

**Национальная академия наук Украины
Институт геофизики им. С.И. Субботина**

В.П. Нагорный, В.М. Глоба

Подземные хранилища углеводородов

**Под редакцией
докт. техн. наук, проф. В.П. Нагорного**

Киев – 2014

Подземные хранилища углеводородов / В.П. Нагорный, В.М. Глоба: под редакцией В.П. Нагорного; НАН Украины, Институт геофизики им. С.И. Субботина. – Киев, 2014. – С. 287, ил. 106, табл. 45, библ. 153.

ISBN 978-966-02-7196-8

В монографии показана актуальность и перспективы подземного хранения природных и сжиженных газов, нефти и нефтепродуктов. Отображены этапы развития строительства и эксплуатации подземных емкостей на протяжении 100-летнего периода.

Изложены геологические и горнотехнические условия районов строительства, свойства горных пород, определяющие их пригодность для размещения в них подземных хранилищ углеводородов.

Основная часть монографии посвящена вопросам строительства и эксплуатации различных типов подземных хранилищ: сооружаемых в пористых структурах, в каменной соли методом размыва, в прочных, непроницаемых горных породах шахтным методом, при помощи камуфлетных взрывов и в вечномерзлых породах. Рассмотрены вопросы безопасности и охраны окружающей среды.

Для широкого круга специалистов и студентов технических вузов.

Підземні сховища вуглеводнів / В.П. Нагорний, В.М. Глоба: під редакцією В.П. Нагорного; НАН України, Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна. – Київ, 2014. – С. 287, іл. 106, табл. 45, бібл. 153.

У монографії показана актуальність і перспективи підземного зберігання природних і зріджених газів, нафти і нафтопродуктів. Відображені етапи розвитку будівництва та експлуатації підземних емкостей впродовж 100-річного періоду.

Викладені геологічні та гірничотехнічні умови районів будівництва, властивості гірських порід, що визначають їх придатність до розміщення в них підземних сховищ вуглеводнів.

Основна частина монографії присвячена питанням будівництва і експлуатації різних типів підземних сховищ: споруджуваних в пористих структурах, в кам'яній солі методом розмиву, в міцних, непроничних гірських породах шахтним методом, за допомогою камуфлетних вибухів та у вічномерзлих породах. Розглянуті питання безпеки і охорони довкілля.

Для широкого круга фахівців і студентів технічних вузів.

Рекомендовано до друку Робочою секцією геодинаміки вибуху Вченої ради Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України (протокол № 2 від 28.03.2014 р.).

ISBN 978-966-02-7196-8

© Институт геофизики им. С.И. Субботина
НАН Украины, 2014

© В.П. Нагорный, В.М. Глоба, 2014

Содержание

Введение	7
Раздел 1. Актуальность проблемы подземного хранения углеводородов	9
1.1. Нефть и газ – основные составляющие топливно-энергетического комплекса	9
1.2. Неравномерность потребления углеводородов и создание подземных хранилищ	12
Раздел 2. Развитие подземного хранения углеводородов	19
2.1. Общие сведения о подземных хранилищах углеводородов, их типы и классификация	19
2.2. Опыт создания подземных хранилищ углеводородов . . .	23
Раздел 3. Геологические и горно-технические условия районов строительства подземных хранилищ углеводородов .	29
3.1. Характеристика районов распространения соляных залежей, пригодных для строительства подземных хранилищ методом размыва	29
3.2. Характеристика районов распространения горных пород, пригодных для строительства подземных хранилищ шахтного типа	36
3.3. Характеристика условий для строительства подземных хранилищ камуфлетными взрывами	39
3.4. Горно-геологические условия сооружения подземных хранилищ в районах вечной мерзлоты	41
Раздел 4. Свойства горных пород, определяющие их пригодность для создания подземных хранилищ углеводородов	42
4.1. Физико-механические свойства горных пород	42
4.2. Реологические свойства горных пород	49
4.3. Проницаемость горных пород	51
4.4. Структура порового пространства и экранирующая способность горных пород	55
4.5. Изменение свойств горных пород при длительном контактировании их с углеводородами	58
4.6. Особенности хранения углеводородов в подземных емкостях	62

Раздел 5. Подземные хранилища природных газов в пористых структурах	64
5.1. Общие сведения и параметры подземных газохранилищ	64
5.2. Определение емкости и продуктивности подземных газохранилищ	68
5.3. Технология бурения скважин	70
5.4. Технологическая схема эксплуатации подземного газохранилища в водоносном пласте	73
Раздел 6. Подземные хранилища углеводородов, образованные в отложениях каменной соли	75
6.1. Выбор площадок под строительство подземных хранилищ	76
6.2. Размещение подземных емкостей	77
6.3. Физико-химические основы процесса размыва каменной соли	78
6.4. Бурение и герметизация скважин	82
6.5. Методы сооружения подземных емкостей размывом каменной соли через буровые скважины	88
6.6. Основы проектирования размыва подземных емкостей .	101
6.7. Оценка прочности и выбор формы подземных емкостей	105
6.8. Методы контроля формообразования подземных емкостей и определение их объема	111
6.9. Интенсификации процесса размыва подземных емкостей, образованных в отложениях каменной соли . .	118
6.9.1. Анализ причин, снижающих эффективность сооружения подземных хранилищ в каменных солях методом размыва	118
6.9.2. Методы интенсификации процесса размыва подземных емкостей в отложениях каменной соли	119
6.9.3. Разуплотнение и прочность горных пород при неравномерных динамических нагружениях. Результаты экспериментальных исследований	124
6.9.4. Теоретические исследования напряженно-деформированного состояния нерастворимых пластов горных пород при действии нагрузок	129
6.9.5. Технологии интенсификации сооружения подземных хранилищ в каменных солях методом размыва	139
6.9.6. Промышленные исследования эффективности взрывных методов интенсификации строительства подземных	

	хранилищ в каменных солях методом размыва	153
6.10.	Технологические схемы и режимы эксплуатации подземных хранилищ, образованных в каменных солях методом размыва	162
6.10.1.	Эксплуатация подземных хранилищ газообразных продуктов	162
6.10.2.	Эксплуатация подземных хранилищ нефтепродуктов . . .	167
Раздел 7.	Подземные хранилища углеводородов шахтного типа	170
7.1.	Конструктивные схемы подземных хранилищ шахтного типа	170
7.2.	Выбор основных параметров подземных хранилищ	175
7.3.	Выбор формы и оценка прочности горизонтальных выработок-емкостей подземных хранилищ	178
7.4.	Технология сооружения подземных хранилищ шахтного типа	181
7.4.1.	Технология сооружения вертикальных выработок	181
7.4.2.	Технология сооружения горизонтальных выработок . . .	193
7.4.3.	Сооружение выработок-емкостей подземных хранилищ	202
7.5.	Герметизация подземных хранилищ шахтного типа	208
7.5.1.	Методы герметизации подземных емкостей	208
7.5.2.	Сооружение герметичных перемычек в подземных хранилищах шахтного типа	212
7.5.3.	Герметизация стенок выработок-емкостей	222
7.5.4.	Технология эксплуатации подземных хранилищ шахтного типа	223
7.5.5.	Испытания подземных хранилищ шахтного типа	226
Раздел 8.	Подземные хранилища, образованные камуфлетными взрывами	227
8.1.	Действие камуфлетного взрыва при создании подземных хранилищ	228
8.2.	Технология сооружения подземных хранилищ камуфлетными взрывами	232
8.3.	Сооружение базы подземных хранилищ камуфлетными взрывами	239
8.4.	Безопасность взрывных работ при сооружении хранилищ камуфлетными взрывами	241
8.5.	Обеспечение герметичности и прочности подземных	

	емкостей, сооружаемых камуфлетными взрывами	244
8.6	Эксплуатация подземных емкостей, образованных камуфлетными взрывами	249
Раздел 9.	Подземные хранилища в вечномерзлых породах	252
9.1.	Общие сведения и характеристика пород	252
9.2.	Технология строительства подземных хранилищ в вечномерзлых породах	253
9.2.1.	Ледопородные хранилища шахтного типа	253
9.2.2.	Траншейные ледопородные хранилища	257
9.2.3.	Подземные хранилища, образованные в пластовых льдах посредством скважин	258
Раздел 10.	Изотермические хранилища	259
10.1.	Основные характеристики изотермических хранилищ	260
10.2.	Технология сооружения изотермических хранилищ	262
10.3.	Эксплуатация изотермических хранилищ	267
Раздел 11.	Обеспечение безопасности и охрана окружающей среды	269
	Список литературы	275
	Подземные хранилища углеводородов (хронология, цифры и факты)	283

Введение

Работа промышленности, транспорта, сельскохозяйственного производства и жилищно-коммунального хозяйства непосредственно связана с потреблением жидких и газообразных углеводородов. Известно, что потребление нефти, нефтепродуктов, природного газа имеет неравномерный характер в течении года, месяцев, дней недели и на протяжении суток. Для ритмичной работы всех звеньев отраслей промышленности и транспорта необходимо иметь хранилища, регулирующие сезонные и суточные неравномерности потребления природных углеводородов и продуктов их переработки.

В последние годы создание государственных и стратегических резервов, повышение надежности работы системы дальнего газоснабжения потребовало увеличения объемов баз хранения.

Для хранения нефти, нефтепродуктов, сжиженных газов уже многие десятилетия используются наземные металлические и железобетонные резервуары. Однако эти сооружения имеют существенные недостатки: высокая стоимость строительства и эксплуатационных расходов, значительные металлозатраты, повышенная взрыво- и пожароопасность, большая площадь застройки, значительные потери хранимых продуктов от больших и малых «дыханий» и др.

В XX столетии, кроме традиционных, разрабатывались и более эффективные методы сооружения и хранения углеводородов в подземных хранилищах, располагаемых в верхней части земной коры.

За столетний период в мире накоплен значительный опыт строительства и эксплуатации подземных хранилищ углеводородов. Пройден путь от первых хранилищ газа, образованных в пористых средах в начале XX столетия, до сооружения хранилищ в каменной соли методом размыва и хранилищ шахтного типа в плотных непроницаемых горных породах. В 60-е годы прошлого века разработаны методы сооружения хранилищ при помощи камуфлетных взрывов. Под подземные хранилища приспособлены миллионы кубометров пространств выработок отработанных шахт и рудников. Для хранения природного газа созданы крупнообъемные хранилища в отработанных нефтегазовых месторождениях и водоносных пластах. Строительство подземных хранилищ шагнуло за Полярный круг в районы вечномерзлых пород.

Подземные хранилища стали неотъемлемым звеном в топливно-энергетическом комплексе многих стран, обеспечивающим бесперебойное функционирование и работу промыслов, магистральных газонефтепроводов, нефтеперерабатывающих заводов и газоснабжение промышленных объектов, городов и поселков.

Расширению строительства подземных хранилищ в мире способствовала их высокая эффективность. Достоинством подземных хранилищ являются также их большие объемы и надежность, практически нет потерь при хранении, почти полное отсутствие загрязнения окружающей среды.

На протяжении столетнего периода развивались научные и проводились практические исследования по проблеме разработки эффективных методов сооружения и эксплуатации подземных хранилищ углеводородов. Усилиями ученых научных институтов и вузов, предприятий отрасли была создана научная, проектная и производственная база подземного резервуаростроения в различных горно-геологических условиях.

При написании книги использованы материалы собственных исследований, многочисленные работы известных ученых и специалистов, а также Интернет.

В конце книги авторы приводят хронологию, отражающую в цифрах и фактах веки, относящиеся к проблеме сооружения и эксплуатации подземных хранилищ углеводородов.

Авторы выражают благодарность Юшицыной Я.А. и Беловолу В.В. за подготовку компьютерной верстки книги.

Раздел 1

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ ПОДЗЕМНОГО ХРАНЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ

1.1. Нефть и газ – основные составляющие топливно-энергетического комплекса

Индустрия подземного хранения углеводородов, имеющая уже почти столетнюю историю, напрямую связана с нефтью и газом. В XXI веке нефть и газ остаются основными источниками энергии несмотря на то, что включаются новые технологии, новые источники энергии, находящиеся в недрах Земли.

В современном мире потребление энергии будет еще больше возрастать (табл. 1.1).

Таблица 1.1. Рост энергопотребления в мире, млрд. т условного топлива [1]

Годы	2010	2020	2050	2070	2100
Количество	15,9	19,2	22,5	23,9	24,2

В динамике роста энергопотребления доля нефти и газа составляет 67 % (табл. 1.2).

Таблица 1.2. Структура потребления энергоресурсов в мире на начало XXI столетия [1]

Виды энергоресурсов	Количество (млн. т условного топлива)	%
Нефть	5 100	41
Газ	3 100	26
Уголь	3 130	26
Атомная энергия	336	3,0
Гидроэнергия	350	3,0
Нетрадиционные возобновляемые источники	30	0,3

Мировая добыча нефти в настоящее время составляет около 4,0 млрд. т в год. Как утверждают специалисты, нефть – главный товар в мире, от цены которого в немалой степени зависит «самочувствие» глобальной экономики.

В настоящее время нефтяные месторождения разрабатываются более чем в 100 странах мира. Распределение их по отдельным странам мира неравномерно (табл. 1.3).

Таблица 1.3. Распределение мировых запасов нефти [2]

Регионы	Млн. тонн
Ближний восток	101 752,0
Северная Америка	28 240,0
Латинская Америка	18 556,0
Западная Европа	2 587,0
Восточная Европа	244,0
СНГ	24 905,0
Африка	13 400,0
Южная и Юго-Восточная Азия	3 560,0
Австралия и Океания	651
Другие регионы мира	200 677,0

В XX веке рост спроса на нефть уравнивался открытием новых месторождений, позволявшим увеличить ее добычу. Однако многие считают, что в XXI веке нефтяные месторождения исчерпают себя и диспропорция между спросом на нефть и ее предложением приведет к резкому росту цен.

Но пока добыча нефти растет и растет ее потребление.

Максимальное количество месторождений сосредоточено на Ближнем и Среднем Востоке (около $\frac{1}{3}$ мировых запасов), в США, России, Африке. Большие запасы нефти имеются в нефтяных песках Канады и Венесуэлы. Этой нефти при нынешних темпах потребления хватит на 110 лет. Компании разрабатывают новые технологии добычи нефти из нефтяных песков.

Нефть является главной статьей российского экспорта. Россия поставляет на экспорт около 250 млн. т, что составляет 32 % всего российского экспорта.

Особое место в энергетическом балансе стран мира занимает природный газ. Мировые геологические запасы газа на континентах и морском шельфе по прогнозным оценкам составляют 100 трлн. м³.

Первое место по добыче природного газа занимают Соединенные Штаты Америки (около 20 % добываемого в мире газа), за ними с некоторым отрывом следует Россия (17,6 %).

Дальнейшее потребление природного газа будет расти ускоренными темпами. До 2015 года оно почти удвоится и вырастет до 5 трлн. м³.

Распределение добычи природного газа по основным регионам мира представлено в табл. 1.4.

Таблица 1.4. Добыча природного газа в регионах мира в 2009 г. [124]

Регион	Добыча, млрд. м ³
Северная Америка	813,0
Евразия	973,0
Африка	203,8
Южная и Центральная Америка	151,6
Ближний Восток	407,2
Азиатско-Тихоокеанский регион	438,4

Во многих странах мира сосредоточены крупные газовые месторождения: в России – Уренгойское – 4 трлн. м³, Медвежье – 11 трлн. м³; в США – 8,3 трлн. м³; Алжире – 4 трлн. м³; Иране – 3,4 трлн. м³ [1].

Мировые извлекаемые запасы газа увеличатся за счет открытия месторождений на континентальном шельфе, освоения месторождений на больших глубинах, за счет метана угольных месторождений и освоения сланцевого газа и газогидратов. К концу 2100 года прогнозируется добывать 7500 млрд. м³.

По подсчетам госдепартамента энергетики США в 2030 году по сравнению с 2003 годом роль газа, как энергоносителя, в мировой промышленности увеличится в 10 раз и его ежегодное потребление до 2030 г. составит 5,0–5,5 трлн. м³ [125].

Стратегия развития отраслей топливно-энергетического комплекса во многом определяется потенциальными ресурсами углеводородного сырья и возможностями его освоения. По прогнозам развития энергетической базы и прироста запасов уровень добычи нефти удвоится и к 2100 году составит 5 млрд. т/год.

Увеличение добычи нефти и газа в XXI веке будет происходить за счет новых месторождений, залегающих на глубинах 5–7 км в труднодоступных районах. Однако основные перспективы прироста запасов связываются с континентальным шельфом. Ожидается, что к 2050 г. добыча нефти и газа на морских месторождениях составит более 50 %. К этому же периоду будет приурочено начало освоения труднодоступных запасов с глубины моря более 1 000 м.

Решение этих проблем невозможно без применения новых технологий в поиске, разведке, добыче и транспортировке углеводородов. Одна из главных целей – внедрение передовых методов увеличения нефтеотдачи. За счет увеличения коэффициента

нефтеотдачи пластов только на 10 % дополнительно можно извлечь более 100 млрд. тонн.

Надежность топливно-энергетического комплекса и энергетическая безопасность государства во многом зависят от бесперебойного функционирования системы добыча – транспортировка – хранение и потребления углеводородов. И в этой системе хранению углеводородов отводится особое место.

1.2. Неравномерность потребления углеводородов и создание подземных хранилищ

Актуальность и перспективность проблемы подземного хранения нефти, нефтепродуктов и сжиженных газов обусловлена рядом факторов, главными из которых являются: неравномерность и сезонность потребления нефтепродуктов; рост объемов добычи нефти и газа, производство нефтепродуктов и сжиженных газов; развитие трубопроводного транспорта; необходимость снижения потерь нефти и нефтепродуктов, имеющих место при хранении в резервуарных парках; повышение экономичности хранения за счет уменьшения металлоемкости, капитальных и эксплуатационных затрат; необходимость создания гарантийных запасов нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ) и специальных резервов; охрана окружающей среды.

Обеспеченность достаточным количеством баз хранения углеводородного сырья и продуктов их переработки является основным условием, характеризующим уровень технической вооруженности нефтяной, газовой и нефтеперерабатывающей промышленности.

Установлено, что бесперебойное функционирование системы добыча – транспортировка – переработка – потребление может быть обеспечено, если одной тонне годового прироста добычи соответствует $0,3-0,4 \text{ м}^3$ годового прироста резервуарной емкости [3].

Как первичному топливно-энергетическому ресурсу ведущее место отводится природному газу. В структуре энергетических источников России природный газ составляет более 50 % [125]. Такая тенденция наблюдается и в других развитых странах. Это обеспечивает устойчивое и надежное газоснабжение промышленности, жилищно-бытового сектора и сельского хозяйства, зависящего во многом от природно-климатических условий.

Для природного газа, являющегося основным энергетическим источником, характерна сезонная неравномерность его потребления. Сезонная неравномерность потребления газа – это колебания в потреблении газа по месяцам, кварталам, сезонам года, обусловленные главным образом изменением температуры наружного воздуха. Кривая изменения объема газопотребления имеет циклический синусоидальный вид с периодом, равным году (рис. 1.1).

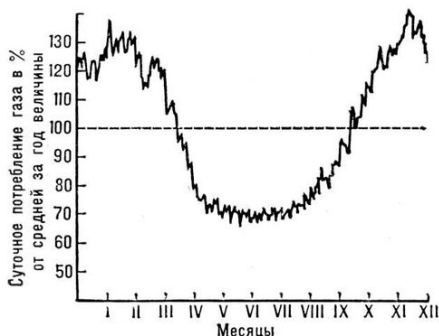


Рис. 1.1. График газопотребления промышленного города [126]

Значительная неравномерность потребления газа характерна для крупных городов, имеющих большой разрыв между максимальным (зимним) и минимальным (летним) расходом газа из-за того, что газ используется для отопления в зимнее время.

Месячная неравномерность газопотребления характеризуется коэффициентом месячной неравномерности потребления газа K_M , определяемым по формуле [127]

$$K_M = \frac{Q_M}{Q_c}, \quad (1.1)$$

где Q_M – фактическое месячное потребление; Q_c – среднемесячное потребление

$$Q_c = Q_g / 12, \quad (1.2)$$

где Q_g – объем годового потребления газа.

В летние месяцы коэффициент месячной неравномерности меньше единицы.

Для устранения сезонной неравномерности потребления газа в крупных городах и промышленных центрах избыток газа летом передают так называемым буферным потребителям, переходящим в зимний период на другой вид топлива. Для быстрого перехода с одного вида топлива на другой, а иногда для совместного сжигания двух различных видов топлива, тепловые агрегаты оборудуются комбинированными газогорелочными устройствами – газомазутными или пылегазовыми. В практике также имеют место технологические процессы, не допускающие даже кратковременного прекращения подачи топлива ввиду возможной порчи ценной продукции или выхода из строя газоиспользующего оборудования. В таких случаях также необходима установка газогорелочных устройств, позволяющих немедленно переходить с одного вида топлива на другой [128].

Иногда сезонная неравномерность потребления газа устраняется введением принудительного графика потребления. При этом промышленные предприятия являются буферным потребителем, сглаживающим неравномерность расхода. В зимнее время почти все предприятия отключают от газовой сети, летом же их подключают. По другому варианту в зимнее время за счет уменьшения подачи предприятиям газа-топлива увеличивается его потребление коммунально-бытовым сектором.

Часовая неравномерность потребления газа компенсируется с использованием аккумулирующей способности последних участков газопроводов, отводов магистральных газопроводов к крупным потребителям и промышленным районам. Значительная часть неравномерности расхода газа компенсируется за счет аккумулирующей способности разветвленной газораспределительной сети высокого давления [128].

Неравномерный режим потребления природного газа, обусловленный объективными факторами, оказывает существенное влияние на загрузку мощностей промыслов и газопроводов. Это приводит к тому, что рабочие мощности с одной стороны могут быть недоиспользованы, а с другой – не в состоянии покрыть пиковые расходы газопотребления. В результате создается условие несогласованности в режимах подачи и потребления природного газа. В то же время необходимо чтобы мощности по добыче и транспорту газа были задействованы с оптимальной загрузкой, а потребители получали газ в необходимых количествах в течение года, включая

периоды пиковых спадов.

Сезонная неравномерность потребления газа определяет напряженную работу компрессорных станций в зимнее время и требует резервирования, аккумулирования больших количеств газа для выравнивания его потребления и повышения эффективности, оптимальности и надежности всех звеньев системы добыча – транспорт – потребление. Эта проблема решается строительством подземных газохранилищ.

Неравномерность потребления характерна и для жидких углеводородов. Неравномерность потребления нефтепродуктов, периодические спады и подъемы в течение года связаны, прежде всего, с использованием нефти в качестве топлива в различных отраслях промышленности и транспорта (табл. 1.5).

Таблица 1.5. Удельный вес нефтепродуктов в общем расходе топлива [4]

Область применения	Расход топлива	
	виды топлива	доля в общем расходе
Промышленность	ДТ, бензин	17,0
Электростанции	Мазут	11,0
Сельское хозяйство	ДТ, бензин	75,0
Транспорт:		
железнодорожный	ДТ, мазут	25,0; 26,0
автомобильный	ДТ, бензин	70,0; 30,0
морской	ДТ, мазут	92,0; 42,0
авиационный	Авиабензины	100,0
Строительство трубопроводов	ДТ, бензины	80,0; 20,0

Каждая отрасль промышленности, транспорт, строительство характеризуются сезонной неравномерностью потребления топлива, причиной которой являются экономико-организационные и природно-климатические факторы.

Сезонность потребления топлива в зависимости от природно-климатических условий особенно ярко проявляется в районах Средней Азии, Сибири и севера Российской Федерации. Так, в условиях пустынь Средней Азии работа машин и механизмов, потребляющих топливо, крайне затруднена повышенным содержанием пыли, песка, действием ветра и высокой температуры воздуха. В холодных районах низкие температуры, особенно в зимний период, резко ограничивают темпы проведения строительных

работ, графики работы машин и механизмов, потребляющих топливо. В районах с вечномёрзлым грунтом и суровым климатом простои машин и механизмов на горнодобывающих предприятиях составляют 70 %. При этом из общего количества простоев из-за климатических условий почти 90 % приходится на зиму–осень [5].

Особенно четко сезонность в работе прослеживается на заболоченных участках. Так, на европейском Севере зона заболоченности составляет 40 % территории, в Западной Сибири – около 70 %. Здесь темпы строительства магистральных газонефтепроводов снижаются в летние месяцы и возрастают, когда болота промерзают и покрываются льдом. В связи с этим наблюдаются значительные сезонные перебои в потреблении топлива.

Расход топлива непосредственно зависит от сезонности работы транспорта. На большинстве железных дорог объем перевозок грузов повышается в среднем на 6–10 % и приходится, в отличие от пассажирских перевозок, на конец осени и зимние месяцы (октябрь–ноябрь). В этот период возрастает потребность в увеличении количества локомотивов, а следовательно, и топлива. Повышается суточная нагрузка и на маневровые локомотивы с дополнительным расходом дизельного топлива до 10–18 % [6].

В автотранспорте сезонность во многом зависит от характера выполняемой работы. Обычно в летний период (июль–август) потребление топлива автомашинами превышает среднегодовой расход на 25–30 %. Для воздушного транспорта сезоны использования топлива обусловлены в основном пассажирским спросом. Здесь нагрузка линий и расход топлива в летние месяцы (июль–август) в 2,4–2,6 раза больше среднегодовой нормы. На водном транспорте неравномерность потребления топлива зависит, главным образом, от интенсивности его эксплуатации во время навигации.

Резкие колебания в расходе топлива имеют место в тех случаях, когда оно применяется для отопления жилых помещений, промышленных зданий, создания вентиляции и других целей.

К экономико-организационным причинам неравномерности использования топлива относятся, в первую очередь, замена и модернизация машин, установок и механизмов, потребляющих топливо. Так, рост мощностей энергетических агрегатов от 50 до 300 тыс. кВт с параметрами пара 90 кгс/см² при температуре 535 °С обеспечивает снижение расхода топлива на 18,8 % [5].

Эксплуатационная надежность транспортно-распределительной системы, обеспечивающей народное хозяйство страны нефтью и нефтепродуктами, находится в прямой зависимости от развития региональных баз оперативного и долговременного хранения нефти и топлива и от резервуарных парков аварийного назначения.

Резервуарные парки размещаются и необходимы во всех звеньях топливно-энергетического комплекса: на промыслах, по трассе магистральных нефтепроводов, на НПЗ для гарантийных запасов сырой нефти и продукции нефтепереработки, на нефтяных терминалах и перевалочных распределительных нефтебазах. Особое место резервуарные парки занимают в системе госрезервов стратегического хранения.

Решение проблемы хранения и резервирования нефти и нефтепродуктов путем применения традиционных резервуаров по сравнению с подземными хранилищами требует больших капитальных вложений, значительных эксплуатационных затрат, больших затрат металла, потребности в значительных земельных отводах, а также существенных затрат на проведение мероприятий по снижению вероятности загрязнения окружающей среды в результате утечек продукта. Наземные склады нефти и нефтепродуктов относятся к категории предприятий повышенной взрывопожарной и техногенной опасности.

Практика показывает, что эксплуатация наземных резервуаров нефтепродуктов сопряжена с рядом сложностей и трудностей, особенно в сложных природно-климатических условиях и при наличии сейсмоопасных зон. При авариях с разрушением резервуаров возможны человеческие жертвы и огромный экономический и экологический ущерб. Вероятность риска тяжелых последствий возрастает вследствие группового расположения резервуаров. Согласно результатам анализа последствий аварий на резервуарах нефтепродуктов, зафиксированный экономический ущерб превышает стоимость возведения самих резервуаров в 20–500 раз. Авария на нефтеперерабатывающем комплексе в Японии принесла убытки в 150 млн. долларов.

Все развитые страны мира имеют многочисленные стратегические и оперативные запасы нефтепродуктов и нефти, размещаемые в подземных резервуарах, образованных в каменной соли. Так, в ФРГ согласно закону о минимальных запасах нефтепродуктов, их суммарные запасы должны составлять 90-

дневный объем потребляемого количества. Для устойчивой работы промысла, объектов переработки и транспортно-распределительной системы нефти и нефтепродуктов необходимо иметь запас этих ресурсов примерно равный 9–11 % от их потребления, а с учетом государственных резервов количество хранимых нефтепродуктов может составить 14–16 % от их потребления [7].

Еще в 1975 году сенат США принял решение о создании стратегического резерва нефти. На сегодняшний день – это крупнейший мировой источник буферных запасов сырой нефти объемом 725,1 млн. баррелей (2009 г.) [129].

К созданию стратегических резервов проявили интерес и ряд других стран (табл. 1.6).

Таблица 1.6. Стратегические резервы добытой нефти в мире (млн. баррелей) [130]

Страна, регион	Резерв
США	563
Япония	321
Германия	55
Европейские страны-члены ОЭСР (включая Германию)	325
Азиатские страны-члены АТЭС (т. н. «Азиатская семерка»)	370

Примечание. ОЭСР – Организация экономического сотрудничества и развития.
АТЭС – Азиатско-Тихоокеанское экономическое сотрудничество.

Таким образом, проблемы обеспечения надежного газоснабжения коммунального хозяйства и отраслей промышленности, ритмичной работы промыслов, магистральных трубопроводов, НПЗ; необходимость создания гарантийных и стратегических резервов нефти и нефтепродуктов должны решаться сооружением подземных хранилищ углеводородов.

Раздел 2

РАЗВИТИЕ ПОДЗЕМНОГО ХРАНЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ

Подземные газонефтехранилища, построенные в XX столетии, нашли свое применение и развитие во многих странах мира.

2.1. Общие сведения о подземных хранилищах углеводородов, их типы и классификация

Подземным хранилищем в непроницаемых горных породах называется естественная или искусственно созданная полость (емкость) в комплексе с наземным и подземным технологическим оборудованием, обеспечивающим прием, хранение и отбор продуктов. По виду хранимого продукта подземные хранилища подразделяются на хранилища: природного газа, сжиженных углеводородных газов, нефти и нефтепродуктов.

Назначение подземных хранилищ – обеспечение надежности, экономичности и оптимальности систем газообеспечения и нефтеснабжения, а также единой системы добыча – переработка – транспортировка – хранение – распределение – потребление.

Функции подземных хранилищ разнообразны. Основные из них следующие [131]:

- обеспечение непрерывной поставки продукции и топлива всем потребителям в соответствии с сезонными и суточными колебаниями потребления;
- обеспечение бесперебойной ритмичной работы объектов добычи, переработки, транспорта;
- накопление необходимых резервов для покрытия отдельных пиковых и случайных колебаний стратегических резервов.

Для строительства подземных хранилищ, как правило, используются плотные непроницаемые породы: каменные и калийные соли, гипсы, ангидриты, глины, мергели, известняки, доломиты, граниты, гнейсы, многолетнемерзлые породы.

Подземные хранилища для природных газов сооружаются в пористых породах (коллекторах).

В мировой практике подземные газонефтехранилища по способам сооружения емкостей для хранения газа, нефти, нефтепродуктов и сжиженных газов подразделяются на:

- образованные в пористых структурах (водоносных пластах и отработанных нефтяных и газовых месторождениях);
- образованные в отложениях каменной соли размывом через буровые скважины;
- создаваемые в прочных и плотных горных породах шахтным способом и в горных выработках отработанных шахт и рудников;
- сооружаемые в вечномерзлых породах;
- образованные подземными (камуфлетными) взрывами;
- заглубленные низкотемпературные хранилища с ледопородной оболочкой.

Существуют различные классификации подземных хранилищ. Так, А.С. Добина и Н.А. Евстропов [8] предлагают подразделять все подземные емкости по способу создания на две группы. К первой группе относятся емкости, представляющие собой полости (переоборудованные горные выработки шахт и рудников), а также выработанные пористые породы (коллекторы), освобожденные от ранее содержащихся в них нефти и газа. Во вторую группу включены специально сооружаемые емкости.

С учетом предложенной в работе [9] классификации газонефтехранилища подразделяются на три основных типа. Подземные хранилища первого типа создаются в различных горных породах горнопроходческими методами. Хранилища второго типа создаются в отложениях каменной соли геотехнологическим способом (растворением соли водой через буровые скважины). Для строительства хранилищ третьего типа используется энергия мощных подземных взрывов, способствующая уплотнению вмещающих пород и образованию в них полостей.

В.Б. Сохранский и В.И. Черкашенинов [9] предложили классификацию подземных хранилищ шахтного типа в зависимости от горно-геологических условий и способов достижения герметичности емкостей. В соответствии с данной классификацией подземные хранилища шахтного типа подразделяются на три вида. К первому виду относятся газонефтехранилища, в которых герметичность подземных емкостей обеспечивается непроницаемостью вмещающих пород. В газонефтехранилищах второго вида герметичность подземных емкостей обусловлена подпором хранимого продукта подземными водами. Герметичность подземных емкостей хранилищ третьего вида достигается искусственно: возведением внутренних покрытий, либо образованием

ледопородного цилиндра вокруг выработки-емкости при хранении продуктов (сжиженного углеводорода, этилена) в охлажденном состоянии.

Подземные хранилища, построенные горным (шахтным) способом называются хранилищами шахтного типа. Хранилища, сооружаемые бесшахтным способом, называются бесшахтными подземными хранилищами. Это определение, согласно СНиП 21-01, вошло в разделение хранилищ по типам, сооружаемых в непроницаемых горных породах (табл. 2.1).

Таблица 2.1. Типы подземных хранилищ и области их применения [132]

Тип резервуара	Вид хранимого продукта		
	Газ	Сжиженный углеводородный газ	Нефть и нефтепродукты
Бесшахтный в каменной соли	+	+	+
Шахтный в породах с положительной температурой	-	+	+
Шахтный в вечномерзлых породах	-	-	+

С учетом способов сооружения и свойств горных пород в табл. 2.2 приведена классификация подземных хранилищ в зависимости от способов сооружения и эксплуатации.

Таблица 2.2. Классификация подземных хранилищ в непроницаемых горных породах [131]

Тип подземного хранилища	Способ сооружения	Горная порода
В отложениях каменной соли: а) в массивах б) в пластах ограниченной мощности	Геотехнологический: 1) циркуляционный; 2) струйный	Каменная соль в виде массивов, штоков, куполов или пластовых отложений различной мощности
Сооружаемые горным способом: а) шахтные; б) ледогрунтовые; в) изотермические	С помощью горнопроходческой техники; выемка грунта	Гипсы, ангидриды, граниты, глинистые сланцы; иногда песчаники; вечномерзлые грунты; искусственно замораживаемые грунты
Другие типы: а) образованные подземными, ядерными и другими взрывами; б) заглубленные в грунтах; в) заброшенные шахты, карьеры и другие горные выработки	Взрывной Выемка грунта и покрытие стенок изолирующими пластмассами	Ангидриды, доломиты, известняки и другие плотные породы Плотные грунты Скальные породы, гранит, гнейс и другие горные породы

В основу классификации подземных газонефтехранилищ, предложенной А.И. Ширковским и Г.И. Задорой, положено состояние хранимого продукта и методы создания емкостей [10].

В зависимости от режима работы хранилища подразделяются на базисные и пиковые. Базисные подземные хранилища газа (ПХГ) предназначены для циклической эксплуатации в базисном технологическом режиме, характеризующемся сравнительно небольшими отклонениями (увеличением или уменьшением в пределах от 10 до 15 %) суточной производительности ПХГ при отборах и закачках газа от среднемесячных значений производительности.

Пиковые ПХГ предназначены для циклической эксплуатации в пиковом технологическом режиме при значительных пиковых спросах (свыше 10–15 %) суточной производительности ПХГ в течение нескольких суток при отборах и закачках газа относительно среднемесячных значений производительности [129].

В зависимости от объема активного газа, производительности откачки и назначения существует распределение ПХГ по следующим типам (табл. 2.3).

Таблица 2.3. Характеристика ПХГ по назначению [129]

Тип хранилища	Объем активного газа	Производительность	Область влияния
Базисные	До нескольких десятков млрд. м ³	До нескольких сотен млн. м ³ в сутки	На газотранспортную систему и газодобывающие предприятия
Районные	До нескольких млрд. м ³	До нескольких десятков млн. м ³	На группу потребителей и участки газотранспортной системы
Локальные	До нескольких сотен млн. м ³	До нескольких млн. м ³	Ограничена отдельными потребителями

Исходя из продолжительности периода отбора активного газа в сутки и возможного покрытия суточной потребности в газе, подземные хранилища подразделяются на:

- базисные – 120–150 суток;
- полупиковые – 60–90 суток;
- пиковые с циклической работой по закачке и отбору за 2–3 месяца.

На рис. 2.1 представлена общая классификация подземных хранилищ углеводородов.



Рис. 2.1. Общая схема классификации подземных хранилищ [11]

2.2. Опыт создания подземных хранилищ углеводородов

Проблемой подземного хранения заинтересовались в мире в начале XX столетия. С тех пор эта отрасль нефтегазовой индустрии прошла свой столетний путь развития. Первые подземные хранилища газа были созданы в 1915 году в Канаде (Уэллед-Каунтри) и США (г. Буффало, штат Нью-Йорк – в отработанном газовом месторождении). В 1916 г. для хранения жидких топлив немецким акционерным обществом была использована соляная каверна.

Первая подземная емкость шахтного типа для хранения нефти появилась в 1949 г. в Швеции, а первое подземное хранилище для сжиженного пропана – в 1950 г. в США.

В бывшем СССР вопрос о подземном хранении нефтепродуктов был поставлен профессором В.Н. Черникиным в 1955 г. В 1958 г. на истощенном газовом месторождении в Куйбышевской области было создано первое подземное газохранилище. В 1959 году началось заполнение газом Калужского газохранилища в водоносных пластах. Позднее в водоносном пласте было создано одно из крупнейших в мире – Щелковское хранилище, в котором хранилось 3,0 млрд. м³ газа. В 60-е годы XX в. вступили в строй два крупных подземных

газохранилища, созданных в истощенных газовых месторождениях Саратовской области, в которые производилась закачка газа из мощной системы газопроводов Средняя Азия – Центр. Были начаты работы по сооружению крупнейших газохранилищ на базе истощенных месторождений Западной Украины, Башкирии и Азербайджана.

В 50-е годы XX в. были созданы подземные газохранилища в водоносных пластах в США и Германии. Так, в районе Чикаго за период 1951–1954 г.г. было построено подземное газохранилище Хершер, на котором было пробурено 20 скважин. При проектной мощности хранилища 2,7 млрд. м³ природного газа в 1955 г. было закачено 504 млн. м³. В этот же период в Западной Германии было введено в строй крупное газохранилище около Ганновера, в водоносные горизонты которого было закачено 55 млн. м³ газа.

Если до середины 50-х годов XX в. подземные хранилища эксплуатировались только в Швеции и США, то в последующий период, начиная с 60-х годов, такие сооружения начали строиться в СССР, Канаде, Англии, Франции, Бельгии, Норвегии, ФРГ, Италии, Финляндии, Алжире.

Так, в США объем подземных емкостей за 1966–1975 г.г. увеличился с 17,8 до 30 млн. м³. Во Франции в 1975 г. вместимость подземных хранилищ достигла 15 млн. м³, что составляет 50 % общего пророста резервуарных емкостей нефтяной и нефтеперерабатывающей промышленности. К 1980 г. этот показатель возрос до 25 млн. м³. В ФРГ вместимость подземных хранилищ в 1975 г. составила 12 млн. м³, в 1980 г. – до 50 млн. м³.

В мировой практике широкое распространение получило хранение различных углеводородов в отложениях каменной соли. Так, к концу 1975 г. объем подземных хранилищ данного вида составил: в США – 30, Франции – 15, ФРГ – 12 млн. м³ [12]. Во Франции подземные хранилища становятся основным способом резервного хранения нефти, нефтепродуктов и сжиженных газов. Крупнейшее подземное хранилище нефти построено в районе г. Маноски. Кровля соляного пласта здесь залегает на глубинах 500–1 000 м. Высота выщелачивания емкостей находится в пределах от 75 до 480 м, диаметр их составляет 20–75 м, емкость образованных каверн – от 18 до 365 тыс. м³. Хранилище состоит из 90 соляных каверн общим объемом 16 млн. м³ [13].

Подземные нефтехранилища в каменной соли интенсивно

строятся в ФРГ. Здесь используются соляные структуры, залегающие на глубинах 800–1600 м, расположенные в основном на севере страны. Наиболее крупным следует считать подземное хранилище, сооруженное вблизи г. Вильгельмсгафена. Здесь 52 каверны вымыты в соляном пласте на глубине 1 км. Вместимость хранилища составляет 17 млн. м³, что обеспечивает 90-дневную бесперебойную работу нефтеперерабатывающих заводов ФРГ [13].

Большое количество соляных пластов, пригодных для строительства подземных хранилищ, имеется в США. Так, в штате Луизиана сооружено подземное нефтехранилище, состоящее из 14 каверн общей емкостью 9 млн. м³. Высота подземных емкостей 225 м, максимальный диаметр – 69 м. В программе создания долговременных запасов в США предусмотрено увеличение объема подземных нефтехранилищ до 75 млн. м³.

На первом этапе строительства подземных хранилищ в каменной соли их объем был сравнительно невелик (30–100 тыс. м³). С развитием опыта сооружения и эксплуатации соляных полостей их объем во Франции и Германии в 1970 году увеличился до 200–400 тыс. м³, в 1980 году – до 300–600 тыс. м³. Сегодня в мире существует около 60 хранилищ в солях, из них 26 – в США.

На территории России в настоящее время строится 3 подземных хранилища газа в соляных структурах: Калининградское, Волгоградское и Новомосковское. Волгоградское ПХГ будет крупнейшим в Европе и первым в России ПХГ в солях с объемом активного газа 800 млн. м³ и суточной производительностью 70 млн. м³.

В бывшем СССР впервые были разработаны научные методы сооружения подземных хранилищ в пластах каменной соли ограниченной мощности (от 5 до 30 м) с применением бурения наклонно-направленных скважин [14].

Широкое распространение в ряде стран получили подземные хранилища для нефти и нефтепродуктов, создаваемые в твердых породах шахтным способом. Они представляют собой комплекс вертикальных, наклонных и горизонтальных выработок, пройденных преимущественно взрывным способом. Такие подземные хранилища с успехом эксплуатируются в странах СНГ, ФРГ, США, Франции, Бельгии, Италии, Финляндии, Швеции, Норвегии, Великобритании и других странах. Суммарный объем действующих шахтных хранилищ в специально построенных выработках для сжиженных

углеводородных газов в 70-х годах XX в. составлял: в США – более 2 000; Франции – 180; Бельгии – 60, Италии – 50 тыс. м³; для нефти и нефтепродуктов: в Швеции – более 3; Финляндии – 4,5; Норвегии – 1,4 млн. м³ [9].

Одно из крупнейших подземных шахтных хранилищ нефти построено в Финляндии при НПЗ в г. Порво. Оно состоит из десяти выработок-емкостей, разделенных на три группы, и эксплуатируется с подпором подземных вод. Объем емкостей составляет от 70 до 180 тыс. м³.

Хранилище топлива, построенное в США, представляет собой комплекс, состоящий из 20 цилиндрических шахт, пройденных в лавовой породе. В эти шахты закладывались стальные цилиндры диаметром 30 и высотой 75 м.

В Сиднее (Австралия) построено подземное хранилище шахтного типа для хранения сжиженного газа. Хранилище состоит из серии туннелей, имеющих сечение 14×11 м и длину 230 м каждая. Общая емкость комплекса составила 130 тыс. м³.

Подземные шахтные хранилища нефти и нефтепродуктов нашли широкое применение в Норвегии, в них хранится 5,0 млн. т нефти. Подземное хранилище в г. Монштадте [15] состоит из 6 емкостей с общим объемом 1,3 млн. м³. Выработки-емкости имеют ширину 18 м, высоту – 33 м и сечение 565 м². Другим примером подземного хранения нефти в Норвегии является хранилище в г. Стуре, состоящее из емкостей туннельного типа с параметрами: высота 33 м, ширина 19 м, длина 317 м. Самым крупным хранилищем является подземное хранилище, расположенное на горе Экеберг, в котором хранится 50 % общего годового расхода нефтепродуктов Норвегии.

Наряду со строительством подземных шахтных хранилищ для хранения углеводородов в ряде стран широко используются выработки отработанных шахт и рудников.

Во Франции на северо-западе страны в бездействующей железорудной шахте создано подземное хранилище нефтепродуктов емкостью 5 млн. м³. Это система вертикальных и горизонтальных выработок шириной 5–6 и высотой до 100 м. В Германии имеется подземное хранилище сырой нефти емкостью 500 тыс. м³ в отработанной шахте, расположенной на глубине 500–600 м [9].

В США с 1960 года в старейшей угольной шахте Лейден (штат Калифорния) функционирует газохранилище, объем которого равен 4,25 млн. м³. Оно обеспечивает 20 % зимних пиковых потреблений

газа г. Денвера.

В Англии спроектировано подземное хранилище для хранения нефтепродуктов в отработанной ангидритовой шахте. Вместимость хранилища составляет 9 млн. м³, глубина – 280 м.

При использовании подземного пространства отработанных рудников для размещения газонефтехранилищ затраты средств на 25 % меньше по сравнению со стоимостью хранилищ, строящихся с применением горно-проходческих работ.

Резервуары природного газа в отработанных угольных шахтах имеются также в Бельгии. Шахты Андермос и Пеоннес с 1980 г. переоборудованы на подземные хранилища и вмещают более 283 млн. м³ газа, откачиваемого в пиковые периоды. Для создания подземных хранилищ в шахтах было герметизировано 29 стволов.

Более 20 лет в ряде стран успешно эксплуатируются низкотемпературные подземные резервуары для сжиженного пропана и сжиженного природного газа. Опыт строительства низкотемпературных подземных хранилищ накоплен и в бывшем СССР. Они действуют как в вечномерзлых грунтах, так и в предварительно замораживаемых [16, 17].

В 60-е годы XX в. впервые в СССР были разработаны методы создания подземных хранилищ для нефти, нефтепродуктов и сжиженных газов при помощи камуфлетных взрывов. Подземные хранилища, образованные этим способом, состоят из подземной емкости (полости), скважины с системой технологических трубопроводов и комплекса поверхностных сооружений [8].

К началу XXI века подземные газонефтехранилища эксплуатировались во многих странах, количество их превысило 1 000. Наибольшее количество подземных хранилищ приходится на газохранилища с активной емкостью газа порядка 340 млрд. м³.

В настоящее время наибольшее распространение получили подземные газохранилища в пористых пластах (истощенных месторождениях и водоносных структурах). Однако с каждым годом увеличиваются темпы строительства газохранилищ в залежах каменной соли. В мире создано около 70 хранилищ газа в каменной соли с общей активной емкостью до 30 млрд. м³. Наибольшее количество ПХГ в соляных кавернах эксплуатируется в США – 31 хранилище, общая активная емкость которых составляет порядка 8 млрд. м³. В Германии эксплуатируется 19 ПХГ с суммарным объемом газа до 7 млрд. м³.

Подземные хранилища газа явились главным связующим звеном и резервом в системе надежного газопотребления многих стран.

Подземные хранилища являются неотъемлемой частью Единой системы газоснабжения России и расположены в основных районах потребления газа. Использование ПХГ позволяет регулировать сезонную неравномерность потребления газа, снижать пиковые нагрузки, обеспечивать гибкость и надежность поставок газа. Сеть ПХГ обеспечивает в отопительный период до 20 % поставок газа российским потребителям, а в дни резких похолоданий эта величина достигает 30 %.

На территории Российской Федерации расположены 25 подземных хранилищ газа с суммарной активной емкостью 65,2 млрд. м³. Газпром наращивает производительность подземных хранилищ, осуществляя ввод новых мощностей – это одна из его стратегических задач. На ближайшую перспективу предполагается строительство 10 хранилищ природного газа в каменной соли.

В сентябре 2013 г. «Газпром» ввел в эксплуатацию первую очередь Калининградского подземного хранилища газа емкостью 52 млн. м³ и максимальной суточной производительностью 4,8 млн. м³. Всего на ПХГ будет построено пять обособленных резервуаров суммарной активной емкостью 261 млн. м³. Это позволит в будущем направлять потребителям до 12 млн. м³ газа в сутки.

«Газпром» хранит свой газ и в Европе, общая мощность подземных хранилищ, размещенных в Украине, Германии, Австрии и других странах составляет 3 млрд. м³ [133].

Дальнейшее развитие подземное хранение получило в Германии. В настоящее время в 48 хранилищах содержится 19 млрд. м³ природного газа для пиковых нагрузок, компенсации нарушений в системе газообеспечения и сезонных колебаний спроса. Подземное хранилище Реден, объем которого 4,2 млрд. м³, является одним из крупнейших в Европе. В стадии строительства подземное хранилище газа в соляных структурах «Катарина» (г. Бернбург), которое будет частью магистрального газопровода «Ямал – Европа». После ввода его в эксплуатацию оно способно будет принимать до 60 млн. м³ природного газа. В Этцеле на подземном хранилище в каменной соли будут сооружены дополнительные каверны объемом 2 млрд. м³.

В Италии существует 10 подземных газохранилищ, Франции – 15, Англии – 5, Нидерландах – 3.

Расширяется также газотранспортная система Украины. Она

включает 12 подземных газохранилищ с активной емкостью 43 млрд. м³, занимает третье место в мире и сохранит свои позиции, как минимум, до 2020 г. за счет увеличения мощностей на действующих ПХГ и строительства новых.

Наряду с подземными хранилищами газа наращиваются мощности подземных хранилищ нефти и нефтепродуктов. В Германии под землей хранится 28 млн. т нефти, емкость подземных нефтехранилищ США оценивается в 65 млн. м³, Франции – 25. Финляндия, Норвегия, Швеция эксплуатируют 250 хранилищ нефти и нефтепродуктов с общим объемом 50 млн. м³. Ряд других стран продолжают наращивать в подземных хранилищах стратегические запасы нефти.

Подземные хранилища углеводородов и дальше будут оставаться важным звеном в топливно-энергетическом комплексе многих стран, обеспечивая их энергетическую безопасность.

Раздел 3

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ГОРНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РАЙОНОВ СТРОИТЕЛЬСТВА ПОДЗЕМНЫХ ХРАНИЛИЩ УГЛЕВОДОРОДОВ

Перспективность строительства подземных хранилищ углеводородов во многом зависит от геологических, гидрогеологических и горно-технических условий залегания пород.

Минералогический состав породы, мощность рабочей толщи, глубина залегания, свойства пород – основные факторы, определяющие выбор методов строительства хранилищ.

Каменная и калийные соли, гипсы, ангидриты, песчаники, граниты, доломиты, гнейсы, алевролиты, глины, многолетнемерзлые породы – вот неполный список горных пород, в которых возможно строительство подземных хранилищ углеводородов.

3.1. Характеристика районов распространения соляных залежей, пригодных для строительства подземных хранилищ методом размыва

В процессе геологических преобразований, протекающих как на поверхности Земли, так и в глубоких горизонтах, образовались

соляные месторождения, представляющие собой скопления солей, приуроченных к осадкам древних геологических эпох.

Залежи солей формировались на протяжении многих геологических периодов жизни Земли, когда создавались благоприятные для них геохимические, гидрогеологические и климатические условия.

Солевые отложения, вследствие осадочного происхождения, скапливались и образовывались мощные твердые залежи, состоящие из покрывающих друг друга солевых пластов различного состава. Такие пласты измеряются десятками метров в толщину и распространяются на значительные пространства.

Существенное влияние на формирование солевых залежей и последующее изменение их состава и структуры оказывают тектонические явления – соляная тектоника. В результате тектонических процессов образуются соляные подушки, купола, куполовидные поднятия с соляным ядром (штоком), сливающиеся на глубине нередко в валы. На рис. 3.1 представлены формы соляных структур (по Ф. Трусхейму).

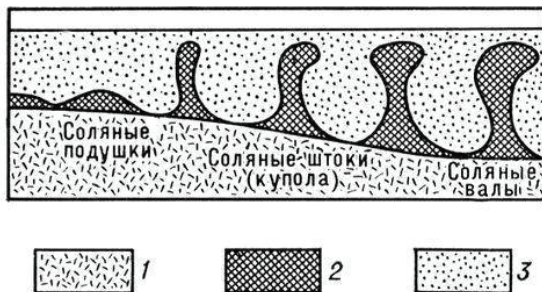


Рис. 3.1. Формы солевых структур [134]:

1 – подсолевое ложе; 2 – соль; 3 – надсолевая толща

В результате деформации земной коры с пластами осадочных пород, образовавшихся в результате выпаривания морской воды или вод соляных озер, под землей образуются огромные горы твердой, плотной массы – каменной соли. Каменная соль при деформации выдавливается вверх с образованием сплошных соляных куполов, обычно имеющих в плане округлую форму и достигающих нескольких километров в диаметре.

Иногда эти купола выдавливаются на поверхность (рис. 3.2).

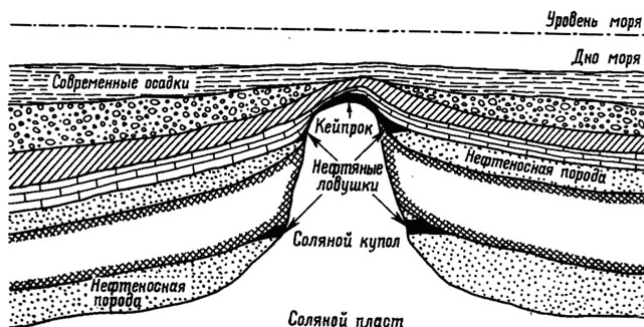


Рис. 3.2. Залегание соляной залежи в виде купола [135]

Каменная соль в виде мощных залежей встречается в разных геологических формациях и присутствует на всех континентах.

В толщах каменной соли и создаются подземные хранилища углеводородов методом растворения. Глубина залегания толщи каменной соли, выбранной для создания подземного хранилища, может изменяться в широких пределах. Для нефтепродуктов и сжиженных газов предельная глубина, согласно [7], составляет 1 200 м, однако при экономической целесообразности глубина может быть и больше. Расчет глубины заложения емкости производится исходя из величины максимального давления в емкости при технических операциях. Принято считать, что один метр геологического разреза обеспечивает противодействие $1,6 \cdot 10^5$ Па. Площадь соляной залежи должна обеспечить возможность размещения проектируемого количества подземных емкостей с учетом необходимых размеров междукламерных целиков.

Подземные емкости сооружаются в залежах каменной соли любой структуры: пластовой, линзообразной, купольной и штоковой. В пластовых залежах выбор участка нужного размера особой сложности не представляет. При линзообразной, а тем более штоковой залежи, ограниченных по площади, выбор участка более сложен. Соляные купола и штоки дают возможность сооружать емкости на нескольких этажах (ярусах). При этом в штоковых залежах расстояние от стенки емкости до соседней скважины должно быть не менее 30 м [7]. Минимальная мощность соляного тела, в

котором может быть построена камера с длинной вертикальной осью составляет 20–25 м. Хранилища тоннельного типа могут создаваться в пластах каменной соли мощностью до 5 м [14].

Литологический состав соленосной толщи и чистота каменной соли являются решающими условиями, определяющими эффективность размыва подземных хранилищ. Содержание нерастворимых рассеянных примесей не должно превышать 20 %, иначе усложняется процесс управляемого выщелачивания и получения надежной формы подземной емкости.

Толща каменной соли, в которой сооружается хранилище, должна быть непроницаемой для хранимого продукта. Соль не должна иметь включений минералов, ухудшающих качество хранимого продукта или же вступать в реакцию с ним, что может повлечь потерю камерой своей устойчивости.

При выборе районов строительства подземных хранилищ следует избегать участков с рыхлой солью (гранаткой) и возможного развития карста. Значительные сложности возникают и в случае газопроявлений в каменной соли, при этом не удается получать герметичные емкости.

