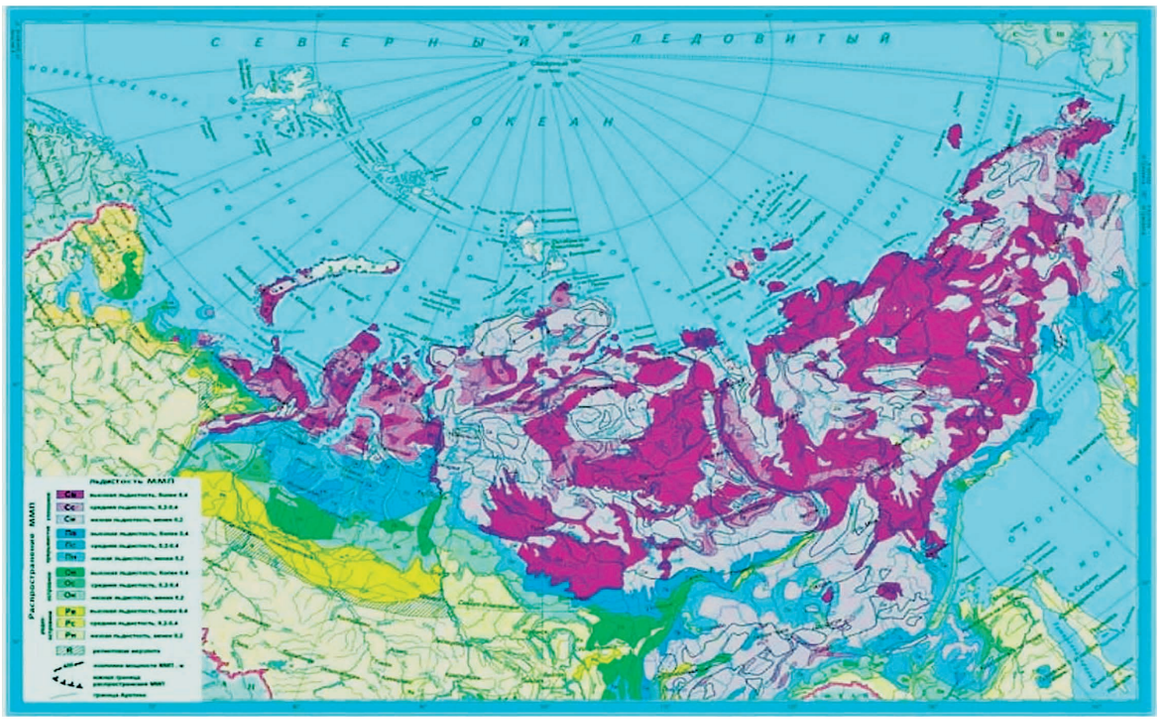

Рис. 13. Карта распространения многолетнемерзлых пород с учетом их льдистости [13]

Анализ способов обращения с буровыми отходами был проведен в 2013 г. с учетом текущих цен на оборудование и строительство. При этом для условий Ямала к настоящему моменту общая тенденция сохраняется, и с каждым годом эффективность в пользу захоронения буровых отходов в подземных резервуарах лишь увеличивается по сравнению с другими описанными аналогами.

6. ЗАЩИТА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Согласно действующему законодательству объекты подземного размещения отходов должны сохранять свои эксплуатационные характеристики на всем жизненном цикле и исключать возможность утечек содержимого в окружающий массив. Это обязательное требование для любых объектов конечного размещения отходов производства. В связи с этим для подземных резервуаров осуществляется постоянный экологический контроль процесса строительства и проводится дальнейший экологический мониторинг после их заполнения.

Основным и специфическим воздействием подземных резервуаров на окружающую среду является техногенное изменение геокриологических условий. Кроме общепринятых мероприятий, обязательных в условиях криолитозоны, существуют определённые дополнительные требования к технологии сооружения и эксплуатации подземных резервуаров в мёрзлых грунтах. Эти требования обусловлены следующими рисками:

– повышением температуры мерзлого массива в окрестности выработок-емкостей вплоть до его разрушения в процессе строительства;
– смещениями поверхности над выработанным пространством;
– повышением температуры породного массива в процессе эксплуатации и после ликвидации подземных резервуаров.

Все указанные риски взаимосвязаны, т. к. именно повышение температуры по любой причине приводит к масштабным смещениям в породном массиве. Причины и следствия могут быть кратко описаны последовательностью событий: «повышение температуры грунта – снижение прочности и увеличение скорости деформаций грунта – ускорение конвергенции выработки – рост смещений земной поверхности». Повышение температуры массива мерзлых грунтов в непосредственной близости от подземных выработок зависит от продолжительности их сооружения и может быть ограничено за счёт рациональной организации процесса.