Особенностью пластовых залежей является наличие несолевых пород (ангидритов, известняков, аргиллитов и т. п.) различной мощности от десятков сантиметров до 3–5 м. Для линзообразных залежей характерно довольно быстрое изменение мощностей по простиранию и также, как и в пластовых залежах, наличие прослоев несолевых пород. Спецификой штоковых залежей является наличие в них участков, насыщенных обломками несолевых пород. Исходя из практики создания хранилищ, мощность нерастворимых прослоев и пластов не должна превышать трех метров. Для пластов большей мощности необходимо применение специальных методов принудительного обрушения, в том числе с применением энергии взрыва взрывчатых веществ (ВВ) [18]. Нерастворимые пропластки и пласты должны иметь плотные контакты с солью, быть непроницаемыми для хранимых продуктов и не содержать в себе водоносных горизонтов.

На территории Российской Федерации расположены 9 соленосных бассейнов (рис. 3.3): Калининградский, Подмосковный, Сереговский, Прикаспийский, Южно-Уральский, Печоро-Камский, Восточно-Сибирский, Северо-Кавказский и Нардвик-Хатангский [19]. Отличительной особенностью Калининградского бассейна является

чистота и однородность каменной соли, залегающей на глубинах от 600 до 1 100 м при мощности пластов соли до 174 м. Прикаспийский соленосный бассейн относится к числу крупнейших соленосных бассейнов мира. На глубинах 2–3 км залегают пластовые залежи каменной соли мощностью от 180 до 300 м. От нее вздымаются сотни соляных куполов, кровля которых залегают на разных глубинах, вплоть до выхода на дневную поверхность.



Рис. 3.3. Карта соленосных бассейнов, пригодных для сооружения подземных емкостей [19]:

- 1 – Калининградский; 2 – Закарпатский; 3 – Прикарпатский; 4 – Припятский;
- 5 – Днепровско-Донецкий; 6 – Донецкий; 7 – Подмосковский; 8 – Сереговский;
- 9 – Прикаспийский; 10 – Южно-Уральский; 11 – Печоро-Камский; 12 – Ереванский;
- 13 – Северо-Кавказский; 14 – Нахичеванский; 15 – Чу-Сарысуйский; 16 – Гаурдак-Нугитанский;
- 17 – Южно-Таджикский; 18 – Восточно-Сибирский; 19 – Нардвик-Хатангский; 20 – Преддобружский

Южно-Уральский бассейн является продолжением к северу Прикаспийского бассейна. В пределах Башкортостана каменная соль залегают пластами мощностью от 10 до 800 м на глубинах от нескольких десятков до 400 и более метров. В Оренбуржье каменная соль имеет мощность от 700 до 900 м, причем пачки однородной соли достигают 300–400 м. В Подмосковном бассейне глубина залегания соляного пласта от 835 до 1 121 м, максимальная мощность пласта соли до 60 м наблюдается по линии Серпухов – Вязьма. Восточно-Сибирский бассейн по своей площади является одним из обширнейших в мире. В пределах бассейна пласты каменной соли

имеют мощность от 30 до 100 м при глубинах залегания от 170 до 1 500 м. В Печоро-Камском бассейне каменная соль залегает пластами разной мощности (от 10 до 400 м) на глубинах 200–1 200 м. В Сереговском бассейне соль вскрыта до глубины 1 136 м при кровле от 237 до 513 м. Строительство крупных подземных хранилищ при объеме единичной емкости 100 тыс. м³ и более перспективно в Калининградском, Прикаспийском, Южно-Уральском, Сереговском и Печоро-Камском соленосных бассейнах. В пределах Подмосковского соленосного бассейна возможно строительство вертикальных камер объемом до 75,0 тыс. м³. В пределах Северо-Кавказского района для строительства хранилища разведан Шедокский участок. Восточно-Сибирский соленосный бассейн перспективен для строительства подземных хранилищ, однако некоторые его площади (Сунтаро-Кемпендянский район) изучены слабо. Строительство подземных хранилищ в Нардык-Хатангском бассейне возможно после его дальнейшего изучения [19].

Припятский соленосный район занимает юго-восточную часть Беларуси. В разрезе бассейна выделяются два соленосных горизонта. Мощность нижнего горизонта около 1 000 м и залегает он на глубинах 1 800 и более метров. Верхний горизонт залегает на глубинах 300–700 м и представлен пачками солей мощностью от 50 до 400 м. Район перспективный для сооружения подземных емкостей объемом 100 тыс. м³ и более.

На территории Закавказья расположены 2 соленосных бассейна: Ереванский и Нахичеванский. Ереванский бассейн (Армения) имеет протяженность с юго-запада на северо-восток более 40 км. Площадь бассейна 600 км². Соленосная толща имеет мощность до 500 м и залегает на глубинах от 430 до 1 430 м. В районе построено первое в СНГ подземное хранилище природного газа, перспективно сооружение крупных хранилищ для любых продуктов. В Нахичеванском бассейне (Азербайджан) каменная соль встречается в виде линзообразных тел. Мощность отдельных линз достигает 20–30 м при глубинах залегания от 65 до 370 м. В пределах бассейна возможно строительство небольших хранилищ местного значения.

В государствах Средней Азии расположены: Чу-Сарысуйский (Казахстан), Гаурдак-Нугитанский (Туркменистан, Узбекистан), Южно-Таджикский (Таджикистан) соленосные бассейны и восточная часть Прикаспийского бассейна (Западный Казахстан). В Чу-Сарысуйском бассейне пласты каменной соли мощностью 50–80 м

залегают на глубинах 700–1400 м. Мощности солей в Гаурдак-Нугитанском бассейне колеблются, достигая в куполах 500–600 м при глубинах залегания 400–800 м с увеличением до 2 000 м в районе Чарджоу. В области Южно-Таджикского бассейна мощность пластов каменной соли достигает 280 м. Во всех соленосных бассейнах Средней Азии возможно строительство крупных хранилищ при объеме единичных емкостей до 100 тыс. м³ (Чу-Сарысуйский бассейн) и более (остальные бассейны).

На территории Украины расположены 5 соленосных бассейнов: Днепроовско-Донецкий, Донецкий, Закарпатский, Прикарпатский и Преддобружский [19].

Соленосная толща в Днепроовско-Донецкой впадине имеет ширину 100–120 км при длине 500–550 км. Бассейн характеризуется широким развитием соляных куполов и штоков, ряд которых выходит на дневную поверхность. Мощность каменной соли в штоках достигает 2–3,5 км. Геологические условия строительства хранилищ наиболее благоприятны в Черниговской, Полтавской и Харьковской областях.

Донецкий соленосный бассейн является продолжением соленосного бассейна Днепроовско-Донецкой впадины. Соляные толщи имеют пластовый характер и залегают на глубинах от 250 до 900 и более метров. Мощность пластов колеблется от 80 до 70 м. Имеющиеся в районе в небольшом количестве соляные купола имеют мощность до 2 км и более. В пределах Днепроовско-Донецкого и Донецкого соленосных бассейнов возможно строительство хранилищ для любых продуктов, объемы хранилищ геологическими условиями не лимитируются.

Площадь развития каменной соли Закарпатского соленосного бассейна вытянута с северо-запада на юго-восток, имея протяженность 65 км и ширину до 25 км. На глубинах 1 000–1 100 м соль имеет пластовый характер при мощности слоя до 100 м. На отдельных участках соль достигает дневной поверхности. В пределах бассейна могут быть созданы подземные хранилища для любых продуктов, однако выбор участка строительства должен производиться на основе тщательных геологоразведочных работ, т. к. в пределах бассейна интенсивно развит поверхностный и глубинный соляной карст.

Прикарпатский соленосный бассейн протягивается в юго-восточном направлении на 280–300 км при ширине от 35 до 60 км.

Условия залегания солей очень сложные: крутые складки, многочисленные блоки. Вследствие этого мощности солей резко изменяются от десятков до нескольких сотен метров. Глубины залегания солей – от 60 до 600 и более метров. Содержание нерастворимого остатка составляет 7–14 и более процентов. Соли часто бывают раздробленными и высокопроницаемыми. Наиболее качественные соли расположены на участке Нижнев – Болехов – Долина. Строительство подземных хранилищ в этом бассейне возможно только после тщательных геологоразведочных работ [19].

Преддобружская соленосная площадь располагается в пределах Измаильского и Килийского районов Одесской области. Мощность пластов каменной соли колеблется от 30 до 60 м. Залегают они на глубинах от 300 до 700 м. Каменная соль по составу чистая и пригодная для сооружения хранилищ с объемами единичных емкостей до 75,0 тыс. м³.

Таким образом, страны СНГ, в том числе и Украина, располагают достаточным количеством соленосных бассейнов, геологические и горно-технические условия которых позволяют сооружать в этих районах подземные хранилища различных типов, в том числе и крупные.

3.2. Характеристика районов распространения горных пород, пригодных для строительства подземных хранилищ шахтного типа

Подземные хранилища шахтного типа преимущественно создаются в горных породах, обеспечивающих долговременную устойчивость выработок без применения или с минимальным применением крепи.

Выработки-емкости размещаются в различных по литологии горных породах, однако предпочтение отдается скальным породам с высокой крепостью (гранитам, гнейсам, плотным песчаникам, прочным карбонатным породам), в которых возможно размещение выработок большого поперечного сечения.

Основные требования к горно-геологическим условиям при строительстве хранилищ шахтного типа сводятся к следующему:

- выработки-емкости хранилища следует размещать в горных породах ниже уровня подземных вод;
- минимально допустимая глубина залегания горных пород, пригодных для размещения шахтного хранилища, определяется

расчетом, исходя из размеров емкости, максимального допустимого давления в резервуаре, плотности горных пород, залегающих выше кровли хранилища;

- степень обводненности породных массивов и положение местного уровня подземных вод должны отвечать условию, при котором давление воды на поверхности выработки-емкости превышает внутреннее давление продукта в выработке-емкости;

- прочностные свойства горных пород должны отвечать условию сооружения выработок-емкостей, как правило, без применения крепи, кроме пород III категории устойчивости по СНИПу, в которых применение крепи допускается;

- горные породы считаются пригодными, если они не фильтруют хранимый продукт, не содержат включений, влияющих на качество этого продукта, устойчивы к горному давлению.

Хранение нефти, нефтепродуктов и сжиженных газов в подземных емкостях шахтного типа практически осуществимо в местах, где на определенной глубине залегают мощные устойчивые отложения непроницаемых горных пород или пород, поддающихся герметизации с помощью несложных инженерных мероприятий.

Диапазон горных пород, в которых могут быть созданы шахтные хранилища довольно широк. По литологическому составу к породам, пригодным для строительства, отнесены гипсы, ангидриты, мергели, плотные известняки, доломиты, граниты, калийные и каменные соли, глины и некоторые другие породы с коэффициентом крепости по шкале Протодяконова $f=2-10$. При этом наиболее приемлемы гипсо-ангидритовые породы с хорошей устойчивостью в горных выработках. Шахтные хранилища могут сооружаться в любых водоупорных породах (осадочных, магматических или метаморфических), химически инертных к углеводородам, и имеющих мощность не менее 15 м и необходимую глубину залегания.

Глубина залегания емкостей для светлых нефтепродуктов определяется при условии максимально возможного приближения их к земной поверхности. Так, на глубине 20 м избыточное давление должно быть около 3 кг/см^2 , что в данных емкостях обеспечит условия хранения без потерь от испарения при «малых дыханиях».

Слабоуплотненные, рыхлые, макропористые и трещиноватые, кавернозные породы практически не пригодны для создания хранилищ.

Не рекомендуется строить подземные емкости шахтным

способом в породах, вмещающих газ и нефть, так как им всегда сопутствуют пористые газопроницаемые структуры. Данные геологических и гидрогеологических изысканий должны быть предельно уточнены с помощью бурения разведочных скважин.

К переоборудованию под подземные хранилища допускаются отработанные горные выработки любой конфигурации и независимо от способа их вскрытия, но преимущественно горные выработки рудников и шахт по добыче полезных ископаемых с камерной и камерно-столбовой системами разработки.

Выработки, не пригодные к использованию в качестве хранилищ, должны быть изолированы от остальных выработок герметичными перемычками.

На значительной территории бывшего СССР распространены толщи горных пород перспективных для строительства подземных хранилищ шахтного типа [136]. В разные периоды были проведены широкие изыскания по анализу геологического строения в различных районах СССР, а затем и в России, свидетельствующие о широком распространении водоупоров, соответствующих предъявляемым требованиям.

Наиболее детально исследована европейская часть, где ощущается наибольшая потребность в крупных хранилищах углеводородных топлив. Достаточно изучены экранирующие свойства сульфатно-карбонатных отложений, широко развитых на этой территории. Благоприятны для строительства подземных хранилищ древние кристаллические породы Карелии и Кольского полуострова. На восток к Уралу достаточно широко распространены сульфатные породы [136]. Кроме того, они распространены во всех соленосных бассейнах России (Волго-Уральский, Подмосковский, Калининградский и др.). Роль водоупоров играют и доломито-ангидритовые толщи в Среднем Поволжье, где их мощность достигает 60–70 м, а глубина залегания изменяется от 80–100 до 200 м [136].

В центральной части европейской территории России сульфатные образования на большей части площади состоят из доломитов, доломитовых мергелей с прослоями ангидритов, гипсов, глин и известняков.

На западе России распространена глинистая доломито-мергелистая толща. Она представлена преимущественно доломитами и доломитовыми мергелями. На различных площадях европейской

части развиты карбонатные и карбонатно-глинистые породы, локальные участки которых при достаточной мощности могут быть приемлемы для создания подземных хранилищ.

В азиатской части России наибольший интерес для строительства шахтных хранилищ представляют массивы изверженных пород. Они развиты на Урале, вдоль Транссибирской железнодорожной магистрали, по трассе БАМа.

На территории Западной Сибири перспективными площадями являются отложения плотных глин, выполняющих роль водоупоров. Эти отложения имеют мощность до 150 м и глубины залегания до 100 м.

Освоение нефтегазовых месторождений в северных районах России обусловило необходимость строительства подземных хранилищ в этих районах. Здесь имеются кристаллические породы в районах севернее Санкт-Петербурга и на Кольском полуострове.

Перспективными являются гранитные массивы Красноярского края, кристаллические, изверженные и метаморфические породы Амурской области и Приморского края. Именно эти участки могут быть перспективными для строительства подземных хранилищ в связи с реализацией программы освоения углеводородных месторождений Восточной Сибири и Дальнего Востока [136].

Геологические структуры, пригодные для строительства подземных шахтных хранилищ углеводородов имеются и в Украине. В первую очередь это гипсо-ангидритовые породы, размещенные в юго-западной части Русской платформы, включая западные области Украины. Здесь они залегают на поверхности и погружаются на глубину до 100 м и более. Мощность этих пород в среднем 20–40 м.

Вторым районом можно считать степную часть Крыма, где перспективными могут быть мергели верхнемелового периода. Кроме этого заслуживают внимания кристаллические породы Украинского кристаллического щита, находящиеся на глубине 100–200 м. Здесь в границах нетрещиноватой зоны возможно строительство шахтных хранилищ, герметизация которых будет обеспечена подпором подземных вод.

3.3. Характеристика условий для строительства подземных хранилищ камуфлетными взрывами

Подземные емкости, сооружаемые методом камуфлетных взрывов, создаются в пластичных породах: глинах, суглинках и

других глинистых породах. Наибольшее практическое значение имеют крупные пластовые залежи глин и глинистых пород морского происхождения, выдержанные по мощности, однородности строения, минералогическому составу и условиям залегания на значительных площадях. Эффективны также наиболее крупные и выдержанные в литологическом отношении толщи глин, суглинков и других глинистых пород континентального происхождения, хотя при наличии каменистых, песчаных, органических и других включений, неоднородности сложения, слоистости такие породы становятся менее пригодными для образования подземных емкостей [8].

Четвертичные, третичные и другие глинистые породы в меньшей степени подвержены процессам изменения и поэтому, как правило, более приемлемы для создания подземных хранилищ. Они залегают преимущественно в верхних частях осадочных пород на доступных для освоения глубинах.

Важное значение в оценке пригодности глинистых пород для образования подземных емкостей взрывом приобретают гидрогеологические условия их залегания, когда выше- и нижезалегающие водоносные горизонты являются безнапорными или слабонапорными и малодебитными.

Отрицательным фактором является наличие в перекрывающих горных породах прослоек, линз, сыпучих, рыхлых, плавунных, трещиноватых, водоносных, несвязных пород, а в подстилающих отложениях – карстовых пустот и мощных отражающих и преломляющих сейсмических горизонтов.

Переувлажненные (текучей и мягкопластичной консистенции), слабоуплотненные, рыхлые, макропористые, фильтрующие, тиксотропные, слабосвязные породы (илы, лесс, супеси) для образования подземных емкостей взрывом не пригодны. Как правило, не пригодными являются обезвоженные, сухие, переуплотненные, сланцеватые, трещиноватые, непластичные, метаморфизированные глинистые породы (глинистые сланцы и др.), находящиеся в твердом состоянии, так как при взрыве они разрушаются и у них низкий показатель простреливаемости (менее $0,05-0,1 \text{ м}^3/\text{кг}$).

Для успешного применения взрывного способа образования подземных емкостей имеет значение и влажность пород, при этом содержание влаги в породе должно быть не менее 10 и не более 20 %. При избытке влаги способность породы к уплотнению сильно снижается.

Следует отметить химическую и физико-химическую инертность глинистых пород к нефтепродуктам (мазут, дизтопливо, бензин) и сжиженным углеводородным газам, которая дает возможность сохранить их товарные качества при длительном хранении.

Глинистые породы, пригодные для строительства подземных емкостей камуфлетными взрывами, широко распространены на северо-западе европейской части России. На территории Ленинградской и Архангельской областей распространена толща синих глин нижнего кембрия. Мощность пачки чистых глин в разрезе толщи составляет 20–60 м.

Глины юрского возраста мощностью 60 м распространены на правобережье среднего и нижнего течения Волги и Заволжья [136].

3.4. Горно-геологические условия сооружения подземных хранилищ в районах вечной мерзлоты

Освоение нефтегазовых месторождений в районах Крайнего Севера Российской Федерации обусловило необходимость создания в суровых условиях Арктики большеобъемных резервуарных парков для хранения жидких углеводородов. Значительная часть разрабатываемых и осваиваемых месторождений севера Тюменской области и полуострова Ямал находится за полярным кругом в условиях многолетнемерзлых пород, которые благодаря своим прочностным свойствам и непроницаемости, пригодны для строительства подземных резервуаров-хранилищ.

На перспективных площадях этой территории залегают как мерзлые породы, так и залежи пластового льда.

В приповерхностной части геологического разреза до глубины 50–100 м залегают осадочные породы четвертичного возраста. Они представлены, в основном, различными типами водно-ледяных отложений, в составе которых присутствуют тонкодисперсные глины и суглинки, супесчано-песчаные породы. В этом районе широко распространены залежи пластовых льдов. Мощность льдов достигает 27 м, глубина залегания кровли от 5,0 до 25 м, температура колеблется в диапазоне минус 3,5 – минус 6,0 °С, что достаточно для размещения выработок-емкостей.

На этих площадях все типы отложений находятся в многолетнемерзлом состоянии. Промерзание водонасыщенных морских отложений привело к формированию мерзлой толщи осадочных пород. Комплексные исследования прочностных свойств и

напряженно-деформированного состояния многолетнемерзлых пород позволили установить их пригодность для строительства подземных хранилищ углеводородов [136].

Широкое распространение в районах российской Арктики получили и скальные породы. Массивы, сложенные гнейсами и гнейсодиоритами, выявлены на побережье Кольского полуострова, материковой части Архангельской области, на островах Северного Ледовитого океана. Так, только на западном берегу Печерской губы сочетание глубоководного фарватера и благоприятных геологических условий позволяет сооружать подземные хранилища шахтного типа для хранения до 1,0 млн. т сырой нефти и сжиженного газа с последующей их загрузкой в океанские танкеры.

Таким образом, учет требований, предъявляемых к горным породам, геологическим условиям их залегания, дает возможность обоснованно выявлять в исследуемых районах породы, пригодные для строительства подземных хранилищ углеводородов и осуществлять прогноз перспективных территорий их распространения.

Раздел 4

СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ИХ ПРИГОДНОСТЬ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ХРАНИЛИЩ УГЛЕВОДОРОДОВ

Надежность подземных газонефтехранилищ определяется их герметичностью, прочностью и долговечностью. Исходя из требований, предъявляемых к подземным емкостям, естественные породные массивы, окружающие выработки хранилища, должны быть практически непроницаемыми для хранимых продуктов, а слагающие их породы – прочными, устойчивыми, обеспечивающими сооружение и эксплуатацию выработок-емкостей, как правило, без крепи, химически нейтральными к хранимым продуктам. Оценка пригодности горных пород для создания подземных хранилищ производится в процессе исследований их свойств.

4.1. Физико-механические свойства горных пород

Основными показателями физико-механических свойств горных пород, пригодных для сооружения подземных

газонефтехранилищ, принято считать их прочностные характеристики, а также реологические особенности.

Под прочностными характеристиками горных пород понимают их временные сопротивления элементарным видам нагружений – одноосному сжатию, растяжению, сдвигу и изгибу. Подробное описание методов испытаний пород на одноосное сжатие, растяжение, сдвиг и изгиб приведено в работах Л.И. Барона и др. [20], К.В. Руппенейта [21], В.В. Ржевского и Г.Я. Новика [22], А.И. Спивака [23]. Физико-механические свойства соляных пород рассмотрены в работе [24].

Следует отметить, что прочность соляных пород на изгиб составляет от 5 до 20 % их прочности при одноосном сжатии.

Для прочностных расчетов подземных емкостей необходимо знание не только физико-механических, но и деформационных свойств горных пород, важнейшими из которых являются модуль Юнга и коэффициент Пуассона. В табл. 4.1 приведены значения этих показателей для некоторых горных пород.

Таблица 4.1. Модуль Юнга и коэффициент Пуассона горных пород [21]

Породы	Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона
Глины	0,30	0,25–0,35
Известняки	13,0–85,0	0,28–0,33
Доломиты	21,0–165,0	0,28
Граниты	До 60,0	0,26–0,29
Каменная соль	6,0–8,5	0,44
Калийные соли:		
сильвинит	11,8	0,39
каинит	20,4	0,39

В табл. 4.2 приведены показатели пределов прочности пород на сжатие, растяжение и изгиб.

В настоящее время существуют различные методы определения прочности материалов и, в том числе, горных пород, анализ которых приведен в работах [22, 25, 26].

Для оценки деформационных свойств горных пород большое значение имеет построение паспортов прочности. Широко применяются следующие виды построения паспортов прочности: объемного сжатия, среза со сжатием, соосных пуассонов, по

результатам определения прочности горных пород при растяжении и сжатии, расчетный.

Таблица 4.2. Показатели пределов прочности пород на сжатие $\sigma_{сж}$, растяжение σ_p и изгиб $\sigma_{изг}$ [21]

Породы	$\sigma_{сж}$, МПа	σ_p , МПа	$\sigma_{изг}$, МПа
Граниты	100–250	100–150	10–30
Известняки	90–120	12,00	18,00
Гипсы	17,0	1,90	6,00
Известняки с гипсом	42,0	2,40	6,50
Каменная соль (Артемовск)	36,6	1,33	3,30
Калийная соль (сильвинит, Верхнекамское)	39,6	0,61	2,20
Калийная соль (сильвинит, Старобино)	26,6	1,39	3,30

При испытании горных пород в объемном напряженном состоянии с целью определения прочности и получения исходных данных для паспорта прочности разработаны экспериментальные установки и методики проведения испытаний [27, 28].

Огибающая главных кругов напряжений может быть представлена аналитически. Наиболее простое аналитическое выражение зависимости касательных напряжений τ от нормальных σ_n – это прямая линия

$$\tau = \sigma_n \operatorname{tg} \varphi + \tau_1, \quad (4.1)$$

где φ – угол наклона огибающей к оси абсцисс; τ_1 – предельное касательное напряжение в породе при отсутствии нормального напряжения. Угол φ назван углом внутреннего трения, $\operatorname{tg} \varphi$ – коэффициентом внутреннего трения.

Значения угла внутреннего трения для солевых пород приведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3. Значение угла внутреннего трения [24]

Месторождения	Породы	φ , град
Яр-Бишкадакское	Каменная соль	36
Старобинское:	Каменная соль	33
	Сильвинит	31

Из (4.1) видно, что $tg\varphi$ – это коэффициент пропорциональности между нормальным и касательным напряжениями при разрушении породы. Показатель τ_1 называется сцеплением горной породы и количественно равен пределу прочности породы на срез при отсутствии нормальных напряжений.

Породы, пригодные для строительства подземных газонефтехранилищ, характеризуются большой пластичностью, т. е. способностью к необратимым деформациям. Для определения и количественной оценки пластичности горных пород при статических нагрузках используются различные методы и аппаратура. Л.А. Шрейнером разработан прибор УМГП-3, работа которого основана на вдавливании цилиндрического штампа с плоским основанием в породу [25].

Показатели пластичности некоторых горных пород приведены в табл. 4.4.

Таблица 4.4. Показатели пластичности некоторых горных пород [22]

Породы	$K_{пл}$
Глины сланцевые	1,7–2,0
Известняки	2,5–4,5
Гипсы	1,8–3,7
Ангидриты	2,1–4,3
Каменная соль	3,4–4,2

Разработка технологии строительства подземных хранилищ в условиях вечной мерзлоты в северных районах определяется физико-механическими свойствами многолетнемерзлых пород.

Многолетнемерзлые грунты, в отличие от скальных пород, не имеют кристаллизационных связей между минеральными частицами грунта и прочностные характеристики их не постоянны, а зависят от многих факторов, и прежде всего, от цементирующего действия льда, образующегося в результате замерзания воды и рассолов, находящихся в порах грунта. К факторам, обуславливающим нестабильность физико-механических свойств мерзлых грунтов, относятся: изменение температуры грунтов и напряженного состояния под влиянием внутренних и внешних воздействий, время действия нагрузки, релаксация напряжений и ползучесть мерзлых и протаивающих грунтов [29].

Свойства мерзлых грунтов определяются физико-механическими характеристиками талых грунтов и, кроме того, относительным сжатием при переходе мерзлого грунта под нагрузкой в талое состояние. Относительное сжатие δ при переходе грунта из мерзлого состояния в талое равно [30]

$$\delta = (h_m - h_m) / h_m, \quad (4.2)$$

где h_m – высота образца грунта в естественном мерзлом состоянии, см; h_m – высота образца грунта после перехода его в талое состояние в условиях невозможности бокового расширения при заданном давлении, см.

К основным расчетным характеристикам мерзлых грунтов относятся: мгновенная прочность при одноосном сжатии $\sigma_{сж}$, растяжении σ_p и сдвиге, сцепление τ_0 , угол внутреннего трения φ , определяющий часть сопротивления сдвигу, зависящую от нормального давления. Сцепление τ_0 является частью сопротивления сдвигу и не зависит непосредственно от нормального давления.

Величины τ_0 и φ при мгновенной прочности на сжатие и растяжение можно рассчитать по формулам

$$\tau_0 = 0,5\sqrt{\sigma_{сж}\sigma_p}; \quad (4.3)$$

$$\varphi = \arcsin(\sigma_{сж} - \sigma_p) / (\sigma_{сж} + \sigma_p). \quad (4.4)$$

Основное влияние на физико-механические свойства мерзлых грунтов оказывают гранулометрический состав минеральных частиц скелета грунта, естественная водонасыщенность грунта и температура промерзания. Основные прочностные характеристики мерзлых грунтов приведены в табл. 4.5.

Большое влияние на прочность оказывает влажность мерзлых грунтов. С ее увеличением временное сопротивление на сжатие песчаных грунтов значительно возрастает, в глинистых грунтах – только до влажности 13–14 %, затем до влажности 19 % остается постоянным, а при дальнейшем увеличении ее до 35 % – снижается. При увеличении влажности значения сопротивления сдвигу, сцепления и угла внутреннего трения всех типов мерзлых грунтов возрастают (рис. 4.1).

Таблица 4.5. Физико-механические характеристики вечномёрзлых пород [29]

Грунт	Влажность, %	Предел прочности (условно-мгновенные сопротивления), МПа, при сжатии (в числителе), при растяжении (в знаменателе) в зависимости от температуры °С		
		-1	-5	-10
Песок	5	1,25/0,12	2,23/0,4	3,01/0,59
	10	1,96/0,32	3,33/0,66	5,05/0,98
	15	3,4/0,44	5,44/1,01	6,88/1,34
	18–20	5,21/0,62	9,19/1,34	10,87/1,66
Супесь	5	1,36/0,2	2,49/0,81	2,89/0,49
	10	3,22/0,6	6,61/0,92	7,49/1,06
	17	5,19/0,77	11,36/1,52	13,58/2,23
Суглинок	20	2,55/0,87	7,84/1,92	10,57/2,09
	30	4,18/1,23	8,13/2,16	12,13/2,23
	41	5,58/1,15	10,03/2,26	13,31/2,4
	70	6,88/0,94	12,09/1,6	14,37/2,06
Глина	20	2,05/0,55	4,96/1,14	6,41/2,01
	30	2,17/0,84	5,63/1,55	7,65/2,11
	481	3,81/1,4	8,32/2,16	10,62/2,5
	70	5,16/1,17	10,56/1,405	13,2/2,05

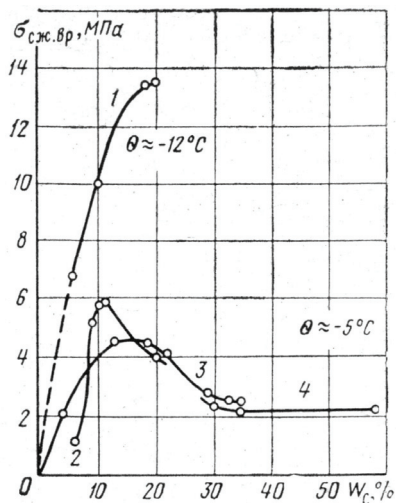


Рис. 4.1. Зависимость временного сопротивления мерзлых грунтов сжатию от суммарной влажности мерзлых грунтов [29]:

1 – песок; 2 – супесь; 3 – глина (содержание фракций 0,005 мм – 51 %); 4 – пылеватая глина (содержание фракций 0,005 мм – 63 %)

Для строительства подземных хранилищ методом камуфлетных взрывов пригодны породы, имеющие следующие показатели [31]:

Влажность, %	не менее 10 и не более 20
Плотность породы, г/см ³	не более 2,0
Пористость, %	порядка 30
Число пластичности	не менее 12
Показатель проницаемости, м ³ /кг	не менее 0,1
Гранулометрический состав частиц (содержание фракций), %:	
глинистых (0,005 мм)	не менее 15
пылеватых (0,05–0,005 мм)	не менее 35
песчаных (2,0–0,05 мм)	не более 40

Перспективы строительства подземных хранилищ в районах российской Арктики предопределили необходимость комплексного изучения физико-механических свойств вечномёрзлых пород с целью обоснования устойчивости подземных выработок в этих районах.

Так, на севере Тюменской области залегают дисперсные осадочные породы, представленные различными типами водно-ледяных отложений, в составе которых присутствуют глины, суглинки, песчаные породы. Характерной особенностью геологического строения перспективных площадей, является наличие залежей пластовых льдов [136].

В табл. 4.6 приведены результаты испытания образцов мерзлых пород перспективных площадей для строительства подземных хранилищ.

Таблица 4.6. Прочностные и деформационные характеристики мерзлых пород [136]

Вид грунтов	Температура опыта, °С	σ_c , МПа	σ_c^∞ , МПа	α	E_0 , МПа	$E_{0л}$, МПа	ν
Пески	-1	7,9	0,8	0,58	776,7	0,64	0,54
	-3	15	1,1	0,44	132,6	1,32	0,51
	-5	18,2	1,1	0,37	110,2	1,15	0,43
Суглинки	-5	2,6	0,44	0,54	116,6	0,13	0,67
Лед	-3	2,4	0,64	0,69	271,8	0,03	1,04
	-5	3,2	0,74	0,66	325,7	0,09	0,99

Примечание. σ_c – условно-мгновенная прочность; σ_c^∞ – предел длительной прочности; α – коэффициент нелинейности во времени; E_0 – модуль линейной деформации;

$E_{0л}$ – длительное значение модуля линейной деформации; ν – коэффициент поперечного расширения

4.2. Реологические свойства горных пород

Для обеспечения надежной эксплуатации подземных хранилищ, а также для прогнозирования устойчивости выработок-емкостей, необходимо учитывать фактор времени и его влияние на напряженно-деформированное состояние пород в зоне, прилегающей к емкости. Породы, слагающие подземные хранилища, являются в основном телами упругопластическими и характеризуются большими деформациями ползучести при постоянной нагрузке во времени. Величина деформаций и напряжений этих пород определяется, с одной стороны, нагрузкой, с другой – временем ее действия. Изменение напряжений и деформаций горных пород во времени при постоянной нагрузке называют ползучестью.

Реологические свойства горных пород изучаются экспериментально. Для проведения испытаний на ползучесть и длительную прочность образцов горных пород в условиях одноосного сжатия изготавливаются образцы цилиндрической формы высотой и диаметром 42 мм.

В работе [32] приведены результаты лабораторных испытаний деформаций ползучести образцов каменной соли и карналлита с поперечным сечением $0,10 \times 0,10$ м. При длительных исследованиях образцов каменной соли и нагрузке, составляющей 88 % от разрушающей, уже через 30 дней ползучесть входит в стадию прогрессирующей, а через 86 дней образец разрушается.

Сопоставление деформаций при кратковременной и длительной нагрузке показывает, что во втором случае значения продольных и поперечных деформаций выше. Следует также отметить, что на величину и характер изменения деформаций ползучести при длительных испытаниях значительное влияние оказывают влажность и скорость нагружения солевых пород.

По мнению А.Н. Ставрогина [33], атмосферная влага, проникая в тело образца сильвинита, ослабляет межатомные связи, в результате чего процесс ползучести протекает более интенсивно. Исследования влияния режима и скорости нагружения на деформации ползучести проводились в два этапа: при плавном нагружении и при разной скорости нагружения. Испытания образцов каменной соли при постоянной скорости нагружения позволили установить, что если нагрузка составляет более 60 % от разрушающей ($\sigma_c = 28,0$ МПа), развиваются деформации прогрессирующей ползучести, при этом

образец разрушается. Вторая серия образцов каменной соли была изучена при разной скорости нагружения – от 0,35 до 2,8 МПа/сут. Полученные результаты свидетельствуют о том, что значения продольных деформаций ползучести и времени до разрушения образца в значительной степени зависят от скорости нагружения. Так, при скорости нагружения 2,8 МПа/сут. образцы разрушались через 9 суток, а при скорости 0,35 МПа/сут. – на 73 сутки.

Явление, обратное ползучести (постепенное снижение напряжений в породе при постоянной ее деформации), называется релаксацией напряжений. Релаксация представляет собой ползучесть при напряжении, уменьшающемся пропорционально нарастающей пластической деформации. В этом случае упругие деформации, появившиеся в породе при первоначальном нагружении, постепенно переходят в пластические. Установлено, что существует общая закономерность изменения свойств пород в зависимости от времени действия на них нагрузки: чем длительнее воздействие нагрузки, тем меньше проявляются упругие свойства пород (модуль Юнга, предел упругости) и тем сильнее пластические свойства.

При горнотехнических расчетах с учетом фактора времени в качестве критерия принимается величина допустимых деформаций, не вызывающих разрушения, или вводится в расчет предел длительной прочности $\sigma_{дл}$ – напряжение, способствующее разрушению образца в заданном промежутке времени.

Предел длительной прочности горных пород определяется при испытаниях образцов на сжатие или изгиб. Для этого фиксируют время от начала нагрузки образца до его разрушения при конкретном уровне напряжения. Затем по результатам серии испытаний при различных нагрузках строят кривую длительной прочности в координатах напряжение – время, по которой и определяют значение $\sigma_{дл}$. По опубликованным данным [25], пределом длительной прочности следует считать напряжение, не вызывающее разрушения образца в течение 1 000 ч.

И.Х. Габдрахимов, учитывая нелинейный характер деформации солевых пород Верхнекамского месторождения при длительных нагрузках, отмечает, что при напряжении $\sigma_t = (0,7 - 0,9)\sigma_{сж}$ испытание образцов заканчивается разрушением в течение небольшого промежутка времени. Для определения значения $\sigma_{дл}$ предложено соотношение [34]

$$\lim \sigma_{\partial л} = \frac{\sigma_{сж}}{1+B}, \quad (4.5)$$

где B – реологический параметр материала.

В работе [25] отмечено, что при сжатии каменной соли в границах (14,0–22,0) МПа, значения длительной прочности составляют $\sigma_{\partial л} = (0,6–0,75)\sigma_{сж}$.

А.Н. Ставрогин [33] на основании экспериментальных исследований длительной прочности сильвинита установил зависимость времени τ до разрушения от величины приложенного напряжения σ

$$\tau = \tau_0 e^{-\alpha\sigma}, \quad (4.6)$$

где τ_0 и α – константы материала.

Между длительной прочностью глин и временем приложения нагрузки t существует следующая эмпирическая зависимость [22]

$$\sigma_{\partial л} = \sigma_0 \ln \frac{A}{t}, \quad (4.7)$$

где σ_0 – прочность породы при мгновенном нагружении; A – константа, характеризующая стойкость породы.

Для некоторых глин и мергелей $\tau_0 = 2\sigma_{\partial л}$, для многих других пород предел длительной прочности $\sigma_{\partial л} = (0,7–0,8)\sigma_0$.

Учет реологических явлений в породах, склонных к пластическим деформациям, имеет особое значение при горнотехнических расчетах подземных хранилищ. Устойчивость выработок-емкостей и целиков многокамерных хранилищ следует определять по длительной прочности пород с учетом их ползучести и релаксации.

4.3. Проницаемость горных пород

Одной из основных задач при проектировании и строительстве подземных газонефтехранилищ является выбор практически непроницаемых горных пород, способных обеспечить герметичность емкостей. Оценка герметичности пород осуществляется по абсолютной проницаемости.

Количественно проницаемость определяется на основании закона

линейной фильтрации Дарси и характеризуется коэффициентом проницаемости. Расчет коэффициента абсолютной проницаемости образца производится по формуле

$$K = \frac{10^3 \bar{Q} \mu l}{\Delta p F}, \quad (4.8)$$

где \bar{Q} – расход газа при атмосферном давлении, см³/с, приведенный к среднему давлению (P_{cp}) газа в образце, $P_{cp} = (P_1 + P_2)/2$

$$\bar{Q} = \frac{2QP_0}{P_1 + P_2 + 2P_0}, \quad (4.9)$$

P_0 – атмосферное давление, кгс/см²; P_1 – давление газа на входе в образец, кгс/см²; P_2 – давление газа на выходе из образца, кгс/см²; μ – динамическая вязкость газа, сП; l – длина образца породы, см; Δp – перепад давления по длине образца, кгс/см²; F – площадь сечения образца, см².

Для нахождения абсолютной проницаемости из каждого отобранного монолита изготавливаются образцы, ориентированные параллельно и перпендикулярно напластованию. Их боковая поверхность покрывается парафином, бекелитовым лаком или клеем БФ-2 для устранения микродефектов, образующихся при изготовлении. Подготовленные образцы высушиваются до постоянной массы при 105⁰С (гипс – при 50⁰С). Испытания проводятся на установке УИПК-1 [35].

Результаты исследований проницаемости горных пород с целью оценки их пригодности для подземных хранилищ приведены в работе [9]. В частности, были определены количественные показатели проницаемости некоторых горных пород. Так, абсолютная проницаемость для ангидрита составляет $3,5 \cdot 10^{-4}$ (параллельно напластованию) и $2,1 \cdot 10^{-4}$ (перпендикулярно напластованию), для гипса – $9,04 \cdot 10^{-2}$, для доломита – $1,98 \cdot 10^{-2}$ (параллельно напластованию) и $9,37 \cdot 10^{-3}$ Д (перпендикулярно напластованию) [36].

В работе [37] приведены результаты экспериментов по изучению проницаемости солевых пород Прикарпатья с целью установления их пригодности для строительства газонефтехранилищ. Исследования проводились на экспериментальной установке. Образцы солевых

пород представляли собой керны диаметром 43 и высотой 35 мм. После тщательной обработки поверхности образец помещали в камеру давления, где с помощью резиновой манжеты осуществлялся гидрообжим образца. В качестве рабочего агента использовался инертный газ. Испытаниями установлено, что проницаемость солевых пород зависит от их минерального состава. Основным компонентом, влияющим на проницаемость пород, являются глинистые частицы. Калийные соли, характеризующиеся высоким содержанием глинистых частиц, связывают между собой другие компоненты породы (сильвинит, галлит, ангидрит, каинит). Проницаемость калийных и каменных солей при всестороннем давлении (11–15) кгс/см² составляет: для сильвинита 0,272–0,608, для каинита – 0,130, каинит-лангбейнита 0,0102, каменной соли (0,00144–0,0348) мД.

Установлена зависимость проницаемости от всестороннего давления (рис. 4.2). Из рис. 4.2 видно, что наименьшей проницаемостью обладают каменные соли и каинит-лангбейниты, наибольшей – солевые глины и сильвинитовые породы, однако и они при всестороннем давлении (200–300) кгс/см² являются породами с низкой проницаемостью.

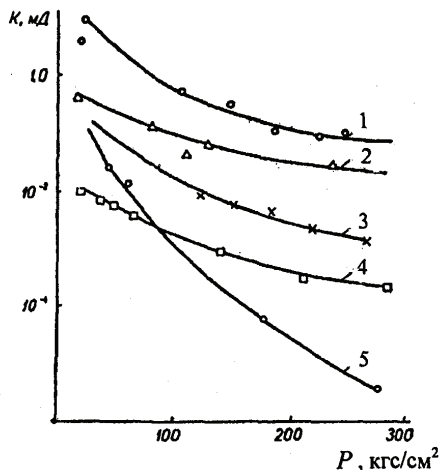


Рис. 4.2. Зависимость газовой проницаемости K от всестороннего давления P для разных типов пород [37]:

1 – солевая глина; 2 – сильвинит; 3 – каинит; 4 – каинит-лангбейнит; 5 – каменная соль

Располагая данными о проницаемости пород и ее изменении с глубиной залегания пласта или залежи, можно оценить пригодность месторождений для строительства хранилищ. Так, надежный экран для нефтепродуктов – породы с проницаемостью $<10^{-1}$ мД. Следовательно, калийные соли (практически непроницаемые породы) могут быть использованы для сооружения в них подземных газонефтехранилищ.

Исследования зависимости проницаемости цилиндрических образцов плотных пород от характера внешней нагрузки свидетельствуют о том, что влияние радиального сжатия на изменение проницаемости во много раз превосходит влияние торцевого сжатия (табл. 4.7).

Таблица 4.7. Относительное уменьшение проницаемости горных пород в зависимости от характера внешней нагрузки [9]

Порода	Место отбора, возраст, глубина отбора	Давление сжатия, кгс/см ²		Относительное изменение проницаемости в зависимости от внешнего сжатия, %	
		начальное	конечное	радиальное	торцевое
Известняк	Куйбышевская область, казанский и самарский ярусы, 87–215 м	25	200	11,4–71,8	2,4–21,0
Алевролит	Краснодарский край, келловейский ярус, 70 м	25	200	89,1–99,4	5,0–8,8
Ангидрит	Куйбышевская область, самарский ярус, 220–245 м	25	200	98,9–99,1	14,8–21,5
Гипс	Татарстан, казанский ярус, 100 м	25	150	92,5–98,8	3,8–9,1

Помимо внешнего давления, на проницаемость оказывает значительное воздействие давление P_{ϕ} фильтрующего флюида. Данные, приведенные в работе [9], показывают, что при повышении P_{ϕ} на 30 кгс/см² при $\Delta P = \text{const}$ проницаемость гипсов увеличивается в 1,2–5,0 раза. Авторы объясняют это явление тем, что при повышении давления газа происходит как частичная разгрузка породы от внешнего давления и, соответственно, увеличение ее общего объема, так и сокращение объема твердой фазы за счет сжатия отдельных ее частиц под действием внешнего и внутреннего давлений.

Наряду с напряженно-деформированным состоянием на

проницаемость пород в некоторой степени влияет также температура. Результаты исследований для различных по литологии пород показывают, что этот фактор не имеет большого значения при строительстве шахтных хранилищ, т. к. глубина их заложения незначительная и температура на этих глубинах не превышает 12–15 °С [9].

Решение вопросов пригодности пород и технологии строительства газонефтехранилищ обуславливает необходимость определения проницаемости не только в лабораторных, но и непосредственно в условиях естественного залегания пород. Для этих целей разработаны различные приборы, принцип действия которых заключается в следующем. В шпур нагнетается под давлением флюид. Шпур тщательно герметизируется [38]. По перепаду давления и расходу флюида рассчитывается коэффициент проницаемости из уравнения

$$K = \frac{Q \mu}{4\pi r_0 (P_0 - P_1)}, \quad (4.10)$$

где K – коэффициент проницаемости; Q – расход жидкого флюида; μ – вязкость флюида; r_0 – радиус шпура; P_0 – давление флюида в шпуре; P_1 – давление флюида на контуре сферы его распространения в массиве (в практических расчетах принимается равным атмосферному).

4.4. Структура порового пространства и экранирующая способность горных пород

Изучение экранирующей способности пород, обуславливающей возможность создания в них емкостей для хранения углеводородных топлив, связано с необходимостью установления не только абсолютной проницаемости горных пород, но и детального изучения структуры порового пространства.

Известно, что проницаемость горных пород зависит от наличия открытой пористости. Однако, как отмечено в работе [39], непосредственной зависимости между открытой пористостью и проницаемостью, без учета структуры порового пространства пород, не существует. Установлено, что на изменение проницаемости пород-коллекторов решающее воздействие оказывают размеры поровых каналов [40].

Для изучения структуры порового пространства труднопроницаемых пород В.И. Черкашенинов и В.Б. Сохранский применяют метод нагнетания ртути в глубоко вакуумированные образцы пород под высоким давлением.

Для характеристики порового пространства применяются эквивалентные радиусы пор, определяемые из выражения

$$r_{\text{эк}} = \frac{2\sigma \cos \theta}{P_{\text{к}}}, \quad (4.11)$$

где $r_{\text{эк}}$ – эквивалентный радиус пор; σ – поверхностное натяжение ртути на границе с воздухом; θ – краевой угол смачивания ртути; $P_{\text{к}}$ – капиллярное давление.

Обычно угол смачивания пород ртутью принимается равным 140° , поверхностное натяжение – $4,8 \cdot 10^{-5}$ кгс/см². Тогда уравнение (4.11) принимает вид

$$r_{\text{эк}} = \frac{7,5677}{P_{\text{прив}}}, \quad (4.12)$$

где $P_{\text{прив}}$ – приведенное давление ртути, кгс/см².

Таким образом, обработка данных опытов сводится к вычислению эквивалентных радиусов пор по формуле (4.11), а также к расчету объема пор образца согласно соотношения

$$V = \frac{K \Delta R - \Delta V}{M}, \quad (4.13)$$

где V – объем пор образца; K – константа прибора; ΔR – изменение напряжения в сети прибора при данном приведенном давлении ртути; M – масса образца до опыта; ΔV – поправка на сжимаемость ртути.

По найденным значениям эквивалентных радиусов и соответствующих им объемов пор строятся интегральные структурные кривые исследуемых пород: по оси абсцисс откладываются логарифмы эквивалентных радиусов, по оси ординат – объемы пор. Интегральные кривые позволяют построить порометрические диаграммы распределения пор в процентах по логарифмам эквивалентных радиусов.

Для изучения структуры порового пространства пород была подобрана партия образцов с различной проницаемостью – от 10^{-5} до

десятых долей миллиарда. В результате проведенных исследований получены соответствующие порограммы распределения пор по размерам [40].

Данные экспериментов позволили, прежде всего, отметить уменьшение размеров фильтрующих пор по мере снижения проницаемости пород. Поровое пространство пород проницаемостью 10^{-1} мД характеризуется наличием как тонких (0,02–0,0025) мкм, так и относительно крупных пор, диаметр которых составляет (10–12) мкм. В породах с проницаемостью 10^{-2} мД поры значительно меньше, их максимальные диаметры не превышают 2,5 мкм. Дальнейшее уменьшение величины пор наблюдается в породах с проницаемостью 10^{-3} – 10^{-4} мД.

Анализ порограмм позволяет сделать вывод о том, что проницаемость пород зависит главным образом от структуры порового пространства. При этом основным фактором является распределение пор по размерам. Герметичность подземных емкостей может быть обеспечена только в том случае, если размеры пор невелики и естественная влага, содержащаяся в породе, удерживается капиллярными и молекулярно-поверхностными силами. В этом случае для вытеснения влаги углеводородными жидкостями и газом необходимо давление, превышающее максимальные давления в емкостях. Породы с крупными порами, в которых вода перемещается под действием гравитационных сил или вытесняется при перепадах давления (что наблюдается в процессе эксплуатации хранилищ), непригодны для строительства подземных емкостей.

Согласно существующим классификациям пород-коллекторов нефти и газа породы, в которых возможно движение пластовых флюидов, имеют абсолютную проницаемость более 0,1 мД. Следовательно, экранами по отношению к углеводородным флюидам могут быть только породы с более низкой проницаемостью.

Для установления экранирующей способности различных по составу и проницаемости пород определялись условия прорыва нефтепродуктов и газа через водонасыщенное поровое пространство. Исследовались сульфатные (гипсы, ангидриты) и карбонатные (доломиты, известняки) породы с абсолютной проницаемостью 10^{-1} – 10^{-5} мД. Структура порового пространства этих пород, изученная методом ртутной порометрии, характеризуется наличием пор диаметром (0,016–13,0) мкм. Установлено, что прорыв осуществляется при давлениях углеводородных жидкостей до 15, газа

– до 75 кгс/см² [41].

Рассмотренные свойства плотных пород, а также данные по вытеснению из них воды углеводородными жидкостями и газом положены в основу оценочной классификации плотных пород по экранирующей способности (табл. 4.8).

В соответствии с классификацией определяется пригодность пород для хранения жидких и газообразных углеводородов при избыточных давлениях в емкостях до 70 кгс/см². Так, породы I и II классов (с высокой и повышенной экранирующей способностью) можно использовать для сооружения хранилищ углеводородов различных видов при следующих давлениях в емкости: для нефтепродуктов (<1,0), бутана (<5,0), пропана (<15,0), этана (<40,0), этилена (<(40,0–70,0) кгс/см².

Таблица 4.8. Оценочная классификация плотных пород по экранирующей способности [9]

Классы пород	Давление прорыва, кгс/см ²	Проницаемость, мД	Медианный диаметр пор, мкм	Экранирующая способность
I	70	10 ⁻⁵	0,4	Высокая
II	40–70	10 ⁻⁴ –10 ⁻⁵	0,08–0,04	Повышенная
III	15–40	10 ⁻³ –10 ⁻⁴	0,16–0,08	Средняя
IV	5–15	10 ⁻² –10 ⁻³	0,5–0,16	Пониженная
V	1–5	10 ⁻¹ –10 ⁻²	6,4–0,5	Низкая
VI	1	10 ⁻¹	6,4	–

Породы III класса (со средней экранирующей способностью) пригодны для хранения всех перечисленных продуктов, за исключением этилена; IV класс пород (с пониженной экранирующей способностью) предусматривает возможность строительства хранилищ для пропан-бутановых смесей и нефтепродуктов. В породах V класса могут храниться только углеводороды бутанового ряда и нефтепродуктов.

Проницаемость 10⁻¹ мД (VI класс) является верхним пределом использования пород для строительства подземных хранилищ.

4.5. Изменение свойств горных пород при длительном контактировании их с углеводородами

Надежная эксплуатация подземных газонефтехранилищ обеспечивается стойкостью горных пород к агрессивному

воздействию хранящихся продуктов, контактирующих с этими породами продолжительное время. Если при воздействии углеводов будет происходить интенсивная деструкция скелета вмещающих пород, то это приведет к повышению их проницаемости и снижению герметичности емкостей.

Влияние долговременного контакта углеводов на проницаемость горных пород и их физико-механические свойства изучались на примере известняков, доломитов, ангидритов и гипсов [42]. Образцы цилиндрической формы (длина – 50,0, диаметр – 30,0 мм) помещались в среду дизельного топлива (как наиболее агрессивного из нефтепродуктов) и сжиженного газа (пропан-бутановая смесь). Проницаемость определялась на установке УИПК-1М при одном и том же режиме испытаний (избыточное давление азота – 10,0 кгс/см² без противодействия на выходе, внешняя нагрузка на образец – 30,0 кгс/см²). В табл. 4.9 представлены усредненные значения проницаемости по группам пород каждого литологического типа.

Таблица 4.9. Результаты исследования абсолютной проницаемости пород в процессе долговременного контакта их с углеводородными средами [42]

Порода	Проницаемость по газу, мД			
	до контакта	после 6 м-цев хранения	после 24 м-цев хранения	после 48 м-цев хранения
С дизельным топливом				
Известняк	$6,62 \cdot 10^{-5}$	$9,37 \cdot 10^{-5}$	–	$2,04 \cdot 10^{-4}$
Доломит	$1,09 \cdot 10^{-2}$	$1,23 \cdot 10^{-2}$	–	$1,45 \cdot 10^{-2}$
Ангидрит	$1,24 \cdot 10^{-2}$	$1,62 \cdot 10^{-3}$	–	$1,55 \cdot 10^{-2}$
Гипс	$2,31 \cdot 10^{-2}$	$1,98 \cdot 10^{-2}$	–	$1,55 \cdot 10^{-2}$
С сжиженным газом				
Известняк	$4,23 \cdot 10^{-5}$	$4,13 \cdot 10^{-5}$	$1,25 \cdot 10^{-4}$	$1,14 \cdot 10^{-4}$
Доломит	$1,28 \cdot 10^{-2}$	$1,39 \cdot 10^{-2}$	$1,44 \cdot 10^{-2}$	$5,23 \cdot 10^{-3}$
Ангидрит	$4,38 \cdot 10^{-4}$	$4,48 \cdot 10^{-4}$	$4,29 \cdot 10^{-4}$	$3,57 \cdot 10^{-4}$
Гипс	$9,04 \cdot 10^{-2}$	$7,27 \cdot 10^{-2}$	$7,28 \cdot 10^{-2}$	–

Из табл. 4.9 видно, что проницаемость большинства исследованных пород при трех-, четырехлетнем контакте с углеводородными средами практически не изменялась. Зафиксированное в ряде опытов некоторое увеличение

проницаемости происходило в основном за счет нарушения приповерхностной части выработки-емкости, где наблюдалось образование проницаемой зоны мощностью не более 2,5 см (из расчета 50-летнего срока службы хранилищ), что не представляет реальной угрозы разгерметизации хранилищ.

Диструкционные процессы в скелете пород настолько малы, что не оказывают заметного влияния на их прочностные характеристики (табл. 4.10). После длительного контакта с углеводородами прочностные показатели пород практически не изменялись.

Таблица 4.10. Изменение прочности пород при длительном контакте с углеводородными средами [9]

Порода	Прочность до контакта, кгс/см ²	Прочность после 24 месяцев хранения, кгс/см ²	
		с сжиженным газом	с дизельным топливом
Известняк	74,6	84,0	–
	576,9	571,0	–
	1200,0	1286,0	1187,0
Доломит	67,6	73,0	–
	590,0	612,0	–
	965,0	971,0	954,0
Ангидрит	52,4	49,5	–
	346,0	360,8	–
	600,0	597,7	611,6
Гипс	22,2	22,0	–
	101,2	107,0	–
	261,0	254,0	266,0

Примечание. Первая цифра для каждой породы обозначает прочность при одноосном растяжении, вторая – при сжатии, третья – при объемном сжатии.

В работе [43] приведены исследования деформирования солевых пород при их контакте с нефтепродуктами. Для этого была разработана экспериментальная установка (рис. 4.3).

Образцы помещались в сосуд с нефтепродуктом (дизельное топливо). Запись поперечной деформации при изменении реологических свойств образца производилась автоматически при помощи самописца.

Данные исследования образцов, находящихся в нефтепродукте, сравнивались с аналогичными результатами для образцов, контактирующих с атмосферным воздухом. Исследования

проводились при нагрузках 30, 40 и 60 % от разрушающей. Максимальная продолжительность опытов составила 120 дней. Предел прочности на сжатие определялся на прессе ПСУ-125.

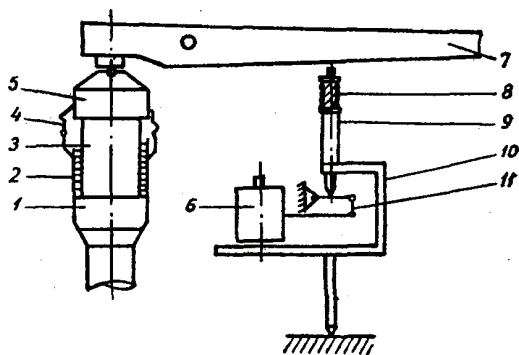


Рис. 4.3. Схема экспериментальной установки для исследования характера деформирования пород при их контакте с нефтепродуктами [43]:

- 1 – нижняя плита; 2 – сосуд с нефтепродуктом; 3 – образец; 4 – полиэтиленовая оболочка; 5 – верхняя плита; 6 – барабан самопишущего прибора; 7 – рычаг передачи давления груза; 8 – пружина; 9 – верхняя штанга прибора; 10 – корпус прибора; 11 – система рычагов со стрелкой, фиксирующей продольную деформацию

По результатам исследований построены кривые ползучести образцов калийных солей прикарпатских месторождений (рис. 4.4).

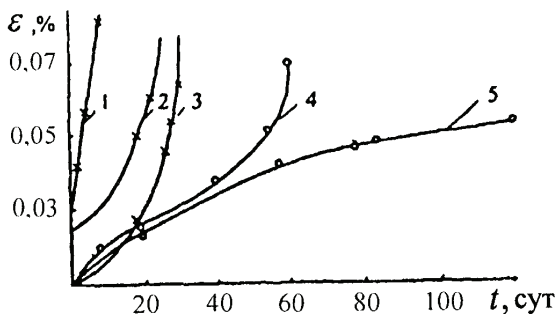


Рис. 4.4. Графики ползучести образцов солевых пород [43]:

- 1, 2, 3 – в контакте с атмосферным воздухом при нагрузках, составляющих 60, 40, 30 % от разрушающей; 4, 5 – в контакте с нефтепродуктами при нагрузках, составляющих 40 и 30 % от разрушающей

Анализ графиков показывает, что степень деформации образцов, находящихся в контакте с нефтепродуктами, в три-четыре раза ниже, чем образцов, контактирующих с атмосферным воздухом. Исследованиями установлено, что нефтепродукты, соприкасаясь с соляными породами, создают защитную среду, предохраняющую их от влияния влажности атмосферного воздуха, тем самым, повышая длительную прочность пород.

Следовательно, хранение нефтепродуктов в солевых породах оказывает на них положительное воздействие, замедляет процесс деформирования солевых пород под действием горного давления.

Таким образом, проведение комплекса исследований физико-механических свойств горных пород позволяет производить оценку их пригодности для строительства подземных газонефтехранилищ.

4.6. Особенности хранения углеводородов в подземных емкостях

Главной особенностью подземного хранения углеводородных топлив является их длительное непосредственное контактирование с горной породой, в которой сооружена емкость. Кроме того, в процессе хранения углеводородов в солевых емкостях происходит взаимодействие нефтепродуктов и сжиженных газов с насыщенным рассолом, а при эксплуатации шахтных хранилищ в них могут поступать грунтовые воды.

В подземных хранилищах, в отличие от наземных резервуаров, температура хранения продукта не зависит от природно-климатических условий, сезонных колебаний температуры воздуха и верхнего слоя грунта. В подземных хранилищах, сооружаемых в залежах каменной соли, топливо находится под давлением при отсутствии воздушной фазы в непосредственном контакте с солью и рассолом, что является благоприятным фактором.

Особые условия, характерные для подземного хранения, со временем оказывают влияние на физико-химические свойства газонефтепродуктов, а следовательно, и на их качество. В работах В.А. Мазурова [44], В.С. Азева [45], Н.В. Стрюк [46], П.М. Гофман-Захарова [47], Н.Г. Коробцовой [48] рассмотрены вопросы влияния контактирования различных горных пород, грунтовых вод и рассола на химическую стабильность топлив.

Для оценки возможности подземного хранения товарных высококачественных моторных топлив были проведены

лабораторные и опытно-промышленные исследования в натуральных условиях. При этом широко применялся метод длительного опытного хранения различных топлив. Экспериментально установлено, что основные показатели физико-механических свойств топлив, находящихся в подземных емкостях, образованных в каменной соли, не противоречат предусмотренным ГОСТами [44].

В работе [49] приведены результаты исследований длительного контактирования с каменной и калийной солями автомобильного бензина А-75 и дизельного топлива марки «А». Обнаружено, что физико-химические показатели топлив остаются без существенных изменений.

Наблюдения за качеством этилированных бензинов А-76 и А-66 в соляной каверне подтвердили, что после длительного хранения в подземной емкости физико-химические свойства бензина удовлетворяют требованиям ГОСТа [45].

Реактивное топливо Т-1 находилось в опытной соляной каверне при температуре 18 °С в течение пяти лет. Анализ контрольных проб показал, что плотность, вязкость, фракционный состав, зональность, иодное число, фактические смолы, термическая стабильность практически не изменились [50].

Исследованиями установлено изменение кислотности и содержания фактических смол при хранении этилированного бензина А-76, дизельного топлива ДЛ и реактивного топлива Т-1 в подземных емкостях. Проверка в натуральных условиях показала, что контактирование топлив с водой и рассолом при их хранении в солевых емкостях не оказывает существенного воздействия на физико-химические свойства нефтепродуктов [51].

Наряду с изучением химической стабильности топлив при их хранении в солях проводились работы по установлению возможности хранения в других горных породах. В работе [52] отмечено, что длительное хранение неэтилированного бензина А-66, топлива Т-1, дизельных топлив КЗ, ДЛ и Л в емкостях, созданных в суглинках и кембрийской глине на глубинах 25–40 м, не снижает их качества.

Хранение в подземных емкостях сжиженных углеводородных газов обуславливает необходимость выявления их химической стабильности при взаимодействии с горными породами. Для этого изучалось изменение качества сжиженных углеводородных газов при хранении в подземных емкостях, образованных в сульфатно-карбонатных породах [53]. Установлено, что содержащиеся в породе

незначительные примеси окислов алюминия, железа и кремния не оказывают влияния на химическую стабильность хранимого продукта, т. к. эти окислы становятся катализаторами лишь после специальной физико-химической переработки и действуют на продукт только при температурах не ниже 150–200 °С. Температура же вмещающих пород в подземных хранилищах не превышает 10 °С, а максимальная температура поступающего в хранилища газа – 40 °С.

На качество топлив оказывают влияние механические примеси. При контакте нефтепродуктов со стенками подземных емкостей возможно попадание в них механических частиц, что значительно повышает степень загрязненности нефтепродуктов и отрицательно сказывается на их эксплуатационных свойствах. Наиболее жесткие требования предъявляются к чистоте авиационных топлив.

Проверка загрязненности топлива Т-1 при его выдаче из подземной соляной каверны показала, что содержание механических примесей в пробах в начале перекачки составило 60–100, а в середине – 30 г/т, что в три раза выше, чем при хранении в наземных стальных резервуарах [54]. Следовательно, для поддержания уровня чистоты топлива необходимо предусмотреть его очистку от механических загрязнений путем установки соответствующего фильтрующего оборудования на линии выдачи топлива из подземного хранилища.

Раздел 5

ПОДЗЕМНЫЕ ХРАНИЛИЩА ПРИРОДНЫХ ГАЗОВ В ПОРИСТЫХ СТРУКТУРАХ

Развитие нефтегазовых комплексов в XX столетии и создание во многих странах единых систем газообеспечения предопределили строительство большеобъемных подземных газохранилищ. Такими стали подземные хранилища, образованные в пористых структурах, сооружение которых было начато в начале XX столетия.

5.1. Общие сведения и параметры подземных газохранилищ

Подземные хранилища природных газов, сооружаемые в пористых структурах, разбиваются на два типа: сооружаемые в истощенных нефтяных и газовых залежах и в водоносных пластах.

Главным фактором этих хранилищ является наличие пористых структур, чтобы горные породы, как губка (впитывали) всасывали газ.

Подземные газохранилища в истощенных месторождениях. На долю этих хранилищ приходится основной объем хранимого газа. Расходы на создание и эксплуатацию газохранилищ в истощенных пластах приблизительно в 1,5–2,0 раза меньше, чем затраты на газохранилища в водоносных пластах. Это связано с тем, что истощенные нефтяные и газовые месторождения полностью разведаны и оборудованы.

В хранилищах, образованных в истощенных нефтегазовых пластах, приемлемой для хранимого газа является геологическая среда, сложенная пористыми и проницаемыми горными породами, когда-то насыщенными нефтью или газом.

Принцип создания хранилища – сжатие и вытеснение газом жидкостей, находящихся в пласте.

Способ эксплуатации таких хранилищ заключается в сжатии и расширении газа в сочетании с эффектом сжимаемости и подвижности воды и нефти. Газ закачивается в хранилище под давлением и вытесняет жидкость из пласта. И наоборот, – при откачке газа потребителям, жидкость под давлением пластов снова заполняет освободившиеся поры.

При сооружении хранилищ на базе выработанных газовых и нефтяных месторождений для закачки газа используются в основном старые эксплуатационные скважины. В этом случае первоначальной стадией строительства подземного хранилища является тщательное изучение крепления и цементирования всех скважин, расположенных на месторождении и их переоборудование. Такая необходимость может быть вызвана плохой цементацией и другими причинами. Иногда приходится спускать новую обсадную колонну, когда старая подверглась коррозии и нуждается в замене, а также разбуривать заброшенные законсервированные скважины. С целью установления возможной утечки газа из пласта или через кольцевое пространство обсадной колонны в процессе эксплуатации подземного хранилища газа испытанию на герметичность подвергается каждая скважина.

Давление газа в подземных хранилищах зависит от геологии пластов, глубины залегания и может достигать 15–20 МПа.

Основными сооружениями подземного газохранилища являются эксплуатационные и контрольные скважины, компрессорный цех для закачивания газа в пласт и подачи его потребителям при отборе,

установки для очистки и осушки газа, системы борьбы с гидрообразованиями, технологические трубопроводы, система КИП и автоматики, газосборный коллектор.

Подземные газохранилища в водоносных пластах. Несмотря на то, что наиболее экономичным типом крупных ПХГ являются истощенные, или находящиеся на стадии истощения нефтяные и газовые залежи, вследствие их геологической и географической изученности, имеющегося обустройства, наличия скважин, сокращения срока ввода, значительная часть хранилищ создана в водоносных пластах.

Создание ПХГ в водоносных пластах представляет собой сложную научно-техническую задачу. Найденный пласт должен длительное время сохранять и затем отдавать закачанный в него газ. Чаще всего такими пластами являются пористые водоносные пласты, при этом пласт имеет куполообразную форму, образующую «ловушку» с непроницаемой кровлей, препятствующей проникновению газа в другие пласты или к поверхности через трещины. Газ закачивается в сводовую часть куполообразной структуры и образует там газовый «пузырь», а вода оттесняется к краям структуры (рис. 5.1).

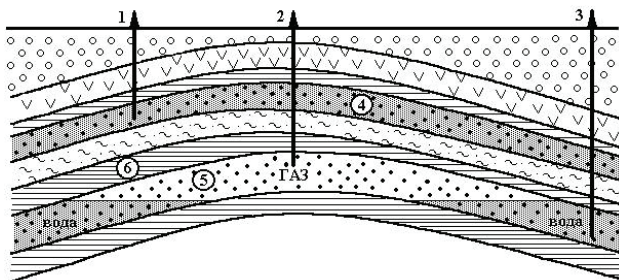


Рис. 5.1. Схема геологической структуры, в которой размещается подземное газохранилище [137]:

- 1, 2, 3 – скважины; 4 – водоносный пласт; 5 – полость, заполненная газом;
6 – непроницаемый пласт плотных горных пород

При вытеснении воду из пласта можно удалить через разгрузочные скважины, а при оттеснении – перемещать по водоносной системе. Кровля может быть представлена плотными пластичными глинами или крепкими известняками и доломитами при отсутствии трещин и разломов, что при толщине кровли 5–15 м на

глубине 300–1 000 м достаточно для предотвращения утечек газа. Наиболее экономичным считают ПХГ на глубине 300–600 м.

При строительстве ПХГ в водоносных пластах необходимо наличие в геологической структуре следующих факторов: подземная структура должна быть в виде свода (купола), пласт породы (коллектор) для хранения газа должен иметь достаточную пористость и проницаемость, для исключения утечки газа иметь кровлю, состоящую из непроницаемых пород.

Проницаемость коллектора практически должна быть не менее 0,3–5,0 Дарси, пористость выше 10–15 %. На рис. 5.2 представлена модель подземного газохранилища в водоносном пласте.

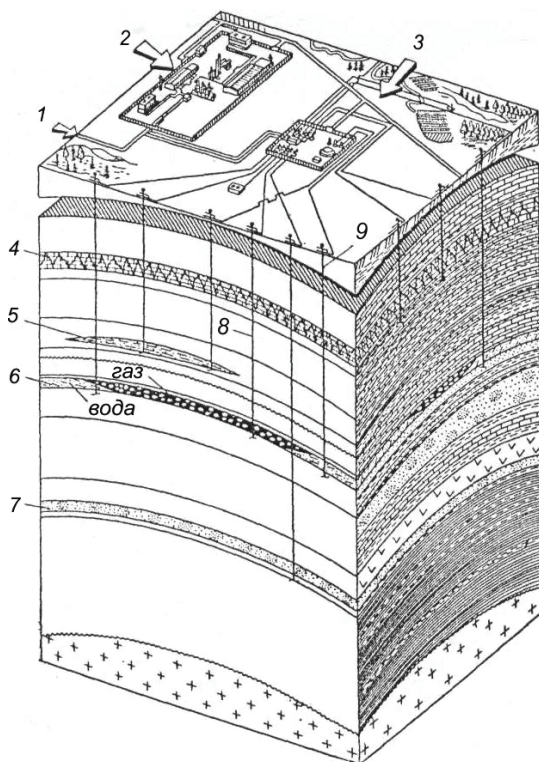


Рис. 5.2. Подземное хранилище природного газа в водоносных пластах [55]:

- 1 – газ из магистрального газопровода; 2 – компрессорная станция;
- 3 – газораспределительный пункт; 4 – карбонатный пласт; 5 – песчаная линза;
- 6, 7 – песчаные пласты; 8 – эксплуатационная скважина; 9 – разгрузочная скважина

Подземное хранилище включает три технологических процесса: закачка, хранение и отбор газа.

Закачка газа – это нагнетание его в искусственную газовую залежь при заданных технологическим проектом показателях. Газ из магистрального газопровода поступает на площадку очистки газа от механических примесей, затем на пункт замера и учета газа, и далее в компрессорный цех, где компримируется и подается по коллекторам на газораспределительные пункты (ГРП). На ГРП общий газовый поток разделяется на технологические линии, к которым подключены шлейфы скважин.

Отбор газа из подземного хранилища является практически таким же технологическим процессом, как и добыча из газовых месторождений, но с одним существенным отличием: весь активный (товарный) газ отбирается за период от 60 до 180 суток. Проходя по шлейфам, он поступает на газосборные пункты, где собирается в газосборный коллектор. Из него газ поступает на площадку сепарации для отделения пластовой воды и механических примесей, после чего направляется на площадку очистки и осушки. Очищенный и осушенный газ поступает в магистральные газопроводы [138].

5.2. Определение емкости и продуктивности подземных газохранилищ

Общая емкость подземного газохранилища состоит из емкостей для активного и буферного газов. Газ, закачиваемый летом в подземное хранилище, а в зимний период отбираемый и подаваемый потребителям, называется активным (рабочим). Газ, находящийся постоянно в подземном хранилище, называется буферным. Буферный газ нужен для создания в хранилище определенного давления в конце отбора, увеличения дебитов скважин и уменьшения степени сжатия на компрессорных станциях. Объем буферного газа составляет примерно половину от всего газа, закачиваемого в хранилище.

Необходимая емкость по активному газу определяется графическим и аналитическим методами.

Графический метод состоит в том, что активный объем определяется по графику газообеспечения населенного пункта, при этом считается, что источником поступления газа является магистральный газопровод, работающий с постоянной производительностью в течение года Q_{cp} .

На рис. 5.4 представлена диаграмма ежемесячного газопотребления.

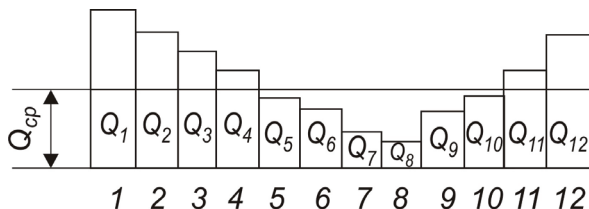


Рис. 5.4. Диаграмма ежемесячного газопотребления

Порядок определения активного объема газа следующий.

1. Определяется среднемесячная производительность газопровода

$$Q_{cp} = \frac{1}{12} \sum_1^{12} Q_i, \quad (5.1)$$

где Q_i – объем потребления газа за i -тый месяц.

Из рис. 5.4 видно, что отбор газа имеет место в месяцы под номерами 1–4, 11, 12. Закачка газа происходит в месяцы под номерами 5–10.

2. Объем активного газа определяется двумя способами, согласно приведенной на рис. 5.4 диаграмме.

1-й способ

$$Q_a = (Q_1 - Q_{cp}) + (Q_2 - Q_{cp}) + (Q_3 - Q_{cp}) + (Q_4 - Q_{cp}) + (Q_{11} - Q_{cp}) + (Q_{12} - Q_{cp}); \quad (5.2)$$

2-й способ

$$Q_a = (Q_{cp} - Q_5) + (Q_{cp} - Q_6) + (Q_{cp} - Q_7) + (Q_{cp} - Q_8) + (Q_{cp} - Q_9) + (Q_{cp} - Q_{10}); \quad (5.3)$$

Ориентировочно объем активного газа можно определить по формуле

$$Q_a = Q_{om} \cdot \alpha \cdot \beta + Q_{отк} \cdot \eta, \quad (5.4)$$

где Q_{om} – годовое потребление газа на отопление; α – районный коэффициент, $\alpha = 0,6 - 0,8$; β – корреляционный коэффициент,

$\beta = 1,2 - 1,5$; $Q_{отк}$ – годовая потребность газа при отключении отопления; η – коэффициент, учитывающий повышение расхода газа на технологические нужды, $\eta = 0,01 - 0,02$.

3. Максимальная производительность подземного хранилища определяется

$$Q_{\max} = (1,5 - 2,0)Q_a / n_0, \quad (5.5)$$

где n_0 – число суток отбора газа из подземного хранилища.

5.3. Технология бурения скважин

При создании подземных хранилищ в истощенных нефтегазовых залежах для эксплуатации хранилищ используется, как правило, существующая система скважин после соответствующего их обследования, проверки цементации и герметичности.

Для строительства подземных хранилищ в водоносном пласте необходимо осуществить бурение системы скважин: эксплуатационных, наблюдательных и контрольных. По эксплуатационным скважинам газ нагнетается в водоносный пласт. Чтобы газ не просочился из хранилища в вышележащие породы и при наличии разрывных нарушений даже на поверхность, за этим следят с помощью контрольных и наблюдательных скважин, вскрывающих основной и контрольный водоносные пласты.

Бурение скважины – сложный технологический процесс строительства, состоящий из таких операций:

- углубление скважин посредством разрушения горных пород на забое буровым инструментом;
- удаление выбуренной породы из скважины;
- крепление ствола скважины в процессе ее углубления обсадными колоннами.

Горная порода при бурении разрушается породоразрушающими инструментами – буровыми долотами (рис. 5.5, а).

При взаимодействии долота с породой образуется цилиндрическая выработка. Долото вращается при осевой нагрузке на забой вместе с бурильной колонной (при роторном бурении) или вместе с валом забойных двигателей (турбобуров, электробуров). В зависимости от прочности горных пород, хрупкости, абразивности, используются разные типы буровых долот (рис. 5.5, б, в).

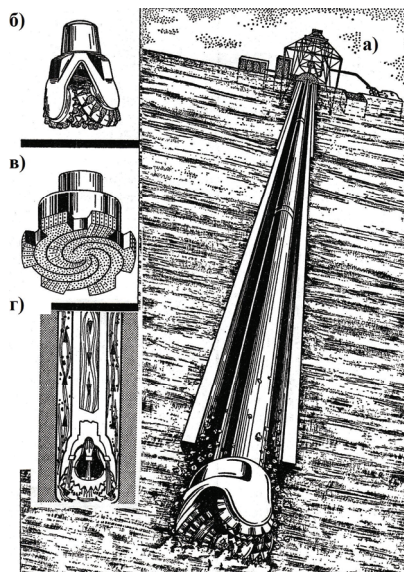


Рис. 5.5. Технологические элементы бурения скважин [2]:

а) – разрушение породы при бурении; б) – буровое долото шарошечного типа; в) – долото алмазное; г) – подача бурового раствора в забой скважины

В скважину во время процесса бурения подается буровой промывочный раствор (рис. 5.5, г). К нему предъявляются определенные требования: способствовать разрушению пород, очистке забоя и транспортировке породы на поверхность, поддержанию прочности стенки скважины, невозможности процесса осаждения обломков породы в стволе скважины.

Основным заданием бурения является доведение скважин до проектной глубины и выполнение всех технических частей проекта. Конструкция скважины определяется числом рядов труб, спускаемых в процессе бурения (рис. 5.6).

Соединение устанавливаемых в скважине труб, называют колонной. Первая колонна, устанавливаемая в горловине скважины, является направляющей. Она устанавливается строго вертикально, ее высота составляет 5–10 м. Заколонное пространство цементируется.

Первая колонна предназначена для направления потока бурового раствора, используемого для разрушения и выноса выбуренной из скважины породы в желобную систему, она также оберегает скважину от размыва потоком раствора.

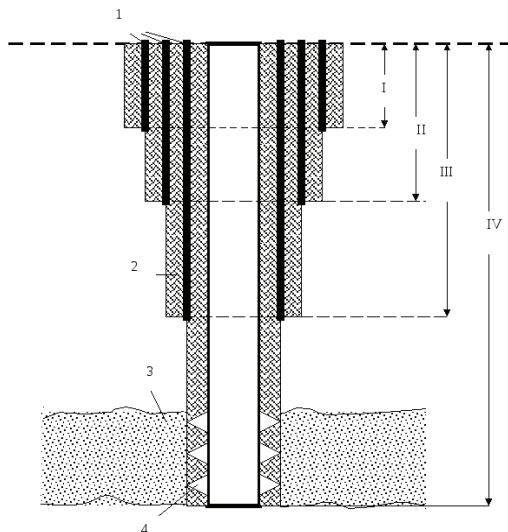


Рис. 5.6. Конструкция скважины [139]:

1 – обсадные трубы; 2 – цементный раствор; 3 – пласт; 4 – перфорация;
 I – направление; II – кондуктор; III – промежуточная колонна; IV – эксплуатационная колонна

Следующей колонной является кондуктор, опускаемый в скважину в зависимости от геологической обстановки на глубину 100–500 м. Он предназначен для предотвращения загрязнения питьевых водных горизонтов фильтратом бурового раствора и защиты скважины от возможных осложнений.

За кондуктором в скважину опускается эксплуатационная колонна. Такая конструкция скважины считается одноколонной.

При сложных условиях залегания пластов и высокой прочности горных пород в скважину могут опускаться, кроме эксплуатационной, две и более промежуточные (технические) колонны. Тогда конструкции считаются двух-, трехколонные и более.

Бурение скважин при строительстве подземных хранилищ в водоносных пластах осуществляется буровыми установками. Габариты и масса установок зависят, главным образом, от глубины бурения скважин, типа силового привода и географических условий района бурения.

Использование современных буровых установок для глубокого эксплуатационного бурения позволяет бурить скважины глубиной от

2 до 10 тыс. м и более.

В странах СНГ, и в частности в Украине, широко используются буровые установки типа БУ-2 500, ДТУ, Уралмаш 3 000 ЕУБ, Уралмаш 15 000, выпускаемые «Уралмашем».

Важным процессом в обеспечении надежности подземных хранилищ является качественная цементация затрубного пространства. Каждая скважина поддается испытаниям на герметичность. Применяются также методы акустического и радиоактивного контроля, способствующие обеспечению надежной эксплуатации подземного хранилища.

5.4. Технологическая схема эксплуатации подземного газохранилища в водоносном пласте

В состав подземного хранилища входят компрессорные цеха, блоки очистки газа, распределительные пункты и скважины (рис. 5.7).

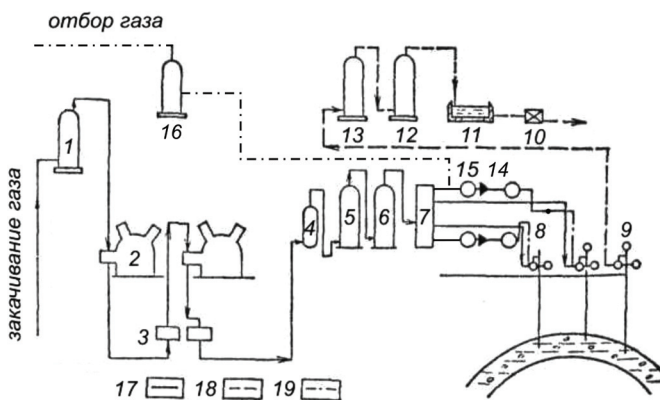


Рис. 5.7. Технологическая схема закачивания и отбора газа из подземного хранилища в водоносном пласте [55]:

- 1 – пылеуловитель; 2 – газомоторный компрессор; 3 – холодильник; 4 – циклонный сепаратор; 5 – угольный адсорбер; 6 – керамический фильтр; 7 – газораспределительный пункт; 8 – эксплуатационные скважины; 9 – разгрузочная скважина; 10 – насос;
- 11 – бассейн; 12 – трап низкого давления; 13 – трап высокого давления;
- 14 – редукционный штуцер; 15 – газосепаратор; 16 – установка осушки газа;
- 17 – закачивание газа; 18 – откачивание воды; 19 – отбор газа

Газ подается в хранилище по отводу из магистрального газопровода, проходит очистку в пылеуловителях 1 и направляется к компрессорному цеху 2 на компримирование до давления 12–15 МПа.

Поскольку при сжатии газа его температура резко возрастает, то он охлаждается в воздушных холодильниках 3, после чего поступает на очистку от компрессорного масла. Очистка проводится по нескольким ступеням: циклонный сепаратор 4, угольный адсорбер 5 и керамический фильтр 6. После охлаждения и очистки от масла газ по газосборному коллектору поступает на ГРП 7, где направляется по отдельным шлейфам в скважины ПХГ с измерением количества газа, закачиваемого в каждую скважину.

При отборе газ из эксплуатационных скважин поступает по индивидуальным шлейфам. Редуцируют (снижают) давление газа с помощью штуцеров редуцирования 14. Газ, выходящий из скважины, выносит с собой песок и влагу, отделяемые в сепараторе 15. После сепаратора газ поступает на установку осушки 16 и далее направляется в магистральный газопровод. При закачке газа выжимаемая вода направляется в трапы высокого 13 и низкого 12 давлений, после чего под давлением, создаваемым насосом 10, направляется для закачки через поглощающие скважины в более отдаленные пласты.

Закачка газа происходит при переменном давлении и расходе закачиваемого газа. Компрессорные станции (КС) на ПХГ с компрессорными закачкой и отбором должны иметь большой диапазон регулирования подачи – от 5 % в период первоначального заполнения до 100 % при проектной приемистости коллектора. Поэтому применяют комбинирование в составе компрессорных станций поршневых агрегатов и базовых турбоагрегатов, параллельно-последовательное включение агрегатов и рабочих колес. Диапазон рабочих давлений КС определяется пластовым давлением, давлениями в подводящем газопроводе, скважинах и шлейфах. В зависимости от степени подвижности пластовых вод режим пласта приближается к газовому (для истощенных месторождений) или к водонапорному. Высокое давление закачки увеличивает эффективность ПХГ. Следует учитывать, что давление в призабойной зоне в период хранения может значительно падать [131].

Технологическая схема подземного хранилища газа должна позволять производить сбор, замер количества, распределение и обработку газа при отборе и закачке его в хранилище. Перед закачкой в хранилище газ подвергается компримированию до необходимого давления. Применяемые технологические схемы ПХГ отличаются в основном только способами очистки газа при закачке в пласт. При

использовании поршневых компрессорных агрегатов, газ при сжатии нагревается и загрязняется парами компрессорного масла. При попадании масла на забой скважины уменьшается сечение поровых каналов и снижается фазовая проницаемость для закачиваемого газа, что приводит к увеличению давления закачки и уменьшению расхода газа. Поэтому газ перед закачкой необходимо очищать от примесей компрессорного масла. При применении многоступенчатых центробежных компрессоров очистка газа от масла не требуется. Для уменьшения дополнительных температурных напряжений в металлической фонтанной арматуре, обсадной колонне и другом оборудовании скважины нагретый газ охлаждается.

Раздел 6

ПОДЗЕМНЫЕ ХРАНИЛИЩА УГЛЕВОДОРОДОВ, ОБРАЗОВАННЫЕ В ОТЛОЖЕНИЯХ КАМЕННОЙ СОЛИ

Совершенствование конструкции и методов сооружения наземных стальных резервуаров повышает их технико-экономические показатели. Однако капиталовложения и расход металла на их сооружения остаются весьма значительными. В шаровых резервуарах этот расход на 1 м^3 емкости составляет от 72 до 250 кг, в горизонтальных цилиндрических – до 350 кг металла [56]. Кроме того, в таких резервуарах значительны потери хранимых продуктов от испарения и эксплуатационные расходы. Поэтому, важное значение имеет строительство высокоэффективных емкостей новых типов, и в первую очередь, подземных хранилищ в отложениях горных пород. Наибольшее распространение получило хранение углеводородов в подземных емкостях, сооружаемых в отложениях каменной соли.

Каменная соль легко растворяется в пресной воде. В 1 м^3 воды при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$ может растворяться до 358 кг соли. При условии получения концентрированного рассола для образования 1 м^3 емкости требуется около $6\text{--}7 \text{ м}^3$ воды.

Мировые запасы каменной соли в толщах осадочных пород оцениваются в $35 \cdot 10^{14}$ т. Они неравномерно распределены по континентам. Так, Африка, Южная Америка и Австралия сравнительно бедны солью, тогда как в Европе, Азии и Северной Америке запасы ее огромны [56].

6.1. Выбор площадок под строительство подземных хранилищ

Подземные емкости можно создавать в месторождениях каменной соли всех типов залегания: пластовых, пластолинзообразных, гнездообразных, купольных и штоковых.

Разведочные работы по исследованию геологического строения соляного массива, определения глубины залегания и мощности соляного пласта, качества каменной соли, необходимых для выбора метода размыва и интервалов заложения емкостей, осуществляются обычными геофизическими методами и разведочным бурением. При разведке изучают также покрывающие породы для определения конструкции скважины, выбора оптимальных параметров бурения и цементации, а также выявляют возможности сброса рассола в пористые структуры покрывающих и подстилающих пород.

При бурении разведочных скважин в толще каменной соли производят сплошной отбор керна. Для каменной соли необходимо иметь наиболее полные данные о ее химическом составе, условиях залегания (угол падения, напластование, трещиноватость и другие), об объемном весе, количестве нерастворимых включений, мощности и распространении пропластков пород, о глубинах их залегания.

Изучаются гидрогеологические условия месторождения. При разведке месторождения необходимо определить количество водоносных горизонтов, их литологический характер, глубины залегания, мощности, выдержанность и распространение; гидростатические уровни каждого водоносного горизонта, взаимосвязь вод различных горизонтов кровли; площади возможной инфильтрации подземных вод; источники, условия и области питания водоносных горизонтов; степень обводненности отдельных участков месторождения; химический состав вод водоносных горизонтов; агрессивность вод различных водоносных горизонтов; гидрогеологические условия контактной зоны, условия карстообразования; источники технического и питьевого водоснабжения. Особое внимание при этом следует уделить условиям карстообразования, агрессивности подземных вод, поискам необходимых структур для аккумуляции или сброса рассола.

Для решения вопроса о возможности и целесообразности строительства на данном месторождении каменной соли подземного хранилища помимо геологического строения участка собираются и

изучаются сведения о географическом положении участка (близость к обслуживаемому объекту, транспортные условия и другие), сведения о рельефе местности (возможность создания временных и постоянных рассолохранилищ) и климате, источниках водоснабжения с целью установления возможности забора пресной воды для размыва и возможности сброса рассола [56].

Целесообразно располагать хранилища в непосредственной близости от промыслов, добывающих рассолы (растворы хлористого натрия) размывом через скважины. При таком сочетании целесообразно кооперироваться с промыслом в период строительства и эксплуатации. При размыве емкостей возможно получение воды из системы водоснабжения промысла и сдача ему рассола. При получении на определенных этапах размыва емкостей неконцентрированного рассола его можно дополнительно насыщать в камерах рассолопромысла.

При эксплуатации подземного хранилища, расположенного вблизи рассолопромысла, можно получать от него рассол для выдавливания хранимых продуктов. Практика подтверждает исключительную эффективность такой кооперации.

Глубина заложения подземных хранилищ чаще всего определяется глубиной расположения соляных пластов, пригодных для выщелачивания емкостей.

6.2. Размещение подземных емкостей

Подземные емкости по площади залежи размещаются в зависимости:

- от условий залегания месторождения каменной соли, охарактеризованного геофизическими исследованиями и разведочным бурением по выбранной для строительства площади;
- от общего объема хранилища и объема отдельных емкостей, предназначенных для хранения различных продуктов;
- от принятых расстояний между соседними емкостями.

Расстояния между отдельными емкостями определяются в зависимости от: максимальных размеров одной емкости, возможного искривления скважин, минимальной величины междукамерного целика, возможных погрешностей при контроле формы емкости и ее искажения в процессе размыва.

При сооружении базы подземного хранения, состоящей из нескольких подземных емкостей, расстояние между скважинами

выбирается с учетом необходимости оставления безопасного целика между двумя хранилищами и может быть определено по формуле [11]

$$L = 0,07H_{\sigma} + R(m + n + k),$$

где H_{σ} – глубина бурения, м; R – радиус подземной емкости, м; m – междукамерный коэффициент; n – коэффициент погрешностей контроля за формообразованием; k – коэффициент асимметричности. Рекомендуемые значения коэффициентов приведены в табл. 6.1.

При размещении подземных емкостей по площади следует учитывать возможность их размыва в мощных соляных залежах на разной глубине. В этом случае емкости могут располагаться на разных ярусах. При таком расположении емкостей расстояние между устьями скважин может быть уменьшено, причем минимальное расстояние от стенки емкости до соседней скважины не должно быть меньше 30 м [56]. Величина целика между соседними емкостями может быть определена по вышеприведенной формуле.

Таблица 6.1. Значения коэффициентов k , n , m [11]

Показатели	Схема подземного выщелачивания		
	сверху вниз	снизу вверх	комбинированная
Для коэффициента k			
Тип месторождения:			
пластовое	2,2	2,7	2,4
пластово-линзовидное	2,2	2,7	2,4
куполо- и штокообразное	2,5	2,5	3,0
Для коэффициента n			
Тип емкости:			
шаровая форма	3	3	3
вертикально вытянутая форма	4	4	4
Для коэффициента m			
Для всех типов месторождений и форм емкостей	0,1	0,5	0,2

6.3. Физико-химические основы процесса размыва каменной соли

Среди подземных хранилищ всех типов, сооружаемых в непроницаемых горных породах, наибольшее распространение получили хранилища, образованные в каменной соли методом выщелачивания (размыва).

Сооружение подземных емкостей методом выщелачивания

состоит из бурения скважины с поверхности до соляного пласта (или купола) и опускания в нее двух–трех колонн труб (одна в другой). По одной колонне труб в забой скважины подается вода, которая, размывая пласт, насыщается солью. Насыщенный солью раствор (рассол) подается на поверхность по другой колонне труб. Таким образом, с помощью циркуляции воды осуществляется выщелачивание соли и образование подземной емкости [57].

Растворение каменной соли в воде – процесс гетерогенный, проходящий на границе раздела двух фаз (твердое тело – жидкость). Гетерогенная реакция растворения включает три стадии: поступление растворителя к поверхности твердого тела; реакция взаимодействия растворителя и твердого вещества (межфазовые процессы); отделение растворимого вещества от поверхности твердого тела (диффузионный процесс).

При растворении всегда наблюдается перемещение жидкой фазы относительно твердой поверхности растворимого вещества. Даже в случае отсутствия внешних причин, вызывающих движение жидкой фазы (например, перемешивания), происходит естественная конвекция жидкости, обусловленная тем, что плотность жидкой фазы неодинакова в разных точках внутри раствора. Независимо от характера движения жидкости у границы раздела фаз имеется диффузионный слой жидкости, препятствующий диффузии частиц растворимого вещества в массу раствора.

Впервые гипотеза о том, что вблизи поверхности растворяющегося тела образуется пограничный слой жидкости, была высказана Нернстом. Согласно современным представлениям, жидкость в диффузионно-пограничном слое находится в динамическом равновесии, вызванном действием механизмов конвективной и молекулярной диффузий [56].

Диффузионно-пограничный слой не имеет четко выраженной границы и представляет собой область наиболее резкого изменения плотности вещества. Эффективная толщина слоя зависит не только от свойств раствора и скорости его движения, но и от коэффициента диффузии.

Скорость диффузионного процесса растворения, прежде всего, определяется разностью концентраций на контакте между пограничным слоем насыщенного рассола, образующимся на поверхности растворения, и массой растворителя.

Общее уравнение кинетики растворения каменной соли выведено

Шукаревым (1896 г.) и Нойесом с Уитнеем (1897 г.) в виде

$$\frac{VdC}{d\tau} = kS(C_n - C),$$

где V – объем раствора; C – концентрация раствора к моменту времени τ ; C_n – концентрация насыщенного раствора; S – поверхность растворения; k – коэффициент скорости растворения.

Под скоростью растворения понимается количество соли, растворяемой в единицу времени с единицы поверхности (массовая скорость растворения), или расстояние, на которое распространяется растворение (линейная скорость растворения).

Для определения линейной скорости растворения W можно пользоваться зависимостью Нойеса и Уитнея

$$W = \frac{q}{\rho_c} = \frac{K_v(C_n - C_0)}{\rho_c},$$

где q – количество соли, переходящее в раствор с единицы поверхности в единицу времени; K_v – коэффициент скорости растворения; C_n – концентрация насыщения; C_0 – концентрация растворителя в удалении от поверхности; ρ_c – плотность каменной соли.

Из уравнения Нойеса и Уитнея следует, что чем меньше концентрация растворителя, тем больше скорость растворения. Однако значения скорости растворения недостаточно для описания этого явления.

Коэффициент скорости диффузионного растворения определяется формулой [56]

$$K_v = \frac{K_{diff}}{\delta},$$

где K_{diff} – коэффициент диффузии; δ – толщина слоя насыщенного раствора вблизи растворяющейся поверхности.

В результате изучения растворимости каменной соли П.А. Кулле пришел к выводу, что для точного описания процесса должны учитываться гидродинамические параметры движения жидкости, зависящие от таких важных факторов, как ее вязкость и сила тяжести [58].

В общем виде процесс растворения можно представить так.

Образец соли при погружении в растворитель почти мгновенно покрывается пограничным слоем насыщенного раствора. В толще этого слоя происходит диффузионный процесс, а сам слой под действием силы тяжести приобретает самостоятельное движение по поверхности образца. Таким образом, процессы растворения поверхности соли и насыщения растворителя сопровождаются следующими явлениями: переносом вещества вследствие диффузии и переносом вещества при движении вязкой жидкости под действием гравитационных сил. Скорость растворения поверхности соли в значительной степени зависит от угла наклона растворяемой поверхности.

При исследовании растворимости образцов П.А. Кулле было замечено, что скорость растворения поверхности, расположенной под углом $\varphi = 180^\circ$ к горизонту, значительно превышает скорость растворения поверхности, расположенной под углом $\varphi = 90^\circ$. Так, при $\varphi = 0^\circ$, $q = 3,5$ кг/м²ч; при $\varphi = 90^\circ$ $q = 10,0$ кг/м²ч; при $\varphi = 180^\circ$ $q = 24,0$ кг/м²ч [59].

Таким образом, наибольшую скорость растворения имеет кровля камеры. Скорость растворения вертикальной поверхности (стенки камеры) примерно в 2,5 раза меньше горизонтальной. Подошва камеры растворяется с минимальной скоростью, которая практически стремится к нулю. В процессе растворения на эту поверхность выпадают нерастворимые примеси, затрудняющие проникновение растворителя к соли.

П.А. Кулле были получены эмпирические зависимости для определения скорости растворения W соли при расположении поверхностей растворения под различными углами к горизонту.

При растворении поверхностей, расположенных к горизонту под углами от 0 до 90° , W определяется из уравнения

$$W = \left(1 - \frac{C_0 \rho_{нр}}{C_n \rho_0}\right) \left(1 + \frac{l}{22,4}\right) (3,25 \rho^{0,5} + 1,8).$$

Если поверхности расположены к горизонту под углами от 90 до 180° , следует пользоваться формулой

$$W = \left(1 - \frac{C_0 \rho_{нр}}{C_n \rho_0}\right) \left(1 + \frac{l}{22,4}\right) (8,75 \sin \beta + 5,87),$$

где $\rho_{нр}$ – плотность насыщенного рассола; ρ_0 – плотность растворителя; β – угол наклона поверхности; 3,25; 1,8; 8,75; 5,87 – размерные коэффициенты.

Скорость растворения в значительной степени зависит также от температуры: с повышением температуры она возрастает.

6.4. Бурение и герметизация скважин

Строительство подземных хранилищ в каменных солях методом размыва начинается с бурения скважин. Этот комплекс работ предусматривает непосредственно процесс бурения, цементацию обсадных колонн и испытание скважины на герметичность.

В зависимости от выбранного метода строительства, обусловленного мощностью рабочей толщи каменной соли, бурение скважин осуществляется вертикально или наклонно. Расположение скважин для размыва определяется на основании тщательного сравнения технико-экономических показателей, учитывающих геологические условия месторождения каменной соли, рельеф местности, наличие источников водоснабжения, условия сброса и утилизации рассола, возможность устройства рассолохранилища и расстояния от поставщиков к потребителю хранимых продуктов.

При сооружении хранилищ методом подземного выщелачивания, как правило, применяются вертикальные скважины трехколонной конструкции. Их бурят обычными методами, для обсадки используют трубы диаметром 194–377 мм.

Проходка скважин осуществляется любым из известных способов механического бурения. Для вертикальных скважин глубиной свыше 500 м применяется турбинное и роторное бурение с помощью установок БУ-50, БР, БУ-75 и др. Для бурения скважин глубиной до 500 м с начальным диаметром 325–377 мм пригодны передвижные установки типа УРБ-ЗАМ, УБВ-300 и др.

Исключительно важное значение при бурении скважин выщелачивания имеет их вертикальность. Искривление ствола вертикальной скважины не должно превышать 6° в пределах конуса средних отклонений, образующая которого составляет угол 1° с вертикалью, проходящей через устье скважины.

Для проходки наклонно-горизонтальных скважин применяются станки колонкового бурения. Ствол скважины подразделяется на три участка: наклонно-прямолинейный, переходной (обеспечивающий

плавный подход к соляному пласту по дуге определенного радиуса) и прямолинейный (по соляному пласту).

Особые требования предъявляются к герметичности скважин. Герметичность скважины и закрепленной части ствола зависит от герметичности обсадной колонны труб. Она обусловлена отсутствием дефектов в теле труб и резьбовых соединениях и проверяется после тампонажа затрубного пространства до разбуривания цементной пробки. Герметичность обсадной колонны достигается нанесением на резьбовое соединение специальных герметизирующих смазок, применением сварной колонны, заваркой муфтовых соединений качественными электродами. При свинчивании труб с муфтовыми соединениями используют графитные или специальные смазки, обеспечивающие герметизацию резьбовых соединений.

Высококачественная цементация обсадной колонны является главным условием герметичности скважин и успешной их эксплуатации. Особенно жесткие требования предъявляются к герметизации затрубного пространства скважин в случае подземного хранения сжиженных углеводородных газов, утечка которых в пористые и проницаемые породы должна быть исключена в течение всего времени существования хранилища.

Цементация затрубного пространства обсадной колонны осуществляется цементным раствором, приготовленным на насыщенном рассоле. Однако при затворении портландцемента или специальных смолистых цементов на рассоле их прочность снижается, поэтому необходимо принимать специальные меры по повышению сцепления на контакте цемента с обсадной колонной [60]. Для предотвращения снижения прочности при затворении цемента рекомендуется добавлять в него инфузорную землю в определенной пропорции. В последнее время для тампонажа скважин подземных хранилищ применяют специальные цементно-соляные смеси и высококачественные расширяющиеся цементы [47]. Для надежного тампонажа цементный раствор готовится на насыщенном растворе хлористого натрия плотностью 317 кг/м^3 .

Сроки схватывания цементных растворов на насыщенном растворе хлористого натрия весьма значительны. Поэтому для получения высококачественного цементного камня в затрубном пространстве и сокращения сроков схватывания необходимо использовать цементные растворы с минимально допустимым водоцементным отношением; вводить в тампонажный материал

добавки гипсглиноземистого расширяющего цемента, массовое содержание которого должно составлять 25 %. Допустимые колебания плотности раствора в процессе цементации $\pm 0,5 \text{ г/см}^3$. Для обеспечения равномерной толщины цементного кольца по всей высоте колонны через каждые две–три трубы устанавливают центрирующие пружинные фонари.

Качество тампонажа затрубного пространства зависит также от правильного определения основных технологических параметров цементирования. Для получения расчетных значений предложена следующая методика [61].

Вначале определяется объем цементного раствора V_c , закачиваемого в скважину при цементировании основной обсадной колонны. Он состоит из объема цементного раствора, необходимого для заполнения затрубного пространства в интервале, закрепленном ранее спущенной промежуточной колонной V_1 ; объема цементного раствора, требующегося для заполнения кольцевого пространства в необсаженном интервале скважины V_2 и объема цементного раствора V_k , оставленного в основной скважине

$$V_c = V_1 + V_2 + V_k; \quad V_1 = 0,785(d_1^2 - D_2^2)H_1;$$

$$V_2 = 0,785 \left[(k_1 D^2) - D_2^2 \right] H_2; \quad V_k = 0,785 d_2^2 h_g,$$

где d_1 – внутренний диаметр промежуточной колонны, м; D_2 – наружный диаметр основной колонны, м; H_1 – длина интервала, обсаженного промежуточной колонной, м; k_1 – коэффициент, учитывающий сложность горно-геологических условий; D – диаметр скважины в необсаженной части, м; d_2 – внутренний диаметр основной колонны, м; H_2 – длина интервала необсаженной промежуточной колонны; h_g – высота цементного стакана в основной колонне, м.

С учетом допустимых потерь раствора $V_{дон}$ при его приготовлении и закачке, обычно равных 5...10 % от объема раствора, закачанного в скважину, общий объем раствора $V_{ц.р}$ составит

$$V_{ц.р} = V_c + V_{дон}.$$

Необходимое количество сухого цемента $q_{ц}$ для приготовления 1 м³ цементного раствора, можно определить из выражения

$$q_{ц} = \frac{\rho_{ц}\rho_{в}}{\rho_{в} + m\rho_{ц}},$$

где $\rho_{ц}$ и $\rho_{в}$ – плотности воды и цемента, соответственно (обычно $\rho_{ц} = 3\,150$ кг/м³); $m = 0,4\dots 0,5$ – водоцементный фактор, представляющий собой отношение массы пресной воды к массе цемента.

Общее количество необходимого сухого цемента $G_{ц}$ (в кг) для приготовления цементного раствора определяется по формуле

$$G_{ц} = k_{ц}q_{ц}V_{ц.р},$$

где $k_{ц}$ – коэффициент, учитывающий потери цемента при погрузочно-разгрузочных работах ($k_{ц} = 1,03\dots 1,05$).

Общий объем воды $V_{о.в}$ для приготовления цементного раствора вычисляется по формуле

$$V_{о.в} = k_{в}V_{в}V_{ц.р},$$

где $V_{в}$ – необходимый объем воды (в м³) на 1 м³ раствора; $k_{в}$ – коэффициент, учитывающий потери воды ($k_{в} = 1,03\dots 1,05$).

На основании определения рабочего давления в конце продавливания и суммарной производительности цементировочных насосов производят выбор цементировочных агрегатов и устанавливают их количество.

Общее время процесса цементирования $T_{ц.ем}$ представляет собой сумму затрат времени на выполнение отдельных операций

$$T_{ц.ем} = t_3 + t_{np} + t_{\partial},$$

где t_3 – время закачки цементного раствора, мин.

$$t_3 = \frac{V_{ц.р}}{\sum Q_a},$$

где $\sum Q_a$ – суммарная максимальная производительность насосов цементировочных агрегатов, применяемых для закачки цементного раствора, м³/мин.; t_{np} – время продавливания цементного раствора, мин.

$$t_{np} = \frac{V_{np}}{\sum Q_a},$$

где V_{np} – объем продавочной жидкости; t_d – время на освобождение цементировочной пробки от удерживающих стопоров, на промывку обвязочных линий и т. п. ($t_d \approx 10-15$ мин.).

Производительность цементирования обсадной колонны труб должна быть на 30...40 % ниже времени схватывания цементного раствора.

Качество монтажа обсадной колонны и цементации затрубного пространства проверяют гидравлическими испытаниями, а при необходимости – опрессовкой воздухом или газом. При этом сначала испытывают обсадную колонну труб для разбуривания цементной пробки, а затем цементное кольцо в затрубном пространстве. Если полученные результаты положительные, продолжают бурение скважины до проектной отметки, после чего повторяют испытание, проверяя герметичность необсаженной части ствола. Такая последовательность работ позволяет выявить тот элемент скважины, который является причиной негерметичности [62].

Проверку обсадной колонны и затрубного пространства осуществляют насыщенным рассолом, а необсаженные интервалы – продуктом, подлежащим хранению. Величину испытательного давления $P_{и.к}$ на головке технологических скважин при опробовании колонны рекомендуется определять по формуле [47]

$$P_{и.к} = k \left[H_d (\rho_p - \rho_n) g + P_{общ.нр} \right],$$

где k – коэффициент превышения испытательного давления над максимальным эксплуатационным (принимается равным 1,25); H_d – длина обсадной колонны, м; ρ_p – плотность насыщенного рассола, кг/м³; ρ_n – плотность испытательной жидкости (хранимый продукт), кг/м³; $P_{общ.нр}$ – суммарные гидравлические сопротивления в

скважине при закачке нефтепродукта, н/м²; g – ускорение силы тяжести, м/с².

Минимальное и максимальное значения испытательного давления, независимо от результатов расчета, ограничиваются определенными пределами: максимум не должен превышать прочности материала обсадных труб, а минимум для колонн диаметром 50, 60, 70, 80, 100 мм составляет 426–377, 325–277, 219, 168, 146–114 кг/см², соответственно.

Колонна считается герметичной, если в течение 30 минут падение давления не превышает 2 % от испытательного. После того, как скважина пробурена до проектной отметки, ее вновь проверяют на герметичность. При сдаче емкости в эксплуатацию герметичность скважины контролируется закачкой нерастворителя под башмак обсадной колонны. Если разница в количестве закачанного и отобранного через двое-трое суток продукта не превышает 0,8 %, то скважина герметична. В процессе эксплуатации герметичность скважин подземных хранилищ необходимо проверять не реже одного раза в течение трех лет.

В работе [63] предложен более надежный метод испытания на герметичность системы скважина – камера. Он заключается в проведении опрессовки системы скважина – камера ненасыщенным рассолом с последующим сопоставлением фактической скорости падения давления в процессе испытания с расчетной величиной при разных давлениях. Разработанная методика позволяет определить величину утечки ненасыщенного рассола по формуле

$$q = \beta V \varphi \sqrt{P_i - x},$$

где β – термический коэффициент сжимаемости рассола; V – объем системы скважина – камера, м³; P_i – давление на оголовке скважины, которое не должно превышать давления гидроразрыва, кгс/см²; x – параметр испытания; φ – критерий герметичности. Если система герметична, то $\varphi = 0$.

Условно герметичной, по предложенной методике, считается такая система, для которой выполняется условие

$$q \leq \beta V W_i \delta_M,$$

где W_i – средняя скорость депрессии, кгс/см²·ч; δ_M – относительная

ошибка измерений скорости депрессии.

Этот способ позволяет сократить сроки ввода в эксплуатацию подземных газонефтехранилищ, повысить их надежность. После испытаний скважину оборудуют двумя висячими колоннами труб (рис. 6.1). Такая конструкция обеспечивает все технологические операции по направленному размыву подземных емкостей.

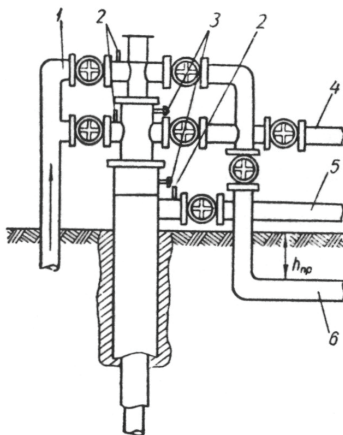


Рис. 6.1. Схема оборудования скважины для размыва подземной емкости [11]:

1 – трубопровод для подачи воды; 2 – штуцеры для установки манометров; 3 – краники для отбора проб; 4 – трубопровод к мерному ящику; 5 – трубопровод для подачи нерастворителя; 6 – трубопровод для сброса рассола; $h_{пр}$ – глубина промерзания грунта

6.5. Методы сооружения подземных емкостей размывом каменной соли через буровые скважины

Возможность разработки пластов каменной соли на больших глубинах, незначительный объем подготовительных работ и высокая экономичность способствовали развитию методов сооружения подземных хранилищ в каменных солях размывом через буровые скважины.

Размыв каменной соли происходит по двум принципиально различным схемам: 1) закачкой пресной воды по одной колонне труб и выдавливанием рассола на поверхность по другой (циркуляционный метод); 2) струями воды, разбрызгиваемыми в емкости специальным оросителем, при атмосферном или повышенном давлении (струйный метод или метод орошения).

Размыв подземной емкости осуществляется, как правило, с подачей нерастворителя, с помощью которого контролируется и управляется процесс растворения и форма емкости. Обычно в качестве нерастворителя используют нефтепродукты или газообразные продукты (воздух, природный газ).

В зависимости от технических возможностей, конкретных горно-геологических условий, планируемого срока строительства, формы и объема емкости, допустимых размеров емкости по условиям прочности могут быть применены различные технологические схемы подземного выщелачивания через буровые скважины.

Прямоточный и противоточный методы. При прямоточном методе залежь каменной соли вскрывается буровой скважиной, обсаживаемой колонной труб. От поверхности земли до башмака, расположенного в верхней части залежи, производится цементация затрубного пространства. После тампонажа обсадной колонны скважина углубляется до подошвы разрабатываемого соляного пласта. Затем в скважину опускается одна рабочая колонна труб, нижний конец которой устанавливается у забоя скважины на расстоянии 1,0–2,0 м от подошвы пласта. На поверхности скважина оборудуется оголовком, который монтируется таким образом, чтобы вода поступала во внутреннюю колонну труб. Рассол выдавливается на дневную поверхность по межтрубному пространству.