После заполнения резервуара отходами идет постепенное их промерзание. Процесс полного перехода отходов в твердомерзлое состояние занимает значительное время (десятки лет) и может быть ускорен в несколько раз за счёт искусственного охлаждения грунтового массива вокруг выработки или отходов внутри нее. Например, с помощью сезонно-охлаждающих устройств. Отходы бурения при промерзании оказывают давление на контур выработки, что препятствует разрушению грунтового массива и повышает ее устойчивость.

Экологические риски для подземных резервуаров, связанные с повышением температуры воздуха и деградацией мерзлоты на территории Ямала вследствие изменения климата, оценены с учетом климатических моделей проекта CMIP5 для наиболее реалистичного сценария RCP 4.5 [11]. Сценарий RCP 4.5 подразумевает повышение среднегодовой температуры воздуха от 2 до 4,5°C в течение 100 лет. При этом происходит значительная подвижка криолитозоны на север (*рис. 12*).

Можно отметить, что реалистичный сценарий изменения климата RCP4.5 свидетельствует о сохранении на территории Ямала условий для надежной изоляции буровых отходов в мерзлом массиве в будущем.

7. РАЙОНИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИИ РФ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ПОДЗЕМНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ

Большая часть территории Российской Федерации покрыта многолетнемерзлыми грунтами, что позволяет говорить о возможности создания на значительных участках северных регионов

Западной Сибири, Восточной Сибири и Дальнего Востока подземных хранилищ для хранения различных продуктов или конечного размещения промышленных отходов III и IV класса опасности.

Глубины заложения подземных резервуаров, их тип, конструктивные особенности, вместимость и технология строительства напрямую зависит от строения геологического разреза на выбранной территории. Согласно современному районированию [13] большая часть криолитозоны России отвечает условиям льдистости более 0.2 д.е., что является достаточным для строительства подземных резервуаров при наличии дисперсных грунтов на глубинах до 100 м.

К настоящему времени проведены подробные изыскания для строительства подземных хранилищ скважинного типа в многолетнемерзлых породах на территории полуострова Ямал, на Тазовском полуострове, Вилюйском районе Якутии, Магаданской области и т.д. Изыскания были направлены на изучение данных регионов с целью создания подземных хранилищ для хранения жидких углеводородов и захоронения отходов бурения, образовавшихся при бурении разведочных, опорных, наблюдательных и промысловых скважин.

Наиболее перспективным, с точки зрения строительства подземных хранилищ для жидких углеводородов и захоронения отходов бурения, является территории Ямальского полуострова, Гыдана, севера Западной и Восточной Сибири.

Оптимальными условиями, с точки зрения строительства и эксплуатации поземных резервуаров, считаются следующие:

– температура массива мерзлых грунтов ниже минус 3°С;
– массив обладает льдистостью около 0,3 д.е., что препятствует фильтрации жидкой фазы захораниваемых отходов;
– кровля резервуаров находится ниже глубины нулевых годовых амплитуд колебаний температуры;
– мощность породного пласта для заложения выработок-емкостей составляет не менее 15 м;
– на площадке строительства отсутствуют межмерзлотные воды.

Наиболее благоприятны для строительства подземных резервуаров массивы многолетнемерзлых пород, сложенные мерзлыми песками или пластовыми льдами с незначительными включениями и линзами тонкодисперсных грунтов.

8. ВЫВОДЫ

Специалистами ООО «Газпром геотехнологии» разработана экономически эффективная и экологически безопасная технология строительства подземных резервуаров многоцелевого назначения в многолетнемерзлых породах. Технология успешно реализована на территории полуострова Ямал для захоронения отходов бурения всех типов скважин Бованенковского НГКМ и Харасавэйского ГКМ. В период с 2008 по 2019 гг. были построены более 50 резервуаров для захоронения отходов бурения суммарным объемом свыше 150000 м^3. Технология захоронения отходов бурения в подземных резервуарах, создаваемых через скважины в многолетнемерзлых породах, не имеет аналогов в мировой практике.

Внедрение указанной технологии позволило минимизировать техногенное воздействие на окружающую среду Крайнего Севера, существенно сократить капитальные и эксплуатационные затраты на обращение с буровыми отходами, образовавшимися в результате бурения скважин различного назначения в процессе освоения нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал.