В начальный период эксплуатации пресная вода насыщается за счет растворения стенок скважины на участке вскрытой соляной залежи. Так как скорость растворения соляных стенок сравнительно высока (до 15 см/сут.), этот период работы непродолжителен. В связи с подачей свежей воды непосредственно к забою скважины наиболее интенсивно развивается нижняя зона скважины с постепенным уменьшением ее диаметра по высоте. В результате выщелачивания образуется камера (полость) грушевидной формы (рис. 6.2, а).

При размыве каменной соли противоточным методом воду подают по обсадной трубе, а рассол отбирают по рабочей колонне. Такой способ выщелачивания формирует конусообразную камеру с вершиной, обращенной вниз, и сильно развитой потолочиной. Новые порции воды, подаваемой по обсадной трубе, способствуют интенсивному растворению кровли размываемой емкости, и образующийся рассол опускается к подошве пласта. В связи с тем, что нижняя зона размывается ненасыщенным рассолом, растворение здесь происходит менее интенсивно и размыв ослабляется. Здесь

размыв практически не происходит. Поступление новых порций воды в камеру позволяет выдавливать рассол по центральной трубе на поверхность.

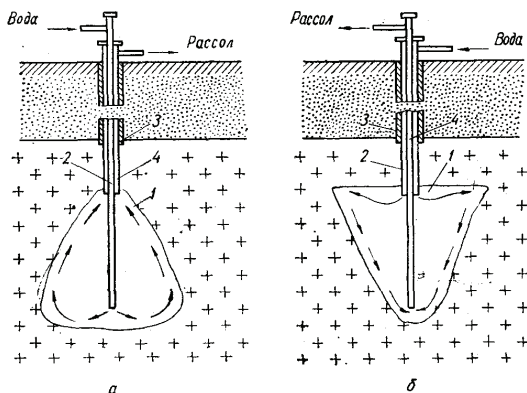


Рис. 6.2. Подземное выщелачивание каменной соли прямоточным (а) и противоточным (б) методами [18]:

- 1 – камера выщелачивания; 2 – водопадающая колонна; 3 – тампонажный цемент; 4 – рассолоподъемная колонна

Боковая поверхность конуса по мере растворения становится более полой, покрывается различными примесями, находящимися в каменной соли. Растворение у кровли емкости происходит примерно с постоянной скоростью, равной линейной скорости растворения каменной соли в пресной воде (10–12 см в сутки). При этом высота растворяющейся верхней части весьма незначительная. Диаметр основания конуса за год может достигнуть 75–90 м (рис. 6.2, б).

При размыве противоточным методом породы кровли соляного пласта обнажаются на большой площади, что может вызвать обрушение пород под действием горного давления и, как следствие, обрыв труб. Кроме того, противоточная эксплуатация характеризуется довольно низкой производительностью выщелачивания (10–15 м³/ч рассола).

Несмотря на ряд недостатков прямоточного и противоточного методов выщелачивания они отличаются предельной простотой схемы наземных обустройств и небольшим расходом металла.

Комбинированный метод. Этот метод получил наиболее широкое применение в практике строительства подземных хранилищ (рис. 6.3).

Он предусматривает осуществление размыва в два этапа. На первом этапе формируется емкость в восходящем направлении. Вначале размывается гидровруб (I ступень размыва), а затем еще несколько ступеней до получения емкости определенных размеров. На втором этапе верхнюю и нижнюю части емкости формируют навстречу друг другу: верхнюю – в нисходящем направлении, нижнюю – в восходящем.

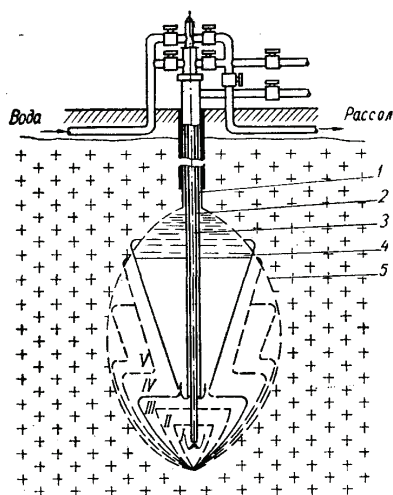


Рис. 6.3. Схема создания подземной емкости комбинированным методом размыва [56]:

1 – обсадная колонна труб; 2 – водоподающая рабочая колонна; 3 – рассолоподъемная рабочая колонна; 4 – нерастворитель; 5 – контур проектной емкости; I–V – ступени размыва

При переходе со II ступени на III, т. е. с размыва по схеме снизу вверх на размыв сверху вниз, уровень нерастворителя поднимается до кровли будущей емкости и изменяется уровень (отметка) подачи воды в емкость. Дальнейшее выщелачивание при постоянном положении водоподающей колонны с периодическим подкачиванием нерастворителя происходит по регламенту, обеспечивающему формирование верхней части камеры на противоточном режиме.

Принятый в комбинированном методе порядок размыва позволяет сочетать надежное управление формообразованием емкости с высокой интенсивностью размыва при благоприятных

условиях приема нерастворимых включений, что существенно при создании камер сфероидальной формы в различных горно-геологических условиях.

Подземное выщелачивание каменной соли с гидроврубом. В результате обобщения производственного опыта подземного выщелачивания каменной соли через скважины и проведенных исследований был разработан новый способ, получивший наименование метода с применением гидровруба. Гидровруб – это специальная горная выработка, создаваемая искусственным путем в нижней части соляного пласта. Она имеет форму горизонтального кольцевого вруба, образующегося вокруг скважины при растворении каменной соли водой.

Сущность метода заключается в следующем. Первоначально искусственно создаются условия для поддержания растворяющей воды на постоянном уровне с целью максимального развития камеры в горизонтальном направлении. Это позволяет в дальнейшем обеспечить наибольшую поверхность горизонтальной кровли. В камеру одновременно с водой вводится нерастворитель, в данном случае сжатый воздух, прикрывающий кровлю камеры на этапе создания вруба, т. е. в период размыва камеры в горизонтальном направлении. Количество подаваемого сжатого воздуха устанавливается из расчета его избытка по сравнению с количеством, растворимым в данном объеме рассола. Образуется изолирующий слой воздуха, регулируемый и поддерживаемый на всем протяжении формирования гидровруба. Высота вруба 1,0–1,5 м, диаметр зависит от предполагаемого объема камеры.

Сооружение камеры гидровруба – начальный этап подземного выщелачивания, предшествующий процессу размыва емкости снизу вверх.

Управление размывом способствует постепенному образованию цилиндрической камеры диаметром, соответствующим диаметру начальной камеры гидровруба.

Теоретическое обоснование и практическое осуществление метод выщелачивания с гидроврубом получил в работах П.А. Кулле [58]. Разработана система создания гидровруба с применением в качестве нерастворителей различных видов нефтепродуктов – нефти, жидких углеводородных газов и др. (рис. 6.4). При этом скважина, вскрывающая соляную залежь, обсаживается обсадной колонной диаметром 325 мм и затрубное пространство цементируется. После

проверки скважины на герметичность в нее опускаются две свободно висящие эксплуатационные (рабочие) колонны труб (труба в трубе) диаметрами 219 и 114 мм. Оголовок скважины оборудуется фланцами для обеспечения герметического разобщения обсадной и висячих рабочих колонн труб, открытых в нижней части. Таким образом, создаются три пути движения: внешний – между обсадной колонной (а ниже зоны обсадки – стенками скважины) и внешними стенками рабочей колонны труб большого диаметра, который служит для подачи жидкого нерастворителя; промежуточный кольцевой – между внутренними стенками рабочей колонны большого диаметра и внешними стенками рабочей колонны меньшего диаметра, используемой для подачи воды; центральный – внутреннее пространство рабочей колонны труб меньшего диаметра, необходимое для подъема рассола.

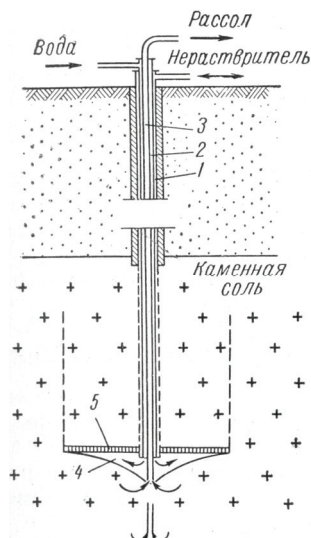


Рис. 6.4. Схема подземного выщелачивания с применением гидровруба [56]:

- 1 – обсадная колонна; 2 – водоподающая рабочая колонна; 3 – рассолоподъемная колонна;
4 – камера гидровруба; 5 – слой нерастворителя

Рассолоподъемная колонна опускается с таким расчетом, чтобы перед началом размыва каменной соли ее башмак находился на 0,3–0,5 м выше подошвы обрабатываемой залежи. Башмак водоподающей колонны (рабочей колонны большого диаметра) устанавливается на

1,5–2,0 м (высота гидровруба) выше башмака рассолоподъемной. Подача воды и нерастворителя в камеру, а также отбор рассола производится непрерывно. Нерастворитель (например, нефть) скапливается в верхней части камеры и предохраняет кровлю от растворения водой. Камера развивается только в горизонтальном направлении.

По окончании сооружения гидровруба большая часть нерастворителя (60–70 %) возвращается на поверхность; вода получает доступ к кровле камеры и начинается процесс интенсивного размыва соляной залежи снизу вверх.

Основным недостатком метода гидровруба является необходимость поддержания строгой горизонтальности потолочины камеры. При этом, во-первых, ограничивается площадь размыва, а следовательно, и производительность; во-вторых, возникает опасность обрушения потолочины. В настоящее время метод гидровруба включается как элемент в другие технологические процессы управляемого выщелачивания.

Ступенчатое выщелачивание каменной соли. Широкое распространение в практике строительства подземных хранилищ в солях получил метод ступенчатого выщелачивания, который может быть успешно применен и на месторождениях с содержанием нерастворимых примесей до 30 % (рис. 6.5). При данном способе выщелачивания развитие камеры вверх по вертикали регулируется применением нерастворителя, предохраняющего кровлю камеры от растворения пресной водой.

При ступенчатом выщелачивании снизу вверх скважина оборудуется аналогично скважине для создания гидровруба. После образования первоначального вруба отработка соляной залежи происходит ступенями снизу вверх [47]. Это достигается тем, что уровень нерастворителя (нефти) поднимается на определенную высоту (ступень) в результате отбора необходимого объема нерастворителя из скважины, а низ камеры консервируется насыщенным рассолом. Переход на каждую новую ступень вызывает необходимость подъема колонны труб диаметром 219 мм таким образом, чтобы «свежая» вода поступала под новый уровень нефти и размывала боковые стенки в выбранном диапазоне между нефтью (сверху) и рассолом (снизу). Ступени постепенно расширяются от 1,0 до 5,0 м с увеличением высоты активной зоны – до 12,0–15,0 м. Производительность ступенчатого выщелачивания составляет 75–

100 м³/ч рассола, что соответствует размыву 12,0–16,0 м³/ч объема подземной камеры.

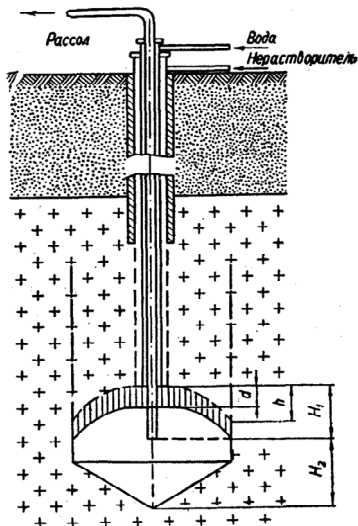


Рис. 6.5. Схема создания подземной емкости ступенчатым противотоком снизу вверх [56]:

H_1 – высота активной зоны; H_2 – высота зоны консервации; h – конечная высота зоны формирования; d – высота ступени выщелачивания

В течение всего процесса выщелачивания потолок камеры сохраняет форму свода, что благоприятно сказывается на скорости размыва емкости. Кроме того, такая форма камеры обеспечивает большую устойчивость и прочность кровли.

Независимое перемещение водоподающей и рассолоподъемной колонн дает возможность подвергать размыву большую или меньшую поверхность стенок камеры и тем самым регулировать форму создаваемой камеры.

Размыв емкостей с использованием газообразного нерастворителя. Для управления процессом размыва и формообразованием емкости применяются жидкие и газообразные нерастворители.

Наиболее простым и дешевым нерастворителем является воздух. Регламент и методы расчета размыва с применением воздушного нерастворителя разработаны Б.Н. Федоровым и изложены в работе [64].

Использование воздушного нерастворителя возможно при любой схеме выщелачивания. Обычно в камеру размыва воздух подается вместе с водой, где он выделяется и собирается в верхней части камеры, создавая воздушную подушку, которая предохраняет потолочину от произвольного размыва. Существуют несколько схем подачи воздуха в водяную линию. Наиболее эффективно применение двух последовательно соединенных центробежных насосов (низкого и среднего давления) с вводом воздуха после первого насоса низкого давления (рис. 6.6), а также подача воздуха через специальные отверстия в корпусе многоступенчатого насоса и смешивания с водой после первого (или второго) рабочего колеса. В этих схемах насосы выполняют роль дожимных компрессоров.

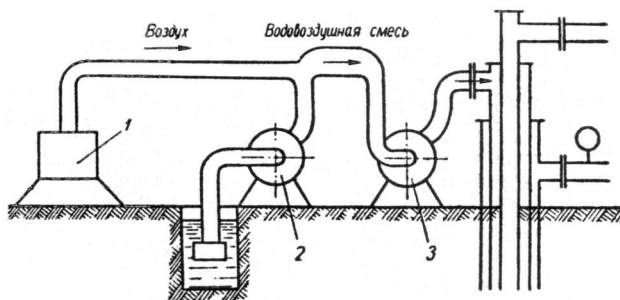


Рис. 6.6. Схема подачи воздуха в подземную емкость [11]:
1 – компрессор; 2 – насос низкого давления; 3 – насос среднего давления

К преимуществам газообразных нерастворителей относятся: простота регулирования и управления потоками, расходом и давлениями; возможность хранения продукта без наземного хранилища и предварительной «отмывки» емкости; автоматизация процесса размыва; относительно низкая стоимость нерастворителя и процесса размыва. Недостатками являются: опасность разрушения потолочины; перемешивание с хранимым продуктом; выпуск газа в атмосферу при снижении давления в хранилище во время подъема труб.

Размыв подземной емкости с помощью двух скважин. Подземные хранилища большой емкости сооружаются способом прямой промывки при двух рядом расположенных скважинах. Причем создание емкостей осуществляется как независимым выщелачиванием, так и совместным, когда одна скважина

используется в качестве водоподающей, а другая – рассолоподъемной.

Технология размыва предполагает применение метода ступенчатого выщелачивания в измененном варианте по отношению к прямой промывке с периодической сменой направления движения воды. Выщелачивание прямой промывкой можно производить без подъема водоподающей колонны, т. е. подавая воду во время размыва в нижнюю часть камеры.

Использование двухтрубной конструкции при прямой промывке способствует уменьшению энергетических потерь во время движения воды и рассола по колоннам труб. Это позволяет повысить производительность выщелачивания, получая при этом подземные емкости большого объема [47].

Струйный метод размыва подземных емкостей. Опыт строительства подземных емкостей циркуляционным методом показал, что процесс выщелачивания протекает сравнительно медленно. Разработан и опробован струйный метод размыва подземных емкостей, с помощью которого соль размывается более интенсивно, и образуются камеры строгой формы (рис. 6.7).

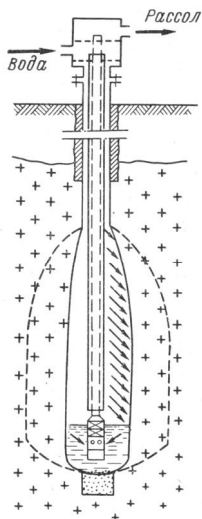


Рис. 6.7. Схема размыва водоструйным методом через отверстия с насадками на водоподающей трубе [56]

Емкости, созданные струйным методом в прочной каменной соли, даже на больших глубинах, находятся в устойчивом состоянии вплоть до заполнения продуктом. Их можно эксплуатировать с применением погружных насосов или выдавливать продукт сжатым воздухом. При использовании в качестве газонефтехранилищ такие емкости опорожняются полностью (до атмосферного давления) или частично, и в них остается внутреннее давление, уравнивающее в определенной степени давление горных пород.

Выщелачивание осуществляется орошением стенок камеры струями воды. Вначале бурится скважина, затем в нее до забоя опускается колонна рассолоподъемных труб (с погружным насосом), проходящая в колонне водоподающих труб. Водоподающие трубы имеют насадки различной длины с отверстиями, рассчитанными на выдачу струи воды определенной длины, и обеспечивающие размыв емкости по высоте отрабатываемой толщи соляного пласта.

Лучшие результаты достигаются при вращении водоподающей трубы и системы насадок. Задавая длину различным струям или, регулируя режим перемещения насадок, можно размывать емкости строго заданной формы, в частности емкости диаметром (15–20 м) на глубинах до 300–500 м. Все процессы, связанные со струйным методом размыва подземных емкостей, могут быть автоматизированы.

В табл. 6.2 приведены данные по циркуляционному и струйному методам размыва.

Таблица 6.2. Показатели методов размыва подземных емкостей [65]

Показатели	Методы размыва	
	Циркуляционный	Струйный
Высота зоны растворения, м	10,0	10,0
Объем камеры, м ³	221,0	221,0
Время размыва, ч	530	122
Средняя минерализация рассола, кг/м ³	64,0	277,0
Расход воды на 1,0 м ³ емкости, м ³	28,4	6,54
Способ управления формообразованием	Применение нерастворителя	Подбор параметров струй воды

Преимущества струйного метода заключаются в возможности создания подземных емкостей заданной формы с устойчивой сфероидальной кровлей. Производительность метода в три–четыре

раза выше циркуляционного.

Сооружение емкостей галерейного типа. Многие месторождения каменной соли имеют пласты мощностью 5,0–20,0 м. О.М. Иванцов и Ю.С. Васюта впервые разработали метод сооружения подземных емкостей в пластах каменной соли ограниченной мощности. Сущность метода заключается в бурении наклонно-горизонтальных скважин и образовании протяженных выработок-емкостей галерейного типа, расположенных вдоль простирания пласта. Несмотря на то, что стоимость бурения наклонных и горизонтальных скважин выше, чем вертикальных, возможность создания крупных хранилищ делает этот способ экономичным [14].

Схемы размыва емкости галерейного типа показана на рис. 6.8.

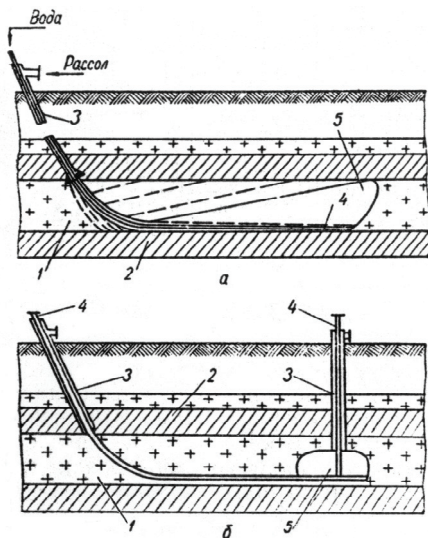


Рис. 6.8. Схемы размыва емкости галерейного типа через одну (а) и две (б) скважины [11]:

- 1 – пласт соли; 2 – вмещающие породы; 3 – обсадные трубы для отбора рассола;
- 4 – водоподводящая колонна труб; 5 – камера, образованная размывом (первая захватка)

При строительстве емкости бурят наклонную скважину с выходом на горизонтальную плоскость. Горизонтальное бурение скважины осуществляется для размыва больших емкостей при максимальном протяжении. Для обеспечения прочности и устойчивости подземной емкости в кровле и почве оставляют

защитные целики соли толщиной 2,0–3,0 м. Чтобы обеспечить сохранность целика соли ниже камеры, горизонтальную часть скважины бурят выше подошвы пласта. Верхний защитный целик можно создать при размыве, задав программу выщелачивания.

Для размыва подземных емкостей галерейного типа используются двухколонные системы без применения нерастворителя. В пробуренную скважину до забоя спускают рабочую колонну труб. Размыв осуществляется по трем схемам.

Первая схема предусматривает размыв захватками. После насыщения воды солью рассол опускается вниз, а новые порции «свежей» воды поднимаются вверх. Образующийся рассол донасыщается при движении по соли вдоль скважины. Поэтому первоначально камера вытянута вдоль горизонтальной части скважины, а затем, постепенно развиваясь вверх, приобретает конечную форму (рис. 6.8, а). После размыва первой захватки эксплуатационная труба поднимается из скважины на заданную высоту. При этом горизонтальный участок укорачивается и начинается размыв следующей захватки. Эта схема размыва применяется в основном при наличии в пласте соли 5–10 % нерастворимых включений.

По второй схеме производят размыв одновременно на всю длину галерейной емкости на прямоточном и противоточном режимах. При этом площади поперечных сечений емкостей уменьшаются в направлении движения растворителя. Поэтому для получения камер одинакового сечения необходимо периодически изменять режимы размыва. Такой способ применяется в пластах чистой каменной соли.

Третья схема предусматривает сооружение подземных емкостей путем размыва с использованием наклонно-горизонтальной и вертикальной скважин (рис. 6.8, б). Этот способ следует использовать при создании хранилищ крупного объема.

В практике строительства подземных хранилищ первые две схемы являются ведущими. Однако выбор наиболее рационального пути основывается на технико-экономическом сравнении вариантов, учете технической возможности применения методов и схем в конкретных геологических и горнотехнических условиях залегания каменной соли, формы и объемов емкости, условий прочности, планируемого срока строительства, способа доставки нерастворителя, наличия источников водоснабжения, а также возможностей сброса и утилизации рассола.

6.6. Основы проектирования размыва подземных емкостей

Практика сооружения емкостей заданной формы и размеров в соляных отложениях потребовала разработки методики определения основных технологических параметров размыва. Предпосылки к созданию основ проектирования размыва были заложены в трудах [58, 65] и нашли свое творческое развитие и промышленное применение в работах П.М. Гофман-Захарова [47], О.М. Иванцова [56], В.А. Мазурова [62, 66, 67] и др.

Анализируя публикации, посвященные процессам растворения минеральных солей и основываясь на результатах теоретических и экспериментальных исследований, В.А. Мазуровым разработаны технология и методы расчета параметров процесса создания подземных емкостей как с пассивной, так и с активной потолочиной, обеспечивающие достаточно точные результаты и сходимость расчетных и фактических данных этапов размыва [66].

Основные технологические параметры устанавливаются после выбора технологической схемы размыва и составления расчетной схемы формообразования емкости. Форма гидровруба цилиндрическая. В конце размыва она преобразуется в усеченный конус, равновеликий по объему начальному цилиндру, с диаметром нижнего основания равным $\frac{2}{3}$ диаметра цилиндра. В качестве поверхности растворения принимается приведенная или условная вертикальная поверхность, с которой количество соли, растворяемое водой в единицу времени, равно количеству соли, растворяемой с поверхности емкости сложной геометрической формы.

Вводятся понятия приведенной скорости растворителя и приведенного коэффициента скорости растворения. На основании экспериментальных исследований установлена область автомодельности и получена система расчетных формул [10].

Приведенная поверхность растворения в соответствии с принятой схемой формообразования определяется по формуле

$$S_{np} = \sum_{i=1}^n S_{ib} + 1,5 \sum_{i=1}^m S_{ir} ,$$

где S_{ib} , S_{ir} – площади вертикальных и горизонтальных поверхностей растворения.

Концентрация поступающего на поверхность рассола на любом

этапе формообразования емкости рассчитывается по формуле

$$C = C_n \left(1 - \frac{1}{(K_{np}/U_{np}) + 1} \right),$$

где C_n – концентрация насыщенного рассола, кг/м³; K_{np} – приведенный коэффициент скорости растворения, м/ч; U_{np} – приведенная скорость движения растворителя, м/ч

$$U_{np} = \frac{Q}{S_{np}},$$

где Q – расход растворителя, м³/ч; S_{np} – приведенная поверхность растворения, м².

Время размыва этапа или всей емкости

$$T = \frac{G}{Q_p},$$

где G – масса соли, поступившей на поверхность с рассолом, кг; Q_p – расход рассола, кг/ч.

Для противоточного режима

$$G = V_{\phi}(\rho_c - 0,8C),$$

для прямоточного

$$G = V_{\phi}(\rho_c - 1,15C),$$

где V_{ϕ} – объем камеры, м³; ρ_c – плотность каменной соли, кг/м³; C – концентрация рассола на конец этапа, кг/м³.

Для определения приведенного коэффициента скорости растворения получены следующие эмпирические формулы [10]

$$K_{np} = (3,53 + 1,158)U_{np}^{0,13}; \quad 0,7 \leq U_{np} \leq 32;$$

$$K_{np} = (2,78 + 1,125)U_{np}^{0,13}; \quad 0,4 \leq U_{np} < 0,7.$$

Количество закачиваемого нерастворителя (воздуха) в емкость вычисляется из уравнения

$$Q_{возд}(\tau) = AV_r(\tau) + V_p(\tau)S_k + 24Q_pS_\delta;$$

$$A = \frac{P_k T_o}{Z P_o T_k},$$

где A – коэффициент приведения объема воздуха к нормальным условиям; $V_r(\tau)$ – функция, описывающая изменение объема, занимаемого воздухом в верхней части камеры, м³/сут; $V_p(\tau)$ – функция, описывающая изменение объема рассола, находящегося в камере, м³/сут; S_k – растворимость воздуха в рассоле в камере, %; Q_p – расход рассола, м³/сут; S_δ – растворимость воздуха в рассоле у башмака рассолоподъемной колонны, %; P_k – абсолютное давление воздуха в камере, кгс/см²; Z – коэффициент сжимаемости при P_k и T_k ; T_k – температура воздуха в камере, К.

Для расчета растворимости воздуха в рассоле S_k (в %) при различных условиях может быть использована формула В.А. Мазурова

$$\lg S_k = \lg P - 0,00055P - 0,0024C + 0,00000053C^2 - \\ - 0,012t + 0,000122t^2 + 0,465,$$

где P – давление, кгс/см²; t – температура, °С; C – концентрация рассола, г/л.

Количество жидкого нерастворителя, закачиваемого в емкость, определяется из уравнения [66]

$$Q_{жидк}(\tau) = \frac{dV_{ж}}{d\tau},$$

где $dV_{ж}$ – объем жидкости, которую необходимо подать в емкость за время $d\tau$.

На основании расчетов построены графики подачи нерастворителя в емкость. В табл. 6.3 приведены результаты расчета размыва емкости подземного хранилища по описываемой методике.

Основные расчетные зависимости показывают, что изменение одного из параметров не может обеспечить устойчивого эффекта при размыве. Так, повышение производительности подачи воды, мало влияя на скорость потока вдоль поверхности растворения, должно сочетаться с геометрией емкости. Увеличение подачи воды до 20–

30 м³/ч в начальной стадии образования камеры (гидровруб) повышает темп роста камеры на 20...22 %, а дальнейшее увеличение до 50 м³/ч – лишь на 10 %. Расширение активной поверхности, особенно с углом наклона, более 90°, благоприятствует росту концентрации, однако с технологических позиций не всегда рационально вводить в работу большие мощности соляной толщи.

Таблица 6.3. Расчетные и фактические данные создания емкости подземного хранилища [10]

Объем камеры в начале и конце этапа, м ³	Средний расход рассола, м ³ /ч	Приведенная поверхность растворения в начале и конце этапа, м ²	Продолжительность этапа, ч			Концентрация рассола в конце этапа, мг/м ³		
			расчетная	фактическая	относительная погрешность, %	расчетная	фактическая	относительная погрешность, %
24 000	78,6	7 170	2 400	2 201	9,1	263	262	0,4
72 000	—	9 510	—	—	—	—	—	—
47 200	93,0	9 510	2 120	2 009	5,5	267	255	4,7
75 800	—	12 420	—	—	—	—	—	—
24 000	85,5	7 170	4 470	4 270	4,7	—	255	4,9
75 800	—	12 420	—	—	—	—	—	—

Расчеты, подтвержденные практическими данными, показывают целесообразность постепенного увеличения интенсивности подачи воды по мере развития камеры, если нет ограничений по условиям отвода рассола или снабжения водой (рис. 6.9).

Поступающая в камеру выщелачивания вода стремится занять верхнее положение, а насыщаемый солью рассол опускается вниз. Постоянное присутствие свежего растворителя способствует более активному растворению верхней части камеры. Чем меньше высота интервала, в котором образуется емкость, тем ближе становятся боковые стенки, придавая камере форму перевернутого конуса. Содержащиеся в соли включения нерастворимых пород осаждаются и накапливаются на пологих поверхностях, затрудняя доступ растворителя. Зная интенсивность их выпадения, можно оценить искажения фактической формы камеры и определить, какая часть ее поверхности исключается из растворения. Наличие включений нерастворимых пород и анизотропия соляной толщи оказывают непосредственное влияние на геометрию камеры, что необходимо учитывать при построении ее расчетной формы. Рассмотренные

характеристики вводятся в программу формирования емкости и обуславливают выбор технологических приемов ее сооружения.

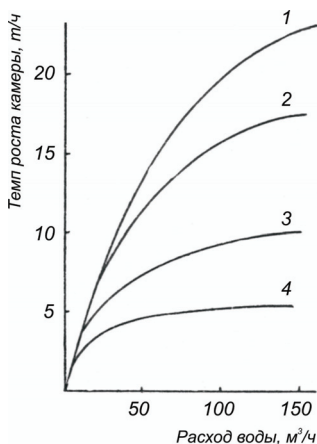


Рис. 6.9. Зависимость прироста камеры (по выходу соли) от интенсивности подачи воды при объеме выщелачиваемой камеры [68]:
1 – 100; 2 – 70; 3 – 35; 4 – 17,5 тыс. м³

В работе [69] приведена принципиально новая методика расчета технологии растворения соли при сооружении подземных емкостей с применением метода ступенчатого противотока снизу вверх, заключающаяся в следующем. Вначале определяют время растворения соли для образования подземной емкости вместимостью V . Зная время и среднюю линейную скорость растворения определяют число ступеней растворения соли n , начальные радиусы R_i и время растворения соли τ_i на каждой ступени. По данным средней концентрации рассола, производительности растворителя и времени растворения соли каждой ступени определяют массу извлеченной соли на каждой ступени. Данная методика отличается надежностью, простотой и обеспечивает получение проектной конфигурации емкости.

6.7. Оценка прочности и выбор формы подземных емкостей

Подземные газонефтехранилища являются капитальными сооружениями, поэтому они должны обладать длительной прочностью и устойчивостью. Разработка методов расчета емкостей

на прочность и определение их допустимых размеров играет важную роль в повышении эксплуатационной надежности подземных газонефтехранилищ.

Технология размыва подземных емкостей позволяет создавать различные формы каверн с изменяющимися в широком диапазоне размерами и объемами. Известно, что при сферической емкости распределение напряжений и деформаций в окружающем массиве более благоприятно, чем при цилиндрической. Напряжения, действующие по контуру сферической емкости как в упругой, так и пластической области, несколько меньше, чем прослеживающиеся по контуру цилиндрической. Поэтому подземным емкостям следует придавать формы: шарообразную, в виде эллипсоида вращения с большей вертикальной осью, цилиндрическую с куполообразной потолочиной, грушевидную и т. д.

Определение допустимых размеров подземных емкостей связано с разработкой методов расчета, которые допускают математическую обработку данных, учитывают глубину заложения и величину противодействия хранимых в емкостях продуктов, случайный характер распределения физико-механических свойств массива соли.

Вопросы прочности, устойчивости подземных газонефтехранилищ нашли отражение в работах Л.Н. Кислер, Н.М. Крюковой, В.А. Мазурова, [70], А.М. Гальперина, Е.М. Шафаренко [71], Ж.С. Ержанова, Г.А. Аршинова, Э.И. Бергмана [72], П.М. Гофман-Захарова [47] и др.

Для определения наибольших допустимых размеров хранилищ НИИПромгазом [70] предложен метод расчета, в основу которого положена статистическая теория хрупкого разрушения. Напряженное состояние по этому методу определяется из решения соответствующей краевой задачи теории упругости, а размеры хранилища рассчитываются при наличии данных о прочностных характеристиках вмещающих пород и сведений об успешной эксплуатации работающей в аналогичном режиме емкости геометрически подобной формы («эталонной»), сооруженной в соляном массиве с известными прочностными характеристиками. Считая вероятность разрушения этой выработки допустимой, размеры проектируемой выработки геометрически подобной формы в аналогичных породах другого месторождения находим из условия

$$P_V \leq P_V \text{ доп.}$$

Основная формула для определения допустимых размеров (пролета) подземных емкостей имеет вид [69]

$$\frac{L}{L_3} = \frac{\left[\frac{\gamma_3 H_3}{\sigma_{nm}^c (1 - \sin \varphi_3)} \right]^{\frac{m_3}{n}} F_n \left(\delta_3, m_3, \frac{\gamma_3}{\gamma}, \sigma_{nm,3}^{\min} \right)}{\left[\frac{\gamma H}{\sigma_{nm}^c (1 - \sin \varphi)} \right]^{\frac{m}{n}} F_n \left(\delta, m, \frac{\gamma_1}{\gamma}, \sigma_{nm}^{\min} \right)},$$

где индексом «3» отмечены величины, относящиеся к эталонной выработке; $n = 2$ – для горизонтальных камер тоннельного типа; $n = 3$ – для вертикальных емкостей; F_n – безразмерные функции, зависящие от геометрической формы выработки и прочности параметров массива; σ_{nm}^c – характеристика соли, имеющая размерность напряжения; γ, φ – средневзвешенный удельный вес пород вышележащей толщи и угол внутреннего трения; γ_1 – удельный вес продукта, обеспечивающего противодействие в емкости; m – безразмерная константа, определяемая по данным механических испытаний; σ_{nm}^{\min} – минимальное значение прочности дефектного элемента. Расчеты по приведенной формуле носят ориентировочный характер в пределах величин пролетов, принятых за эталонные на основании мирового опыта (в пределах 50 м).

Эксплуатационная надежность подземных хранилищ обеспечивается их устойчивостью и прочностью. В ряде работ оценка устойчивости выработки производится по длительной прочности. В качестве условия длительной прочности может использоваться критерий, удовлетворительно характеризующий прочность горной породы в условиях быстрого нагружения. При этом вводится характеристика длительной прочности при одноосном сжатии вместо соответствующей характеристики для мгновенного нагружения.

В работе [72] для определения устойчивости асимметричной полости в отложениях каменной соли применен критерий прочности Лебедева.

Используя в качестве уравнения состояния каменной соли, описывающие три стадии деформирования материала, включая разрушение, А.М. Гальпериным и Е.М. Шафаренко установлены зависимости, позволяющие определить для заданной глубины

заложения хранилища величину противодействия продукта, обеспечивающего безаварийный режим эксплуатации хранилищ сферической формы. Так как наибольшие деформации возникают обычно на контуре выработок, то использование уравнений, описывающих все стадии ползучести, эквивалентно критериям прочности, оценивающим разрушение по достижении на контуре предельных деформаций.

В общем случае давление ($P_b - P_a$), при котором обеспечена прочность хранилища в процессе длительной эксплуатации, выражается формулой

$$P_b - P_a = \frac{2}{\sqrt{3}} K_1 \sigma^\infty \frac{C+1}{C},$$

где P_b – давление на контуре; P_a – противодействие в емкости; K_1 и C – коэффициенты, зависящие от характера объемных деформаций [71].

Для подземных емкостей цилиндрической формы прочность подземной емкости обеспечивается при выполнении условия

$$\sigma_i \leq \sigma_i^\infty,$$

где σ_i – предельное значение интенсивности напряжений; σ_i^∞ – предел длительной прочности.

Расчеты подземных хранилищ на прочность в ряде работ основываются на знании физико-механических свойств горных пород. По данным В.А. Мазурова и Л.Н. Кислер, для оценки прочности емкостей, сооружаемых размывом, механические свойства каменной соли характеризуются двумя основными показателями: средним значением предела прочности на сжатие $\sigma_{сж}$ и коэффициентом вариации (изменчивостью) V [70]. Коэффициент вариации представляет собой среднеквадратическое отклонение, отнесенное к среднему значению. Так, по результатам обработки материалов испытаний керна каменной соли, по данным М.А. Долгих, В.В. Матвиенко и Н.С. Хачатуряна, установлено, что среднее значение предела прочности $\sigma_{сж}$ составляет 131 кгс/см², а коэффициент вариации V равен 22,9 %.

Зная механические свойства каменной соли, можно произвести проверку прочности подземных емкостей шаровой формы и

вытянутого цилиндра по методике, изложенной в работе [47]. Для емкости шаровой формы

$$3\gamma H - P \frac{3 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \leq \frac{2\sigma_{сж}}{K_3},$$

для емкости цилиндрической формы

$$2\gamma H - \frac{2P}{1 - \sin \varphi} \leq \frac{\sigma_{сж}}{K_3},$$

где P – внутреннее давление в емкости (камере выщелачивания), Н/м^2 ; γ – удельный вес горных пород, Н/м^3 ; H – глубина рассматриваемой точки от поверхности, м; φ – угол внутреннего трения (для расчетов принимается равным 15°); K_3 – коэффициент запаса прочности; $\sigma_{сж}$ – среднее значение прочности каменной соли на сжатие, Н/м^2 .

Коэффициент запаса прочности определяется по формуле

$$K_3 = \frac{\sigma_{сж}}{\sigma_n},$$

где σ_n – нормальные напряжения, действующие на стенки камер, Н/м^2 .

Приведенные формулы позволяют получить значения P , обеспечивающие заданные запасы прочности. Для шаровой формы

$$P = \frac{1}{\beta_1} \left(3\gamma H - \frac{2\sigma_{сж}}{K_3} \right),$$

для цилиндрической емкости

$$P = \frac{1}{\beta_2} \left(2\gamma H - \frac{2\sigma_{сж}}{K_3} \right),$$

где

$$\beta_1 = \frac{3 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}; \quad \beta_2 = \frac{2}{1 - \sin \varphi}.$$

Для определения коэффициента запаса прочности K_3

необходимо установить действующие в стенках камер нормальные напряжения σ_n .

Согласно [47] для шаровой формы хранилища

$$\sigma_n^m = \frac{1}{2}(3\gamma H - \beta_1 P);$$

для цилиндрической формы

$$\sigma_n^u = 2\gamma H - \beta_2 P.$$

Характеристику безопасности Δ можно определить по формуле [55]

$$\Delta = \frac{K_3 - 1}{K_3 - W},$$

где W – коэффициент вариации значения $\sigma_{сж}$.

В табл. 6.4 приведены значения вероятности G вывалов на стенках камеры выщелачивания при известных значениях Δ .

Таблица 6.4. Значения G в зависимости от величины Δ [55]

Δ	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
G	0,3	0,27	0,24	0,20	0,28	0,15	0,13	0,11	0,9	0,8	0,6	0,05	0,04	0,035

Продолжение табл. 5.3

Δ	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0
G	0,028	0,2	0,018	0,014	0,010	0,008	0,006	0,004	0,003	0,002	0,0019	3,1

Разработана номограмма (рис. 6.10) для определения максимально допустимого радиуса подземной емкости сферической формы и глубин заложения хранилищ не более 1200 м [47]. Параметры x_1 и x_2 номограммы определяют по формулам

$$x_1 = \frac{1}{G^2}, \quad x_2 = \frac{\gamma_c H}{\sigma_{сж}},$$

где γ_c – удельный вес каменной соли.

На номограмме точка пересечения вертикальной x_1 и наклонной x_2 прямых соответствует допустимому радиусу емкости.

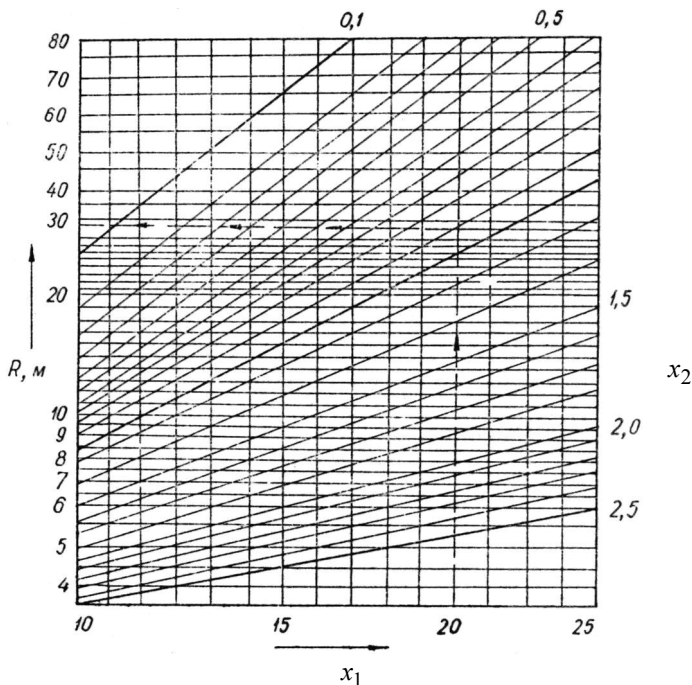


Рис. 6.10. Номограмма для определения максимально допустимого радиуса сферической подземной емкости в отложениях каменной соли [47]

Исходя из опыта строительства подземных хранилищ, радиусы емкостей не должны превышать следующих величин: для сферических емкостей – 30 м, для цилиндрических и эллипсоидообразных с куполовидной кровлей – 25 м, для емкостей с плоской потолочиной – 15 м.

6.8. Методы контроля формообразования подземных емкостей и определение их объема

Строительство и эксплуатация подземных хранилищ требуют необходимости разработки и внедрения надежных методов и приборов контроля над формообразованием с целью получения емкостей заданной прочности и конфигурации. Создание в отложениях каменной соли камер заданной формы и объема возможно только с помощью управляемого размыва, который

осуществляется путем закачки в технологическую скважину жидкого или газообразного нерастворителя, предохраняющего каменную соль от растворения в нежелательном направлении. При этом необходимо точно знать границу раздела нерастворитель–рассол.

Для отбивки уровня нерастворитель–рассол применяются различные способы: подбашмачный контроль, метод контрольной трубки, «нулевой» и электрический методы, радиоактивный каротаж, поплавковый. Они объединяются в две группы: периодический контроль с остановкой размыва и непрерывный контроль при работающей скважине [47].

Подбашмачный метод – один из самых простых и надежных методов контроля уровня нерастворителя. Сущность его заключается в том, что нерастворитель, находящийся в камере, поддерживается на уровне башмака водоподающей колонны, состоит в следующем. Проверка уровня осуществляется при остановке размыва путем подкачки нерастворителя до тех пор, пока он не всплывет и не появится в водоподающей колонне труб, а также на оголовке скважины. Последнее свидетельствует о нахождении нерастворителя на уровне башмака водоподающей колонны.

Сущность способа проверки уровня раздела нерастворитель–рассол с помощью трубки, монтируемой на наружной стороне водоподающей колонны, состоит в следующем. Башмак контрольной трубки небольшого диаметра располагается несколько выше (на 0,5–1,0 м) башмака водоподающей колонны. Зная объем трубки, из нее выпускают нерастворитель в объеме больше расчетного. Если при этом не появится вода или рассол, значит уровень нерастворителя совпадает с нижним концом трубки. Опускание трубки с колонной водоподающих труб связано с определенными трудностями, однако такой способ проверки не требует остановки скважины.

Вместо контрольной трубки применяют электрические контакты, которые размещаются на водоподающей трубе и соединяются кабелем с сигнальной лампой на поверхности. Когда уровень раздела нерастворитель–рассол смещается вверх, контакты попадают в рассол и лампа загорается.

Для проведения замеров «нулевым» методом (рис. 6.11) на контакте нерастворитель–рассол между обсадной и водоподающей трубами опускается контрольная трубка малого диаметра 1. Трубка и межтрубное пространство 2 соединены с чувствительным дифманометром 5. Колонна контрольной трубки с помощью ручного

насоса 4 заполняется нерастворителем из межтрубного пространства. Для выравнивания температур по стволу скважины размыв прекращают на три-четыре часа. Затем из контрольной трубки нерастворитель поступает в мерный сосуд 6 до тех пор, пока перепад давлений на дифманометре не станет равным нулю. Это происходит в момент совпадения уровня контакта нерастворителя с рассолом в контрольной трубке и уровня контакта рассол-нефть в камере. Высота уровня относительно нижнего конца контрольной трубки вычисляется по объему выпущенного нефтепродукта

$$h_m = \frac{4Q_m}{\pi d_m^2},$$

где Q_m – объем выпущенного из трубки нерастворителя; d_m – внутренний диаметр контрольной трубки.

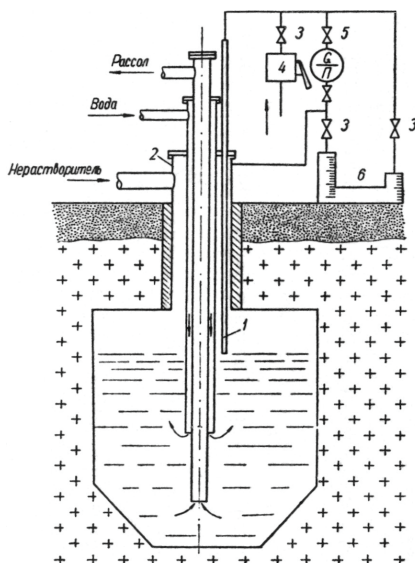


Рис. 6.11. Схема контроля уровня раздела нерастворитель-рассол «нулевым» методом [11]

Метод гидростатического равновесия также предусматривает опускание в межтрубное пространство контрольной трубки. Применение чувствительного поплавкового дифманометра с

индукционным преобразователем показаний позволяет фиксировать изменение уровня раздела нефтепродукт–рассол в процессе работы скважины. По перемещению поплавка в дифманометре рассчитывается изменение уровня раздела нерастворитель–рассол.

Следует отметить, что изменение температуры емкости с глубиной значительно влияет на плотность нефти. Поэтому применение указанного метода связано со значительными погрешностями. Более надежными способами отбивки контакта нефтепродукт–рассол являются нейтронный гамма-метод, а также метод рассеянного гамма-излучения.

В работе [73] предложен поплавокый метод замера границы раздела нерастворитель–рассол с помощью устройства УГРИ-2. Прибор обеспечивает точную фиксацию границы раздела, подачу устойчивого сигнала с фиксированной границы и определение глубины формирования этого сигнала относительно нулевой отметки поверхности земли (рис. 6.12).

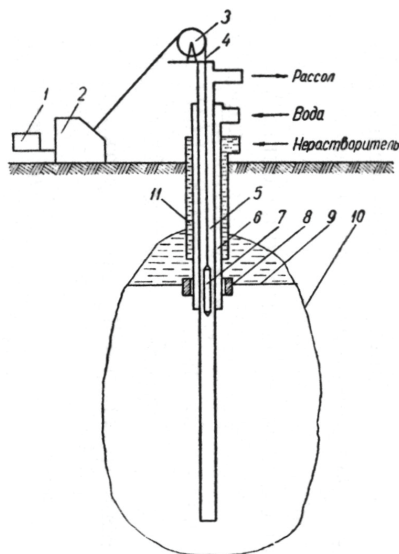


Рис. 5.12. Схема изотопного указателя границы раздела нефтепродукт–рассол в подземных емкостях [73]:

1 – счетчик длины размотанного кабеля; 2 – лебедка; 3 – блок; 4 – кабель; 5 – рассольная колонна; 6 – водоподающая колонна; 7 – гамма-реле; 8 – поплавокый указатель уровня; 9 – граница раздела «нерастворитель–рассол»; 10 – подземная емкость; 11 – колонна для подачи нерастворителя

В качестве указателя границы раздела в приборе использован кольцевой поплавок 8, свободно перемещающийся в емкости 10 по рассольной трубе 5. Фиксация поплавка на границе раздела 9 двух жидкостей с различной плотностью обеспечивается расчетом его плавучести из условия

$$V_p \gamma_p < G_n < V_n \gamma_n,$$

где V_p – объем рассола; V_n – объем поплавка; G_n – вес поплавка; γ_p и γ_n – удельный вес рассола и материала поплавка, соответственно.

Источником сигнала является находящийся в поплавке радиоактивный изотоп. Поток излучения направлен по горизонтали к оси колонны труб. Во время замера границы с поверхности по оси рассольной колонны опускается скважинный прибор, роль которого выполняет приемник излучения гамма-реле 7. По достижении зоны излучения гамма-реле срабатывает и лебедка 2, разматывающая кабель 4 скважинного прибора, останавливается. По счетчику длины размотанного кабеля 1 фиксируется глубина положения границы раздела с точностью 0,02 м. Более эффективно использование измерительного поплавка, управляемого с пульта оператора.

Существуют различные методы определения объема и формы подземных емкостей. Объем камеры можно установить по количеству закачиваемой воды, отбираемому рассолу и его концентрации. Для этого во время размыва камеры непрерывно измеряют количество подаваемой в скважину воды и извлекаемого из нее рассола, а также через равные промежутки времени контролируют плотность рассола. Эти данные позволяют в любой момент выщелачивания камеры вычислить ее объем.

Площадь поперечного сечения камеры определяется способом равновесных давлений, основанном на принципе гидростатического равновесия в камере, заполненной нефтепродуктом или сжиженным газом и рассолом. Известно, что хранимый продукт легче рассола, поэтому у задвижки на подводящем продуктопроводе образуется избыточное давление. При снижении уровня контакта продукт–рассол, т. е. при заполнении камеры продуктом, это давление увеличивается [65]. Состояние равновесия можно описать уравнением

$$h_k = \frac{P_y}{\gamma_p - \gamma_n},$$

где h_k – глубина контакта продукт–рассол, м; γ_p и γ_n – удельный вес рассола и продукта, соответственно, Н/м³; P_y – давление на устье обсадной колонны, Н/м².

При этом

$$\Delta h_k = \frac{\Delta P_y}{\gamma_p - \gamma_n},$$

где Δh_k – приращение глубины (изменение уровня продукт–рассол); ΔP_y – приращение давления на устье обсадной колонны.

Тогда для элементарного объема камеры высотой Δh_k средний радиус R_k (при условии асимметричности камеры) находим по формуле

$$R_k = 1,772 \sqrt{\Delta Q_n / \Delta h_k},$$

где ΔQ_n – объем продукта, введенного для заполнения нового объема камеры, при приращении глубины на Δh_k , м³.

Вытесняя рассол нефтью или нефтепродуктом из камеры с точным замером продукта и давления на устье обсадной колонны, можно вычислить радиус и, следовательно, площадь для ряда поперечных сечений камеры. Однако этот метод не позволяет определить асимметричность размытой камеры.

Все описанные выше способы определения формы и замера объемов подземных камер при размыве каменной соли являются косвенными. Они позволяют получить лишь усредненный радиус конкретного сечения, что не характеризует истинную форму емкости, т. к. нерастворимые включения, пропластки, анизотропия соли способствуют асимметричному развитию емкости в процессе ее размыва. Более надежным способом, позволяющим установить действительную форму подземных камер и их ориентировку в пространстве, является ультразвуковая локация.

В гидролокаторах применяют электронно-лучевой индикатор с фоторегистратором или самопишущий прибор, фиксирующий измерения в полярных координатах. Отклонение электронного луча или перерегистратора от нулевого положения пропорционально интервалу времени t между моментом посылки импульса локации и приходом его отражения от стенки емкости. Расстояние R от

излучателя до стенки камеры подземного хранилища вычисляется по формуле

$$R = \frac{v t}{2},$$

где v – скорость распространения ультразвука в жидкости, заполняющей емкость; t – время, определяемое измерениями и устанавливаемое при калибровке прибора [67].

После съемки сечения камеры на данном уровне скважинный снаряд гидролокатора перемещается на новый уровень. Расстояние между соседними уровнями зависит от размеров емкости, сложности ее формы и колеблется от 1...2 до 20...30 м. Детальное представление о форме емкости дает совокупность всех горизонтальных сечений, которую иногда представляют в виде пространственной модели.

Для контроля формообразования подземных емкостей разработаны звуколокаторы типа «Зонд» [74].

Скважинный комплекс состоит из наземной аппаратуры и скважинного гидроакустического снаряда, соединенных трехжильным каротажным кабелем. Работа с аппаратурой на скважине начинается с рекогносцировочной съемки, целью которой является выделение участков емкости с резким изменением формы и размеров контуров для более детальных исследований. Выбор шага между смежными сечениями осуществляется в зависимости от сложности ожидаемой конфигурации емкости и предполагаемых радиусов. Ориентировочное расстояние между смежными сечениями определяется по формуле

$$h = (R_i + R_{i-1})tg \frac{\beta}{2},$$

где R_i , R_{i-1} – средние радиусы смежных сечений рекогносцировочной съемки, м; β – угол раствора диаграммы направленности излучателя в вертикальной плоскости ($\sim 5^\circ$).

После рекогносцировочной проводится основная съемка, затем обработка полученных данных, в результате которой устанавливаются форма и объем емкости. Объем камер по данным звуколокационной съемки существенно меньше объема, вычисленного по количеству вытесненной на поверхность соли.

Интерпретация материалов звуколокационной съемки

заключается в последовательном внесении поправок. На первом этапе обработки отделяются горизонтальные сечения, на которых зафиксированы двойные и более сложные контуры. Они позволяют выявить перегородки нерастворимых пород. На уточненных контурах первой и второй групп горизонтальных сечений определяются их площади S , используемые при вычислении объема подземных емкостей по формуле

$$V = \frac{1}{3}h(S_{i-1} + S_i + \sqrt{S_{i-1}S_i}),$$

где h – расстояние между соседними горизонтальными сечениями, м; S_{i-1} , S_i – площадь сечений на глубинах H_{i-1} , H_i , м².

Контроль за формообразованием подземных емкостей в солях производят периодически при размыве, завершении строительства и эксплуатации хранилища.

6.9. Интенсификация процесса размыва подземных емкостей, образованных в отложениях каменной соли

6.9.1. Анализ причин, снижающих эффективность сооружения подземных хранилищ в каменных солях методом размыва

Размыв подземных емкостей в отложениях каменной соли является в странах СНГ основной технологией сооружения крупных подземных хранилищ. Этому способствует наличие в СНГ около 20 крупных соленосных бассейнов (в т. ч. 5 в Украине), где возможно строительство подземных емкостей различного объема.

В мировой практике основной технологией сооружения крупных подземных хранилищ является размыв емкостей в отложениях каменной соли через буровые скважины с применением прямоточного, противоточного, комбинированного, с гидроврубом, ступенчатого и других методов. Однако, существенным недостатком таких циркуляционных схем размыва является длительность строительства, продолжающаяся полтора–два и более лет. Кроме того, начальный период формирования емкости, вследствие малой площади контакта растворителя с каменной солью, характеризуется низкой скоростью обменных процессов. При этом концентрация рассола составляет всего 20...50 г/л, что значительно снижает эффективность размывочных работ. Следовательно, для сокращения

сроков размыва емкостей чрезвычайно важным является решение вопроса интенсификации начальной стадии размыва.

Существующие регламенты размыва емкостей по традиционной технологии, кроме низкой концентрации выдаваемого рассола в первоначальный период строительства емкости, не содержат активных мер борьбы с нерастворимыми отложениями. Обычно соляная толща содержит пропластки несолевых пород – ангидритов, известняков, алевролитов (мощностью от нескольких сантиметров до нескольких метров), суммарное содержание которых в зоне размыва емкости может достигать 25...30 % и более. Это существенно снижает скорость выщелачивания, а в некоторых случаях становится невозможным выщелачивание емкостей в пределах проектного контура. В большинстве случаев требуется принудительное обрушение нерастворимых пластов и пропластков, однако известные рекомендации пригодны лишь для редко встречающейся комбинации горно-геологических и строительных условий.

Существующие в настоящее время способы ускорения процесса растворения каменной соли (повышение температуры растворителя, магнитная обработка воды и ультразвуковая обработка массива, использование поверхностно-активных веществ и другие) требуют применения дорогостоящего оборудования, не экономичны и мало пригодны в большинстве случаев размыва емкостей в сложных горно-геологических условиях строительства при наличии в рабочей зоне размыва нерастворимых пластов и пропластков прочных горных пород.

Поэтому перспективна разработка взрывных методов, позволяющих одновременно воздействовать на каменную соль и на нерастворимые отложения с целью направленного изменения их свойств для ускорения процесса размыва.

6.9.2. Методы интенсификации процесса размыва подземных емкостей в отложениях каменной соли

Одной из особенностей подземных хранилищ, образованных в соляных формациях, несколько снижающей их общую эффективность, является длительность сооружения. Так, размыв емкости объемом 100 тыс. м³ в зависимости от применения технологической схемы размыва продолжается полтора–два года. Поэтому сокращение сроков строительства емкостей – важный этап интенсификации процесса сооружения подземных емкостей в

отложениях каменной соли методом размыва.

Теоретические и экспериментальные исследования позволили обнаружить возможность ускорения растворения при активном воздействии на диффузионный слой [47]. Этот принцип применим на всем протяжении процесса размыва, однако наиболее эффективен в первой фазе формирования подземной емкости, т. е. когда концентрация извлекаемого рассола находится еще на низком уровне.

Математически диффузионный процесс в жидкой фазе выражается формулой [75]

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} + W_x \frac{\partial c}{\partial x} + W_y \frac{\partial c}{\partial y} + W_z \frac{\partial c}{\partial z} = D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right). \quad (6.1)$$

В левой части уравнения имеем локальную и конвективную составляющие диффузии, в правой – молекулярную диффузию. Представляя равенство (6.1) в безразмерном виде для условия установившегося процесса $\partial c / \partial \tau = 0$, получаем соотношение между левой и правой частями уравнения, характеризующееся безразмерным параметром – числом Пекле P_e [68]. Большие значения числа P_e , свойственные рассматриваемому процессу, указывают на преобладание конвекционной диффузии. Поэтому искусственное создание конвективных потоков в нужном направлении, даже с небольшими скоростями, дает положительный эффект.

Анализ экспериментальных опытно-промышленных исследований показал, что работы в области интенсификации размыва подземных хранилищ развивались в таком направлении: интенсификация размыва с помощью воздействия на процесс упругими колебаниями; интенсификация размыва посредством создания электрического разряда в воде; турбулизация растворителя раскручиванием входящего потока воды; применение магнитной обработки воды; использование быстроиспаряющихся жидкостей с целью создания барботирующей толщи жидкости; использование энергии взрыва для разуплотнения структуры каменной соли.

Одним из эффективных средств, вызывающих возмущения, которые обуславливают сдвиговые усилия вблизи границы раздела твердой и жидкой фаз, могут служить упругие колебания звукового диапазона частот [76].

В работе [68] обоснована эффективность применения гидродинамического излучателя при выщелачивании подземной

камеры. Возникающие при падении акустических волн на растворяющуюся поверхность стационарные течения среды представляют собой микропотоки, способствующие уменьшению толщины пограничного слоя и ускорению переноса вещества. Воздействие поля акустических колебаний изменяют характер движения растворенного вещества в пограничном диффузионном слое, а также в общем объеме растворителя. Появление акустических потоков в поле упругих колебаний усиливает конвекцию в камере и ускоряет массообменные процессы.

Наиболее приемлемым при подземном выщелачивании каменной соли является роторный гидродинамический излучатель (рис. 6.13). Он представляет собой устройство, с помощью которого кинетическая энергия жидкости преобразуется в акустическую. Жидкость, находящаяся в трубе и используемая как растворитель, через отверстия переменного во времени сечения поступает в пространство, создавая в нем возмущения среды, воспринимаемые как звук. Выходное сечение излучателя изменяется от максимума (когда отверстия статора совпадают с отверстиями ротора) до минимума (когда отверстия статора перекрыты). Вращение ротора осуществляется электродвигателем или гидротурбиной. Излучатель имеет цилиндрическую форму и его можно опускать на любую глубину, подсоединив к центральной колонне труб. Роторные гидродинамические излучатели позволяют получить значительные мощности в широком диапазоне частот (500–5 000 Гц) [68].

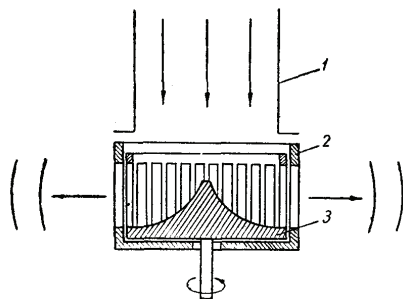


Рис. 6.13. Принципиальная схема роторного гидродинамического излучателя [68]:
1 – водоподающая колонна; 2 – статор; 3 – ротор

Исследования, проведенные А.В. Колосовым, подтвердили эффективность применения акустической интенсификации. Динамика

выдачи соли (характеристика прироста объема камеры) свидетельствует о положительном влиянии упругих колебаний на всех этапах формирования камеры.

В работе [77] установлено, что с повышением колебательной скорости увеличивается эффективность звукового воздействия. Изменение амплитуды колебательной скорости позволяет интенсифицировать растворение каменной соли при любых начальных концентрациях растворителя (раствора). При частоте 100 Гц и изменении колебательной скорости в течение всего периода растворения концентрация соли в рассоле возрастает: при колебательной скорости 2,5 см/с – в 1,4 раза; при 5,0 см/с – в 1,87 раза и при 7,5 см/с – в 2,2 раза.

Результаты, полученные в работе [78], показали возможность интенсификации процесса размыва с помощью электрического разряда в воде. В экспериментах было достигнуто увеличение концентрации рассола на различных расстояниях в 1,3–2,7 раза.

В работе [79] приведены результаты исследований по использованию энергии упругих колебаний при размыве камер и определены технико-экономические показатели работы устройств, возбуждающих такие колебания. Исследовалась эффективность многократного периодически повторяющегося разрушения пограничного слоя с использованием модели малогабаритного скважинного генератора упругих импульсов. Испытания проводились в процессе размыва в целике соли 100-литровой емкости. Установлено, что применение генератора упругих волн для интенсификации процесса выщелачивания позволяет сократить сроки развития камеры более чем в 2,4 раза. Повышение скорости выщелачивания при рассолах высокой концентрации позволяет снизить расход пресной воды и значительно сократить сроки размыва камеры.

В работе [47] приведено гидравлическое перемешивающее устройство (рис. 6.14), с помощью которого внутри зоны растворения создается турбулентное движение жидкости в результате вихревого движения струи на выходе в зону растворения. Шнекообразная насадка, создавая вихревое движение жидкости, увлекает близлежащие слои и постепенно турбулизует всю массу жидкого реагента, обтекающего поверхность растворения. Вынужденная усиленная конвекция жидкости способствует уменьшению толщины диффузионного слоя и резко активизирует процесс растворения.

Наиболее эффективным является использование устройства в начальной стадии размыва при небольших объемах размывающей жидкости.

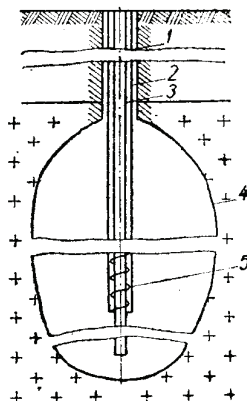


Рис. 6.14. Конструктивная схема перемешивающего устройства [47]:
1 – обсадная колонна; 2 – водоподающая колонна; 3 – рассолоподъемная колонна;
4 – контур подземной емкости; 5 – шнекообразная насадка

Для интенсификации процесса выщелачивания возможна магнитная обработка воды. Однако в процессе проведения экспериментов свойство воды после намагничивания долго сохранять повышенную эффективность растворения соли не подтвердилось.

Способ ускорения растворения и массообмена в камере выщелачивания путем образования барботаж, в заполняющем камеру растворителе, приведен в работе [80]. Вместе с водой в камеру выщелачивания вводится быстроиспаряющаяся жидкость большей плотности, чем концентрированный рассол. Тяжелая жидкость собирается на дне камеры. Регулируя давление в камере, можно создать условия для образования газовых пузырьков, которые, устремляясь вверх, барботируют слой растворителя по всему сечению камеры в горизонтальной плоскости. Использованием в качестве активизирующего агента CO_2 и других газов создается перепад давления, который обеспечивает выделение достаточного количества газа.

Интенсификация обменных процессов при размыве емкостей в каменных солях связана с увеличением поверхности взаимодействия

растворителя и соляного массива, которого можно достигнуть, используя разрушающую способность взрыва. Анализ результатов исследований по разуплотнению структуры каменной соли под действием динамических нагрузок, выполненный в работах [81–84] показал, что необходимая степень разуплотнения соляной породы может достигаться при определенном виде неравномерного напряженного состояния. Требуемый вид неравномерного нагружения соляного массива можно создать путем короткозамедленного взрывания зарядов в торпеде, конструкция которой и расчет зарядов приведены ниже.

6.9.3. Разуплотнение и прочность горных пород при неравномерных динамических нагружениях. Результаты экспериментальных исследований

Известно, что в результате взрыва изменяется физическое состояние горных пород, при этом в зоне взрывного воздействия возникает искусственная трещиноватость, приводящая к изменению начальной пористости массива.

В работе [81] установлено, что развитие деформационных процессов в горных породах зависит как от их исходного физического состояния, так и в значительной мере от вида нагружения, характеризуемого параметром $\zeta = \sigma_3 / \sigma_1$, где σ_3 и σ_1 – наименьшее и наибольшее главные напряжения.

Разработан экспериментальный комплекс для изучения поведения горных пород при динамическом нагружении. Методика проведения экспериментов, описание испытательной камеры и экспериментального комплекса подробно изложены в работе [81].

Результаты экспериментальных исследований деформирования образцов каменной соли и основных типов нерастворимых пород, наиболее часто встречающихся при выщелачивании емкостей, приведены в работах [81, 82, 84, 85]. Некоторые из результатов приведены ниже.

Физико-механические свойства исследованных горных пород приведены в табл. 6.5.

На рис. 6.15 показано влияние вида напряженного состояния на предел упругости σ_y пород. Приведенные графики показывают, что предел упругости с уменьшением показателя неравномерности

нагружения ζ от 0,2 до 0,05 существенно уменьшается (в 4,5 раза для известняков и 2,7...3,1 раза для менее прочных пород).

Таблица 6.5. Физико-механические свойства горных пород [82]

Порода	$\rho (\times 10^3)$, кг/м ³	n , %	$v_p (\times 10^3)$, м/с	ν	$\sigma_0 (\times 10^5)$, Па	$E (\times 10^{10})$, Па
Известняк	2,58	1,7	4,65	0,28	855	4,90
Песчаник	2,36	9,0	2,53	0,17	527	1,46
Ангидрит	2,61	2,0	4,27	0,26	550	4,74
Алевролит	2,58	4,4	3,26	0,19	520	2,86
Аргиллит	2,51	6,0	3,05	0,23	460	2,33
Каменная соль	2,10–2,20	–	2,34–2,95	0,22–0,30	160–210	1,15–1,91

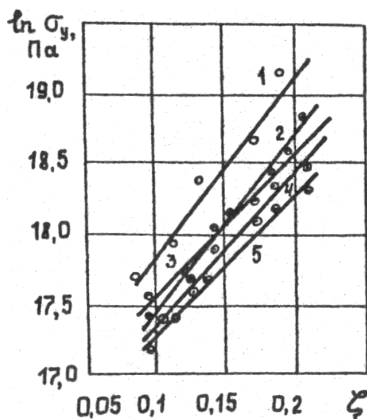


Рис. 6.15. Влияние неравномерного нагружения на предел упругости пород:
1 – известняк; 2 – ангидрит; 3 – песчаник; 4 – алевролит; 5 – аргиллит

Влияние неравномерности нагружения на величину сцепления C и угол внутреннего трения φ в горных породах по данным экспериментов с близкими значениями скорости нагружения (от $1,5 \cdot 10^{11}$ Па/с в песчаниках до $3,1 \cdot 10^{11}$ Па/с в известняках) показано на рис. 6.16 и 6.17.

Анализируя графики рис. 6.16 приходим к выводу о заметном влиянии неравномерности нагружения на величину сцепления. Так, в известняках при изменении ζ от 0,3 до 0,05 величина сцепления уменьшается в 1,42 раза, для каменной соли в 2,6 раза. Отметим, что

установленные зависимости $C(\zeta)$ в качественном отношении аналогичны результатам, приведенным в работе [86].

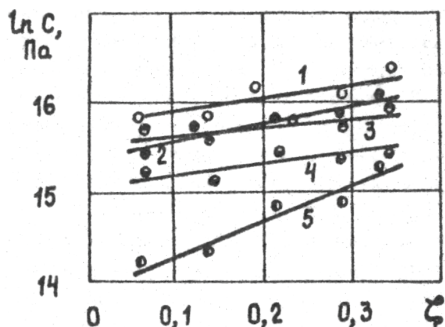


Рис. 6.16. Влияние неравномерного нагружения на величину сцепления в породах: 1 – известняк; 2 – ангидрит; 3 – песчаник; 4 – аргиллит; 5 – каменная соль

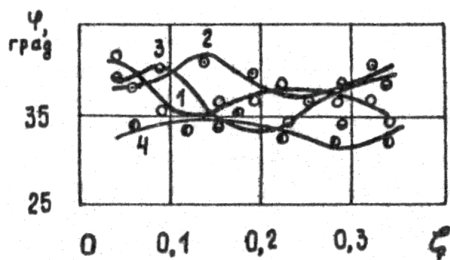


Рис. 6.17. Влияние неравномерного нагружения на угол внутреннего трения: 1 – известняк; 2 – алевролит; 3 – аргиллит; 4 – каменная соль

Что касается угла внутреннего трения φ , то его величина от неравномерности нагружения зависит менее заметно, чем сцепление. Анализ рис. 6.17 позволяет сделать заключение, что некоторое незначительное возрастание угла внутреннего трения с ростом ζ отмечается для известняка; для алевролита, аргиллита и каменной соли характер кривых изменения угла φ при увеличении неравномерности напряженного состояния говорит об отсутствии определенной закономерности.

На рис. 6.18 приведены зависимости модуля Юнга горных пород от числа неравномерных последовательных динамических нагружений. С увеличением количества нагружений модуль Юнга

заметно уменьшается (в 2,0 раза у известняков и ангидритов при 4-кратном и в 4,0 раза у каменной соли при 3-кратном воздействии).

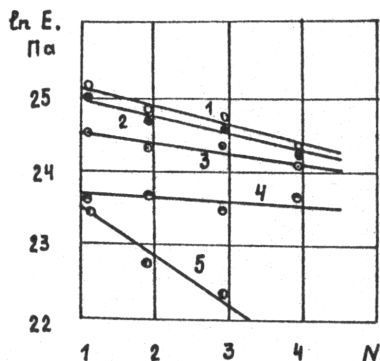


Рис. 6.18. Влияние количества неравномерных динамических нагружений на модуль Юнга:

1 – известняк; 2 – ангидрит; 3 – алевролит; 4 – песчаник; 5 – каменная соль

Довольно сильно количество неравномерных динамических нагружений влияет на величину сцепления, результаты экспериментов представлены на рис. 6.19.

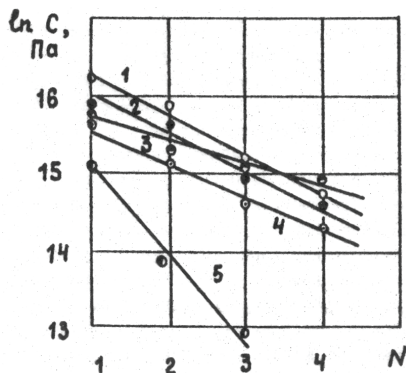


Рис. 6.19. Изменение величины сцепления пород от количества неравномерных динамических нагружений:

1 – известняк; 2 – ангидрит; 3 – песчаник; 4 – алевролит; 5 – каменная соль

Графики указывают на существенное уменьшение величины сцепления с ростом количества нагружений (например, в 4,1...4,3

раза у ангидритов и известняков). У каменной соли снижение величины сцепления при последовательном неравномерном динамическом нагружении еще более заметно (если при первом нагружении значение сцепления составляет $34,4 \cdot 10^5$ Па, при втором – $11,4 \cdot 10^5$, то при трехкратном нагружении величина сцепления не превышает значения $3,4 \cdot 10^5$ Па). Это показывает, как отмечено и в работе [83], целесообразность многократного нагружения для снижения прочностных свойств каменной соли.

Экспериментально установленное снижение величины упругих, прочностных и деформационных характеристик горных пород с увеличением неравномерности и количества нагружений может быть использовано как физическая основа при разработке взрывных методов разуплотнения и разупрочнения солевых отложений и нерастворимых пластов при их размыве и обрушении в процессе сооружения емкостей в каменных солях.

Результаты исследований объемного деформирования образцов каменной соли при различных значениях неравномерности динамического нагружения представлены на рис. 6.20.

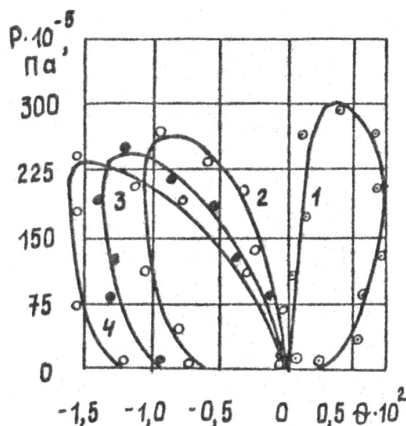


Рис. 6.20. Диаграммы объемного деформирования образцов каменной соли [85]:
 1 – $\zeta = 0,3$; 2 – $\zeta = 0,26$; 3 – $\zeta = 0,18$; 4 – $\zeta = 0,1$

Установлено, что неравномерное нагружение соли с показателем $\zeta = 0,3$ сопровождается уплотнением ее структуры. С увеличением неравномерности нагружения, уже при $\zeta = 0,26$, наблюдается

устойчивый деформационный процесс разуплотнения структуры каменной соли, выражающийся в увеличении объемной деформации образцов при сжатии (к примеру, у песчаников устойчивое разуплотнение их структуры наблюдается при $\zeta = 0,12$ [81]).

6.9.4. Теоретические исследования напряженно-деформированного состояния нерастворимых пластов горных пород при действии нагрузок

Ниже рассмотрен круг задач, связанных с исследованием напряженного состояния нерастворимых пластов при действии разного вида нагрузок и определены условия, при которых происходит разрушение пласта.

Напряженное состояние пластов постоянной мощности при действии нагрузок. Пусть в результате размыва в соляном массиве образовалась некоторая полость радиусом R , в которой остался пласт нерастворимых отложений постоянной мощности h (рис. 6.21).

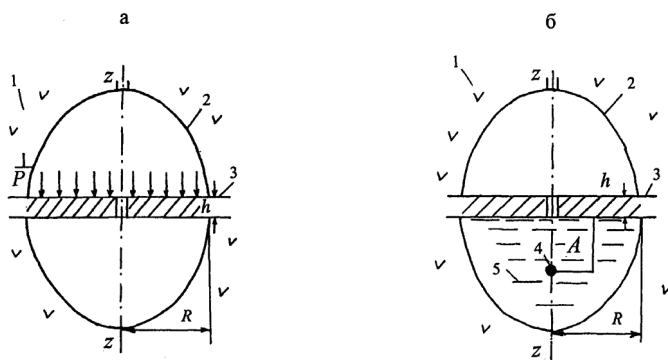


Рис. 6.21. Схемы к расчету напряженного состояния нерастворимого пласта [4]:
 1 – каменная соль; 2 – контур хранилища; 3 – нерастворимый пласт; 4 – заряд ВВ;
 5 – жидкость; h, R – мощность и радиус обнажения пласта; A – расстояние от заряда до нижней поверхности пласта; P – интенсивность статической нагрузки

Очевидно, обрушение пласта под действием нагрузки произойдет в том случае, когда возникающие в нем напряжения достигнут разрушающих величин. При решении поставленной задачи принято:

- нерастворимый пласт является сплошным однородным упругим изотропным слоем пород, обладающим отличным от нуля

сопротивлением разрушению;

- мощность пласта значительно меньше любого другого размера его обнажения;

- воздействие на пласт предполагается таким, что его напряженно-деформированное состояние носит статический или квазистатический характер;

- для анализа напряженно-деформированного состояния пласта применимы основные положения теории изгиба тонких пластин.

Если действующая на круглый пласт нагрузка P распределена симметрично относительно оси емкости ZZ (а рассматривается именно такой случай (рис. 6.21, а)), то деформации и напряжения, возникающие в пласте, будут также симметричны. В цилиндрической системе координат уравнение угла поворота φ нормали к срединной поверхности пласта для рассматриваемых условий имеет вид [87]

$$r \frac{d^2 \varphi}{dr^2} + \frac{d\varphi}{dr} - \frac{\varphi}{r} = -\frac{qr}{D}, \quad (6.2)$$

где $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ – жесткость пласта на изгиб; E и ν – модуль Юнга и коэффициент Пуассона материала пласта; q – поперечная сила, направленная по оси ZZ .

Решение уравнения (6.2) имеет вид

$$\varphi = c_1 r + \frac{c_2}{r} - \frac{1}{Dr} \int \left(r \int q dr \right) dr, \quad (6.3)$$

где c_1 и c_2 – произвольные постоянные интегрирования, определяемые из граничных условий.

Поперечную силу q находим из выражения

$$q = \frac{1}{r} \int_0^r Pr dr, \quad (6.4)$$

где давление P зависит только от координаты r .

При равномерно распределенной нагрузке из выражения (6.4) получаем

$$q = \frac{Pr}{2}. \quad (6.5)$$

С учетом (6.5) из соотношения (6.3) следует

$$\varphi = c_1 r + \frac{c_2}{r} - \frac{Pr^3}{16D}.$$

Определим постоянные интегрирования c_1 и c_2 .

Для случая жесткого защемления контура пласта (что имеет место в рассматриваемой задаче) угол поворота φ в центре пласта (при $r = 0$) должен быть равен нулю. Но это возможно, когда $c_2 = 0$.

На контуре пласта $r = R$ угол поворота φ также равен нулю, откуда

$$c_1 = \frac{PR^2}{16D}.$$

Следовательно,

$$\varphi = \frac{Pr}{16D} (R^2 - r^2).$$

Зная φ , находим изгибающие моменты M_r и M_θ

$$M_r = \left[\frac{P}{16} R^2 (1 + \nu) - r^2 (3 + \nu) \right];$$

$$M_\theta = \left[\frac{P}{16} R^2 (1 + \nu) - r^2 (1 + 3\nu) \right].$$

На контуре пласта при $r = R$

$$(M_r)_{r=R} = -\frac{PR^2}{8}; (M_\theta)_{r=R} = -\nu \frac{PR^2}{8}. \quad (6.6)$$

В центре пласта, где $r = 0$

$$(M_r)_{r=0} = (M_t)_{r=0} = \frac{PR^2}{16} (1 + \nu). \quad (6.7)$$

Из выражений (6.6), (6.7) следует, что наибольшим является момент $(M_r)_{r=R}$.

Известно, что

$$\sigma_r = \frac{12M_r}{h^3} Z.$$

Таким образом, наибольшие напряжения наблюдаются на контуре защемления пласта при $Z = \pm h/2$. Наиболее опасными являются растягивающие напряжения, максимальная величина которых при $r = R, Z = h/2$ равна

$$\sigma_r^{\max} = \frac{3}{4} \frac{PR^2}{h^2}. \quad (6.8)$$

Если рассматривается случай самообрушения пласта (без внешних нагрузок), то из формулы (6.8) следует

$$\sigma_r^{\max} = \frac{3}{4} \frac{\gamma R^2}{h}, \quad (6.9)$$

где γ – удельный вес породы пласта.

Совместный учет внешней нагрузки P и собственного веса пласта приводит к условию

$$\sigma_r^{\max} = \frac{3}{4} \frac{R^2}{h^2} (\gamma h + P). \quad (6.10)$$

Если нагрузка P обеспечивается за счет давления жидкости, подаваемой в полость поверх пласта, то из выражения (6.10) получаем

$$\sigma_r^{\max} = \frac{3}{4} \frac{R^2}{h^2} (\gamma h + \gamma_{жс} h_{жс}), \quad (6.11)$$

где $\gamma_{жс}$ и $h_{жс}$ – удельный вес и высота столба жидкости (рассола), соответственно.

Формулы (6.8) – (6.11) дают возможность определить предельные статические нагрузки на пласт при его обрушении.

Определим из соотношения (6.8) предельную равномерно-распределенную статическую нагрузку $P_{п}$, необходимую для обрушения пласта.

Очевидно, что нерастворимый пласт обрушится тогда, когда σ_r^{\max} достигнет значения равного пределу прочности породы пласта на растяжение σ_p (так как сопротивление горных пород растяжению по абсолютной величине в 8...10 раз и более, меньше сопротивления сжатию). При этом предельная нагрузка равна

$$P_{\Pi} = \frac{4}{3} \left(\frac{h}{R} \right)^2 \sigma_p.$$

Если рассматривается случай самообрушения пласта, то из (6.9) следует, что максимальная мощность пласта при этом составляет [85]

$$h_{\max} = \frac{3}{4} \frac{\gamma R^2}{\sigma_p}. \quad (6.12)$$

Совместный учет внешней распределенной нагрузки интенсивности P и собственного веса пласта мощности h приводит к условию

$$P_{\Pi} = \frac{4}{3} \left(\frac{h}{R} \right)^2 \sigma_p - \gamma h.$$

В случае, когда равномерно распределенная нагрузка обеспечивается путем подачи жидкости поверх пласта мощности h , необходимая высота столба жидкости для обрушения пласта составляет

$$h_{жс} = \frac{1}{\gamma_{жс}} \left[\frac{4}{3} \left(\frac{h}{R} \right)^2 \sigma_p - \gamma h \right]. \quad (6.13)$$

Как видно, необходимая для обрушения пласта нагрузка возрастает с увеличением мощности обрушаемого пласта и прочности породы на разрыв и уменьшается с ростом размеров зоны обнажения.

Если упоминаемое выше давление P не обеспечивает обрушение пласта, то в качестве принудительного воздействия может быть использован взрыв заряда взрывчатого вещества. Тип взрывчатого вещества выбирается таким образом, чтобы обеспечить квазистатическое нагружение на пласт. Для этого необходимо, чтобы соблюдалось условие

$$v_b t_+ \gg h,$$

где v_b – скорость взрывной волны в жидкости; t_+ – длительность действия давления.

Перед проведением взрывных работ по обрушению нерастворимого пласта верхняя часть полости освобождается от жидкости. В нижнюю часть полости, заполненную жидкостью, на

расстояние A по вертикали от подошвы пласта опускается заряд ВВ (рис. 6.21, б). В результате взрыва пласт испытывает совместное действие ударной волны и гидропотока, распределенное по всей поверхности обнажения. При $A > 7r_3$ (где r_3 – радиус заряда) гидропоток невелик и нагрузка, приложенная к пласту, представляется в виде [88]

$$P(r) = k r_3^\mu \left(A^2 + r^2 \right)^{\frac{\mu}{2}}, \quad (6.14)$$

где k и μ – коэффициенты затухания взрывных волн в жидкости.

Считая, что взрывная нагрузка на пласт носит квазистатический характер (что можно обеспечить применением ВВ с увеличенной длительностью взрывного нагружения), применяем для расчета напряженного состояния пласта и в этом случае теорию изгиба тонких пластин.

Подставляя (6.14) в выражение (6.4) и производя интегрирование, получаем

$$q = \frac{k r_3^\mu}{r} \left[\frac{\left(A^2 + r^2 \right)^{\frac{2-\mu}{2}} - A^{2-\mu}}{2-\mu} \right]. \quad (6.15)$$

Для нахождения решения уравнения (6.2) разложим в ряд выражение $\left(A^2 + r^2 \right)^{\frac{2-\mu}{2}}$. Количество членов в ряду для обеспечения необходимой точности результата зависит от отношения r/A . Так, при $r/A = 0,5$ учет 4-х членов разложения позволяет уменьшить ошибку в определении результата до 1 %. С учетом этого

$$\left(A^2 + r^2 \right)^{\frac{2-\mu}{2}} = a_0 + a_1 \left(\frac{r}{A} \right)^2 + a_2 \left(\frac{r}{A} \right)^4 + a_3 \left(\frac{r}{A} \right)^6, \quad (6.16)$$

где

$$\begin{aligned} a_0 &= A^{2-\mu}; & a_1 &= \frac{1}{2}(2-\mu)A^{2-\mu}; \\ a_2 &= -\frac{1}{8}\mu(2-\mu)A^{2-\mu}; & a_3 &= \frac{1}{48}\mu(4-\mu^2)A^{2-\mu}. \end{aligned} \quad (6.17)$$

Подставляя (6.16), (6.17) в (6.15) и производя интегрирование в выражении (6.3), получаем

$$\varphi = c_1 r + \frac{c_2}{r} - \frac{B}{D} \left(\frac{a_1 r^3}{8A^2} + \frac{a_2 r^5}{24A^4} + \frac{a_3 r^7}{48A^6} \right),$$

где

$$B = k r_3^\mu / (2 - \mu).$$

Определим постоянные интегрирования c_1 и c_2 . Как и выше, $c_2 = 0$. На контуре пласта $r = R$ угол $\varphi = 0$, следовательно

$$c_1 = \frac{B}{D} \left[\frac{a_1}{8} \left(\frac{R}{A} \right)^2 + \frac{a_2}{24} \left(\frac{R}{A} \right)^4 + \frac{a_3}{48} \left(\frac{R}{A} \right)^6 \right].$$

Таким образом,

$$\varphi = \frac{B}{D} \left[\frac{a_1}{8A^2} (R^2 r - r^3) + \frac{a_2}{24A^4} (R^4 r - r^5) + \frac{a_3}{48A^6} (R^6 r - r^7) \right]. \quad (6.18)$$

Для нахождения напряжений в пласте, определяем с учетом (6.18) изгибающие моменты M_r и M_θ

$$M_r = B \left\{ \frac{a_1}{8A^2} \left[(R^2 - 3r^2) + \nu(R^2 - r^2) \right] + \frac{a_2}{24A^4} \left[(R^4 - 5r^4) + \nu(R^4 - r^4) \right] + \frac{a_3}{48A^6} \left[(R^6 - 7r^6) + \nu(R^6 - r^6) \right] \right\};$$

$$M_\theta = B \left\{ \frac{a_1}{8A^2} \left[(R^2 - r^2) + \nu(R^2 - 3r^2) \right] + \frac{a_2}{24A^4} \left[(R^4 - r^4) + \nu(R^4 - 5r^4) \right] + \frac{a_3}{48A^6} \left[(R^6 - r^6) + \nu(R^6 - 7r^6) \right] \right\}.$$

На контуре пласта $r = R$

$$(M_r)_{r=R} = -B \left[\frac{a_1}{4} \left(\frac{R}{A} \right)^2 + \frac{a_2}{6} \left(\frac{R}{A} \right)^4 + \frac{a_3}{8} \left(\frac{R}{A} \right)^6 \right];$$

$$(M_{\theta})_{r=R} = -vB \left[\frac{a_1}{4} \left(\frac{R}{A} \right)^2 + \frac{a_2}{6} \left(\frac{R}{A} \right)^4 + \frac{a_3}{8} \left(\frac{R}{A} \right)^6 \right]. \quad (6.19)$$

В центре пласта $r = 0$

$$(M_r)_{r=0} = (M_{\theta})_{r=0} = B(1+v) \left[\frac{a_1}{8} \left(\frac{R}{A} \right)^2 + \frac{a_2}{24} \left(\frac{R}{A} \right)^4 + \frac{a_3}{48} \left(\frac{R}{A} \right)^6 \right]. \quad (6.20)$$

Из выражений (6.19) и (6.20) следует, что максимальные растягивающие напряжения имеют место на контуре защемления нижней поверхности пласта, где они равны [89]

$$\sigma_r^{\max} = \frac{6k r_3^{\mu}}{(2-\mu)h^2} \left[\frac{a_1}{4} \left(\frac{R}{A} \right)^2 + \frac{a_2}{6} \left(\frac{R}{A} \right)^4 + \frac{a_3}{48} \left(\frac{R}{A} \right)^6 \right]. \quad (6.21)$$

Из выражения (6.21) определяем предельную взрывную нагрузку на обрушаемый пласт. Это достигается тогда, когда σ_r^{\max} станет равным динамическому пределу прочности породы пласта на растяжение $\sigma_{p,\delta}$, при этом минимальный радиус заряда равен

$$r_3 = \left\{ \frac{(2-\mu)h^2 \sigma_{p,\delta}}{6k \left[\frac{a_1}{4} \left(\frac{R}{A} \right)^2 + \frac{a_2}{6} \left(\frac{R}{A} \right)^4 + \frac{a_3}{8} \left(\frac{R}{A} \right)^6 \right]} \right\}^{\frac{1}{\mu}}. \quad (6.22)$$

Нетрудно увидеть, что с увеличением параметра A требуемая для обрушения пласта нагрузка увеличивается.

Расчет и анализ предельных нагрузок при обрушении пластов.

Предельную мощность пласта при его самообрушении определяем из выражения (6.12), из которого видно, что предельная мощность увеличивается с ростом радиуса обнажения пласта. Зависимость $h_{\max}(R)$, установленная согласно (6.12) для пород различной крепости, представлена на рис. 6.22.

Из рис. 6.22 видно, что для характерных размеров хранилищ ($R \approx 20$ м) предельная мощность пласта 2,5 м удовлетворяет условию

самообрушения только для пород, прочность которых на растяжение не превышает $25 \cdot 10^5$ Па. Для более прочных горных пород необходимо применять различные методы принудительного обрушения.

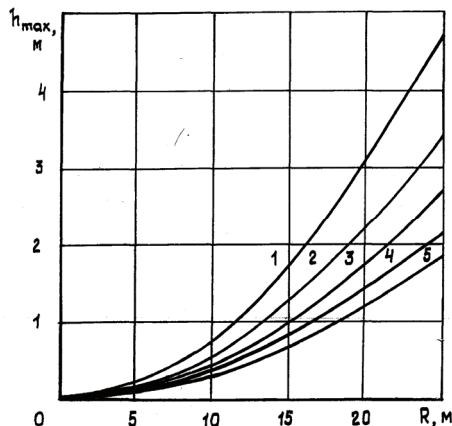


Рис. 6.22. Влияние радиуса обнажения пласта R и прочности породы на разрыв σ_p на максимальную мощность пласта h_{\max} при его самообрушении [4]:
 1–5 – $\sigma_p = 25 \cdot 10^5; 35 \cdot 10^5; 45 \cdot 10^5; 55 \cdot 10^5; 65 \cdot 10^5$ Па

В случае, когда мощность подлежащего обрушению пласта больше, чем предельная мощность согласно (6.12), обрушения пласта можно достигнуть путем подачи жидкости на верхнюю его часть. При этом предварительно откачивают жидкость из нижней части емкости для обеспечения максимального прогиба пласта и производят тампонаж сквозного отверстия в пласте. Предельную высоту столба жидкости рассчитывают согласно формуле (6.13).

Изменение предельной высоты столба жидкости $h_{жс}$ в зависимости от радиуса пласта R , прочности породы на растяжение σ_p для различных мощностей h пластов представлено на рис. 6.23.

Как видно, предельная высота столба жидкости $h_{жс}$ уменьшается с увеличением радиуса обнажения пласта R и увеличивается с возрастанием прочности породы на растяжение σ_p и мощности пласта h .

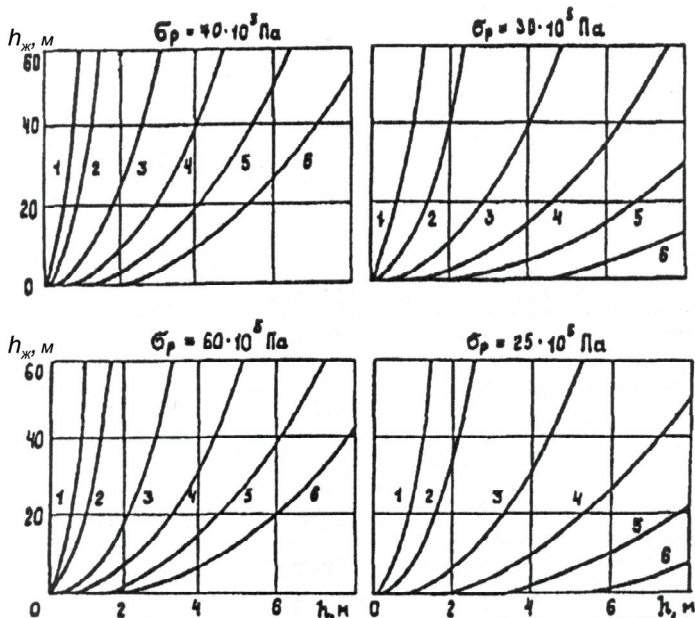


Рис. 6.23. Изменение предельной высоты столба жидкости $h_{ж}$ от мощности h , радиуса обнажения пласта R и прочности его на растяжение σ_p [4]:

1–6 – $R = 3; 5; 10; 15; 20; 25 \text{ м}$

Если необходимая для обрушения пласта предельная высота столба жидкости больше расстояния от верхней части пласта до свода размытой полости, то нагружение пласта путем подачи жидкости не обеспечит его обрушения. В таком случае для обрушения пласта может быть использован взрыв заряда ВВ в нижней части полости, заполненной жидкостью, предварительно откачав жидкость из верхней ее части. Радиус заряда определяют из формулы (6.22), результаты расчетов при $K = 14497 \cdot 10^5 \text{ Па}$ и $\mu = 1,13$ представлены на рис. 6.24.

Как видно, радиус заряда увеличивается с увеличением прочности породы на растяжение σ_p и мощности пласта h и уменьшается с увеличением радиуса обнажения пласта R и отношения R/A .

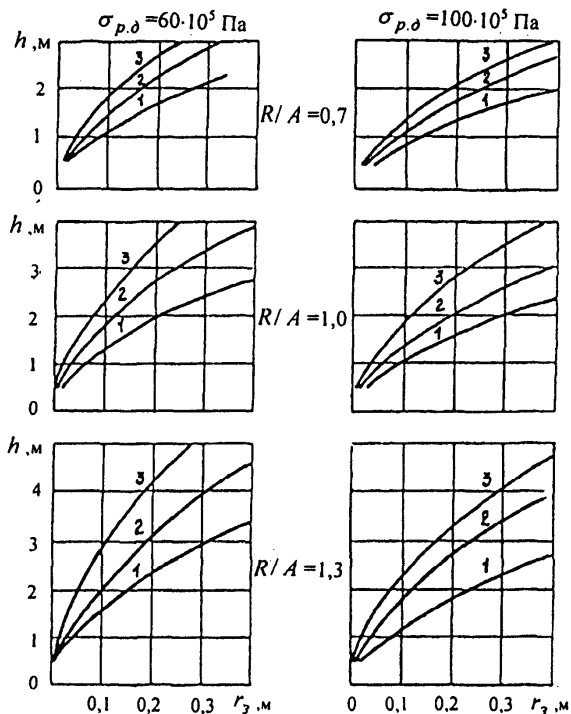


Рис. 6.24. Зависимость минимальной величины радиуса r_3 от мощности h и радиуса пласта R , прочности породы $\sigma_{p,d}$ и расстояния A от заряда до пласта [4]:
1–3 – $R = 5; 10; 20$ м

6.9.5. Технологии интенсификации сооружения подземных хранилищ в каменных солях методом размыва

Конструкция заряда для разуплотнения и разупрочнения горных пород. Управлять видом напряженного состояния в горной породе при взрыве можно путем взаимодействия взрывных волн от нескольких зарядов, взрывааемых с замедлением.

На рис. 6.25 представлена типичная картина изменения напряжений σ_1 и σ_3 в горной породе при взрыве одиночного заряда.

Количественные значения амплитуд и изменение их во времени различны для разных пород, однако, качественная картина одна и та

же. В условиях скважин требуемой неравномерности напряженного состояния массива можно достигнуть в результате взаимодействия волновых процессов при взрыве двух или нескольких зарядов, расположенных в одной скважине.

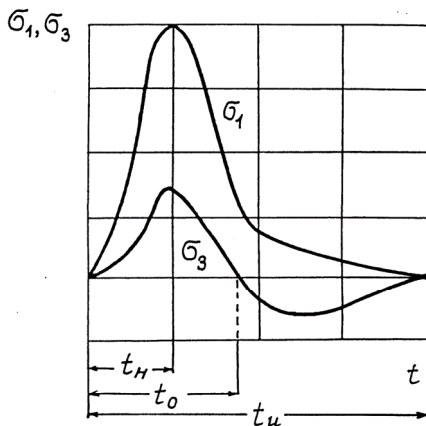


Рис. 6.25. Общий вид изменения во времени главных напряжений σ_1 и σ_3 при взрыве одиночного заряда ВВ в горной породе [4]:

t_n – время нарастания $\sigma_1(t)$ до максимального значения; t_0 – время существования положительной фазы $\sigma_3(t)$; t_u – длительность действия импульса взрыва

Анализ изменения показателя ζ неравномерности нагружения среды при взрыве двух зарядов при разных величинах замедления взрывания Δt между зарядами показывает, что наиболее предпочтительными с позиций создания в массиве длительного состояния высокой неравномерности являются варианты, при которых $\Delta t = t_n$ и $\Delta t = t_0$ [84].

Реализацию взаимодействия взрывных волн при взрыве двух зарядов предлагается осуществлять с применением конструкции торпеды, приведенной на рис. 6.26.

Суммарный заряд торпеды состоит из двух (или более) частей заряда, взрыв которых с замедлением обеспечивает возможность создания в массиве неравномерного динамического нагружения. Необходимое время замедления частей заряда в торпедe реализуется

спецустройством, или отрезком детонирующего шнура. Заряд помещается в специальную оболочку – корпус торпеды, предупреждающий разрушение торпеды при опускании ее в расчетный интервал обработки.

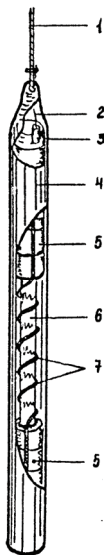


Рис. 6.26. Схема конструкции торпеды [4]:

- 1 – электрофизический кабель; 2 – электропровод; 3 – инициирующее устройство;
4 – корпус; 5 – заряд ВВ; 6 – стержень; 7 – детонирующий шнур

Межзарядный промежуток служит для размещения отрезка ДШ и конструктивно представляет собой цилиндр, в котором помещен стержень (например, деревянный), на поверхности которого навит детонирующий шнур длиной $l_{ш}$. Шаг витков h_b определяется из условия предотвращения прямой передачи детонации по скважинной жидкости.

Взрывание торпеды осуществляется электрическим способом.

Количество торпед N определяется мощностью (высотой) зоны обработки $h_{з.о}$ и радиусом действия одной торпеды R_m

$$N = \frac{h_{з.о}}{2R_m}.$$

В заданный интервал обработки торпеда опускается на геофизическом кабеле с помощью спускоподъемных механизмов.

Исходными данными для расчета параметров взрывных работ являются:

- геологический разрез скважины;
- данные о физико-механических свойствах горных пород в зоне взрывной обработки;
- кавернограммы скважин;
- сведения о конструкции скважин: интервалы обсадки, группы прочности, диаметр и толщина стенок труб, толщина и прочностные свойства цементного камня, характеристика качества цементирования;
- интервал взрывной обработки горных пород;
- наличие специализированных геофизических организаций;
- обеспеченность взрывчатыми материалами, разрешенными к использованию при геофизических работах в глубоких скважинах;
- оснащенность спускоподъемным оборудованием и снаряжением;
- данные об интервале заложения хранилищ и регламенте размыва; сведения о выполненных работах по размыву и объему сформированной каверны, а также данные о геометрических параметрах нерастворимых пластов, находящихся в области проектного контура сооружаемого хранилища [91].

Расчет параметров взрывных работ для разуплотнения массива в зоне взрывной обработки. Разуплотнение горного массива в зоне взрывной обработки необходимо для улучшения фильтрационных характеристик пород в призабойной зоне скважины и повышения концентрации рассола в первоначальный период строительства подземных хранилищ в каменных солях методом размыва.

В соответствии с проектным контуром и регламентом работ при размыве емкости в каменных солях назначается необходимая глубина взрывной обработки массива h_n , м.

Общая масса заряда в торпедо определяется по формуле

$$Q = \left[\frac{3(h_n - r_p) - 2v_p b h_n}{2a v_p} \right]^3, \quad (6.23)$$

где r_p – внешняя граница распространения трещин разрыва в массиве; v_p – скорость продольных волн в обрабатываемом взрывом массиве; a, b – экспериментальные коэффициенты [84].

Допустимая масса заряда с учетом сохранения устойчивости и герметичности обсадной колонны скважины определяется по методике, изложенной в работе [91].

По кавернограмме устанавливается фактический диаметр ствола скважины. Толщина цементного камня H_k по глубине скважины определяется из выражения

$$H_k = \frac{d_{ск} - d_m}{2},$$

где $d_{ск}$ и d_m – диаметр скважины и внешний диаметр обсадной трубы.

Из рассчитанных значений H_k на разных глубинах выбирается одно или несколько сечений скважины, подлежащих проверке с учетом затухания взрывной волны по стволу скважины.

Полагая, что для зарядов, массы которых отличаются не более чем на порядок, соблюдается принцип геометрического подобия волновых процессов, принимаем, что в области значений $120 < r/r_3 < \infty$ величина давления P в сечении скважины, расположенном на расстоянии r от очага взрыва, определяется согласно формуле

$$P = P_0 (r/r_3)^{-\alpha},$$

где $P_0 = 891 \cdot 10^5$ Па, $\alpha = 0,13$ согласно данным [92].

Допустимое давление P_0 обсадной трубы на цементный камень, с учетом недопустимости его растрескивания, определяется по формуле

$$P_0 = \frac{k_\partial \sigma_p (r_{bk}^2 - r_{ак}^2) + 2P_2 r_{bk}^2}{r_{ак}^2 + r_{bk}^2}, \quad (6.24)$$

где $\sigma_p \approx 0,1\sigma_0$, σ_p – предел прочности цементного камня на сжатие; r_{bk} , $r_{ак}$ – наружный и внутренний радиусы цементного камня; k_∂ – коэффициент динамичности нагрузки, $k_\partial = 2$; P_2 – горизонтальная

составляющая горного давления на глубине опасного сечения обсадной колонны скважины

$$P_{\Gamma} = \frac{\nu}{1-\nu} \gamma H,$$

где ν – коэффициент Пуассона горных пород в опасном сечении колонны; H – расстояние от устья до опасного сечения; γ – средний удельный вес пород по разрезу скважины

$$\gamma = \frac{\sum \gamma_i m_i}{\sum m_i},$$

где γ_i и m_i – удельный вес и мощность пластов пород, залегаемых выше глубины опасного сечения, соответственно.

Радиальное перемещение u внутренней поверхности цементного камня при давлении P_{∂} трубы на цементный камень рассчитывается согласно [87]

$$u = \frac{1-\nu_k}{E_k} \frac{r_{ak}^2 P_a - r_{bk}^2 P_b}{r_{bk}^2 - r_{ak}^2} r_{ak} + \frac{1+\nu_k}{E_k} \frac{r_{ak} r_{bk}^2 (P_a - P_b)}{r_{bk}^2 - r_{ak}^2}, \quad (6.25)$$

где P_a, P_b – внутреннее и внешнее давления на цементный камень (принимая $P_a = P_{\partial}, P_b = P_{\Gamma}$); ν_k, E_k – коэффициент Пуассона и модуль Юнга цементного камня.

Предельное давление P_n в обсадной трубе рассчитывается с учетом условия равенства радиальных перемещений внутренней поверхности цементного камня и наружной стенки трубы и достижения при этом в цементном камне предельного значения напряжений. Таким образом, P_n определяется из выражения

$$u = \frac{1-\nu_m}{E_m} \frac{r_{am}^2 P_n - r_{bm}^2 P_{\partial}}{r_{bm}^2 - r_{am}^2} r_{bm} + \frac{1+\nu_m}{E_m} \frac{r_{am} r_{bm} (P_n - P_{\partial})}{r_{bm}^2 - r_{am}^2}, \quad (6.26)$$

где r_{am}, r_{bm} – внутренний и наружный радиусы обсадной трубы; ν_m, E_m – коэффициент Пуассона и модуль Юнга материала обсадной трубы.

Согласно справочным данным [93] определяем максимальное давление в трубе P_m , при котором она переходит в текучее состояние.

Производим сравнение максимально допустимого давления P_m в трубе с предельным давлением P_n , обеспечивающим сохранность цементного камня.

В случае

$$P_m \geq P_n$$

выполняется условие сохранения целостности цементного камня.

Если

$$P_m < P_n,$$

то давление P_n ограничивается значением P_m .

Производится сравнение величины давления P во взрывной волне в опасном сечении обсадной колонны при взрыве заряда ВВ требуемой массы Q с величиной предельного давления P_n в трубе в этом сечении.

При

$$P < P_n$$

допустимая масса заряда принимается равной требуемой массе и взрыв производится без применения средств гашения взрывных волн.

Если

$$P > P_n,$$

производится выбор средств гашения взрывных волн, обеспечивающих снижение амплитуды взрывной волны в опасном сечении колонны до значения P равного или меньшего P_n . При этом допустимая масса заряда принимается равной требуемой массе Q , и взрыв производится с применением выбранных средств гашения взрывных волн.

Технологии обрушения пластов нерастворимых пород в процессе размыва подземных емкостей. Опыт эксплуатации подземных хранилищ, созданных методом выщелачивания, показывает, что в мощных пластах соли, как правило, нерастворимые породы имеют вид рассеянных включений или сплошных пропластков и прослоев различной мощности. Наличие нерастворимого пропластка обуславливает потери полезного объема камеры, зачастую препятствуя ее образованию и опусканию новой эксплуатационной колонны при замене старых труб без повторного разбуривания

пропластков, затрудняет выбор метода и схемы размыва подземной емкости.

Особенно осложняет процесс размыва то обстоятельство, что довольно часто нерастворимые пласты не самообрушаются. Оставление таких пластов в емкости размыва и дальнейшие самопроизвольные смещения и местные разрушения таких пластов могут привести к нарушению нормальной работы хранилища, а в некоторых случаях, к выходу его из строя со значительной потерей хранимого продукта. Поэтому вопрос о ликвидации (разрушении) сплошных нерастворимых пропластков, осложняющих технологию сооружения и эксплуатацию подземных хранилищ, заслуживает особого внимания.

Первые сведения о необходимости постановки проблемы содержатся в работе О.М. Иванцова [3]. На основании теоретических исследований и опытно-промышленных испытаний в работе [94] предложены методы расчета мощности пропластков при их самообрушении, а также методы управляемого принудительного обрушения во время строительства емкости.

Для предотвращения стихийного обрушения пропластков предложены способы управляемого обрушения посредством давления сил гидростатического столба жидкости и с помощью энергии взрыва. Первый метод заключается в том, что пропласток разрушается под действием гидростатического столба жидкости, находящегося над пропластком, и собственной массы пропластка [95]. Если этого давления для обрушения пропластка недостаточно, то нагружение на пропласток повышается путем закачивания поверх разрушаемого пласта жидкости под давлением. Применение управляемого обрушения пропластков в емкости позволяет ликвидировать опасность обрыва рабочей колонны труб.

На основе проведенных исследований поведения горных пород при действии различного вида нагружений в работе [4] приведены методы и технологии разрушения нерастворимых пластов в зоне размыва емкостей в каменных солях в сложных горно-геологических условиях. Разработанные методы и технологии разделены на три группы.

К первой группе относятся методы, базирующиеся на основе самообрушения нерастворимых пластов. Главная идея таких методов состоит в том, что при достижении зоной обнажения пласта проектных размеров, последний обрушается под влиянием сил,

обусловленных собственной массой пласта. Условие саморазрушения обнаженного пласта определяется согласно выражению (6.12).

Для хранилищ радиусом 15,0...20,0 м согласно инструкции [96] допускается наличие в массиве соли нерастворимых прослоек толщиной до 2,5 м. Однако практика размыва хранилищ показывает, что в большинстве случаев необходимо принудительное обрушение нерастворимых пластов, поскольку зона обнажения пласта не всегда достигает проектных значений. В таких случаях для достижения условий самообрушения пласта необходимо снизить его характеристику σ_p (предел прочности породы пласта на разрыв), или дополнительно его нагрузить. Главный недостаток первой группы методов состоит в том, что при неконтролируемом самообрушении пласта возможен обрыв технологических колонн.

Ко второй группе методов относятся методы обрушения обнаженных пластов статическим нагружением. Простейшим видом такого нагружения является гидростатическое давление столба жидкости на пласт, вес которого обеспечит необходимое нагружение. Минимальная высота столба жидкости для обрушения пласта определяется согласно выражению (6.13).

Внедрение методов второй группы усложняется применением технологий гидроизоляции верхней и нижней полостей размываемой емкости для обеспечения необходимого прогиба пласта в сторону свободной от жидкости поверхности. Следует принять во внимание ограниченность возможностей метода, связанную с тем, что верхняя часть емкости не всегда может вместить необходимое количество жидкости для обеспечения выполнения условия обрушения пласта.

Наиболее перспективны методы третьей группы управляемого разрушения нерастворимых пластов под действием импульсных нагрузений. Они разделяются на два класса. Первый класс основан на разупрочнении породы пласта для достижения условий его самообрушения. Второй связывается со взрывным обрушением обнаженных нерастворимых пластов. Если методы первого класса используются как до начала, а в случае необходимости, и в процессе выполнения работ по размыву емкости, то методы второго класса применяются лишь при наличии обнажения пласта в процессе размыва хранилища.

Таким образом, при выборе метода разрушения нерастворимых пластов в зоне выщелачивания каменной соли необходимо принимать

во внимание горно-геологические условия строительства, геометрические характеристики нерастворимого пласта, физико-механические свойства его породы, а также технические и технологические возможности предприятия, выполняющего работы по сооружению хранилищ.

Наличие нерастворимых пластов и прослоек горных пород в зоне выщелачивания подземной емкости в каменной соли усложняет регламент выполнения работ. При этом в технологию формирования емкости включается существенный элемент – разрушение нерастворимых пластов в зоне размыва емкости.

Технологическая схема выполнения работ по разрушению нерастворимых пластов горных пород зависит от выбранного метода их разрушения.

Технологическая схема № 1. Разупрочнение нерастворимого пласта до начала технологического процесса размыва хранилища.

Если геометрические параметры пласта (его радиус и толщина) не могут обеспечить выполнение условия самообрушения, то следует выполнить предварительное разупрочнение породы пласта с целью снижения его характеристики σ_p до уровня σ_1 , что обеспечит выполнение условия самообрушения (6.9). При этом величина разрушающего нагружения σ_1 определяется из выражения [84]

$$\sigma_1 = \frac{2C_0 \exp(\zeta B) \cos \varphi}{1 - \xi - (1 + \zeta) \sin \varphi},$$

где C_0 – величина сцепления породы пласта при испытаниях на одноосное сжатие; φ – коэффициент внутреннего трения породы пласта; ζ – показатель неравномерности нагружения; B – коэффициент. Значение коэффициентов C_0 , φ и B для некоторых типов горных пород приведены в работе [84].

Сравнивая σ_1 со значением динамической прочности породы пласта на разрыв $\sigma_{p.d}$, устанавливаем необходимое количество неравномерных динамических нагружений на породу пласта для достижения условий самообрушения пласта в процессе размыва емкости.

При применении технологической схемы № 1 до начала процесса выщелачивания на скважине выполняется комплекс работ по подготовке скважины для проведения взрывных работ.