Литература

1. https://www.gazprom.com/f/posts/53/331565/gazprom-ecology-report-2016-en.pdf
2. *Кузьмин, Г.П., Яковлев, А.В.* Подземные резервуары в мерзлых грунтах. – Якутск: Институт мерзлотоведения СО РАН, 1992. – 152 с.
3. *Смирнов, В.И.* Строительство подземных газонефтехранилищ: Газоил пресс, 2000, 250 с.
4. *Аренс, В.Ж., Бабичев, Н.И., Башкатов, А.Д., Гридин, О.М., Хрулев, А.С., Хчеян, Г.Х.* Скважинная гидродобыча полезных ископаемых. – М.: Горная книга, 2007. – 295 с.
5. Патент РФ №2422218 Способ подземного захоронения буровых отходов в многолетнемерзлых породах.
6. Патент РФ №2438953 Способ подземного захоронения буровых отходов в многолетнемерзлых породах.
7. *Аренс, В.Ж., Бабичев, Н.И., Башкатов, А.Д., Гридин, О.М., Хрулев, А.С., Хчеян, Г.Х.* Скважинная гидродобыча полезных ископаемых. – М.: Горная книга, 2007. – 295 с.
8. *Аренс, В.Ж., Мельник, В.В., Сурин, С.Д., Хрулев, А.С., Хчеян, Г.Х.* Скважинная гидротехнология. – М.: Изд. дом НИТУ «МИСиС», 2019. – 200 с.
9. *Аксютин, О.Е., Казарян, В.А., Ишков, А.Г., Хлопцов, В.Г., Теплов, М.К., Хрулев, А.С., Савич, О.И., Сурин, С.Д.* Строительство и эксплуатация резервуаров в многолетнемерзлых осадочных породах. – М. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2013. – 432 с.
10. https://www.gazprom.ru/about/strategy/innovation/award/2013/
11. https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip/wgcm-cmip5
12. Цифровые карты криолитозоны и оценка современных изменений в криолитосфере / Д.С. Дроздов, Г.В. Малкова, В.Е. Романовский и др. – Институт Криосферы Земли СО РАН. №1(16), 2018. С. 6–12.
13. Национальный атлас Арктики. – М.: Роскартография, 2017. – 496 с.

UDC 621.642.37

DRILLING WASTE DISPOSAL IN UNDERGROUND RESERVOIRS IN PERMAFROST GROUNDS

S.D. Surin, O.I. Savich, U.L. Ffilimonov

Gazprom Geotechnology L.T.D.[1]

[1] Gazprom Geotechnology L.T.D.
11/2 1st Magisralnaya street, Moscow

About the authors

Stepan Dmitrievich Surin,
Candidate of Science, Senior Research Scientist

Oleg Igorevich Savich,
Candidate of Science, Division manager

Yuriy Leonidovich Filimonov,
Candidate of Science, Center Director

The article presents a comparison of methods for handling waste generated during the drilling of production and exploration wells during the development of petroleum fields in the Arctic regions. The description of the technology for construction and operation of underground storages intended for disposal of drilling wastes is given. The article shows the economic efficiency of the introduction of underground burial technology, taking into account the protection of the environment.

Keywords: drilling wastes, underground storages, permafrost grounds, waste management, disposal wastes, economic efficiency

References

1. https://www.gazprom.com/f/posts/53/331565/gazprom-ecology-report-2016-en.pdf
2. *Kuzmin G.P., Yakovlev A.V.* Underground reservoirs in frozen grounds. –Yakutsk. Melnikov permafrost Institute. SB RAS, 1992. – 152 p.
3. *Smirnov V.I.* Construction of underground gas and oil storage facilities. Gazoil press, 2000. – 250 p.
4. *Arens V.Zh., Babichev N.I., Bashkatov A.D., Gridin O.M., Khrulev A.S., Hcheyan G.H.* Borehole hydromining. Mining book. – Moscow, 2007. – 295 p.
5. Patent RU №2422218. Method for underground disposal of drilling waste in permafrost grounds.
6. Patent RU №2438953. Method for underground disposal of drilling waste in permafrost grounds.
7. *Arens V.Zh., Babichev N.I., Bashkatov A.D., Gridin O.M., Khrulev A.S., Khcheyan G.H.* Borehole hydro-mining of mineral deposits. – Moscow: Mining book, 2007. – 295 p.
8. *Arens V.Zh., Melnik V.V., Surin, S.D., Khrulev, A.S., Khcheyan, G.H.* Borehole hydrotechnology. – Moscow: MISIS, 2019. – 200 p.
9. *Aksyutin O.E., Kazarian V.A., Ishkov A.G., Khloptsov V.G., Teplov M.K., Khrulev A.S., Savich O.I., Surin S.D.* Reservoirs construction and operation in permafrost sedimentary rocks. – Moscow – Izhevsk: SIC «Regular and chaotic dynamics», Institute of computer research, 2013. – 432 p.
10. https://www.gazprom.ru/about/strategy/innovation/award/2013/
11. https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip/wgcm-cmip5
12. Цифровые карты криолитозоны и оценка современных изменений в криолитосфере / Drozdov, D.S, Malkova, G.V., Romanovskiy, V.E. and others. – Institute of Earth's Cryosphere SB RAS. №1(16), 2018. P. 6–12.
13. National Atlas of the Arctic. – Moscow: Roskartographia, 2017. – 496 p.