При этом необходимо:

- освободить скважину от технологических колонн и внутреннего оборудования;
- установить спускоподъемное оборудование с запасом кабеля, достаточного для работы на всех глубинах;
- оборудовать зарядную мастерскую для подготовки торпед;
- уточнить геофизическими методами геологический разрез скважины, в т. ч. интервал залегания нерастворимого пласта и согласовать отметки кабеля спускоподъемного механизма с характерными отметками геологического разреза скважины;
- уровень воды в скважине должен располагаться на глубине не менее 50–100 м от устья скважины.

Непосредственно перед проведением взрывных работ выполняется шаблонирование скважины с целью проверки возможности доставки торпеды в заданный интервал обработки скважины.

Если шаблонирование прошло без осложнений, в скважину опускают заряд ВВ и выполняют его подрыв.

Результаты взрывных работ контролируются геофизическими методами, выполняемыми после проведения взрывных работ, а также по данным наблюдений за ходом размыва емкости.

Технологическая схема № 2. Разрушение обнаженного пласта в камере выщелачивания статическим нагружением.

В практике выщелачивания подземных хранилищ в каменной соли бывают случаи, когда в результате размыва емкости нерастворимый пласт, который согласно проектным данным должен самообрушиться, сохраняет положение равновесия и не обрушается. Для обрушения такого пласта может быть применена схема, базирующаяся на методе статического нагружения пласта столбом жидкости, закачиваемой поверх пласта.

Данная технологическая схема может быть использована при условии, что пласт характеризуется низкой водопроницаемостью.

Для разрушения пласта статическим нагружением столбом жидкости необходимо:

- провести откачку жидкости как из надпластовой, так и частично с подпластовой полостей размываемой емкости для создания возможности прогиба пласта в сторону свободной поверхности;

- установить гидроизоляционный пакер (цементный мост) в интервале пласта;
- проверить надпластовую полость размываемой емкости на герметичность;
- выполнить закачку жидкости поверх пласта.

Когда нагрузка на пласт достигнет критической величины, пласт обрушится в нижнюю часть емкости.

Технологическая схема № 3. Разрушение обнаженного пласта в камере выщелачивания с применением взрывчатых веществ.

В случае, когда невозможно выполнить гидроизоляцию надпластовой и подпластовой полостей размываемой емкости или надпластовая емкость по своим геометрическим параметрам не может принять необходимое количество жидкости для обрушения пласта, применима схема, основанная на методе разрушения обнаженного пласта нерастворимых пород с использованием энергии взрывчатого вещества. При этом необходимая масса заряда для разрушения пласта определяется согласно формуле (6.22).

Работы по обрушению пласта выполняют в следующей последовательности:

- откачивают жидкость с надпластовой полости размываемой емкости;
- скважину освобождают от технологических колонн и внутреннего оборудования;
- устанавливают спускоподъемное оборудование, выполняют комплекс геофизических работ по уточнению параметров пласта и места его расположения в размываемой емкости;
- выполняют расчет необходимой массы заряда для обрушения пласта;
- выполняют шаблонирование и проверяют возможность доставки заряда в подпластовую полость размываемой емкости;
- опускают заряд в заполненную жидкостью подпластовую полость размываемой емкости и выполняют подрыв заряда;
- проверяют результат торпедирования с помощью метода ультразвуковой локации.

Разнообразие горно-геологических условий строительства и технических возможностей предприятий обуславливает выбор той или иной из приведенных технологий. Решение о применении

выбранной технологии принимается в каждом конкретном случае Техническим советом предприятия и непосредственно исполнителями работ (специализированной геофизической партией, имеющей все необходимые средства: подъемники, геофизические приборы, взрывчатые вещества).

Средства защиты скважин от чрезмерных импульсных давлений.

Значительные нагрузки при взрыве могут привести к аварийному состоянию обсадных колонн скважин и при давлениях больших, чем предельно допустимые, необходимо применение средств защиты скважин, снижающих максимальное давление во взрывной волне до безопасного значения. Основными требованиями к средствам защиты являются: эффективность гашения взрывных волн, безотказность и безаварийность в работе, простота изготовления и использования.

В настоящее время применяют ряд способов гашения взрывных волн. Один из них – установка над зарядом цементных мостов и взрывных пакеров, трудоемкий и занимает значительное время (несколько суток). Кроме того, после производства взрывных работ необходимо выполнение работ по разбурированию мостов и пакеров, при этом довольно часто возникает загрязнение рабочего интервала.

До 50 раз способны снизить давление во взрывной волне локализаторы действия взрыва в виде съемных преград, действие которых обусловлено гашением ударных волн на пространстве с вакуумом и торможении гидропотока при дросселировании жидкости через отверстия в корпусе локализатора. Однако, наличие жесткого корпуса у таких локализаторов не исключает возможности заклинивания аппарата, а также удара по башмаку колонны.

Отмеченных недостатков лишены аппараты защиты с вакуумными баллонами. Конструктивно такие аппараты представляют собой песчано-цементные цилиндры, в которых размещены вакуумные баллоны. Наличие вакуумных баллонов способствует реализации двух механизмов гашения волн. Первый связан с уменьшением акустической жесткости среды и уменьшением энергии в проходящей по ней волне; второй основан на том, что под действием ударной волны при разрушении вакуумных баллонов происходит турбулизация потока и увеличение местного сопротивления гидропотоку. Применение локализаторов с вакуумными баллонами дает снижение амплитуды давления во взрывной волне до 10 раз. Следует отметить некоторую сложность изготовления таких локализаторов и технологии их установки, а

также засорение скважины в процессе эксплуатации [97].

Наиболее просты в изготовлении и надежны в работе локализаторы действия взрыва, изготовленные из резиновых оболочек, заполненных песком. Как показали результаты экспериментальных исследований в натуральных условиях, такой локализатор, устанавливаемый на расстоянии 1,0–1,5 м над торпедой, способен снизить давление в ударной волне в 1,5–2,0 раза [97]. Достоинством такого локализатора является изготовление из недефицитных материалов и простота применения. Крепятся такие локализаторы к геофизическому кабелю в двух точках: верхняя – жесткое крепление, препятствующее скольжению оболочки; нижняя – полужесткое крепление.

При необходимости устанавливается несколько локализаторов, которые в совокупности снижают максимальное давление во взрывной волне до безопасного значения.

Технологические особенности выполнения взрывных работ.

Перед началом работ по торпедированию необходимо: извлечь из скважины внутрискважинное оборудование и (в некоторых случаях) технологические колонны; установить на скважине спускоподъемное оборудование с запасом кабеля, достаточным для выполнения работ на всех глубинах; оборудовать зарядную мастерскую и район работ средствами оповещения и сигнализации; производитель работ должен ознакомиться с «Паспортом взрывных работ на скважине»; выполнить работы по согласованию отметок кабеля спускоподъемного механизма с отметками геолого-геофизического разреза скважины.

При торпедировании скважины с целью разуплотнения массива зеркало жидкости в скважине должно располагаться на глубине не менее 50–100 м от устья.

При ведении взрывных работ по разрушению нерастворимых пластов необходимо откачать жидкость над верхней частью пласта для обеспечения возможности его деформирования в сторону свободной поверхности.

После подготовки скважины к торпедированию перед выполнением зарядных и взрывных работ все высоковольтные линии в радиусе 300 м отключаются.

До и после проведения взрывных работ производятся геофизические исследования скважины: кавернометрия, электро- и радиоактивные каротажи, термометрия, ультразвуковая локация

(необходимость тех или иных наблюдений уточняется на месте).

При необходимости производятся гидродинамические исследования скважин до и после торпедирования.

После торпедирования систематически регистрируются параметры, определяющие эффективность взрывной обработки: концентрация рассола, расход растворителя, электроэнергии, других материальных и трудовых ресурсов.

Все взрывные работы должны производиться в полном соответствии с требованиями «Единых правил безопасности при взрывных работах», а также «Правил технической эксплуатации применяемого оборудования» и «Технической инструкции по прострелочно-взрывным работам в скважинах».

6.9.6. Промышленные исследования эффективности взрывных методов интенсификации строительства подземных хранилищ в каменных солях методом размыва

Интенсификация строительства подземных хранилищ в каменных солях в начальной стадии размыва. Ранее отмечалось, что существующая технология сооружения подземных хранилищ в массивах каменной соли методом размыва имеет существенный недостаток, обусловленный низкой концентрацией рассолов (редко превышающей 25–50 г/л) в первоначальной стадии размыва емкости. Это приводит к перерасходу растворителя (воды), увеличению энергозатрат и продолжительности строительного периода, и как правило, к ухудшению технико-экономических показателей строящегося объекта.

Согласно штатному регламенту размыва подземной емкости объемом 100 тыс. м³ при часовой подаче пресной воды 45,2 м³ концентрация соли в самом начале размыва должна быть на уровне 14 г/л, при этом удельный расход растворителя составляет 26,5 м³ на 1 м³ камеры. Предполагаемое время создания резервуара – 640 суток, из них чистое время работы скважины по размыву емкости – 599 суток. При этом необходимо через скважину прокачать 837,8 тыс. м³ пресной воды. Концентрации 180 г/л предполагается достигнуть в конце 1-го этапа размыва через 123 суток от начала размыва при объеме выработанного пространства в 5,0 тыс. м³, концентрация 235 г/л достигается в конце 2-го этапа через 273 суток при объеме камеры в 28,2 тыс. м³. Как видно, в течение 4-х месяцев размыва концентрация выдаваемых на поверхность рассолов не превышает

180 г/л, что значительно снижает эффективность размыва емкостей в первоначальный период строительства.

Рассмотрим опыт применения взрывного метода разуплотнения солей в условиях строительства подземной емкости объемом 100 тыс. м³.

Согласно геофизическим наблюдениям скважина встречается каменную соль на глубине 803 м и заглублена в нее на 237 м. Свойства солей, установленные по результатам испытания керна, характеризуются следующими показателями: прочность на одноосное сжатие $\sigma_0 = 164 \cdot 10^5$ Па, модуль Юнга $E = 3,13 \cdot 10^{10}$ Па, коэффициент Пуассона $\nu = 0,264$, сцепление $c = 48 \cdot 10^5$ Па, угол внутреннего трения $\varphi = 31^\circ$.

Конструкция скважины. По наносам и частично в пределах соляного массива скважина обсажена и зацементирована. До глубины 20,0 м скважина обсажена направлением диаметром 0,63 м, затем до глубины 278 м – кондуктором диаметром 0,426 м и, затем, до глубины 827 м, включая 24 м по соли, обсадными трубами диаметром 0,324 м из стали групп прочности *D* и *E* с толщиной стенок $9,5 \cdot 10^{-3}$ и $12,4 \cdot 10^{-3}$ м.

При цементировании использовался тампонажный портландцемент «для холодных скважин» Здолбуновского завода. По данным испытаний предел прочности цементного камня на изгиб составляет $27,4 \cdot 10^5$ Па.

Расчет параметров взрывных работ. Взаимодействие волновых процессов при взрыве принималось таким, чтобы обеспечивался вид напряженного состояния в обрабатываемом соляном массиве с показателем неравномерности нагружения ζ близким к 0,1. Масса заряда выбрана с учетом параметров выщелачиваемой емкости, геологических условий, конструктивных особенностей скважины и требуемой глубины h_m взрывной обработки прискважинной зоны, составляющей 7,5 м.

Анализ кавернограмм показал, что наиболее опасным по действию взрыва на обсадную колонну скважины является глубина 798 м, где толщина цементного камня составляет $45,5 \cdot 10^{-3}$ м.

Допустимое давление трубы на цементный камень P_0 (с учетом (6.24) и двухкратного увеличения прочности цементного кольца при ударно-волновых нагрузках) в опасном сечении обсадной колонны

равно $105,0 \cdot 10^5$ Па. Предельное давление P_n в основной колонне определяется из условия, при котором радиальное перемещение u наружной стенки трубы должно быть таким, как и внутренней поверхности цементного камня при давлении P_0 . Для цементного камня величина радиального перемещения согласно (6.25) составляет $u = 6,48 \cdot 10^{-5}$ м, при этом давление P_n в трубе, вызывающее такое смещение цементного камня, согласно (6.26), равно $105,42 \cdot 10^5$ Па.

Максимальное давление P_{\max} в рассматриваемой трубе, при котором она переходит в текучее состояние, составляет $195 \cdot 10^5$ Па (при отсутствии внешней нагрузки) [93]. Следовательно, при предельном давлении в опасном сечении колонны равном $P_n = 105,42 \cdot 10^5$ Па сохраняется целостность цементного камня и условий для разрушения основной колонны не возникает.

При начальном давлении продуктов детонации для взрывчатого вещества гексогена $P_0 = 1,57 \cdot 10^{10}$ Па с учетом горного давления в зоне взрыва граница распространения трещин разрыва r_p , определяющая внешнюю границу макроразрушений в породе, составляет $r_p = 13,43 r_3$.

Приняв для каменной соли значения коэффициентов $a = 1,17 \cdot 10^{-4}$ с/кг^{1/3} и $b = 2,192 \cdot 10^{-4}$ с/м [84] определяем, согласно (6.23), что при $r = h_n$ общая масса заряда в торпеде составляет 9,7 кг при радиусе заряда $r_3 = 0,11$ м.

Полагая, что для зарядов, массы которых отличаются не более, чем на порядок, соблюдается принцип геометрического подобия волновых процессов, принимаем

$$P_p = P_3 \left[\frac{r_3(p)}{r_3(\varepsilon)} \right]^\alpha,$$

где P_p и P_3 – давления от взрыва рабочего и эталонного (массой 5,0 кг) зарядов; $r_3(p)$ и $r_3(\varepsilon)$ – радиусы рабочего и эталонного зарядов ($r_3(\varepsilon) = 0,092$ м); α – показатель затухания, равный 0,13 [92].

Так как расстояние от очага взрыва до опасного сечения составляет 270 м, то расчетное давление в этом сечении от взрыва

заряда массой 9,7 кг составляет $P_p = 323 \cdot 10^5$ Па. Сравнивая P_p со значением максимального давления $P_{\max} = 195 \cdot 10^5$ Па, при котором труба переходит в текучее состояние, заключаем, что взрывание рабочего заряда массой 9,7 кг, без соответствующих средств защиты скважины от поражающего действия взрыва, недопустимо.

Средства защиты скважины. Значительные нагрузки при взрыве могут привести к аварийному состоянию обсадных колонн и при расчетном давлении в $323 \cdot 10^3$ Па в опасном сечении необходимо применение локализаторов действия взрыва, снижающих пиковое давление во взрывной волне до безопасного значения.

При торпедировании скважины применялись средства защиты в виде резиновых оболочек, заполненных песком. Количество защитных оболочек на одно торпедирование устанавливали с учетом выражения

$$\frac{323 \cdot 10^5}{105,42 \cdot 10^{-5}} = 3,06,$$

т. е. в опасном сечении колонны необходимо погасить давление во взрывной волне в 3,06 раза. С учетом этого, для обеспечения сохранности основной колонны при торпедировании скважины над зарядом устанавливали два локализатора.

Для создания в околоскважинной зоне взрывной обработки соляного массива неравномерного напряженного состояния, общий заряд делился на две равновеликие части (массой по 4,85 кг каждая) и взрывался в короткозамедленном режиме. С учетом свойств соляного массива, необходимого радиуса взрывной обработки h_n и необходимой величины неравномерности нагружения $\zeta = 0,1$ интервал замедления взрывания двух зарядов в торпедо рассчитывался согласно формуле [98]

$$\Delta t = 0,425 \left(a \sqrt[3]{Q} + b h_n \right),$$

где Q – масса равновеликих частей заряда.

С учетом принятых выше значений a и b при $h_n = 7,5$ м величина $\Delta t = 7,72 \cdot 10^{-4}$ с.

Интервал замедления при взрыве зарядов в торпедо обеспечивался отрезком детонирующего шнура, длина которого

определялась исходя из скорости детонации ДШ (6 500 м/с) и составляла 5,0 м. Для предотвращения прямой детонации детонирующий шнур наматывался на деревянный стержень с нарезанным углублением в виде спирали. Расстояние между витками принималось равным не менее 5 радиусов ДШ.

Для формирования заряда, доставки в заданный интервал обработки скважины и подрыва его в короткозамедленном режиме взрывчатое вещество (шашки гексогена) помещали в специальную оболочку – корпус торпеды. Две равновеликие части заряда разносились в торпедо на расстояние 1,0 м. В корпусе торпеды между двумя частями заряда также размещали деревянный стержень с детонирующим шнуром, обеспечивающим передачу детонации от одного заряда к другому.

Торпедирование скважины. Взрывные работы были проведены в интервале 1 048–1 068 м. Центр первой торпеды располагался на глубине 1 063 м, центр второй – 1 053 м. Каждый взрыв проводился при отдельной спуско-подъемной операции с помощью передвижной каротажной станции и бурового станка.

Перед началом размыва и после торпедирования скважина была проверена на герметичность. Проверка показала, что взрывные работы не оказали отрицательного воздействия на колонну.

Результаты торпедирования оценивались по концентрации рассола в технологическом процессе размыва емкости. Выполненный комплекс работ по созданию искусственной трещиноватости в околоскважинной части соляного массива обеспечил интенсификацию начальной стадии процесса размыва подземной емкости. Первоначальная концентрация рассола составляла 42,7 г/л с дальнейшим увеличением ее до 120 г/л в конце 1-го месяца, 190 г/л – в конце 2-го месяца и 250 г/л – под конец 3-го месяца размыва. Разуплотнение соляных отложений привело к интенсивному развитию полости, что позволило сократить время строительства объекта на 250 суток, снизить расход электроэнергии на 3,78 млн. кВт/час и технологической воды на 317,0 тыс. м³.

Таким образом, разуплотнение соляных пород в процессе торпедирования скважин является эффективной ресурсосберегающей технологией при строительстве подземных хранилищ в каменных солях. Разработанная технология с успехом может применяться на всех строящихся подземных хранилищах в каменных солях на стадиях гидроруба и первой–второй ступенях размыва емкостей.

Управление обрушением нерастворимых отложений. Рассмотрим опыт обрушения нерастворимых отложений при сооружении подземного хранилища на скважине, горно-геологические условия которой отличались наличием в области гидроруба крутопадающих нерастворимых отложений (угол падения 60–70°) [98]. На глубинах 973–983 м отмечался пласт ангидрита мощностью 2,5 м, на глубинах 962–967 м – засоленный аргиллит мощностью 2,0 м. Нерастворимые отложения имели следующие характеристики: ангидрит – $E = 1,32 \cdot 10^{10}$ Па; $\sigma_0 = 350 \cdot 10^5$ Па; $\rho = 2810$ кг/м³; $\nu = 0,26$; аргиллит – $E = 1,24 \cdot 10^{10}$ Па; $\sigma_0 = 320 \cdot 10^5$ Па; $\rho = 2540$ кг/м³; $\nu = 0,28$.

Конструкция скважины. До глубины 20 м скважина обсажена направлением диаметром 0,53 м, затем до глубины 250 м – кондуктором диаметром 0,426 м и до глубины 912,23 м (включая 22 м по соли) обсадными трубами марки «Д» диаметром 0,324 м при толщине стенки $1,2 \cdot 10^{-2}$ м. Все обсадные колонны зацементированы до устья. При цементировании применялся тампонажный цемент по ГОСТ 1581-78 Здолбуновского цементного завода. Прочность материала цементной рубашки обсадной колонны на сжатие не превышала 13 МПа. Цементный камень опрессован давлением 10 МПа. Скважина испытана на герметичность и показала положительный результат, несмотря на неравномерность толщины цементного камня согласно геофизическим исследованиям о качестве цементирования.

Растворение каменной соли было начато согласно штатному регламенту размыва. За чистое время размыва 136,2 сут. через скважину было прокачено 113 тыс. м³ пресной воды. При подаче пресной воды объемом 40 м³/час концентрация соли в выдаваемом рассоле не превышала 28...35 г/л. При этом был достигнут объем камеры 4 423,0 м³, после чего процесс размыва практически прекратился. При этом максимальный радиус обнажения нерастворимых отложений был равен 10,2 м, а максимальная глубина размывтой полости по центру пласта составляла 12,2 м. Отсутствие размыва поставило вопрос о поиске путей его интенсификации.

Учитывая наличие нерастворимых пластов, для интенсификации размыва было осуществлено торпедирование, позволившее наряду с разуплотнением соляного массива снизить прочность материала нерастворимых отложений до уровня, обеспечивающего их самообрушение.

По данным кавернометрии для сохранения герметичности и целостности основной колонны при взрывных работах наиболее опасным являлся интервал 870–890 м, где толщина цементного камня была минимальна и составляла $43 \cdot 10^{-3}$ м.

С учетом многослойности деформируемой среды (нерастворимая порода, цементный камень, труба) и допустимой интенсивности взрывной волны в наиболее опасном сечении обсадной колонны была определена масса предельно допустимого заряда, составляющая 8,6 кг.

Поскольку прочность пород на растяжение на порядок меньше, чем на сжатие, самообрушение пласта определяется величиной растягивающих напряжений σ_p . С учетом фактических размеров обнажения и параметров пласта величина σ_p должна быть не менее $8,8 \cdot 10^5$ Па. Сравнивая эту величину с фактической прочностью нерастворимых пластов на разрыв $\sigma_p = 35 \cdot 10^5$ Па, определяем характер и количество импульсных нагружений, приводящих к требуемому разуплотнению пласта и снижению его прочности до необходимого значения.

Экспериментальные исследования показали, что при достижении неравномерности динамического нагружения с показателем $\zeta = 0,1$, прочностные характеристики ангидритовых и аргиллитовых пород снижаются не менее, чем в два раза. С учетом этого для достижения условий самообрушения необходима двукратная взрывная обработка нерастворимых отложений с суперпозицией взрывных волн при показателе $\zeta \leq 0,1$.

Для торпедирования скважины использовались две торпеды с зарядом по 8,6 кг каждая. Заряд торпеды разделялся на две равновеликие части по 4,3 кг, короткозамедленный режим взрывания создавался отрезком детонирующего шнура, обеспечивающего интервал замедления $\Delta t = 4,5 \cdot 10^{-4}$ с между взрывами частей торпеды. Глубина размещения зарядов определялась их назначением: первый (нижний) взрыв рассчитывался на результат разуплотнения и разупрочнения нерастворимых отложений; второй – на частичное обрушение нерастворимых пластов и разуплотнение структуры соли в объеме, максимально доступном при обработке.

Взрывные работы осуществлялись в два этапа. Сначала опускалась первая (нижняя) торпеда в расчетный интервал обработки,

производился взрыв, затем следовали работы по доставке второй торпеды и ее подрыву. Поскольку необходимая масса заряда рассчитывалась из условия сохранения герметичности и целостности основной колонны и взрывные нагрузки в районе опасного сечения колонны не превосходили предельно допустимых значений, средства гашения взрывных волн для защиты скважины не применялись.

Результаты торпедирования оценивались по данным акустического каротажа и по изменению концентрации рассола. Анализ результатов каротажа показал, что свободный диаметр скважины в ангидритовой и аргиллитовой толщах увеличился до 1,0 м. При традиционных методах взрывных работ для разрушения нерастворимых пластов в такой области необходимо осуществить подрыв заряда массой 270 кг. Кроме того, при взрыве такого заряда необходимо было бы применять специальные средства защиты скважины от поражающего действия взрыва, что значительно усложнило бы технологию и стоимость взрывных работ.

После торпедирования скважины проведены геофизические исследования скважины на герметичность. Результаты показали, что взрывные работы не оказали отрицательного воздействия на колонну.

Наиболее важным результатом выполненных работ является изменение технологических характеристик процесса размыва хранилища. Увеличение свободного диаметра скважины после взрыва обеспечило свободную циркуляцию растворителя, концентрация выдаваемого рассола сразу увеличилась в 10 раз (до 250–310 г/л) и стала практически предельной, оставаясь на этом уровне в течение всего последующего периода размыва. За это время было подано 94,3 тыс. м³ растворителя, удельный расход которого снизился в 3,25 раза и составил 8,2 м³ на 1,0 м³ емкости.

Повторный акустический каротаж и данные ультразвуковой локации позволили установить, что нерастворимые отложения по мере их обнажения в процессе размыва самообрушились и на конец размыва емкости радиус зоны обрушения нерастворимых пластов достиг 10 м. Разуплотнение соляных отложений привело к интенсивному развитию полости в радиальном направлении, что положительно сказалось на размыве емкости и за пределами взрывной обработки.

В результате выполненных работ создались условия для промышленной эксплуатации хранилища, при этом чистое время размыва емкости сократилось на 100 суток. Кроме того, сэкономлено

1,4 млн. кВт/час электроэнергии, количество нерастворителя уменьшилось на 151,2 тыс. м³.

Технологические показатели размыва емкости объемом 100 тыс. м³ с применением предлагаемой технологии создания искусственной трещиноватости как в соляном массиве, так и в нерастворимых пропластках, по сравнению с традиционной технологией размыва емкости, приведены в табл. 6.6.

Таблица 6.6. Показатели размыва емкостей [85]

Показатели	Единица измерения	По традиционной технологии	С применением предлагаемой технологии
Общий объем камеры размыва в зоне действия взрыва	тыс. м ³	–	17,2
Фактическая подача растворителя	м ³ /час	61,7–64,5	33,3–38,9
Концентрация рассола	г/л	74,2–129,8	197,5–275,0
Скорость размыва	м ³ /час	2,1–3,5	5,5–7,5
Продолжительность размыва	сут.	666	461
Сокращение чистого времени размыва	сут.	–	205
Расход растворителя	м ³	487 000	170 000
Экономия растворителя	м ³	–	317 000
Экономия электроэнергии	млн. кВт/час	–	3,78

Таким образом, в результате внедрения взрывных методов интенсификации строительства подземных хранилищ в каменных солях методом размыва установлено:

1. Взрывные методы направленного изменения свойств массива на основе создания искусственной трещиноватости могут быть широко и эффективно использованы для интенсификации геотехнологических процессов в различных областях горного дела и строительства.

2. При сооружении подземных хранилищ в каменных солях до начала выполнения работ по размыву емкости в области гидровруба и частично 1-й ступени размыва целесообразно выполнение взрывных работ, направленных на предварительное разуплотнение структуры соли в призабойной зоне скважины. Это позволяет резко увеличить эффективность обменных процессов и в 3–4 раза увеличить скорость размыва емкости в наиболее трудоемкой начальной стадии размыва.

3. В сложных горно-геологических условиях строительства

емкостей при наличии в зоне проектного контура хранилища нерастворимых отложений, снижающих эффективность размыва, производство взрывных работ по разупрочнению нерастворимых пластов создает условия для самообрушения нерастворимых отложений, что обеспечивает увеличение концентрации выдаваемого рассола до 10 раз и способствует интенсивному развитию размываемой полости.

4. При появлении в зоне размыва хранилищ обнаженных нерастворимых пластов, препятствующих размыву емкостей в штатном режиме, необходимо выполнение взрывных работ по разрушению пластов, что позволяет увеличить эффективность размыва хранилищ и в итоге получать камеры проектных объемов.

5. Отличаясь простотой практической реализации, применение взрывных методов интенсификации строительства подземных хранилищ в каменных солях в сложных горно-геологических условиях, основанных на разупрочнении и разуплотнении структуры солей и сопутствующих нерастворимых отложений, дает сокращение сроков строительства, снижение расходов материалов, экономию электроэнергии, что способствует повышению технико-экономических показателей строящихся хранилищ.

6.10. Технологические схемы и режимы эксплуатации подземных хранилищ, образованных в каменных солях методом размыва

Технологические схемы и режимы эксплуатации подземных хранилищ обуславливаются их назначением (регулирование сезонной и суточной неравномерности подачи и потребления продукта, обеспечение надежной эксплуатации транспортно-распределительных систем и т. п.), а также физико-механическими свойствами хранимого продукта и его агрегатным состоянием. При эксплуатации подземных хранилищ процесс хранения включает 3 основных этапа: заполнение емкости, хранение продукта, отбор или опорожнение емкости.

6.10.1. Эксплуатация подземных хранилищ газообразных продуктов

Для закачки газообразных продуктов в подземные емкости используют поршневые компрессорные машины, так как необходимо компримировать газообразные продукты до сравнительно высокого

давления. Отбирают газообразные продукты из подземной емкости двумя способами: при постоянном давлении газа в емкости путем замещения его раствором (насыщенным рассолом), хранящимся в специальном рассолохранилище; при переменном давлении газа в емкости, когда отбор происходит путем создания избыточного давления самого газа. Опыт показал, что второй способ находит более широкое применение из-за высокой экономичности и относительной простоты. Технологическая схема эксплуатации подземного хранилища природного газа в отложениях каменной соли с применением компрессорного способа представлена на рис. 6.27.

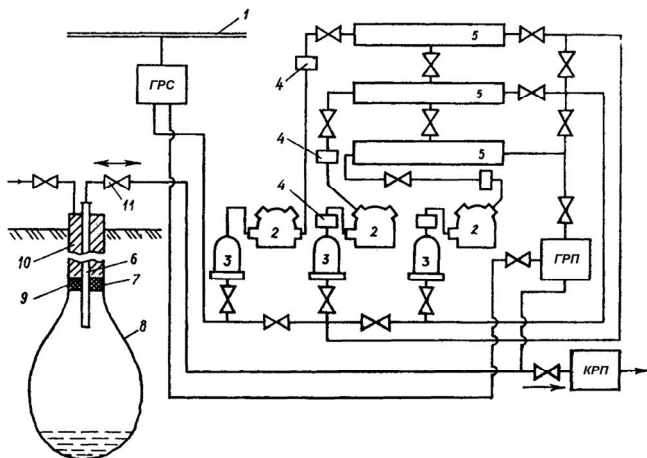


Рис. 6.27. Технологическая схема эксплуатации подземного хранилища газа с применением компрессорного способа [99]

Природный газ в период минимального потребления (весенне-летний период) отбирается из магистрального газопровода 1 и подается в компрессорные станции 2 подземного хранилища, где компримируется до давления, необходимого для закачки газа в подземную емкость, при этом газ проходит очистку от механических примесей, конденсата 3 и масла 4, затем после охлаждения 5 по технологическим трубопроводам и по подвесной колонне труб 6, опущенной в скважину, подается в подземную емкость 8.

При отборе газа из подземной емкости открывается задвижка на оголовке 11. Газ под действием избыточного давления поступает на поверхность и подается по технологическим трубопроводам на пункт

редуцирования, где давление снижается до необходимого для дальнейшего транспортирования газа потребителям.

Подземная емкость 8 соединяется с наземными сооружениями посредством скважины диаметром 150–300 мм, закрепленной обсадной колонной 7. Для эксплуатации емкости скважина оснащается подвесной колонной труб 6. С целью герметизации межтрубного пространства и недопущения утечек из емкости хранимого продукта в пространство между обсадной и подвесной колоннами устанавливается пакер 9. В ряде случаев для повышения надежности эксплуатации скважины межтрубное пространство над пакером заполняется буферной жидкостью 10. На устье скважина герметизируется запорной арматурой 11.

При хранении жидких углеводородных газов в подземных хранилищах наибольшее распространение нашла рассольная схема эксплуатации, основанная на вытеснении хранимого продукта из подземной емкости на поверхность, закачиваемым насыщенным рассолом.

К основным преимуществам такой схемы относятся: нейтральность насыщенного рассола по отношению к стенкам хранилища и хранимому продукту; повышенная эффективность отбора продукта за счет того, что плотность рассола примерно в два раза выше плотности хранимых продуктов; отсутствие больших и малых «дыханий» хранимого продукта. Недостатками являются дополнительные затраты на: создание специальных рассолохранилищ для хранения оперативного запаса рассола; поддержание заданной концентрации рассола, герметичности стенок и днища рассолохранилища.

Принципиальная технологическая схема эксплуатации подземного хранилища сжиженных газов в каменной соли по рассольной схеме представлена на рис. 6.28.

Заполнение емкости сжиженным газом происходит из цистерны 1; возможно также поступление сжиженного газа по магистральному трубопроводу или водным транспортом. Далее сжиженный газ подается насосами 2 в наземные буферные резервуары 3, затем насосами высокого давления 4 (под давлением, достаточным для вытеснения рассола из подземной емкости) по межтрубью скважины в верхнюю часть емкости 5. Рассол по внутренней колонне вытесняется в наземное рассолохранилище 6.

Использование буферных наземных резервуаров приводит к

значительному снижению энергозатрат. Особенно это ощутимо при закачке сжиженного газа насосами производительностью $200 \text{ м}^3/\text{ч}$ в емкости, расположенные на глубинах более 400 м.

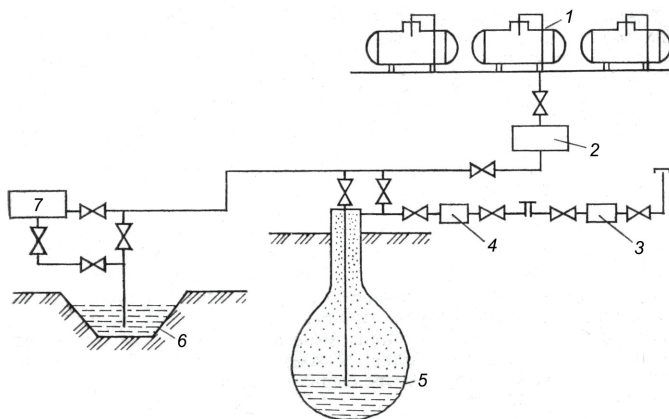


Рис. 6.28. Технологическая схема эксплуатации подземного хранилища газа по рассольной схеме [99]

Отбор сжиженного газа осуществляется вытеснением его рассолом, подаваемым из рассолохранилища **б** специальным рассольным насосом **7** в центральную рассольную колонну. Сжиженный газ по межтрубью поступает на поверхность под избыточным давлением, необходимым для его дальнейшей транспортировки по технологическим трубопроводам.

Наземное рассолохранилище представляет собой естественную или искусственно созданную выемку в грунте, покрытую противофильтрационными экранами, предотвращающими утечки рассола в подстилающие породы.

Для предотвращения утечек и фильтрации рассолов в грунт применяют специальные герметизирующие покрытия (экраны): пленки, полимеры из материалов, созданных на основе синтетических каучуков. Откосы рассолохранилищ защищают от разрушения сборными железобетонными, асфальтобетонными или бетонными плитами.

Изменение концентрации рассола при хранении в наземном рассолохранилище может происходить под действием атмосферных осадков и погодных условий. Разбавленный насыщенный рассол

является причиной неуправляемого доразмыва подземной емкости в процессе ее эксплуатации, а перенасыщение рассола при его нагреве приводит к выпадению соли в технологических трубопроводах, повышению плотности рассола и, тем самым, к увеличению затрат энергии на его вытеснение.

В процессе эксплуатации подземных емкостей, созданных в каменной соли, их объем можно увеличить путем дорастворения стенок емкости при выдавливании продукта ненасыщенным рассолом или пресной водой.

Кроме наиболее распространенной рассольной схемы эксплуатации, могут применяться и так называемые безрассольные способы. К ним относятся:

- вытеснение хранимого продукта газообразными агентами;
- отбор продукта из подземных хранилищ погружными электроцентробежными насосами, размещенными в буровых скважинах;
- отбор продукта струйными аппаратами (эжекторами);
- использование термогазлифта.

Основными преимуществами безрассольных схем эксплуатации являются: уменьшение затрат на строительство комплексов подземных хранилищ; возможность извлечения остатков хранимого продукта; простота осуществления режимов отбора и закачки продукта; отсутствие опасности неуправляемого доразмыва емкостей.

Основной недостаток безрассольной схемы эксплуатации подземных хранилищ вытеснением хранимого жидкого продукта газообразным агентом состоит в диффузионном растворении газа в хранимом жидком продукте, что может привести к изменению его товарных свойств. Как показал опыт эксплуатации, после года постоянного контакта наблюдается появление метана в сжиженной пропан-бутановой смеси. Поэтому основным показателем, характеризующим возможность применения такой схемы, является оценка степени влияния газообразного агента на качество хранимого продукта. К настоящему времени данная схема эксплуатации используется лишь для подземных хранилищ таких продуктов, которые в дальнейшем применяются в качестве сырья на нефте- и газоперерабатывающих заводах.

Исследования показали, что безрассольные схемы эксплуатации подземных хранилищ с использованием струйных аппаратов и термогазлифта при определенных условиях могут дать некоторую

экономии затрат по сравнению с рассольной и безрассольной схемами с вытеснением продукта газообразным агентом.

С целью снижения капиталовложений и эксплуатационных издержек могут быть использованы комбинированные способы эксплуатации подземных хранилищ сжиженных газов, включающие элементы как рассольных, так и безрассольных схем.

6.10.2. Эксплуатация подземных хранилищ нефтепродуктов

Существуют различные схемы эксплуатации подземных хранилищ нефтепродуктов по рассольной системе с компоновкой насосами различного давления: нефтепродукт перекачивается по трубопроводу в буферный резервуар, а оттуда насосами высокого давления – в подземные резервуары; одновременная подача дизельного топлива и бензина по самостоятельным линиям непосредственно на всасывающую линию насосов высокого давления; из подземных резервуаров нефтепродукты с помощью рассольных насосов откачивают в буферные резервуары, а из них с помощью насосов низкого давления – в железнодорожные цистерны; при поступлении по железной дороге нефтепродукты с помощью насосов низкого давления закачивают в буферные резервуары, а оттуда с помощью насосов высокого давления – в подземные емкости. Технологическая схема подземного хранилища нефтепродуктов приведена на рис. 6.29.

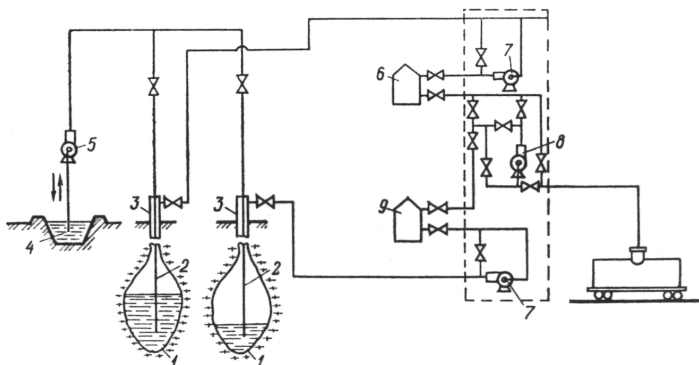


Рис. 6.29. Технологическая схема подземного хранилища нефтепродуктов [99]:

1 – подземная емкость; 2 – рассольная колонна; 3 – скважина; 4 – рассолохранилище; 5 – насос для рассола; 6 – буферный резервуар для дизельного топлива; 7, 8 – насосы высокого и низкого давления, соответственно; 9 – буферный резервуар для бензина

Для различных глубин заложения подземных хранилищ в солях могут быть рекомендованы насосы с характеристиками, приведенными в табл. 6.7.

Таблица 6.7. Характеристика насосов для перекачки светлых нефтепродуктов [99]

Марка насоса	Подача, м ³ /ч	Напор, м
НПС 65/35-500	65	500
НПС 200-700	200	700
НПС 120/65-750	65	75

Количество закачанного и отобранного продукта определяется преимущественно по расходомерам или счетчикам.

При эксплуатации подземных хранилищ по рассольной схеме может произойти выброс хранимых продуктов. Причиной выброса могут быть: обрыв рассольной колонны во время закачивания или отбора продукта, разрушение резервуара вследствие воздействия сейсмических нагрузок или взрыва, переполнение подземного резервуара при закачивании продукта. В этих случаях столб рассола в скважине замещается столбом продукта, происходит изменение давления в резервуаре, выброс из подземной емкости некоторой массы продукта. При выбросе происходит расширение продукта и рассола и уменьшение объема резервуара за счет проявления упругих свойств массива каменной соли.

Для обеспечения нормальной эксплуатации скважин подземных резервуаров и предупреждения возможного аварийного фонтанирования скважины оснащаются предохранительным оборудованием. Выброс можно предотвратить установкой специальной запорной арматуры для автоматического перекрытия сечения технологических трубопроводов и передачи рассола в резервуар и из него (рис. 6.30).

Запорная арматура срабатывает от специального устройства, реагирующего на перепад давления в трубопроводе при значительном изменении скорости потока. При переполнении резервуара продукт попадает в рабочую колонну и, будучи легче рассола, начинает подниматься к устью скважины. Давление столба смеси рассол – продукт уменьшается на величину изменения уровня хранимого в резервуаре продукта, в результате чего с увеличением объема происходит его расширение, что способствует более интенсивному

перемещению продукта в рассолопроводе и вызывает увеличение расхода рассола на поверхности в трубопроводе.

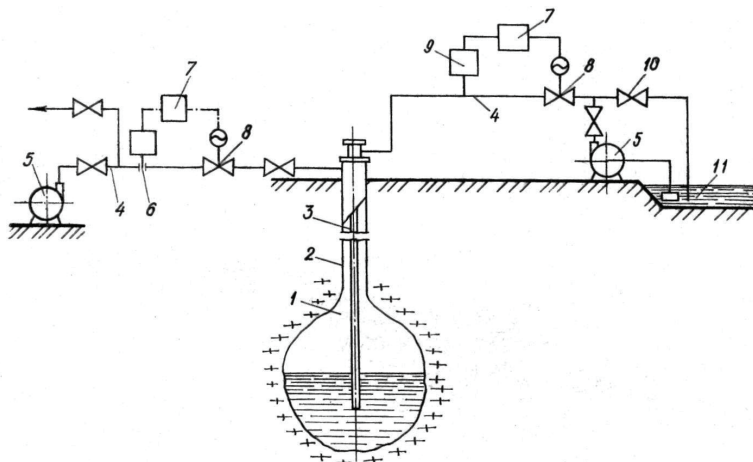


Рис. 6.30. Схема обустройства оголовка скважины для предотвращения выброса продукта из подземного резервуара [99]:

1 – подземный резервуар; 2, 3 – обсадная и рабочая колонны; 4 – технологические трубопроводы; 5 – насосы; 6 – диафрагма; 7 – регуляторы; 8 – задвижки с электроприводом; 9 – датчик сигнала; 10 – задвижка; 11 – рассолохранилище

Поскольку количество продукта в колонне с течением времени возрастает, то описанные процессы становятся более выраженными до того момента, когда расход потока в трубопроводе не достигнет максимального значения. В этом случае давление в трубопроводе у головки резервуара увеличится, что воспринимается чувствительным элементом датчика сигнала. При этом величина сигнала пропорциональна величине давления столба смеси. При достижении заданного давления сигнал от датчика поступает к регулятору, который закрывает задвижку с электроприводом, предотвращая тем самым выброс продукта на поверхность. После срабатывания задвижки продукт перестает подниматься в рассольной колонне. Он занимает 30–70 % ее высоты (оптимально – 50...65 %).

Раздел 7

ПОДЗЕМНЫЕ ХРАНИЛИЩА УГЛЕВОДОРОДОВ ШАХТНОГО ТИПА

Подземные хранилища шахтного типа получили широкое распространение в мировой практике строительства подземных газонефтехранилищ. Как правило, они сооружаются в различных устойчивых непроницаемых породах, а также в проницаемых породах с искусственной герметизацией стенок емкостей. Под хранилища переоборудуются отработанные выработки шахт и рудников; шахтные емкости используются для хранения большинства углеводородных топлив и сырья. Капитальные затраты на строительство подземных шахтных хранилищ снижаются в 1,5–2,5 раза, а эксплуатационные расходы – в три раза и более по сравнению с расходами по созданию наземных складов.

7.1. Конструктивные схемы подземных хранилищ шахтного типа

Подземные хранилища, создаваемые шахтным способом, представляют собой комплекс горных выработок и сооружений. В состав комплекса входят следующие элементы: подземные выработки-емкости для хранения углеводородов, вскрывающие выработки, выработки вспомогательного назначения, наземные сооружения, технологическое оборудование (рис. 7.1).

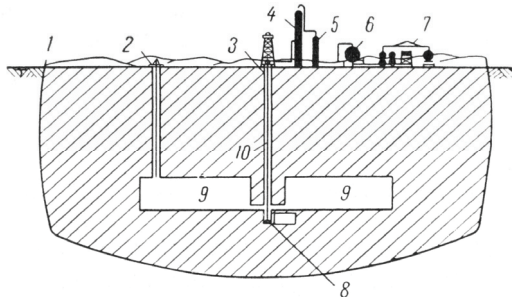


Рис. 7.1. Схема подземного шахтного хранилища сжиженного газа [56]

1 – поверхность; 2 – трубопровод для закачки продукта; 3 – шахтный ствол; 4 – колонна для фракционирования; 5 – дегидратор; 6 – промежуточная емкость; 7 – наливная эстакада; 8 – насос; 9 – подземная емкость; 10 – трубопровод для выдачи продукта

Выработки-емкости представляют собой отдельные тоннели или камеры, отходящие от магистральных выработок, или систему горизонтальных взаимосвязанных выработок в зависимости от емкости хранилища и устойчивости пород, поперечное сечение выработок-емкостей имеет круглую, сводчатую и трапецеидальную форму.

Под вскрывающими выработками понимают вертикальные или наклонные стволы, связанные с горизонтальными выработками – штольнями. Вскрывающие выработки предназначены для соединения выработок-резервуаров с поверхностью, размещения трубопроводов и эксплуатационного оборудования. В зависимости от горно-геологических условий вскрывающие выработки бывают вертикальными, горизонтальными и наклонными.

К выработкам вспомогательного назначения относятся околоствольные (коллекторные) и подводящие выработки, камеры подземных насосных станций и эксплуатационные скважины. Форма поперечного сечения коллекторных выработок принимается в зависимости от горно-геологических условий по аналогии с типовыми сечениями откаточных горных выработок.

Подводящие выработки служат для сообщения коллекторных выработок с выработками-емкостями и размещения герметичных перемычек. Размеры поперечного сечения подводящих выработок принимаются минимальными по условиям проведения горнопроходческих работ, а также из соображений уменьшения размеров герметичных перемычек и упрощения работ при их возведении. Эксплуатационные скважины проходятся обычно роторным бурением с применением шарошечных долот диаметром до 500 мм.

Наземные сооружения шахтных хранилищ отличаются от аналогичных производственных комплексов наземных баз наличием приточно-вытяжных вентиляционных систем.

К технологическому оборудованию хранилищ относятся приемные и расходные трубопроводы, насосы, буферные наземные резервуары, измерительные устройства количества продукта, установки по подготовке продукта к хранению.

Геологические и горно-геологические условия, а также действующие технологические нормы обуславливают необходимость разработки различных схем и методов сооружения подземных хранилищ шахтного типа.

По схеме вскрытия шахтные газонефтехранилища подразделяются на хранилища с вертикальным стволом, наклонной вскрывающей выработкой и штольной (горизонтальной выработкой) (рис. 7.2).

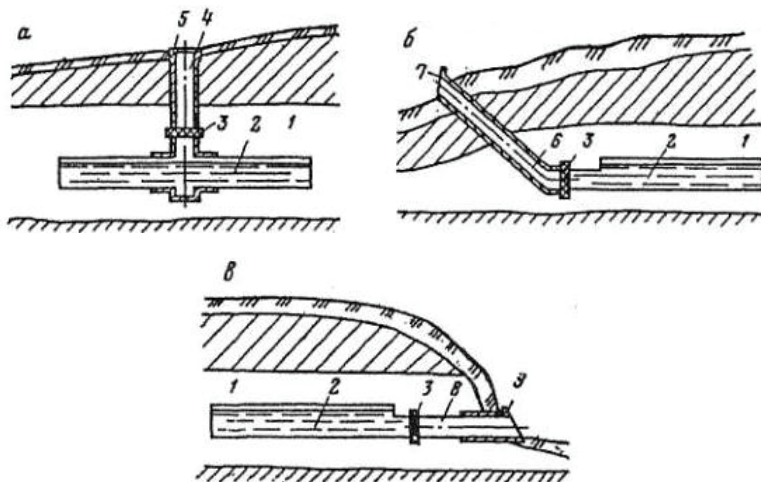


Рис. 7.2. Схемы шахтных хранилищ с вертикальной (а), наклонной (б) и горизонтальной (в) вскрывающими выработками [140]:

- 1 – толща непроницаемых пород; 2 – выработка-емкость; 3 – герметичная перемычка; 4 – вертикальная вскрывающая выработка; 5 – оголовок; 6 – наклонная вскрывающая выработка; 7 – устье; 8 – горизонтальная вскрывающая выработка; 9 – портал

Выбор того или иного способа вскрытия осуществляется в зависимости от расположения рабочей толщи пород (глубины залегания и выхода на поверхность) и рельефа местности.

В зависимости от объема хранилища, количества одновременно хранимых продуктов и условий проведения горнопроходческих работ в практике строительства применяются три основные схемы: хранилища камерного типа с замкнутой системой выработок-емкостей; хранилища камерного типа с обособленными выработками-емкостями; хранилища ячеистого типа [9].

Хранилища камерного типа с замкнутой системой выработок-емкостей предназначены для хранения как одного, так и нескольких видов продуктов при общем объеме емкостей более 50 тыс. м³ (рис. 7.3).

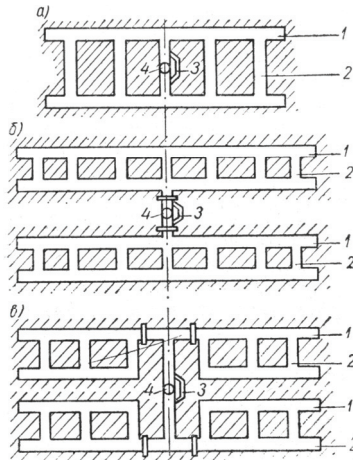


Рис. 7.3. Схемы шахтных газонефтехранилищ камерного типа с замкнутой системой выработок-емкостей для одного (а), двух (б) и четырех (в) видов продуктов [11]:

1 – выработки-емкости; 2 – сбойки между выработками-емкостями; 3 – обходная выработка; 4 – вскрывающая выработка

Хранилища камерного типа с обособленными выработками-емкостями используются для хранения одного или нескольких видов продуктов при общем объеме емкостей до 50 тыс. м³. Хранилища ячеистого типа могут быть любого объема, они рассчитаны только на один продукт. Кровля выработок таких хранилищ поддерживается целиками, размеры которых составляют в плане 10×10 или 15×15 м. Емкость имеет форму прямоугольника или квадрата (рис. 7.4).

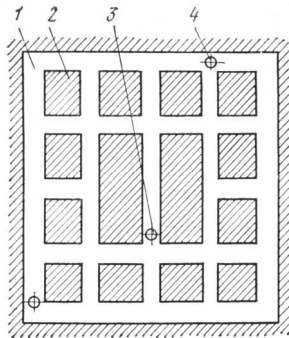


Рис. 7.4. Схема шахтного газонефтехранилища ячеистого типа [29]:

1 – выработки-емкости; 2 – породный целик; 3 – вскрывающая выработка (ствол); 4 – вентиляционная скважина

Ствол располагается в центре, герметизирующая перемычка устраивается в стволе. Иногда кровля между целиками крепится анкерной крепью.

Наряду с хранилищами, расположенными в горизонтальных выработках-емкостях, используются и вертикальные выработки. Такие хранилища могут сооружаться и в проницаемых горных породах. В качестве примера можно привести вертикальные емкости, созданные в бывшем СССР и других странах [100]. Они закрепляются монолитной железобетонной крепью (рис. 7.5).

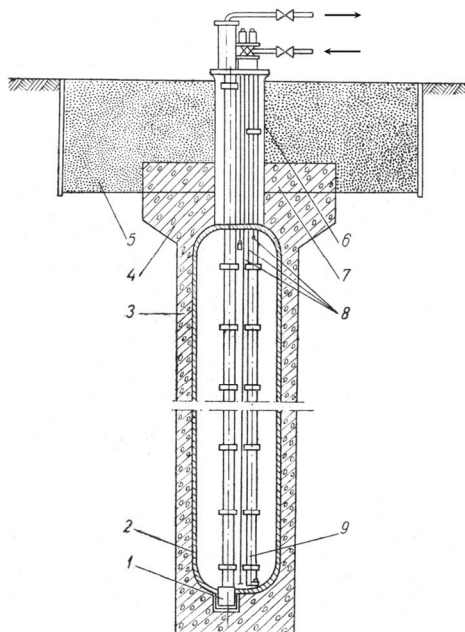


Рис. 7.5. Схема подземной емкости вертикального типа [11]:

- 1 – насос для отбора газа; 2 – металлическая облицовка; 3 – железобетонная крепь;
4 – железобетонный воротник; 5 – грунтовая засыпка; 6 – горловина; 7 – перекрытие;
8 – мерные трубы; 9 – трубопровод для закачки газа

Вместимость вертикальных емкостей составляет 1 000–1 200 м³ при диаметре 6 м и глубине заложения днища 45 м. Для емкостей предусматриваются железобетонные перекрытия, размещаемые примерно на 5 м ниже поверхности земли. Над перекрытием

выполняется грунтовая засыпка до нулевой отметки. При строительстве вертикальных емкостей для обеспечения герметизации применяют также металлическое крепление стен.

Экономическая эффективность создания подземных газонефтехранилищ в непроницаемых устойчивых породах значительно возрастает, если в качестве емкостей используются горные выработки отработанных шахт и рудников. Причем при сооружении хранилищ шахтного типа возможно применение как всего комплекса горных выработок, так и их части.

Как правило, в качестве выработок-емкостей используются горизонтальные выработки камерного типа. Выработки-емкости в устойчивых породах проектируются как без крепи, так и с применением анкерной крепи. В ряде случаев применяется набрызг-бетонная крепь.

7.2. Выбор основных параметров подземных хранилищ

Надежная эксплуатация подземных хранилищ зависит от правильного выбора технологических параметров их строительства, к которым относятся: глубина заложения, минимальная мощность вмещающих пород, площадь поперечного сечения выработок, допустимое давление в хранилище, обеспечение прочности и герметичности подземных емкостей.

Глубина заложения подземного хранилища. Глубина заложения подземного хранилища шахтного типа определяется, в первую очередь, наличием достаточно мощного пласта непроницаемой горной породы и вида хранимого продукта (нефть, нефтепродукты, сжиженные газы). Затраты на строительство и эксплуатацию шахтных хранилищ прямо пропорциональны глубине их заложения.

Минимальная глубина заложения емкостей принимается из расчета максимального рабочего давления 0,1 МПа, уравновешенного давлением толщи пород над емкостью мощностью не менее 6,0 м.

Глубина заложения емкостей подземных хранилищ светлых нефтепродуктов определяется из условия максимально возможного приближения их к земной поверхности. Так, на глубине 20,0 м для таких емкостей избыточное давление может быть около 0,3 МПа, что обеспечит условия хранения без потерь от испарения.

Экономически целесообразна глубина заложения емкостей в газонепроницаемых породах для хранилищ нефтепродуктов 20–40 м [101].

Для хранилищ сжиженных газов глубина заложения кровли емкостей шахтных хранилищ (H) определяется в зависимости от средней плотности покрывающих пород и максимального давления газа в хранилище

$$H > K_3 \frac{P_{вн}}{\gamma_{ср}}, \quad (7.1)$$

где K_3 – коэффициент запаса прочности покрывающих пород (обычно 1,2–1,5); $P_{вн}$ – максимально возможное давление сжиженного газа внутри емкости, МПа; $\gamma_{ср}$ – средневзвешенный удельный вес покрывающих пород, Н/м³

$$\gamma_{ср} = \frac{\sum(H\gamma)}{\sum H} = \frac{H_1\gamma_1 + H_2\gamma_2 + H_2\gamma_2 + \dots + H_n\gamma_n}{H_1 + H_2 + \dots + H_n} \quad (7.2)$$

где $H_1, H_2 \dots H_n$ – мощность отдельных пластов, слагающих покрывающую толщу пород; $\gamma_1, \gamma_2 \dots \gamma_n$ – удельный вес этих пластов.

Минимальная глубина заложения подземных емкостей также зависит от вида углеводородных газов и должна составлять для пропана не менее 100 м, для бутана – не менее 80 м.

Практически глубина заложения емкости определяется горно-геологическими условиями и соответствующими свойствами горных пород.

Мощность горных пород. Минимальная мощность вмещающих горных пород для размещения выработок-емкостей определяется из условия (рис. 7.6)

$$M \geq h + m_{кр} + m_n + \Delta h, \quad (7.3)$$

где h – высота выработки; $m_{кр}$ и m_n – минимальная мощность непроницаемых пород, соответственно, в кровле и почве выработки-емкости; $m_{кр}$ и m_n должны быть не менее 5 м каждая; Δh – превышение отметок почвы выработки-емкости, м,

$$\Delta h = L \cdot i, \quad (7.4)$$

где L – длина выработки-емкости, м; i – уклон выработки.

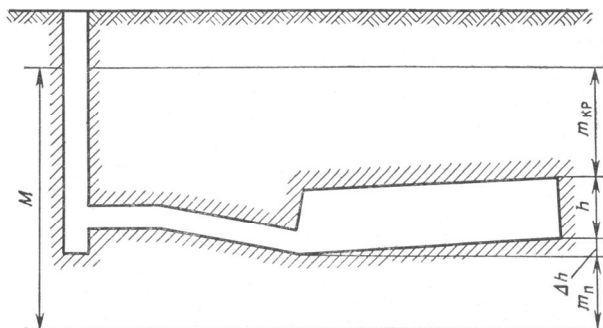


Рис. 7.6. Схема для расчета минимальной мощности вмещающих пород [55]

Размеры подземных хранилищ. Шахтные хранилища представляют собой систему взаимосвязанных горных выработок: горизонтальных, наклонных, вертикальных.

В практике строительства хранилищ выработки-емкости в толще непроницаемых, устойчивых горных пород имеют площадь поперечного сечения до 100 м^2 и более.

Выработки-емкости в устойчивых породах сооружаются поперечным сечением $6,0 \times 5,8$; $6,0 \times 4,5$; $10,5 \times 7,5$; $7,5 \times 4,5$; $9,0 \times 4,5$; $13,0 \times 6,0$ (первая цифра – высота, вторая – ширина выработки). Практически в зависимости от породы высота выработок-емкостей составляет: для гипса – 7,0 м; ангидрита – 8–10 м; гранита – 15 м.

Важным параметром хранилища является его форма выработки. Наиболее устойчивыми выработками в глинистых сланцах являются выработки арочной или конусообразной формы, высота которых превышает ширину в 1,5–2,0 раза. Такая форма поперечного сечения выработок позволяет вести работы с применением анкерной крепи, что в значительной степени снижает стоимость строительства. В породах средней устойчивости поперечное сечение выработок уменьшается и камерам придается форма, сводящая к минимуму необходимость крепления.

В многокамерных подземных хранилищах между выработками-емкостями оставляются предохранительные целики. Их ширина зависит от крепости пород и может быть в 2–3 раза больше ширины выработки.

Подготовительные и вспомогательные выработки обычно имеют поперечное сечение $4,0\text{--}8,0 \text{ м}^2$.

Вертикальные выработки (стволы) подземных хранилищ обычно круглого сечения, диаметром 4–6 м. При определении размеров поперечного сечения вертикальных стволов учитывают габариты и расположение емкостей, зазоры между ними и крепью.

В ряде стран выработки-емкости имеют значительные поперечное сечение и длину. Так, в Австралии параметры выработок-емкостей составляют: сечение 14×11 , длина от 230 до 700 м, Норвегии – сечение 18×33 , длина – до 500 м, Финляндии – сечение 20×30 , длина до 850 м.

7.3. Выбор формы и оценка прочности горизонтальных выработок-емкостей подземных хранилищ

Надежность эксплуатации подземных хранилищ зависит от прочности и герметичности незакрепленных выработок-емкостей, определения их оптимальных размеров. При решении этих вопросов существенное значение имеют данные, характеризующие состояние пород (проницаемость, напряжение) в глубине массива и в окрестностях выработки.

Еще в 80-е годы XX столетия наметилось новое направление в исследовании распределения напряжения вокруг подземных выработок, при котором оценка напряженного состояния, или устойчивости горного массива, производится по результатам изучения фильтрационных свойств – проницаемости пород. Так, А.М. Фридлянд [102], наблюдая за сплошностью пород, окружающих выработки, нагнетал в шпурсы сжатый воздух и производил оценку фильтрационных свойств пород на различном расстоянии от обнажения по падению давления в специальном сосуде. Р.П. Коротков в основу методики определения напряженного состояния массива угля положил функциональную зависимость между напряжением в массиве и его проницаемостью [103]. В работе [38] приведены результаты исследований распределения напряжений в массиве в четырех сечениях незакрепленной выработки-емкости прямоугольной формы шириной 5,0 и высотой 2,5 м. Установлено, что наиболее опасным местом в сечении выработок является их кровля, где могут возникать максимальные растягивающие напряжения.

Методика определения проницаемости пород рабочей толщи в массиве рассмотрена в работе [104]. В основу изучения напряженного состояния в окрестностях выработок-емкостей положена

функциональная зависимость между горным давлением и проницаемостью массива как пористой среды

$$K = f(\sigma), \quad (7.5)$$

где K – проницаемость пород в заданной точке; σ – нагрузка (горное давление), вызывающая напряженное состояние пород.

Связь между проницаемостью и нагрузкой на пласт может быть выражена эмпирическим уравнением [105]

$$K = K_0 \cdot e^{c \cdot p}, \quad (7.6)$$

где K_0 – проницаемость разгруженных от давления пород; c – константа, характеризующая породу; p – нагрузка, обуславливающая напряженное состояние пород.

Напряжение σ_y в любой заданной точке массива определяется из выражения

$$\sigma_y = \rho_{cp} \cdot g \cdot H \frac{\ln K_0 / K_n}{\ln K_0 / K_m}, \quad (7.7)$$

где ρ_{cp} – средневзвешенная плотность покрывающей толщи пород; H – мощность покрывающей толщи пород; K_n – проницаемость пород при напряжении; K_m – проницаемость пород в заданной точке массива K (определяется непосредственно в массиве); K_0 – определяется в лабораторных условиях.

Большой вклад в разработку методики расчета устойчивого пролета незакрепленной выработки внесли В.Д. Слесарев и Г.Н. Кузнецов. По гипотезе В.Д. Слесарева, основанной на теории балок, устойчивый пролет L одиночной горизонтальной выработки значительной длины определяется по формуле

$$L = A \sqrt{\frac{R_p \cdot h}{\gamma}}, \quad (7.8)$$

где R_p – предел прочности пород при растяжении; h – мощность слоя кровли; γ – удельный вес пород; A – коэффициент, характеризующий степень закрепления кровли на опорах и степень деформации пород. Развивая гипотезу балок, Г.Н. Кузнецов предложил для вычисления величины устойчивого пролета использовать коэффициент пригрузки.

Позднее В.Н. Козак, К.П. Молчанова, анализируя существующие методы расчета, с учетом влияния на устойчивость пролета угла падения пород, времени эксплуатации выработки-емкости, характера заземления пролета на опорах предложили расчетную формулу

$$l = K_a K_t \sqrt{A \frac{\sigma_{u3z} \cdot h_0}{(1 + K_n) \gamma}}, \quad (7.9)$$

где l – пролет; K_a – коэффициент, учитывающий изменение устойчивости пролета в зависимости от изменения угла падения слоев пород; K_t – коэффициент, учитывающий устойчивость пролета во времени; A – коэффициент, учитывающий характер заземления пролета на опорах и степень деформаций пород; σ_{u3z} – предельное сопротивление породы на изгиб несущего слоя; h_0 – мощность несущего слоя; γ – удельный вес пород несущего слоя; K_n – коэффициент пригрузки со стороны вышележащей толщи горных пород.

В работе [106] выбор устойчивых форм и размеров незакрепленных выработок-емкостей осуществлялся по методу аналогий. Сущность его заключается в том, что на основании данных о геологическом строении участка сооружения хранилища и изучения физико-механических свойств массива подбирается другое месторождение со сходным геологическим строением – эталон, в пределах которого уже ведутся горные работы. Размеры устойчивого пролета и целиков эталонной выработки переносятся в горно-геологические условия проектирующегося подземного хранилища.

На рис. 7.7 показаны формы возможных поперечных сечений выработок-емкостей.

Определение устойчивых форм выработок-емкостей осуществляется в зависимости от напряженного состояния пород вокруг выработок в процессе их строительства и эксплуатации [9].

Установлено, что наибольшая концентрация напряжений наблюдается в угловых зонах, особенно в выработках-емкостях прямоугольной формы поперечного сечения [107].

С целью снижения концентрации напряжений в угловых зонах целесообразно осуществлять закругления емкостей. Радиус закругления выработок-емкостей квадратного и прямоугольного поперечных сечений определяют согласно формуле

$$R = l/15,3 . \quad (7.10)$$

где l – ширина выработки-емкости, м.

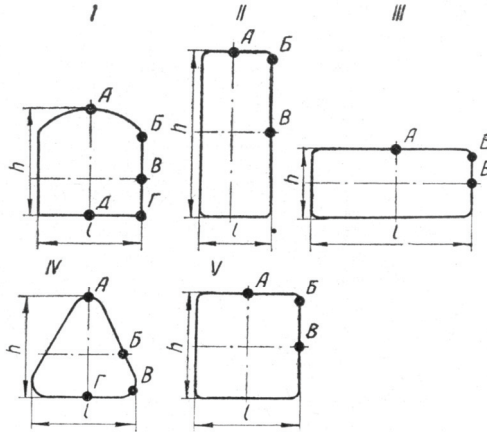


Рис. 7.7. Формы поперечных сечений выработок-емкостей [11]:

h – высота выработки; l – ширина выработки; $a = l/h$; I – $a = 0,83$; II – $a = 0,62$;

III – $a = 1,61$; IV – $a = 1,03$; V – $a = 1,0$;

A–Д – характерные точки контура выработки-емкости

7.4. Технология сооружения подземных хранилищ шахтного типа

В технологиях строительства подземных хранилищ шахтного типа применяются все процессы горного производства с использованием современных машин и механизмов.

7.4.1. Технология сооружения вертикальных выработок

К вертикальным выработкам относятся стволы, вскрывающие рабочую толщу горных пород, в которой будет размещаться подземное хранилище. На проходку вертикальных стволов при строительстве хранилищ обычно затрачивается 40–50 % всего времени строительства. При объеме хранилища более 25 000 м³ проходят главный ствол и два вентиляционных, при объеме более 35 000 м³ число стволов увеличивается до трех и более.

Стволы в период строительства хранилищ используются для спуска и подъема грузов и рабочих, извлечения породы, вентиляции,

прокладки водоотводящих труб, кабелей и т. п.

При эксплуатации стволы могут выполнять следующие функции: быть емкостью для размещения хранимого продукта; частично использоваться в качестве емкости (только в пределах непроницаемой толщи пород до герметичной перемычки, размещенной в нижней части ствола); служить выработкой для сообщения поверхностей с подземными емкостями, а также размещения технологических подземно-транспортных и специальных коммуникаций.

При определении размеров поперечного сечения вертикальных стволов учитываются габариты и расположение подъемных сосудов, величина зазоров между ними и крепью. Диаметр стволов колеблется в пределах 4,0–6,0 м. Проявляется тенденция к уменьшению диаметра стволов до минимума, что дает возможность обеспечить надежную герметизацию хранилищ.

Шахтный ствол (рис. 7.8) состоит из верхней части – устья с воротником, основной части – вертикальной протяженной закрепленной выработки, сопряжения ствола с околоствольными выработками и нижней части – зумпфа.

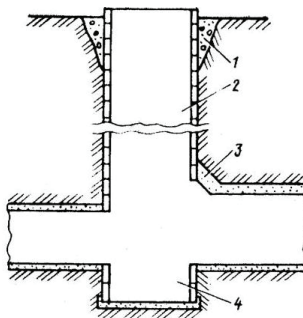


Рис. 7.8. Шахтный ствол [141]:

1 – воротник; 2 – вертикальный ствол; 3 – сопряжение ствола с околоствольными выработками; 4 – зумпф

Стволы подземных хранилищ имеют поперечные сечения различных форм. Наиболее широко применяется круглая форма, позволяющая использовать стандартные виды крепи (сборная тубинговая крепь, металлические обсадные трубы, монолитный бетон).

К постоянной крепи вскрывающихся выработок предъявляются требования долговечности и огнестойкости. В некоторых случаях

крепь (или участок крепи) должна дополнительно обладать продукто- и водонепроницаемостью, способностью выдерживать внутреннее давление. Материалами, полностью или частично соответствующими этим требованиям, в настоящее время являются монолитный или сборный железобетон и металл, иногда для постоянной крепи стволов используются комбинации этих материалов.

При строительстве подземных хранилищ вертикальные выработки (стволы) проходятся, как обычным способом посредством буровзрывных работ, так и специальным – с помощью бурения буровыми агрегатами, а в сложных геологических условиях – путем замораживания.

Сооружение стволов при помощи буровзрывных работ. Буровзрывные работы включают в себя три процесса: бурение шпуров или скважин, их зарядание и взрывание. Вертикальные стволы, как правило, проходят сплошным забоем, при этом применяется, в большей степени метод шпуровых зарядов.

Машины для бурения шпуров выбирают в зависимости от крепости пород и площади поперечного сечения ствола. При крепости пород f до 12 применяются ствольные бурильные установки и бурильные молотки, при крепости $f > 12$ – бурильные молотки ПР-30, ПК-50 массой 30 и 50 кг. Число бурильных молотков, находящихся в забое, устанавливается из расчета один на $4,5 \text{ м}^2$ забоя.

Для сооружения вертикальных стволов диаметром до 6 м, используемых в качестве подземных вертикальных емкостей, эффективно применение установки БУКС-1м. Установка снабжена устройствами для очистки шпуров водовоздушной смесью, что обеспечивает интенсивный вынос шлама и полное пылеудаление (рис. 7.9).

Обслуживают установку три-четыре бурильщика. Забой ствола можно обуривать одним агрегатом, расположенным в центре забоя. Установка позволяет в три-четыре раза увеличить скорость бурения по сравнению с ручными бурильными молотками.

После разрушения горной породы взрывом, ее выемка и транспортировка осуществляется в специальных сосудах-бадьях емкостью до $1,0 \text{ м}^3$. Погрузка породы в бадьи происходит с помощью грейферных погрузчиков.

Качественно новым этапом в развитии техники сооружения вертикальных стволов была разработка и внедрение в практику горного дела стволопроходческих комплексов. В этом направлении

большие работы были проведены в бывшем СССР и созданы различные образцы стволопроходческой техники.

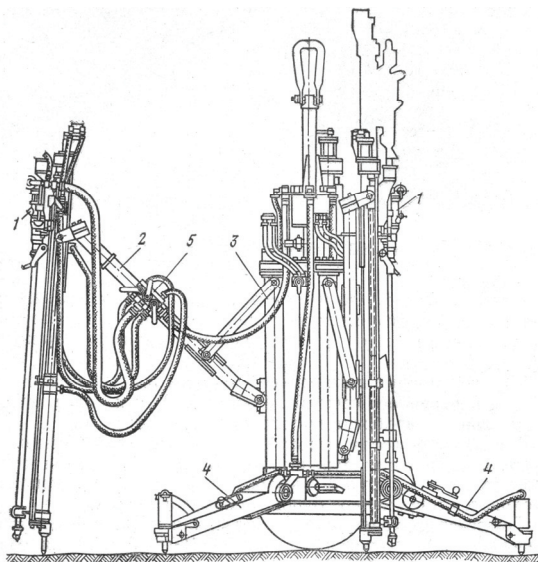


Рис. 7.9. Схема буровой установки БУКС-1м [29]:

1 – буровой агрегат; 2 – манипуляторы; 3 – гидравлические цилиндры; 4 – опорная станина; 5 – пульт управления

Стволопроходческие комплексы устранили тяжелый физический труд шахтостроителей и обеспечили повышение производительности труда в 5 раз и высокую безопасность ведения горных работ. Этими установками было пройдено много стволов в России, Украине и Казахстане. В установках совмещаются процессы разрушения пород, погрузка горной массы и возведение постоянного крепления ствола.

Одним из таких комплексов является комплекс КС-1м (рис. 7.10), предназначенный для проходки стволов диаметром до 6 и глубиной 700 м и более в породах средней крепости.

В состав комплекса входит бурильная установка типа БУКС, подвешиваемая на тельфер породопогрузочной машины, с которой осуществляется групповое бурение шпуров; породопогрузочная машина КС-1МА с грейферным погрузчиком, саморазгружающаяся бадья для выдачи погруженной породы на поверхность и металлическая передвижная опалубка. При наиболее

распространенной совмещенной технологической схеме проходки стволов опалубка устанавливается на забой. Комплекс обеспечивает скорость проходки ствола до 400 м/мес.

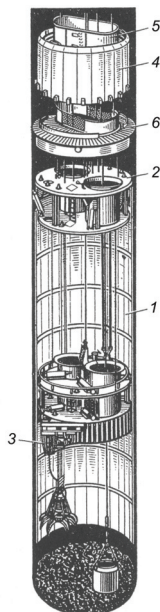


Рис. 7.10. Стволопроходческий комплекс КС-1м/6,2 [126]:

1 – металлический щит; 2 – натяжной полук; 3 – каретка с породопогрузочной машиной КС-1м; 4 – опалубка; 5 – балкон опалубки; 6 – опускное пикетажное кольцо

Проходка стволов начинается с бурения шпуров. Глубина шпуров устанавливается в зависимости от крепости пород: для пород средней крепости она составляет 2,5–3,5 м; для крепких пород – 2,0–2,5 м.

При проектировании взрывных работ тип вруба и схема расположения шпуров в забое выбираются в зависимости от крепости пород, их напластования и формы поперечного сечения выработки (рис. 7.11).

В стволах круглого поперечного сечения шпурсы располагают по нескольким концентрическим окружностям (рис. 7.12, а).

Вруб состоит из 6–12 шпуров, глубина их на 15–20 см больше остальных. Наиболее широко применяют врубы с параллельными шпурами, обеспечивающими меньший выброс породы вверх.

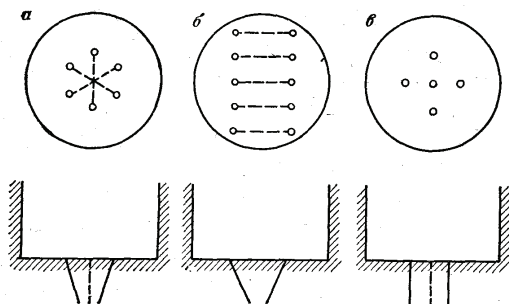


Рис. 7.11. Схемы врубов при проведении вертикальных выработок [29]:
 а) – конусообразный; б) – клиновой; в) – призматический

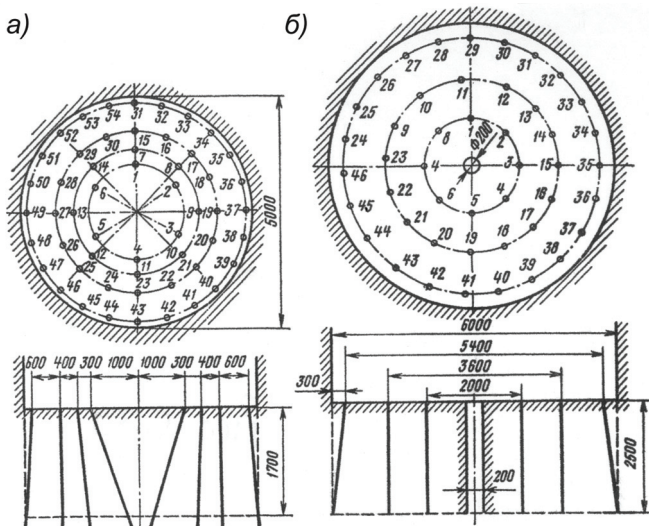


Рис. 7.12. Схема расположения шпуров при проходке стволов круглого сечения [29]:
 а) – с врубом из шести шпуров; б) – с опережающей скважиной диаметром 200 мм

Для усиления действия врубовых шпуров по центру ствола бурят скважину диаметром 200 мм, опережающую забой на 10–20 м. Эта скважина не заряжается, а используется как дополнительная открытая поверхность (рис. 7.12, б).

Общий расход взрывчатых веществ на взрывание шпуров определяется исходя из удельного расхода ВВ (табл. 7.1).

Таблица 7.1. Удельный расход взрывчатого вещества (аммонит № 6 ЖВ) при проходке стволов подземных хранилищ [11]

Категория пород по СНИП	Удельный расход ВВ (аммонит № 6 ЖВ) в патронах различного диаметра, кг/м ³	
	32, 36 мм	45 мм
V	0,7–0,8	0,56–0,64
VI, VII	0,9–1,1	0,72–0,88
VIII	1,2–1,5	0,96–1,20
IX–X	1,6–2,1	1,30–1,70
XI	2,2–2,9	1,75–2,30

При использовании других ВВ величину удельного расхода необходимо умножить на переводной коэффициент, который для скального аммонита № 1 равен 1,15, для аммонита ПЖВ-20 – 1,25.

Расход ВВ на величину подвигания забоя ствола на один цикл, т. е. на одну заходку, определяется по формуле

$$Q = q \cdot V, \quad (7.11)$$

где q – удельный расход, кг/м³; V – объем оббуренной породы, подготовленной к взрыванию за одну заходку, м³.

По мере углубления ствола производится крепление его стенок чугунными тубингами, бетоном или железобетоном.

Сооружение стволов бурением. Наряду с проходкой стволов взрывным способом в мировой практике строительства хранилищ шахтного типа широкое применение нашел прогрессивный метод – проходка стволов бурением. При этом способе полностью механизуются все технологические операции по разрушению и уборке горной массы, исключается пребывание людей в забое ствола в процессе его строительства.

При строительстве подземных хранилищ вертикальные стволы играют две функции: как вскрывающие выработки подземных хранилищ и как выработки-емкости, в которых хранятся углеводороды.

При строительстве газонефтехранилищ в США вертикальные стволы бурят усовершенствованными роторными установками с шарошечными долотами, используемыми для проходки нефтяных скважин.

Работы по проходке стволов ведут по многоступенчатой схеме с предварительным бурением передовой скважины и последующим расширением ее до проектного диаметра.

В практике шахтного строительства в бывшем СССР для проходки стволов малого диаметра широко применялось реактивно-турбинное бурение. Благодаря этому способу максимально автоматизируются и механизуются основные производственные процессы без присутствия людей в забое. При этом численность производственного персонала по сравнению с обычным способом проходки при помощи буровзрывных работ сокращается примерно в три раза и сокращаются также общие затраты.

Широкое применение данного способа бурения стало возможным в результате создания необходимых технических средств и прежде всего разработанных агрегатов реактивно-турбинного бурения (РТБ) (табл. 7.2).

Таблица 7.2. Технические характеристики реактивно-турбинных буров типа РТБ [142]

Показатель	РТБ-760	РТБ-920	РТБ-1020	РТБ-1260	РТБ-1560	РТБ-2080	РТБ-2600
Диаметр ствола при бурении, мм	760	920	1 020	1 260	1 560	2 080	2 600
Тип/число турбобуров	Т12РТ-240/2		Т12РТ-240/3		Т12РТ-240/4		
Диаметр, мм/число долот	349,2/2	444,5/2	490/2	444,5/3	490/3	490/3	490/3
Расход бурового раствора, л/с	100–110	100–110	100–110	150–165	150–165	150–165	150–165
Максимальный поперечный размер бура, мм	700	850	930	1145	1430	1950	2450
Нагрузка на долото, кН, не более	70	75	80	125	130	190	225
Масса бура, кг	12 000	13 000	13 000	21 000	22 000	38 000	38 000

Схема буровой установки РТБ-2080 для бурения ствола (скважины) диаметром 2,07 м представлена на рис. 7.13.

Турбобуры вращаются под действием проходящего через них глинистого раствора, нагнетаемого с поверхности. При бурении скважины диаметром 2,08 м одновременно работают три турбобура, из которых один (головной) разбуривает центральную часть забоя диаметром 1,02 м, а два других – периферийную его часть (рис. 7.14).

Проектная скорость бурения стволов глубиной до 300 м для описанной установки составляет 0,5–0,6 м/ч.

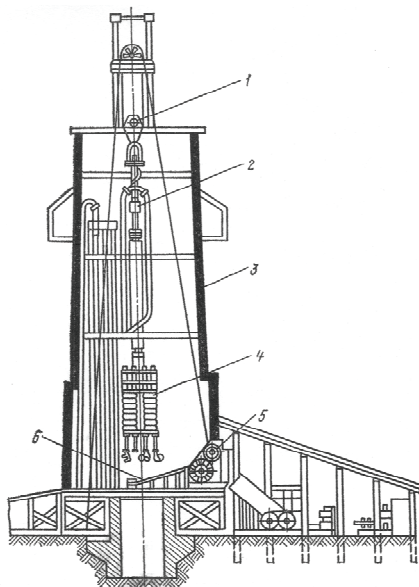


Рис. 7.13. Схема буровой установки РТБ-2080 [29]:

1 – талевая система; 2 – вертлюг; 3 – вышка; 4 – реактивный турбинный блок;
5 – буровая лебедка; 6 – ротор

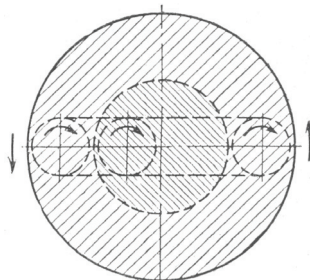


Рис. 7.14. Схема разрушения забоя при бурении установкой РТБ-2080 [29]

(направление вращения долот показано по часовой стрелке,
корпуса РТБ – против часовой стрелки)

Быстрое внедрение РТБ обусловлено существенными достоинствами этого вида буровой техники, главные из которых: применение в агрегате турбобуров породоразрушающего инструмента (долот, буровых вышек, бурильных труб и др.), серийно выпускаемых

для бурения на нефть и газ; планетарный принцип разработки забоя, не требующий больших осевых усилий, высокой грузоподъемности буровой установки и обеспечивающий относительно небольшие искривления выработки в процессе ее бурения; простота конструкции и надежность в эксплуатации, позволяющие путем простейших изменений в пространственной компоновке турбобуров оснащать их долотами различных диаметров.

После завершения буровых работ из скважины удаляется буровой инструмент, начинается ее крепление. В качестве крепи используются стальные обсадные трубы. Свободное пространство между обсадной трубой и выработкой тампонируется цементным раствором.

Для вентиляции выработок в период строительства бурятся специальные вентиляционные скважины диаметром 100, 200, 300 и 500 мм. Скважины диаметром 500 мм являются также запасным выходом в случае аварии и оборудуются специальным подъемником.

В мировой практике строительства подземных хранилищ вертикальные стволы часто выступают в качестве выработок-емкостей. Для этих целей стволы проходятся диаметром до 9,0 м с помощью специальных буровых стволопроходческих машин и комбайнов.

Одной из таких конструкций является стволопроходческий комбайн СК (рис. 7.15).

Применяется в породах средней крепости (коэффициент крепости не более 12). Позволяет совместить процессы механического разрушения массива горной породы режущим инструментом, уборку разрушенной породы из забоя и перегрузку ее в подъемные сосуды, крепления ствола монолитным бетоном, наращивания труб, вентиляции, водоотлива, подачи бетона. Представляет собой трехэтажный металлический каркас с размещенным на нем оборудованием. Агрегат обслуживают 3 человека. По сравнению с буровзрывным способом применение стволопроходческих агрегатов позволяет резко повысить производительность труда проходчиков, устранить тяжелый физический труд, обеспечить высокую степень безопасности ведения горных работ и улучшить санитарно-гигиенические условия труда рабочих.

Большим достижением в мировой практике было создание буровых агрегатов на принципах роторного колонкового реактивно-турбинного бурения. Представителем такого агрегата может быть установка УЗТМ-8,75 (рис. 7.16).

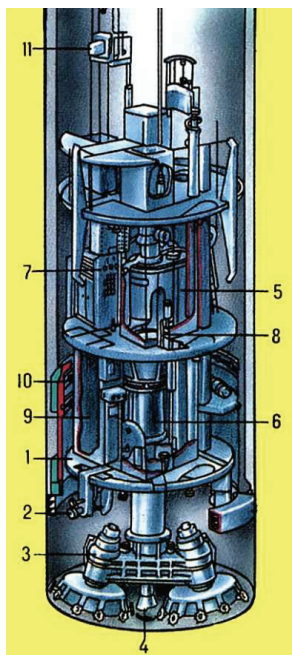


Рис. 7.15. Стволпроходческий агрегат типа СК [143]:
 1 – каркас; 2 – гидроцилиндры распора; 3 – двухдисковый планетарный исполнительный орган; 4 – пневматический эжектор для уборки породной массы; 5 – редуктор главного привода; 6 – приводные валы; 7 – пульт управления; 8 – механизм перегрузки; 9 – подъемный сосуд; 10 – опалубка; 11 – телескопические механизмы для наращивания труб

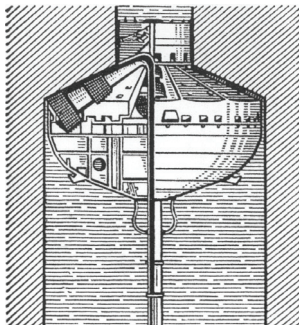


Рис. 7.16. Бурение ствола установкой УЗТМ-8,75 [144]

Этой установкой бурят стволы диаметром 7,5 и 8,5 м на глубину до 600 м. Рабочим инструментом является шарошечное пилот-долото и расширитель. С помощью этой установки ведутся работы в два этапа: сначала бурится пилотная скважина, а затем расширяющей головкой разбуривается ствол до проектного диаметра.

В последние годы в Украине были разработаны методы интенсификации проходки стволов, которые могут быть применены и при строительстве подземных хранилищ шахтного типа. Заслуживает внимания технология, разработанная ДонНТУ, предусматривающая комбинированную схему: буровую и взрывную.

При такой схеме работы ведутся в два этапа: сначала бурением проходится передовая выработка, а затем бурением шпуров и их взрыванием производится расширение ствола до проектных размеров (рис. 7.17).

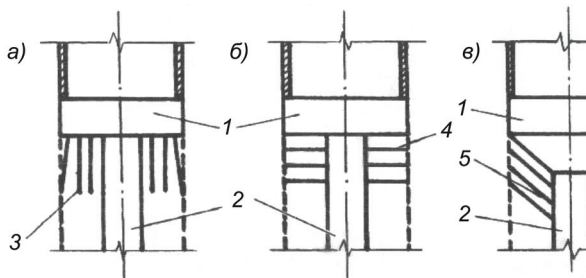


Рис. 7.17. Схемы отбойки породы при строительстве стволов с расширением восстающего сверху вниз [145]:

1 – углубляемый ствол; 2 – передовой восстающий; 3 – нисходящие продольные шпуров; 4 – горизонтальные шпуров; 5 – наклонные шпуров

Отбойку породы при расширении передового восстающего сверху вниз обычно производят с помощью нисходящих продольных шпуров (рис. 7.17, а). Находят также применение горизонтальные (рис. 7.17, б) или наклонные шпуров (рис. 7.17, в), выбуриваемые из восстающего со специальных буровых полок.

Технология углубления стволов с расширением восстающего сверху вниз с помощью продольных шпуров является достаточно универсальной и может применяться в скальных и полускальных породах. При этом обеспечивается удовлетворительное качество оконтуривания стволов и высокое значение коэффициента использования шпуров.

За последние годы в промышленно развитых странах дальнего зарубежья созданы высокоэффективные буровые установки для подземного бурения вертикальных выработок диаметром до 2,4 м и более. Эти установки позволяют успешно проводить передовые выработки при углублении (проходке) стволов в скальных породах любой крепости. С увеличением диаметра передовой выработки, проводимой буровым способом, уменьшается удельный вес работ по расширению передовой выработки взрывным способом.

В Западной Европе для проходки стволов диаметром до 8,5 м на глубину до 750 м в сложных гидрогеологических условиях применяется роторная буровая установка, работающая по принципу последовательного расширения ствола с извлечением породы через бурильные трубы эрлифтом. В США получили распространение роторные установки, которыми проходят стволы диаметром от 1,5 до 4,0 м. В установках используют тяжелое нефтебуровое и специальное наземное оборудование, трубы, многшарошечные долота, расширители, грузы. Кроме обратной промывки, применяется система обратной продувки воздухом. По мере углубления ствола стенки его закрепляются бетоном или тубингами. Современная технология проходки стволов стволопроходческими агрегатами и комплексами позволяет одновременно с проходкой ствола производить его крепление.

Когда ствол пройден и достиг проектной глубины, от него производится проходка вспомогательных и коллекторных выработок, из которых ведется проходка камер (выработок-емкостей) значительных поперечных размеров.

7.4.2. Технология сооружения горизонтальных выработок

Подземная часть хранилищ шахтного типа включает в себя систему горизонтальных выработок вспомогательного и основного назначения. К выработкам вспомогательного назначения относятся околоствольные (коллекторные) выработки и подводящие. К основным выработкам относятся выработки (камеры)-емкости, в которых впоследствии хранится нефть, нефтепродукты, сжиженные, а иногда и природные газы.

Форма коллекторных и подводящих выработок может быть трапециевидной, прямоугольно-сводчатой, арочной и определяется интенсивностью горного давления, видом крепи или ее отсутствием.

Подводящие выработки служат для сообщения коллекторных выработок с выработками-емкостями и для размещения герметичных перемычек. Размеры поперечного сечения подводящих выработок принимаются минимальными по условиям проведения горнопроходческих работ, а также из соображений уменьшения размеров герметичных перемычек и упрощения работ при их возведении. Коллекторные и вспомогательные выработки подземных хранилищ обычно имеют небольшие сечения ($S = 3-5 \text{ м}^2$).

Проходка выработок буровзрывными работами. Более 80 % всего объема проходки выработок при строительстве подземных хранилищ осуществляется при помощи буровзрывных работ. Полный цикл работ по проходке горизонтальных выработок включает следующие операции: бурение шпуров и скважин, зарядание, взрывание, погрузка разрушенной горной массы и ее транспортировка, крепление выработок (по необходимости).

При проходке коллекторных и вспомогательных выработок и выработок-емкостей выбор бурильных машин осуществляется исходя из физико-механических свойств горных пород, параметров выработки и методов взрывных работ. Все вспомогательные и коллекторные выработки проходятся при помощи шпуровых и скважинных зарядов. Бурение осуществляется бурильными машинами вращательного, ударно-вращательного и ударно-поворотного действия.

Вращательное бурение экономически целесообразно применять при проходке выработок по породам с $f = 4-6$. При выборе электрических бурильных машин вращательного действия следует учитывать геологические и гидрогеологические условия строительства подземных хранилищ. Для бурения шпуров в породах с $f = 3-4$ рекомендуется применять ручные электросверла, а при $f = 5-6$ – колонковые.

В практике широко распространены ручные пневматические машины ПР-18ЛУ, ПР-24ЛУ. Из колонковых бурильных машин чаще всего используются марки ПК-3 и ПК-5. Их устанавливают на колонках, буровых тележках и манипуляторах. В породах, для которых $f=12$, при бурении шпуров применяют колонковые электросверла, наиболее мощными из них являются ЭБК-5, СЭК-1 и ЭБГ с гидравлическим приводом. В последние годы широко внедряются установки, полностью механизующие процесс бурения:

БУ-Г, СБУ-2М, БУР-2, СБКНС-2, БСКН-2п (рис. 7.18).

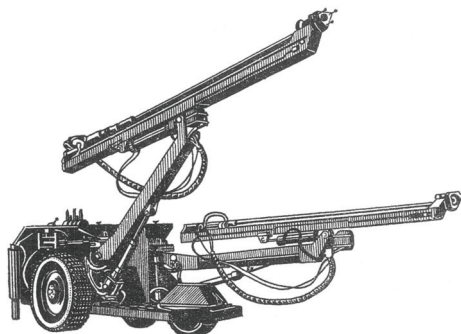


Рис. 7.18. Бурильная установка СБКН-2п [29]

Применение нашли и бурильные установки типа УБШ, позволяющие обуривать забой от 2,3×2,5 до 7,2×8,5 м. Эти установки оснащены двумя манипуляторами (рис. 7.19).

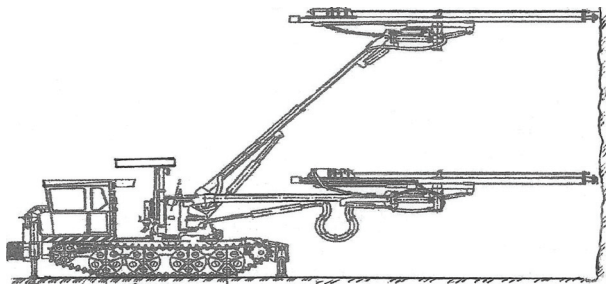


Рис. 7.19. Бурильная установка УБШ-503 [108]

Средняя скорость бурения шпуров самоходными бурильными установками зависит от коэффициента крепости пород и составляет 2–3 при $f = 3-4$; 1–1,5 при $f = 6-8$ и 0,6–0,8 (м/мин.) при $f = 10-12$.

При определении области применения бурильных установок необходимо учитывать крепость пород, параметры выработок, направление бурения, возможность быстрой доставки машин в забой, их монтажа и демонтажа.

Техническая и эксплуатационная производительность бурильных установок при наличии нескольких бурильных машин определяется с учетом одновременности их работы.

Техническая производительность установки (м/мин.)

$$P_m = 66P'_m k_0 n_0, \quad (7.12)$$

где P'_m – техническая производительность одной бурильной машины, м/мин.; k_0 – коэффициент одновременности работы бурильных машин, равный 0,95–0,85 для установок с двумя или тремя и 0,8–0,9 с четырьмя манипуляторами; n_0 – число бурильных машин на установке.

Сменная эксплуатационная производительность установки

$$P_{\partial} = P_m k_{\partial} T_c, \quad (7.13)$$

где k_{∂} – коэффициент использования установки в течение смены (в расчетах можно принимать 0,5–0,7); T_c – длительность смены.

При сооружении емкостей больших поперечных сечений применяются скважинные заряды. В породах с f до 5 для бурения восходящих скважин используются колонковые электросверла ЭБП-1, а также самоходные бурильные установки БК-2, БК-2м и БСН-110/25. Установка БК-2 предназначена для бурения из разрезного штрека веера скважин диаметром 42 мм, длиной до 20 м. Она представляет собой самоходный агрегат, состоящий из длинноходовой бурильной машины с электрическим вращателем и гидравлическим податчиком, манипулятора поворотного типа, ходовой части с четырьмя ведущими колесами.

Для бурения вертикальных нисходящих скважин возможно применение бурового станка БСН-110/25. Часовая производительность станка составляет 12 м, диаметр скважин 95 мм, глубина – до 30 м.

Эффективность сооружения подземных хранилищ шахтного типа при помощи буровзрывных работ в значительной степени зависит от выбранных параметров, и в первую очередь, от формы и размеров, образующихся при помощи взрыва врубовых полостей. В практике взрывного дела применяют различные типы врубов: наклонные, прямые (призматические) и щелевые (рис. 7.20).

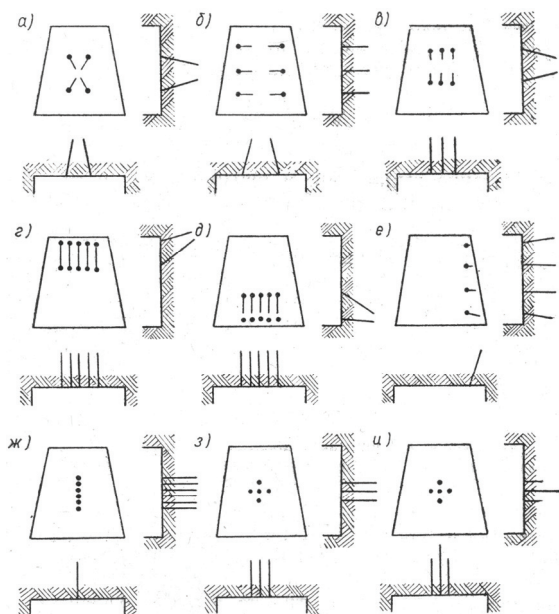


Рис. 7.20. Схемы конструкции врубов, применяемых для проходки горизонтальных выработок подземных хранилищ [11]:

а)–е) – наклонные; з, и) – прямые (призматические); ж) – щелевой

В горной практике используются и другие разновидности врубов. Так, в США при прохождении выработок применяются канадский и цилиндрический врубы (рис. 7.21).

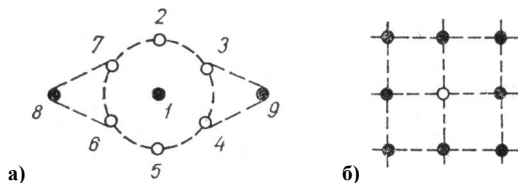


Рис. 7.21. Схемы врубов, применяемых в зарубежной практике [11]:
а) – цилиндрический; б) – канадский; ● – заряженные шпурсы; ○ – холостые шпурсы

Канадский вруб (рис. 7.21, б) состоит из нескольких шпуров диаметром 46–53 мм, пробуренных перпендикулярно к плоскости забоя выработки и расположенных на небольшом расстоянии друг от друга (10–15 см).

Эффективность взрывных работ зависит от выбранных параметров. Так, количество шпуров на забой рассчитывается по формуле

$$N = 3,3\sqrt[3]{f \cdot S^2}, \quad (7.14)$$

где f – коэффициент крепости пород по шкале Протоdjeяконова; S – сечение выработки, м².

По условиям размещения зарядов ВВ количество шпуров на забой выработки определяется по формуле

$$N = \frac{S \cdot q \cdot \eta}{c \cdot P}, \quad (7.15)$$

где S – сечение выработки в проходке, м²; q – расчетный удельный расход ВВ, кг/м³; $\eta = 0,85-0,95$ – коэффициент использования шпуров (КИШ); $c = 0,5-0,7$ – коэффициент заполнения шпуров зарядами ВВ; P – масса ВВ в 1 шпура, кг/м.

Необходимое количество шпуров на забой уточняют графически по схеме поперечного сечения выработки.

Значение q для аммонита № 6 ЖВ в зависимости от крепости взрывааемых пород изменяется в таких пределах [109]:

f	q , кг/м ³	f	q , кг/м ³
22–19	3,8	10–9	2,4
18–15	3,5	8–7	2,0
14–13	3,0	6–4	1,2
12–11	2,6	менее 4	0,9

В зависимости от сечения выработки и крепости пород в качестве врубовых используется 2–14 шпуров, занимающих при прямых врубах 5–10 %, при пирамидальных – 10–12 % общей площади выработки (табл. 7.3).

Таблица 7.3. Количество врубовых шпуров в зависимости от коэффициента крепости и сечения выработки [11]

Коэффициент крепости	Сечение выработки, м ²	
	до 12	более 12
2–3	4	4–6
4–6	4–6	4–9
7–9	6–8	8–10
10–12	8–12	12–14

Глубина шпуров обусловлена, в основном, возможностями применяемого бурового оборудования и свойствами (устойчивостью) пород, а также сечением выработки. Обычно она на 0,1–0,2 м больше глубины остальных шпуров.

Коэффициент использования шпура η составляет 0,8–0,9. Расход ВВ Q на забой определяется по формуле

$$Q = q \cdot S \cdot l \cdot \eta, \quad (7.16)$$

где S – размер площади забоя выработки; l – глубина шпура.

Среднюю величину заряда в шпуре находят как частное от деления расхода ВВ на заходку на общее количество шпуров. Величина заряда врубовых шпуров обычно на 18–20 %, а отбойных – на 10–15 % больше средней величины заряда.

Для взрывания зарядов обычно применяется короткозамедленное взрывание. Время замедления между группами зарядов определяется по формуле [109]

$$t = (1,5 - 2,0) \cdot A \cdot W, \quad (7.17)$$

где A – коэффициент, зависящий от свойств взрываеваемой породы; W – линия наименьшего сопротивления (л. н. с.) в сторону обнаженной поверхности, образованной взрывом предыдущей группы зарядов, м.

Повышение темпов проходки горизонтальных выработок подземных хранилищ. Одним из резервов повышения эффективности взрывных работ и повышения темпов проходки является применение в качестве врубов скважин большого диаметра. Создание таких компенсационных врубовых скважин особенно эффективно при строительстве подземных хранилищ шахтного типа в породах, обладающих повышенной вязкостью и пластичностью (гипс, ангидрид, солевые породы). Такие скважины бурятся специальными бурильными машинами или колонковыми электросверлами с использованием специальных буровых инструментов.

Скважины большого диаметра широко начали применять в 60-х годах XX столетия на калийных и каменно-солевых рудниках. В СССР были проведены работы по исследованию и внедрению врубов со скважинами большого диаметра. На калийных рудниках Прикарпатья испытывались вruby со скважинами диаметром 70, 160 и 390 мм [110]. В результате исследований даны рекомендации по выбору диаметра врубовых скважин и их количества в зависимости от пластичности пород (табл. 7.4).

Таблица 7.4. Диаметр врубовых скважин и их количество в зависимости от пластичности пород [11]

Породы	Коэффициент пластичности	Диаметр врубовой скважины, мм	Количество скважин
Соленосные породы	4,5–5,0	160	2
Каинитовые руды	3,1	160	1
Каинит-лангбейнитовые руды	2,3	100	1

Эффективным методом ускорения проходки выработок по породам с крепостью $f = 2-6$ явилось использование в качестве зарядной камеры врубовой скважины. Такая технология с успехом была опробована и нашла применение при проходке выработок по пластичным вязким породам [11].

Для создания достаточной врубовой полости и увеличения глубины шпуров свыше четырех метров была разработана конструкция вруба, в котором врубовая скважина служила не только дополнительной поверхностью обнажения, но и зарядной камерой, где размещался заряд ВВ для выброса разрушенной взрывом породы. Испытания показали, что применяя данный вруб, можно проходить за 1 цикл 4–6 м. Скорость продвижения забоя увеличивается в 1,5 раза, производительность труда проходчика повышается на 50–60 %. Этот способ может широко применяться при проходке выработок-емкостей для создания нефтехранилищ в породах невысокой крепости, обладающих повышенной пластичностью и вязкостью.

Современной горной технологии присуще не только проведение выработок при помощи буровзрывных работ, но и при помощи высокопроизводительной горной техники – комбайнов.

При комбайновом способе проведения выработок осуществляются разрушение забоя рабочим органом комбайна, погрузка горной массы и ее удаление, крепление выработки. При этом комбайны избирательного действия применяются для проходки протяженных выработок в породах с коэффициентом крепости $f \leq 4$, а при усилении конструкции – в породах с $f \leq 7-8$. Проходческий комбайн избирательного действия ПК-3 приведен на рис. 7.22.

Комбайны роторного типа имеют рабочую головку (ротор), на которой размещены резцы, разрушающие горную массу. Разрушенная порода по транспортеру подается в вагонетки или в самоходные вагоны, транспортирующие породу к стволу (рис. 7.23).

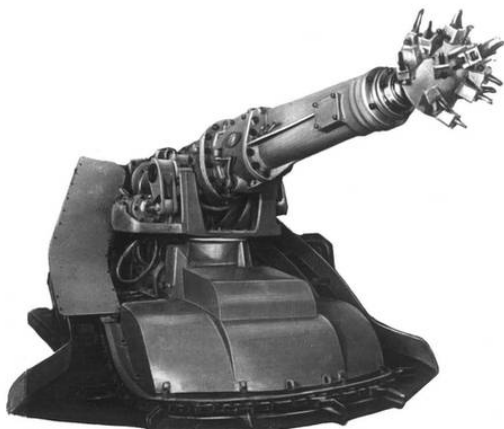


Рис. 7.22. Проходческий комбайн ПК-3 [146]

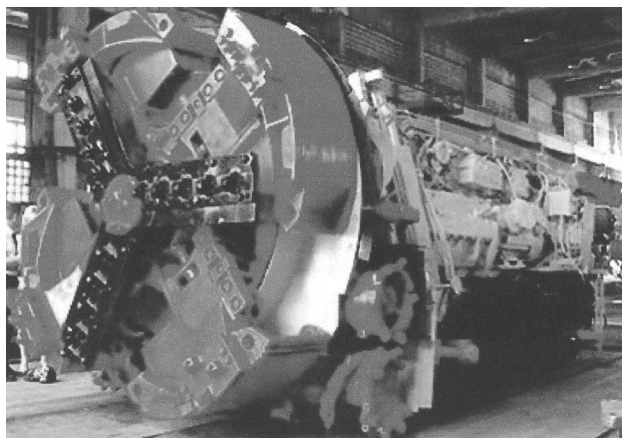


Рис. 7.23. Проходческий комбайн роторного типа ПКС-8М [147]

В табл. 7.5 приведена техническая характеристика проходческих комбайнов.

Совершенствование технологии проведения подземных горных выработок комбайнами обеспечивает механизацию производственных процессов по разрушению горной массы, погрузке, транспортировке и вспомогательные работы.

Таблица 7.5. Проходческие комбайны [148]

Проходческие комбайны избирательного действия (с режущей коронкой на стреле и нагребными лапами)				
Тип	Размеры выработки В×Н, м	Площадь сечения выработки, м ²	Крепость пород, f	Техническая производительность, м ³ /мин.
ПК-ЗР	2,8–4,0×2,1–3,2	5,3–12	<4	0,35
4ПУ	2,6–3,3×1,5–2,85	4–8,2	<4	0,3
ГПКС	2,6–4,7×1,8–3,6	4,7–15	<4	0,5
4ПП-2	3,6–6,2×2,6–4,5	9–25	<6	0,35
ГПК-2	3,7–7,5×3–5,5	10–30	<6–8	0,5
4ПП-5	3,8–6,5×2,8–5	10–30	<7–8	0,7
Проходческие роторные комбайны				
Тип	Размеры выработки В×Н, м	Площадь сечения выработки, м ²	Крепость пород, f	Техническая производительность, м ³ /мин.
ПК-8М	3×3–3,2×3,2	8–9	<4	0,25
Урал-10КС	2,1–2,6×3,9–4,3	7,8–10,2	<4	0,25
Урал-20КС	2,9–3,7×5,3–6,1	13,4–20,2	<4	0,33

7.4.3. Сооружение выработок-емкостей подземных хранилищ

Выработки-емкости являются основными сооружениями подземных хранилищ и представляют собой камеры большого сечения. При их сооружении применяют различные схемы: проходка сплошным забоем, с передовым забоем, уступным забоем (верхним и нижним), комбинированная в сочетании комбайновой выемки со шпуровым (скважинным) методом взрывания.

Проходка выработок-емкостей сплошным забоем с опережающей выработкой малого сечения применяется для создания емкостей площадью 20–30 м² (рис. 7.24).

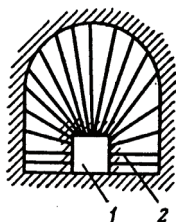


Рис. 7.24. Схема проходки выработок-емкостей с опережающим забоем и веерным расположением шпуров [29]:

1 – опережающий забой; 2 – скважинные заряды

Буровзрывные работы выполняются методом шпуровых и скважинных зарядов. На первом этапе проходится опережающая выработка малого сечения. На втором этапе – из опережающей выработки бурится веер скважин.

Расстояние между плоскостями вееров 0,8–1,2 м. Веера скважин взрываются при помощи короткозамедленного взрывания с интервалом 25–50 мс.

Выработки с большой площадью поперечного сечения сооружаются с верхним или нижним уступом (рис. 7.25). При высоте уступа 3,0–4,0 м можно применять вертикальные шпуровые или скважинные заряды, при большой высоте – скважинные заряды.

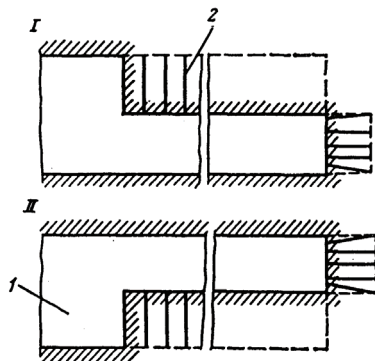


Рис. 7.25. Схема проведения выработок-емкостей с уступным забоем [29]:

I – с верхним уступом; II – с нижним уступом;
1 – выработка-емкость; 2 – скважинные заряды

При использовании скважинных зарядов диаметр скважины d для заданной высоты уступа H , при которой максимально используется объем скважины, равен

$$d = 28H \sqrt{q_n / \Delta}, \quad (7.18)$$

где q_n – расчетный удельный расход ВВ, кг/м³; Δ – плотность заряжания.

Величину линии наименьшего сопротивления определяют по формуле

$$W = d \sqrt{\frac{8,2\Delta}{m \cdot q_n}}, \quad (7.19)$$

где m – относительное расстояние между зарядами, изменяющееся в пределах 1,0–1,5.

При проходке выработок-емкостей применяется многорядное короткозамедленное взрывание скважинных зарядов. При выборе схемы взрывания перспективным следует считать волновую и врубовую схемы короткозамедленного взрывания (рис. 7.26). Замедление между группами зарядов осуществляется электродетонаторами короткозамедленного действия. Обычно интервал замедления составляет 25–50 мс.

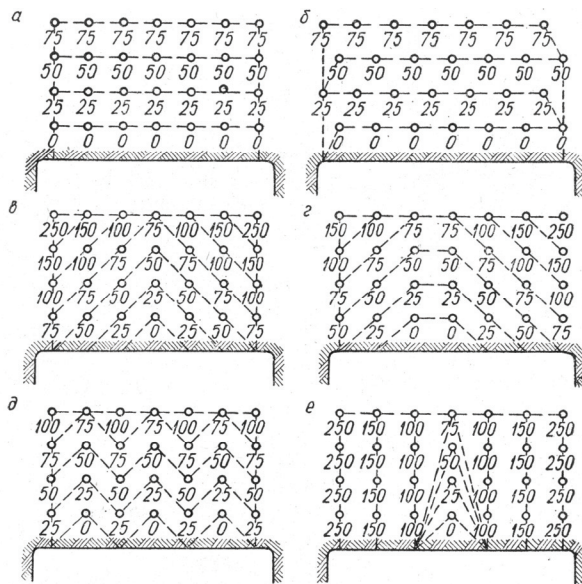


Рис. 7.26. Схемы короткозамедленного взрывания при проходке камер-емкостей подземных хранилищ [11]:

- а) – порядная; б) – шахматная; в) – клиновья; г) – трапецевидная; д) – волновая; е) – врубовая

Для увеличения скорости проходки выработок большого поперечного сечения (а такими являются камеры-емкости подземных хранилищ) могут быть рекомендованы комбинированные схемы проходки с успехом используемые на калийных рудниках. Комбайном ПКС-8М проходятся выработки одним или двумя ходами, а оставшаяся часть проектного сечения выработок обрабатывается

буровзрывным способом. Целик между двумя выработками, пройденными комбайном, разрушается шпурами. В забое бурится 8–10 рядов шпуров. Заряды взрываются с замедлением 25 мс между рядами. Отбойка горной массы в целиках взрыванием вееров скважинных зарядов значительно повышает технико-экономические показатели по сравнению со шпуровым методом.

Контурное взрывание. Основными требованиями, предъявляемыми к выработкам, предназначенным для подземных хранилищ, являются прочность, устойчивость, отсутствие трещиноватости, герметичность с целью их длительной эксплуатации и уменьшения потерь хранимого продукта.

При ведении взрывных работ действие взрыва обуславливает образование вокруг выработки-емкости зоны интенсивной трещиноватости, являющейся зоной повышенной проницаемости. При наличии такой зоны в подземных хранилищах в период их эксплуатации могут происходить фильтрационные процессы, что снижает устойчивость выработки и приводит к потерям продукта.

Важным вопросом при строительстве подземных хранилищ является уменьшение трещиноватости в законтурной зоне емкостей. Одним из способов, уменьшающих разрушение законтурного массива, является контурное взрывание, выполняемое двумя методами: взрывание сближенных зарядов и предварительное щелеобразование.

Взрывание сближенных зарядов применяют при проведении горных выработок небольшого сечения. Оно основано на сближении оконтуривающих шпуров, уменьшении коэффициента заряжения, рассредоточении зарядов, уменьшении диаметра патронов ВВ (рис. 7.27).

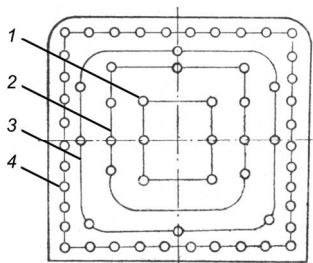


Рис. 7.27. Схема расположения шпуров при контурном взрывании [11]:
1 – врубные шпуры; 2 – вспомогательные; 3 – отбойные; 4 – оконтуривающие

Предварительное щелеобразование применяют при проведении подземных выработок с большой площадью поперечного сечения. Щель по контуру выработки создается в результате опережающего взрыва оконтуривающих шпуров или скважин 1 (рис. 7.28).

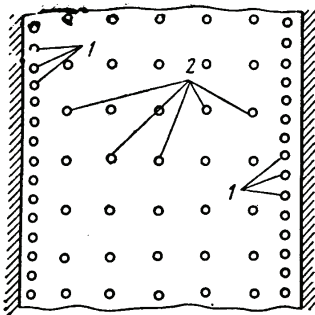


Рис. 7.28. Схема расположения скважин при взрывном щелеобразовании [18]:
1 – оконтуривающие скважинные заряды; 2 – основные заряды

Внутренние шпуров или скважины 2, предназначенные для дробления оконтуренного щелью участка, взрывают во вторую очередь. Контурная щель предохраняет законтурный массив от разрушения и является врубом – дополнительной открытой поверхностью. При этом облегчается работа зарядов 2 и улучшается дробление породы внутри контура. Заряды по контуру располагают один от другого на расстоянии четырех – пяти диаметров зарядов.

При сооружении выработок на качество оконтуривания влияют расстояния между оконтуривающими шпурами, расстояние по л. н. с., коэффициент сближения зарядов, величина удельного расхода ВВ, диаметр и конструкция зарядов, очередность взрывания и расположение оконтуривающих шпуров.

Расстояние между оконтуривающими шпурами и величину расстояния по л. н. с. определяют из условия: при взрыве ряда зарядов от каждого из них распространяется волна сжатия, результатом действия которой является образование вокруг шпура радиальной зоны трещин. При достижении свободной поверхности волна отражается и вглубь массива распространяется отраженная волна растяжения, способствующая образованию трещин, параллельных открытой поверхности, и отрыву породы. Следовательно, коэффициент сближения зарядов (отношение расстояния между

шпурами к величине расстояния по л. н. с.) должен быть таким, чтобы между шпурами образовалась трещина раньше, чем отраженная от поверхности волна подойдет к линии оконтуривающих шпуров. Образовавшаяся трещина преградит путь отраженной волне, в результате чего законтурный массив останется неповрежденным.

При проектировании контурного взрывания определяют такие параметры взрывных работ.

1. Величина расстояния по л. н. с. [111]

$$W = (p_{дет}/\sigma_p)^{2/3}/r_{ш}, \quad (7.20)$$

где $p_{дет}$ – детонационное давление в шпуре или скважине, МПа; σ_p – временное сопротивление породы растяжению, МПа; $r_{ш}$ – радиус шпура (скважины), м.

2. Расстояние между зарядами

$$a = (\sigma_{см}/\sigma_p)^{2/3} r_{ш}, \quad (7.21)$$

где $\sigma_{см}$ – квазистатическое давление в шпуре, МПа.

3. Коэффициент сближения оконтуривающих зарядов

$$m = a/W = 0,4(1 + y)^{2/3}, \quad (7.22)$$

где y – отношение волновых сопротивлений

$$y = \rho_{вв} D / (\rho_n c), \quad (7.23)$$

$\rho_{вв}$ и ρ_n – соответственно плотность ВВ и породы, кг/м³; D – скорость детонации ВВ, м/с; c – скорость звука в породе, м/с.

Обеспечение оптимального коэффициента сближения зарядов оконтуривающих шпуров значительно уменьшает глубину разрушения приконтурного массива. Анализ экспериментов показал, что для пород повышенной вязкости и пластичности при коэффициенте сближения зарядов 0,6–0,7 м глубина разрушенной зоны приконтурного массива снижается до 0,2–0,25 м [29].

Чтобы уменьшить разрушения законтурного массива радиальными трещинами, необходимо уменьшить бризантное действие взрыва. В оконтуривающих зарядах целесообразно уменьшить удельный расход взрывчатого вещества и обеспечить более равномерное его распределение вдоль шпура. При контурном

взрывании возможно применение зарядов уменьшенного диаметра 16–24 мм в шпурах диаметром 36–41 мм. Расстояния между оконтуривающими шпурами (диаметром 43–52 мм) для различных пород приведены в табл. 7.6.

Таблица 7.6. Расстояние между оконтуривающими шпурами [29]

Расстояние между оконтуривающими шпурами, м	0,3-0,4	0,5	0,6
Группа пород (по СНиП)	IX-X	VII—VIII	VI-VII

7.5. Герметизация подземных хранилищ шахтного типа

Надежность шахтных газонефтехранилищ обеспечивается герметизацией подземных емкостей. Герметизация достигается размещением выработок-емкостей в пределах непроницаемого массива пород, герметизацией стенок выработок-емкостей при наличии трещиноватости в породах и созданием специальных устройств, выполняющих роль герметичных перемычек.

7.5.1. Методы герметизации подземных емкостей

В мировой практике накоплен опыт герметизации подземных газонефтехранилищ различными методами и этой проблеме уделяется значительное внимание.

Так, в скандинавских странах ряд подземных нефтехранилищ размещены в трещиноватых водонасыщенных породах. Герметизация таких хранилищ обеспечивается подпором подземных вод с подвижной и неподвижной водяными подушками. При этом хранилища размещаются ниже уровня грунтовых вод с таким расчетом, чтобы гидростатическое давление всегда превышало давление продукта в выработках-емкостях. Герметичность в данном случае обеспечивается разницей давлений грунтовых вод и хранимых продуктов.

По трещинам с окружающих пород в выработку поступает значительное количество грунтовых вод. В результате вокруг нее образуется депрессионная воронка, в середине которой собирается хранимая нефть. Нефть в таких хранилищах находится на водяной подушке, образуемой в результате скопления воды на дне емкости (рис. 7.29).

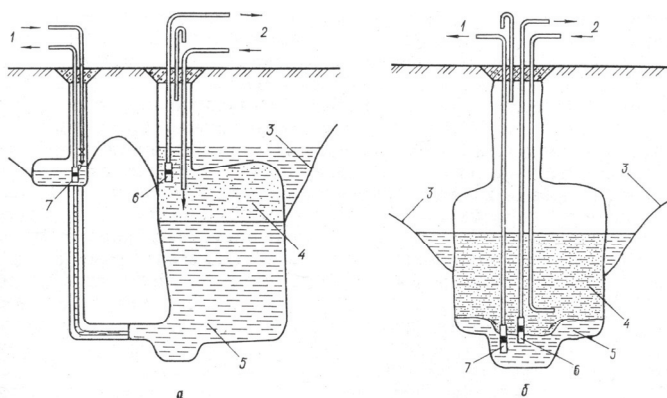


Рис. 7.29. Хранение нефтепродуктов в подземной емкости [99]:

а) – на постоянной водяной подушке; б) – на переменной водяной подушке;

1 – подача и отбор воды; 2 – подача и отбор продукта; 3 – уровень грунтовых вод;

4 – хранимый продукт; 5 – водяная подушка; 6 – продуктовый насос; 7 – водяной насос

Равновесие давлений грунтовых вод и нефти, поддержание грунтовых вод на заданном уровне обеспечивалось на одном из первых подземных хранилищ в Японии путем герметизации емкости при помощи бетона и закачивания в середину емкости азота.

В ряде стран для герметизации выработок-емкостей, пройденных в породах со значительной трещиноватостью широко применяется цементирование породы. Слабые породы закрепляются путем нагнетания цементно-песчаного или беспесчаного раствора. Цементация производится с целью предупреждения прорывов воды в емкость и паров сжиженного газа в окружающие породы, а также для повышения устойчивости пород [11]. Давление нагнетания раствора обуславливается степенью трещиноватости. В породах с малой трещиноватостью оно выше, чем в породах с крупной трещиноватостью. Раствор нагнетается с начальным минимальным давлением, постепенно достигающим проектного.

Для увеличения пластичности цементационных растворов применяются поверхностно-активные вещества (ПАВ). Их вводят в цемент при помоле или изготовлении смесей. Эффективным следует считать использование полимерных или цементно-полимерных покрытий. Так, во Франции для герметизирующих покрытий выработок-емкостей приспособлены пластмассовые листы, которые приклеиваются к стенкам и соединяются между собой сварными

швами или специальной мастикой. В США для повышения непроницаемости цементных растворов, наносимых на стенки подземных хранилищ, поверхность бетона покрывается составами, изготовленными на основе тиокол-латекса [13].

В Германии, США, Франции для герметизации подземных хранилищ шахтного типа применяют полимерные материалы.

Для повышения прочности и герметичности выработок-емкостей используются различные конструкции крепления стенок выработок. Так, в США в качестве покрытий стенок применяют анкерное крепление с металлической сеткой. В Бельгии выработки-емкости, имеющие круглое сечение, закрепляются сплошным креплением со сборными железобетонными элементами толщиной 23 см.

В бывшем СССР была разработана технология хранения сжиженных газов в вертикальных подземных емкостях. При проектировании и строительстве вертикальных подземных емкостей для сжиженных газов в проницаемых породах определяющее значение имеет определение толщины армирования крепи. Метод расчета прочности подземных вертикальных емкостей, предложенный В.И. Черкашениновым, В.П. Шустровым и В.Б. Сохранским [9], учитывает совместность работы крепи с окружающим массивом, находящимся под нагрузкой от давления хранимых газов. Порядок расчета следующий.

1. Определяется количество арматуры по первому предельному состоянию:

а) предварительно находится коэффициент K_0 упругого отпора породы

$$K_0 = \frac{E_n}{(1 + \nu_n \cdot 100)}, \quad (7.24)$$

где E_n – модуль упругости породы, кгс/см²; ν_n – коэффициент Пуассона породы;

б) определяется количество арматуры F_a из выражения

$$F_a = \frac{R_1 \cdot P}{R_a \cdot m \cdot m_{к.с}} - \left(F_0 \frac{R}{R_a} + \frac{R_1 \cdot 100 K_0}{E_a} \right), \quad (7.25)$$

где R_1 – внутренний радиус емкости, см; P – давление сжиженного газа в емкости, кгс/см²; R_a – предел прочности арматуры, кгс/см²;

m – коэффициент условий работы; $m_{к.с}$ – коэффициент сочетаний нагрузок; F_0 – толщина металлической облицовки, мм; R – расчетное сопротивление стали в оболочке, кгс/см²; E_a – модуль упругости арматуры, кгс/см².

2. Устанавливается процент армирования μ для принятой толщины крепи

$$\mu = \frac{F_a \cdot 100\%}{h \cdot 100}, \quad (7.26)$$

где h – толщина крепи, см. Полученная величина не должна превышать рекомендуемую по условиям работ.

3. При рассчитанном количестве арматуры и выбранной толщине крепи определяется раскрытие трещин и сравнивается с допустимым (0,045 см).

Сначала вычисляется коэффициент $K_0^{\text{экв}}$, учитывающий влияние арматуры при отпоре

$$K_0^{\text{экв}} = \frac{F_a \cdot E_a}{R_r \cdot 10^4}, \quad (7.27)$$

где R_r – наружный радиус емкости, см.

Затем определяется коэффициент удельного отпора породы K'_0 с учетом влияния арматуры

$$K'_0 = K_0 + K_0^{\text{экв}}. \quad (7.28)$$

Максимальную величину раскрытия a трещин в бетоне находят из выражения

$$a = c' \frac{P}{K'_0}, \quad (7.29)$$

где c' – эмпирический коэффициент, определяемый по формуле

$$c' = \left(0,28 - 6,25 \frac{P}{K_0} \right) \xi \frac{v \cdot \beta_m}{\mu}. \quad (7.30)$$

Здесь $\xi = 0,011$ – постоянная величина; β_m – коэффициент, зависящий от вида арматуры; v – коэффициент поверхности арматуры

(см), равный $0,25d$ (d – диаметр стержней).

Полученное значение a_{\max} должно быть меньше допустимого $a_0^m = 0,045$ см.

7.5.2. Сооружение герметичных перемычек в подземных хранилищах шахтного типа

Одной из важных проблем обеспечения надежности и герметизации подземных хранилищ является сооружение герметичных перемычек (герметизирующих устройств).

Конструкции герметичных перемычек. Герметичные перемычки предназначены для изоляции выработок, заполненных продуктом, от остальных выработок хранилища или внешней среды. Герметизация перемычки должна выдерживать расчетную нагрузку (давление, создаваемое хранимым продуктом), обеспечивать герметичность конструкции перемычки и контакт с непроницаемой толщей вмещающих горных пород, в которой размещаются емкости; позволять герметичный пропуск необходимых технологических трубопроводов. Перемычки выполняются из материалов, не подвергающихся воздействию со стороны хранимых продуктов и не оказывающих влияния на их товарные свойства. В хранилищах сжиженных газов предусматриваются перемычки высокого, а в хранилищах светлых нефтепродуктов – низкого давления.

В подземных хранилищах, предназначенных для одного вида продукта, как правило, устанавливается герметичная перемычка горизонтального типа на участке ствола, пройденного по непроницаемой толще пород. В комплексных хранилищах используются герметичные перемычки вертикального типа, размещаемые в коллекторных выработках. Количество герметичных перемычек обычно соответствует количеству видов хранимых продуктов (каждый продукт изолируется индивидуальной перемычкой). В перемычках низкого давления в качестве материала обычно предусматривается бетон или железобетон.

Разработанные конструкции герметичных перемычек доказали на практике высокую степень надежности и могут быть рекомендованы при проектировании подземных газонефтехранилищ [9].

Двойная герметичная перемычка, основанная на принципе гидрозатвора (рис. 7.30). Такие перемычки сооружаются в подходящих горизонтальных выработках и предназначаются для герметизации

емкостей сжиженных газов, хранящихся под избыточным давлением паровой фазы.

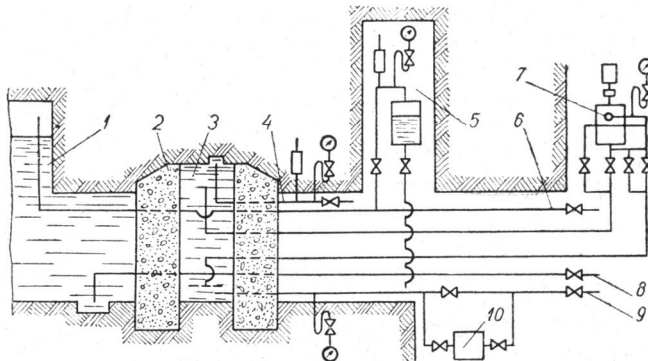


Рис. 7.30. Схема двойной герметичной перемычки, основанной на принципе гидрозатвора [11]:

- 1 – выработка-емкость; 2 – напорные стенки герметичной перемычки; 3 – полость гидрозатвора с изолирующей жидкостью; 4 – трубопровод для выхода воздуха из гидрозатвора; 5 – система поддержания избыточного давления в гидрозатворе;
- 6 – дыхательный трубопровод; 7 – грязевой насос с системой перемешивания жидкости;
- 8 – сливно-наливной трубопровод; 9 – трубопровод для изолирующей жидкости;
- 10 – насос для подачи изолирующей жидкости

Герметичная перемычка состоит из двух напорных стенок, перекрывающих выработку-емкость. Стенки изготовлены из специального бетона. Полость между ними заполнена изолирующей жидкостью специального состава. Изолирующая жидкость в полости гидрозатвора находится под давлением на $0,5-1,0 \text{ кгс/см}^2$, превышающим давление сжиженных газов в хранилище. Более высокое, чем в хранилище, давление изолирующей жидкости препятствует фильтрации из емкости жидкой и паровой фаз продукта.

Одинарная герметичная перемычка с контурным гидрозатвором (рис. 7.31). Работа одинарной перемычки аналогична описанной выше. Гидрозатвор выполнен в виде кольцевого вруба, расположенного по периметру напорной стенки. Одинарные перемычки применяются для герметизации хранилищ нефтепродуктов, находящихся при атмосферном давлении.

Двойная металлическая перемычка, расположенная в устье ствола. Такая перемычка используется в хранилищах для одного вида сжиженного газа при проведении стволов небольшого диаметра

бурением с обсадкой трубами. Пространство между обсадной трубой и породой цементируется продуктонепроницаемым раствором (рис. 7.32).

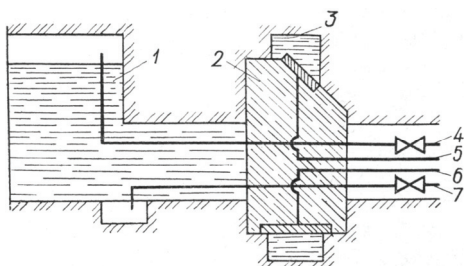


Рис. 7.31. Схема одинарной герметичной перемычки с контурным гидрозатвором [99]:

1 – выработка-емкость; 2 – напорная стенка герметичной перемычки; 3 – полость контурного гидрозатвора; 4 – дыхательный трубопровод; 5, 6 – система трубопроводов для залива и перемешивания изолирующей жидкости; 7 – сливно-наливной трубопровод

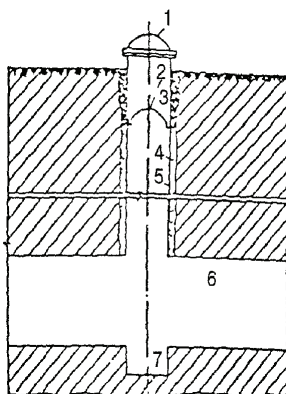


Рис. 7.32. Двойная металлическая перемычка, расположенная в устье ствола [149]:

1, 2 – металлические перемычки в обсадной трубе; 3 – устье ствола;
4 – продуктонепроницаемый раствор; 5 – обсадная труба; 6 – выработка-емкость;
7 – зумпф

Через перемычку проходят технологические коммуникации и погружной насос. Он спускается по специальному трубопроводу, предназначенному для заполнения подземной емкости продуктом. Для контроля за герметичностью перемычки на оголовке устанавливаются предохранительный клапан и манометр,

регистрирующий давление в камере, расположенной между металлическими полусферами. В случае разгерметизации технологических трубопроводов, выходящих из оголовка подземного хранилища, предусмотрено гидравлическое закрытие труб, опущенных в емкость. Для этого по специальному трубопроводу зумпф заливается водой. Вода поднимается по трубопроводам до тех пор, пока ее столб не уравнивает давление газа внутри хранилища, создав таким образом надежный гидравлический затвор в трубах, препятствующий выбросу на поверхность паров сжиженного газа.

Двойная металлическая перемычка, расположенная в стволах большого диаметра. На участке ствола, пройденного по «рабочей толще» пород, возводится продуктонепроницаемая крепь. Крепь представляет собой металлическую сварную обечайку, с внутренней стороны которой имеется железобетонная рубашка. В пространство за металлическую обечайку при расчетном давлении осуществляется двух-, трехкратное нагнетание продуктонепроницаемого раствора. Раствор нагнетается по трубкам, герметично приваренным к металлической обечайке. По ее периметру привариваются металлические воротники, к которым крепятся сферические перемычки (рис. 7.33).

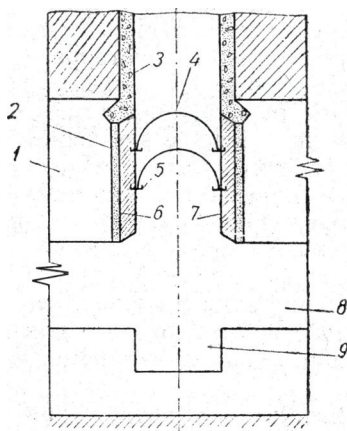


Рис. 7.33. Схема двойной металлической перемычки, расположенной в нижней части ствола [11]:

- 1 – «рабочая толща» пород; 2 – продуктнепроницаемый раствор; 3 – опорный венец крепи ствола; 4 – металлическая перемычка; 5 – кольцевой металлический воротник;
6 – металлическая сварная обечайка; 7 – железобетонная рубашка; 8 – выработка-емкость;
9 – зумпф

При использовании отработанных выработок шахт и рудников под подземные газонефтехранилища сложной проблемой является герметизация шахтных стволов. В стволах размещают комбинированные герметизирующие устройства, включающие железобетонные напорные стенки, бетон, мягкую глину, битум и другие материалы.

Материалы для сооружения герметичных перемычек.

Обеспечение надежности герметизирующих устройств выдвигает ряд требований к материалам, применяемым для их строительства. Основными среди них являются бетон, используемый при сооружении герметичной перемычки, цементные растворы для цементации закрепленного пространства в стволах и изолирующие жидкости, необходимые для герметичных перемычек с гидрозатвором и заполняющие пространство между бетонными стенками.

Бетоны для сооружения перемычек должны быть высокопрочными, практически непроницаемыми при давлении до 15 кгс/см^2 и безусадочными. Это обеспечивает плотность контакта материала перемычки с окружающим массивом пород, устойчивость к агрессивному воздействию углеводородных сред и отрицательных температур, а также исключает образование усадочных трещин в теле конструкции [9].

К изолирующим жидкостям предъявляются такие требования. Их вязкость должна быть минимальной для лучшего насыщения окружающих пород. Изолирующая жидкость не должна проникать через бетонную стенку. Не допускается ее контакт с породой в подходной выработке, где отсутствует избыточное давление.

Перспективными вяжущими материалами, способствующими созданию герметизирующих устройств подземных хранилищ, являются некоторые расширяющиеся портландцементы. Приготовленные на их основе бетоны и растворы отличаются повышенной прочностью, плотностью, наличием деформаций расширения при твердении, коррозионной стойкостью. В настоящее время разработаны специальные практически непроницаемые расширяющиеся цементные растворы и бетоны. В их состав входит расширяющийся портландцемент (РПЦ) МРТУ 51-185-66, состоящий из расширяющегося компонента (РК) – гипсоглиноземистого цемента М500 и портландцемента (ПЦ) М500. В качестве заполнителей применяются материалы, удовлетворяющие требованиям государственных стандартов на гидротехнические бетоны [9].

В зависимости от требуемого расширения бетонов и цементных растворов в состав РПЦ вводится соответствующее количество РК. Как показали исследования [9], при приготовлении расширяющихся бетонов предельные деформации расширения достигаются, если в состав РПЦ вводится не более 30 % РК, а для растворов – не более 20 % РК. Оптимальным составом РПЦ, обеспечивающим максимальную прочность и достаточные деформации расширения в бетонах и цементных растворах, являются РК+ПЦ=20+80 %.

Надежность работы герметизирующих устройств зависит от состояния контакта металлических деталей с материалами, приготовленными на основе РПЦ. Адгезионная способность бетонов и цементных растворов к металлу характеризуется коэффициентом сцепления. Данные табл. 7.7 показывают, что адгезионная способность бетона на основе РПЦ на 20–22 % выше, чем обычного бетона.

Таблица 7.7. Коэффициент сцепления с металлом расширяющегося и объемного бетонов различного возраста твердения [11]

Возраст твердения, сут.	Бетон на РПЦ			Бетон на обычном портландцементе
	$R_{сж}$	$R_{сп}$	$K_{сц}$	$K_{сц}$
28	410	20,9	0,05	0,042
180	534	23,9	0,044	0,035
350	570	30,9	0,054	0,042
720	640	32,1	0,05	–

Примечание. $K_{сц}$ – коэффициент сцепления; $R_{сп}$ – предел прочности сцепления металла с бетоном, кгс/см²; $R_{сж}$ – предел прочности на сжатие, кгс/см²

Выполнение всех требований, предъявляемых к приготовлению материалов, позволяет получать высокомарочные, практически непроницаемые бетоны в конструкциях промышленных герметизирующих устройств подземных хранилищ. В табл. 7.8 приведены физические и механические свойства расширяющегося бетона.

Водопроницаемость при давлении 50 кгс/см² отсутствует. Для получения более плотных и прочных материалов применяются различные полимерные добавки в виде эмульсий, вводимых в бетонную смесь и затвердевающих в цементном камне, кольматируя его поры. Снижению проницаемости и улучшению других свойств бетонов способствуют компоненты, содержащие дивинил, фуриловый

спирт с соленоокислым анилином, эпоксидные смолы и др. Эпоксидные смолы вводятся в количестве 0,3–10 % от массы цемента. Часто используются водорастворимые эпоксидные смолы ТЭГ-1, ТЭГ-17, карбамидная смола № 89 и др.

Таблица 7.8. Свойства расширяющегося бетона [9]

Показатели	Лабораторные образцы (возраст 2 года)	Образцы из производственных замесов (возраст 3,5 года)	Керны из тела перемычки (возраст 5,5 года)	В конструкции (возраст 5,5 года)
Предел прочности при сжатии, кгс/см ²	640	501–584	637	690
Призмная прочность, кгс/см ²	520	412–479	509	–
Предел прочности при растяжении, кгс/см ³	41	33–38	44	–
Деформация расширения, мм/м	+4,7	+(3,4–4,2)	–	–

Для герметизации подземных шахтных хранилищ сжиженных газов применяются перемычки с гидрозатвором специальных конструкций. Они представляют собой две бетонные стенки, примыкающие к окружающей непроницаемой породе, пространство между которыми заполняется изолирующей жидкостью под давлением, превышающим давление хранимого сжиженного газа [11]. Изолирующая жидкость изготавливается на основе глинистого раствора из бентонитового порошка с добавлением жидкого стекла, целлюлозы, щелочи, обеспечивающих стабильность раствора.

Расчет оптимальных параметров герметичных перемычек. Расчет прочности напорных бетонных стенок герметизирующих устройств, расположенных во врубах, выполняется с учетом сжатия и скалывания пород, возможности среза тела перемычек по периметру изолируемых выработок и отсутствия трещин в бетоне, образующихся под действием возникающего в теле перемычки напряженного состояния.

При разработке методики расчета используются две схемы расположения перемычки во врубе: свободное опирание и местное защемление. Установлено [9], что наибольшее растягивающее напряжение в случае свободного опирания возникает в центральной грани, не подверженной действию нагрузки. При жестком защемлении по контуру определяющими оказываются главные растягивающие напряжения у грани со стороны нагрузки в зоне

примыкания напорной стенки к породе, в центральной же части перемычки прослеживаются небольшие напряжения растяжения.

В работе [9] предложена методика расчета толщины перемычки, реализованная на ЭВМ. На рис. 7.34 изображены расчетные зависимости толщины монолитной бетонной напорной перемычки от рабочего давления в подземных емкостях.

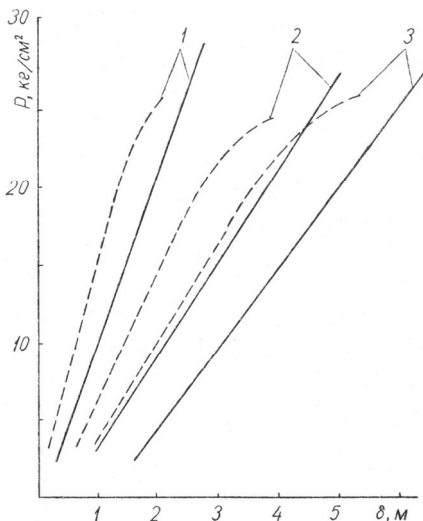


Рис. 7.34. Зависимость толщины напорной стенки δ герметизирующего устройства от давления в емкости (бетон М400, $R_p = 12,5 \text{ кгс/см}^2$) при сечении подходной выработки $1,8 \times 1,8$ (кривая 1) $3,8 \times 3,8$ (кривая 2) и 3×5 м (кривая 3) [9]: сплошной линией обозначено защемление по контуру, пунктиром – свободное опирание

С учетом условия работы перемычки на срез предложена формула для определения толщины δ перемычки [112]

$$\delta = \frac{n \cdot p \cdot a \cdot b}{2(a+b)R_{cp} \cdot m_y}, \quad (7.31)$$

где n – коэффициент перемычки, $n = 1,2-1,3$; p – нагрузка на перемычку; a, b – размеры выработки-емкости (ширина, высота); R_{cp} – расчетное сопротивление бетона перемычки на срез

$$R_{cp} = 0,75 \sqrt{R_{сж} \cdot R_p}, \quad (7.32)$$

$R_{сж}$ – предел прочности бетона на сжатие; R_p – предел прочности бетона на растяжение; m_y – коэффициент условий работы, $m_y = 0,5$.

Создание врубов для размещения герметичных переемычек и выбор рациональной формы заделки. Герметичные переемычки подземных хранилищ размещаются во врубах. Создание врубов является сложной операцией. С целью уменьшения трещиноватости массива, способствующей законтурной фильтрации нефтепродуктов, врубы обычно проходят вручную. Применение буровзрывных работ в данном случае исключается, т. к. ударная волна при взрыве приводит к появлению значительного количества трещин.

Для механизации работ по созданию надежных врубов разработана технология, предусматривающая образование врубов при помощи бурения коротких скважин диаметром 160–200 мм [11]. Применяется буровой инструмент, состоящий из буровой коронки и штанги-шнека длиной 0,75 м. Коронка представляет собой четырехлучевую фрезу, в лучах которой закреплено шесть зубков, армированных сплавом ВК-8. Бурение врубовых скважин осуществляется колонковым электросверлом ЭБК-5.

Вначале одна под другой бурятся короткие скважины, количество которых зависит от размеров горизонтальной выработки. Затем массив между скважинами разрушается отбойными молотками. Создается вруб, в контуре которого отсутствуют трещины. Глубина вруба устанавливается с учетом обеспечения прочности переемычек и предотвращения фильтрационных процессов. Во врубах возводятся бетонные стенки. Надежность работы герметичных переемычек зависит от качества проведения работ по их сооружению, оптимальных параметров и формы заделки в горную породу. Испытания показали высокую производительность бурения и надежность работы конструкции.

С помощью метода фотоупругости исследованы рациональные формы заделки переемычки. В качестве материала для изготовления моделей герметизирующих устройств был использован эпоксигель, представляющий собой состав эпоксидной смолы ЭД-6 (70 %) и отвердителя – метилтетрагидрофталевого ангидрида (30 %). Он обладает хорошей прозрачностью, стабильностью свойств во времени и имеет линейную зависимость между напряжением и деформациями. Модели выработки-емкости выполнялись из органического стекла. Согласно формам заделки переемычки в массив горной выработки

моделям придавались геометрические конфигурации, причем такие параметры, как длина, ширина и глубина заделки были постоянными для каждой формы. В процессе эксперимента изучены конфигурации моделей перемычек, изображенные на рис. 7.35.

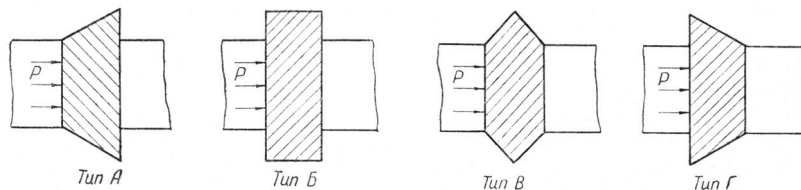


Рис. 7.35. Схемы конструкций моделей герметичных перемычек с различными формами заделки [11]

Поле напряжений каждой перемычки снималось на фотопленку при следующих значениях давления 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 кгс/см². В качестве критерия оценки степени напряженно-деформированного состояния, испытываемого той или иной моделью при ее нагружении, был принят максимальный порядок полос в зоне напряженного состояния. Установлено, что наименьшее напряжение испытывает перемычка с формой заделки Г, наибольшее – А и Б.

Технология сооружения напорных стенок герметичных перемычек и опрессовка емкости. После образования врубов приступают к сооружению напорных стенок. Для этого необходимы бетонные и растворные смеси. Срок выдерживания бетонных и растворных смесей с момента их приготовления до уплотнения может достигать полутора часов, что позволяет применять расширяющийся портландцемент при обычном методе бетонирования. Смеси готовят на типовых бетоносмесительных установках. Транспортировка, укладка, уплотнение осуществляются так же, как и для бетона на обычном портландцементе. Однако бетонирование напорных стенок герметизирующих устройств производится непрерывно. Перерывы в укладке бетона способствуют образованию рабочих швов, которые впоследствии могут стать местом возможной разгерметизации хранилищ. Цементация затрубного пространства расширяющимися цементными растворами при сооружении перемычек в стволах выполняется обычными методами с помощью серийно выпускаемых растворонасосов. В связи с высокими требованиями, предъявляемыми к прочности и герметичности

перемычек, при их строительстве осуществляется тщательный контроль за приготовлением бетонных и растворных смесей.

7.5.3. Герметизация стенок выработок-емкостей

Строительство подземных хранилищ шахтного типа в основном осуществляется в плотных горных породах, не требующих крепления стенок. Однако во многих регионах требуется сооружение подземных хранилищ и в породах менее плотных, а также в многолетнемерзлых, что вызвало необходимость обеспечения прочности и герметичности хранилищ за счет применения различных способов закрепления стенок камер-емкостей. Наиболее широко применяется анкерное и набрызг-бетонное крепление. Анкерное крепление стенок выработок-емкостей осуществляется в комплексе с горнопроходческим циклом.

На рис. 7.36 приведена технология сооружения выработки с механизацией горных процессов и возведением анкерного крепления.

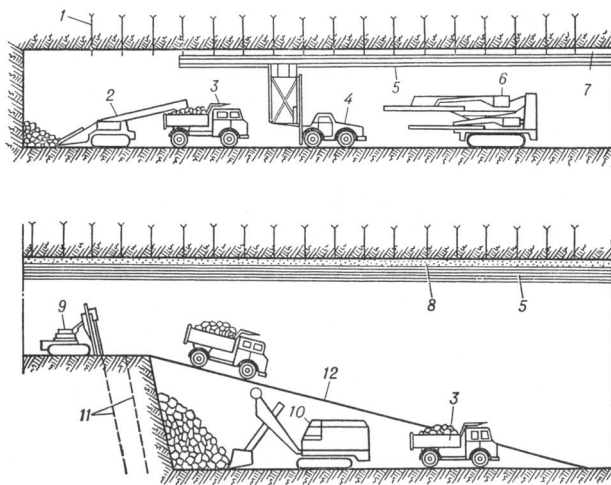


Рис. 7.36. Сооружение подземной емкости уступным забоем с одновременным возведением анкерной крепи [134]:

1 – анкерное крепление; 2 – породопогрузочная машина; 3 – автомобиль-самосвал; 4 – анкероукладочная машина; 5 – вентиляционный трубопровод; 6 – самоходная буровая установка; 7 – предохранительная металлическая сетка; 8 – бетонная крепь; 9 – буровой станок; 10 – подземный экскаватор; 11 – взрывные скважины; 12 – пандус

В Украине создана самоходная установка на гусеничном ходу

УАК, практически устраняющая ручной труд при возведении анкерной крепи.

В некоторых случаях, когда осложняются горные работы в связи со свойствами пород, возникает необходимость наносить на стенки выработок-емкостей набрызг-бетон. Крепление стенок выработок-емкостей позволяет повысить их прочность, устойчивость и обеспечить непроницаемость.

7.5.4. Технология эксплуатации подземных хранилищ шахтного типа

Технологическое обустройство подземных газонефте-хранилищ обеспечивает определение давления, температуры, количества и качества хранимого продукта в подземных емкостях, прием и выдачу продукта на один или несколько видов транспорта, дистанционное управление и автоматизацию производственных процессов.

В основу технологических схем эксплуатации подземных хранилищ шахтного типа положено использование насосных или самотечных способов опорожнения подземных емкостей. На рис. 7.37 представлена технологическая схема эксплуатации подземного хранилища нефтепродуктов шахтного типа.

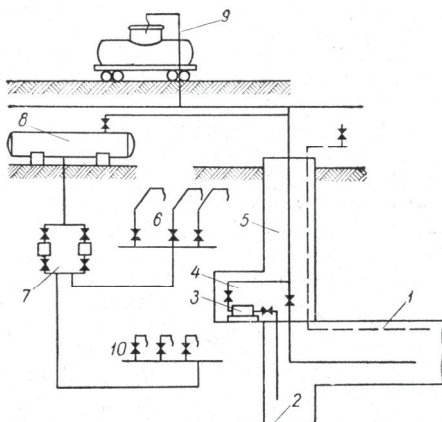


Рис. 7.37. Принципиальная технологическая схема подземного хранилища нефтепродуктов шахтного типа [11]:

- 1 – выработка-емкость; 2 – зумпф; 3 – продуктовый насос; 4 – насосная камера; 5 – ствол;
6 – автоналивные стояки; 7 – наземная насосная станция для раздачи продукта;
8 – наземный буферный резервуар; 9 – железнодорожная эстакада

При эксплуатации подземных хранилищ нефти и нефтепродуктов для выдачи хранимых продуктов на поверхность используются как погружные, так и непогружные насосы с горизонтальным валом (табл. 7.9). Погружные насосы располагаются в эксплуатационных скважинах или вскрывающих выработках, непогружные – в подземных насосных станциях (рис. 7.38).

Таблица 7.9. Техническая характеристика насосов, используемых в подземных шахтных хранилищах [99]

Марка насоса	Производительность, м ³ /ч	Напор, м	Тип электродвигателя	Мощность, кВт
20НА-22Х3	600	65	МА-37-52/4ВП	160
12НА-22Х6	150	54	–	32
НК-560/335-180	600	180	ВАО-132-2	400
НТ560/335-330	500	300	АРП-630	600

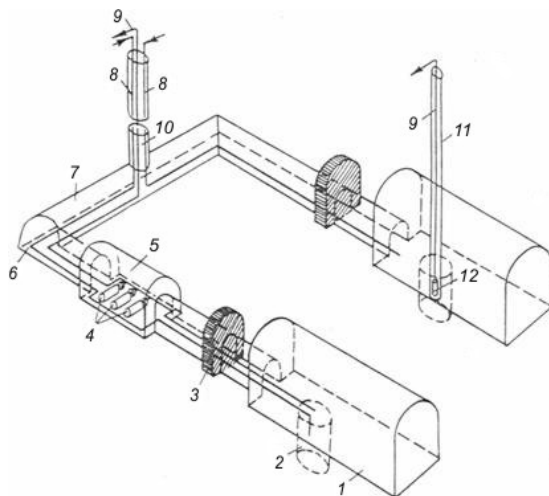


Рис. 7.38. Схема подземного хранилища с погружными и непогружными насосами [150]:

- 1 – выработка-емкость; 2 – зумпф; 3 – герметичная перегородка; 4 – непогружные насосы;
- 5 – насосная камера; 6 – подходная выработка; 7 – коллекторная выработка;
- 8 – трубопровод для закачивания продукта; 9 – трубопровод для отбора продукта;
- 10 – ствол; 11 – технологическая скважина; 12 – погружной насос

Для всех технологических трубопроводов, прокладываемых во вскрывающих и вспомогательных выработках, предусматриваются:

несгораемые опоры, герметизация стыков, усиленная противокоррозионная изоляция, электросварные соединения.

Уровень нефти и нефтепродуктов в емкостях измеряют обычными уровнемерами поплавкового типа, а сжиженных газов – уровнемерами буйкового типа.

Для подачи сжиженных газов в подземные емкости используются насосы 4НГ-5Х4, 4НГ-5Х2 (для пропана, бутана и бытового газа), 4НГК-5Х1.

Для извлечения сжиженного газа из шахтных хранилищ применяют насосы двух типов: артезианские и погружные с забойными двигателями. В бывшем СССР разработан погружной многоступенчатый насос с забойным двигателем типа ЭЦГ. Он имеет три типоразмера: ЭЦГ-16-200 (подача 16 м³/ч при напоре 200 м жидкости), ЭЦГ-63-260 и ЭЦГ-160-260 (соответственно подача 63 и 160 м³/ч при напоре 260 м жидкости).

Необходимое число насосов в хранилище для отгрузки сжиженных газов на железнодорожный транспорт в нормативные сроки определяется выражением

$$n = Q_n / q_n, \quad (7.33)$$

где Q_n – масса продукта, необходимая для отгрузки в железнодорожный транспорт в нормативные сроки

$$Q_n = \frac{Z V_u \varphi}{\tau K_g}, \quad (7.34)$$

где Z – число цистерн в поданном составе; V_u – масса продукта в одной цистерне; φ – коэффициент заполнения цистерны (обычно – 0,8); τ – нормативное время налива цистерны (обычно – 2); K_g – коэффициент запаса во времени (0,8); q_n – подача погружного насоса.

В технологических схемах хранилищ, эксплуатирующихся с подпором подземными водами, дополнительно предусматриваются системы для отбора подземных вод погружными насосами.

При отборе сжиженного газа путем выдавливания жидкой фазы его пары, находящиеся в наземном резервуаре, закачивают в подземную емкость. По мере закачки паров жидкая фаза из подземной емкости выдавливается на поверхность в наземный резервуар, откуда перекачивается к месту раздачи обычными

насосами. Преимущество этого метода заключается в том, что в подземной емкости находятся только приемные и расходные трубы. К недостатку этого метода следует отнести нарушение стабильности температурного режима хранилища.

Существует и другой способ. С помощью компрессора пары отбираются из подземных емкостей и затем компримируются на поверхности. При этом способе отбора оборудование в подземных емкостях не размещается, но требуются значительные энергетические затраты, связанные с осуществлением неизбежного холодильного цикла, что снижает эффективность способа.

Из всех рассмотренных самое широкое распространение получил способ отбора продукта погружными насосами как наиболее экономичный.

7.5.5. Испытания подземных хранилищ шахтного типа

Основным условием надежности подземных хранилищ шахтного типа, является их герметичность. Для проверки герметичности подземные емкости подвергаются опрессовке. Емкости для хранения пропана опрессовывают сжатым воздухом под давлением 1,2–1,4 МПа в течение 24 ч. При положительных результатах приступают к оснащению скважины и ствола устройствами для осуществления сливноналивных операций [47].

Хранилища большой вместимости опрессовывают дважды: первый раз тогда, когда вместимость выработок хранилища составляет всего 500–1 000 м³. В этом случае испытывают проницаемость горных пород под давлением воздуха 0,8–1,0 МПа в течение суток. Второй – после полного окончания строительства хранилища, т. е. когда пройдены горные выработки, сооружены перемычки и установлено необходимое оборудование (задвижки на обсадные трубы стволов и скважин, глубинные насосы, уровнемеры и т. д.). Опрессовку в этом случае выполняют также в течение суток, но при давлении воздуха 1,2–1,4 МПа, т. е. при давлении, в полтора-два раза превышающем предполагаемое давление сжиженных газов в хранилище. В процессе опрессовки наблюдают за давлением и температурой внутри хранилища. Выработки-емкости считаются выдержавшими испытания на герметичность, если видимое падение давления не превышает падения давления из-за изменения температуры. В завершение испытаний по количеству нагнетаемого и выданного воздуха определяют вместимость хранилища.

Раздел 8

ПОДЗЕМНЫЕ ХРАНИЛИЩА, ОБРАЗОВАННЫЕ КАМУФЛЕТНЫМИ ВЗРЫВАМИ

Наряду с подземными хранилищами углеводородов, образованными в солях и хранилищами шахтного типа, разрабатывались новые методы и конструкции подземных хранилищ, расширялась область их применения. Впервые в бывшем СССР был разработан метод подземного захоронения токсичных промышленных отходов в подземных резервуарах, сооружаемых камуфлетными взрывами [8, 47, 113].

Первыми исследованиями в области использования энергии камуфлетного взрыва для уплотнения глинистых грунтов, их практического применения были работы Ю.А. Абелева и М.Я. Сухаревского. В дальнейшем эти работы были продолжены Г.Н. Акутиным и А.А. Вовком.

В 1960 г. группа специалистов (О.М. Иванцов, Н.А. Евстропов и др.) впервые в мировой практике применила метод камуфлетных взрывов в пластичных глинистых породах для строительства подземных хранилищ углеводородов. Затем В.А. Мазуровым, В.И. Смирновым, Д.М. Голицинским, Л.Л. Мельниковым были разработаны способы сооружения подземных хранилищ камуфлетными взрывами сосредоточенных зарядов ВВ, методы расчета параметров взрывных работ и сейсмического воздействия на наземные и подземные сооружения [31, 113, 114].

Изучение, опробование и внедрение данного метода в бывшем СССР проводились в различных геологических условиях (в том числе в моренных суглинках, лессах, скифских, кембрийских и чеганских глинах). В толще моренных суглинков проведено более 100 опытных взрывов с образованием полостей объемом от 10 до 100 м³. В качестве ВВ использованы отходы пироксилиновых порохов, аммонит № 6ЖВ и гранулированный тротил, в качестве забойки – вода. Величина основного заряда ВВ, как правило, составляла 80–650 кг.

Подземные хранилища, сооружаемые этим способом, состоят из подземной емкости (полости), скважины с системой технологических трубопроводов и комплекса поверхностных сооружений. Такие хранилища могут создаваться как взрывами обычных ВВ в

пластичных горных породах, так и при помощи ядерных зарядов в породах различной крепости.

Под воздействием камуфлетного взрыва подземная емкость образуется вследствие уплотнения пластичных пород.

Подземные емкости, образуемые взрывами сосредоточенных зарядов ВВ, по форме близки к сферической.

8.1. Действие камуфлетного взрыва при создании подземных хранилищ

При взрыве одиночного заряда на глубине в зарядной камере создаются большие давления. При давлении 10^4 МПа и более, возникающем на границе раздела заряд ВВ – порода, среда сжимается и в непосредственной близости от заряда образуется сферическая полость, границы которой определяются удельным давлением ударной волны и физико-механическими свойствами среды. Экспериментальные исследования [115] показали, что большое влияние на сжимаемость среды оказывает ее пластичность. По мере возрастания пластичности сжимаемость породы увеличивается.

В грунтах, в отличие от идеальной жидкости, скорость распространения волны сжатия меньше скорости звука. По мере удаления волны сжатия пластические деформации сменяются деформациями упругопластическими, а затем и упругими. Основываясь на таком характере деформаций грунта при подземном взрыве, зону действия взрыва разделили на ближнюю, среднюю и дальнюю, а первую еще и на зоны сжатия и разрушения. Размеры зон сжатия и разрушения для сосредоточенного тротилового заряда предлагается определять из зависимостей [29]

$$R_c = 19K_c \text{ и } \bar{R}_p = 19K_p, \quad (8.1)$$

где $\bar{R}_c = R_c/R_z$ – относительный радиус зоны сжатия (R_c – радиус зоны сжатия, R_z – радиус заряда); \bar{R}_p – относительный радиус зоны разрушения; K_c , K_p – эмпирические коэффициенты, значения которых приведены в табл. 8.1.

Основным условием образования подземной полости камуфлетным взрывом является величина заглубления центрального заряда. Ее находят опытным путем по методу приближений.

Таблица 8.1. Значения эмпирических коэффициентов [29]

Порода	Коэффициент			
	K_c	K_p	R_c	R_p
Рыхлый свеженасыпной грунт	0,6	0,85	11,4	16,15
Песок плотный	0,5	0,63	9,5	17,97
Глина	0,5	0,6	9,5	11,4
Скальная	0,2	0,5	3,8	9,5

Минимально допустимую величину заглубления центра заряда камуфлетного взрыва при однородном геологическом разрезе можно определить по формуле

$$W_{\min} > 2\sqrt[3]{Q/q_n} \quad (8.2)$$

где Q – масса основного заряда, кг; q_n – удельный расход ВВ на единицу нормальной воронки, кг/м³.

В результате действия взрыва происходят необратимые деформации сжатия среды, что приводит к увеличению плотности, а следовательно, к усилению механических связей между отдельными частицами грунта в определенном пространстве вокруг создаваемой полости. Кроме того, в результате воздействия взрыва наблюдаются структурно-текстурные изменения в пластичной породе, что также обуславливает изменение механических свойств грунта.

Н.А. Евстроповым установлено, что абсолютное максимальное увеличение плотности глинистых грунтов после взрыва составляет около 40 %; с удалением от центра взрыва плотность уменьшается по линейной зависимости [116]. Первоначальные механические характеристики глинистых грунтов (сопротивление на одноосное сжатие и сцепление) возрастают после взрыва примерно в 4 раза у стенок полостей, а с удалением от центра взрыва убывают по экспоненциальному закону и описываются уравнениями

$$\sigma_r = \sigma_0 + K_1/e^{\alpha_1/\bar{r}}; \quad C_r = C_0 + K_2/e^{\alpha_2/\bar{r}} \quad (8.3)$$

где σ_0 , C_0 – соответственно предел прочности глин на одноосное сжатие и сцепление до взрыва, МПа; $\bar{r} = r_n/r_3$ – относительное расстояние от контура полости (r_n – расстояние от контура полости, м; r_3 – радиус заряда, м); $\alpha_{1,2}$, $K_{1,2}$ – эмпирические константы, зависящие от физико-механических свойств среды.

Установлены значения эмпирических коэффициентов [117]: для скифских глин $\alpha_1 = 0,18$, $\alpha_2 = 0,49$, $K_1 = 6,6$, $K_2 = 4,0$; для моренных суглинков $\alpha_1 = 0,2$, $\alpha_2 = 0,22$, $K_1 = 6,9$, $K_2 = 1,15$.

На основании экспериментальных исследований и изучения прочностных свойств глинистых пород в зоне уплотнения [118], выделены следующие характерные зоны: полость радиусом R_e , зона растрескивания породы радиусом R_m , зона уплотнения (пластических деформаций) глинистых пород радиусом $R_{з.п.}$ и зона упругих деформаций радиусом R_y (рис. 8.1). Установлено, что уплотнение породы характеризуется увеличением предела прочности на одноосное сжатие и сцепления в 2,0–2,5 раза, увеличением плотности на 5,0–8,0 % и снижением пористости на 15,0–30,0 %. При этом отношение величины зоны уплотнения к радиусу образуемой полости не зависит от масштаба взрыва и находится в пределах 3,0–3,5. Наличие в приконтурном слое ослабленной зоны пород вследствие развития радиальных и кольцевых трещин обуславливает разработку мероприятий по закреплению емкостей.

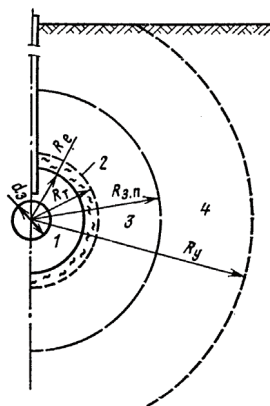


Рис. 8.1. Схема расположения зон действия камуфлетного взрыва в пластичных горных породах [118]:

1 – полость; 2 – зона трещиноватости; 3 – зона пластических деформаций;
4 – зона упругих деформаций

Опытно-промышленные испытания подземных хранилищ, созданных методом камуфлетных взрывов, сопровождались изучением параметров области деформаций пород вокруг полостей.

В результате исследований установлено изменение трещинной проницаемости пород K_n с расстоянием от центра взрыва (рис. 8.2).

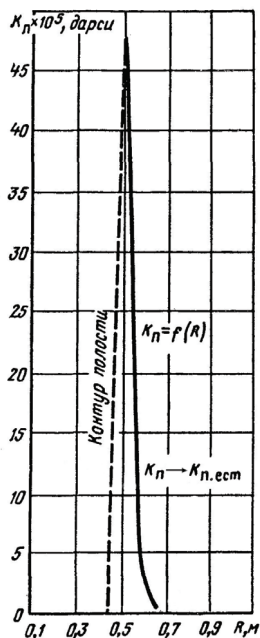


Рис. 8.2. Трещинная проницаемость пород K_n с расстоянием от центра взрыва [118]

Из рис. 8.2 следует, что трещинная проницаемость уменьшается от максимума на контуре каверны по кривой гиперболического типа, асимптотически приближаясь к естественной проницаемости в зоне упругих деформаций.

Камуфлетные взрывы при образовании подземных полостей отличаются от обычных камуфлетных взрывов, применяемых в горном деле и строительстве тем, что для первого случая равные по массе заряды ВВ взрываются на глубине в 2,0–2,5 раза большей, чем для второго. Кроме того, образование подземных полостей методом взрыва осуществляется только в отложениях пластичных пород.

Создание подземных емкостей методом взрыва имеет также ряд технологических особенностей: высокую плотность заряжения основного заряда ВВ, применение гидрозабойки, повышенный удельный расход ВВ.

8.2. Технология сооружения подземных хранилищ камуфлетными взрывами

Участок для строительства подземных хранилищ методом камуфлетных взрывов выбирается исходя из наличия пригодной толщи глинистых пород и возможности ведения в данном районе взрывных работ. Подземные емкости сооружаются в литологически однородных слоях глинистых пород мощностью не менее 15 м с глубиной залегания: для жидких нефтепродуктов 20–120 м, сжиженных газов 60–150 м, жидких удобрений 20–50 м.

Для того чтобы получить подземные резервуары емкостью 100, 200, 400, 500, 700, 1 000 м³ необходима минимальная мощность горных пород соответственно 18, 23, 27, 30, 33 и 38 м, т. е., в 2–3 раза превышающая радиус шара равного объема.

Благоприятными для создания подземных полостей являются глинистые породы с числом пластичности не менее 12, коэффициентом водонасыщенности не более 0,9, коэффициентом диффузии в пределах 10^{-5} – 10^{-6} см²/с.

В практике строительства применяются два метода сооружения: образование полости через скважину и образование полости через шурф. Работы ведутся в такой последовательности: бурение скважины (шурфа) и цементация затрубного пространства; выполнение прострелочных и взрывных работ (рис. 8.3).

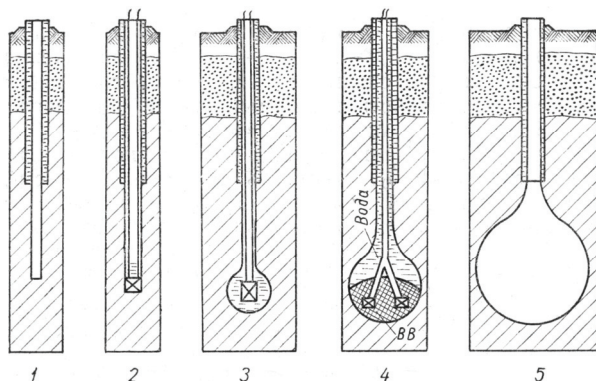


Рис. 8.3. Технологическая схема сооружения подземной емкости способом глубинных взрывов [11]:

1 – бурение и обсадка скважины; 2 – первый прострелочный заряд; 3 – второй прострелочный заряд; 4 – основной заряд ВВ; 5 – готовая подземная емкость

Технологическая скважина при строительстве подземных хранилищ методом камуфлетных взрывов предназначена для спуска и размещения заряда ВВ, ведения взрывных работ по образованию подземной полости и дальнейшей ее эксплуатации.

На первом этапе сооружения емкости скважины бурят самоходными буровыми станками УРБ-3м, УРБ-2А, АБВ-3, УШБ-16, в комплект поставки которых входит оборудование для цементации затрубного пространства. Технические характеристики самоходных буровых станков представлены в табл. 8.2.

Таблица 8.2. Технические характеристики самоходных буровых станков [29]

Технические характеристики	УРБ-3АМ	УРБ-2А	АБВ-3	УШБ-26
Глубина скважины, м	500	200	20; 40; 100	80/300*
Начальный диаметр скважины, мм	248	151	168; 325	150/219*
Способ бурения	Вращательный (ротор)		Ударно-канатный, вибрационный, ударно-вращательный, колонковый	Вращательный
База	МАЗ-500	ЗИЛ-157К	ЗИЛ-131	ЗИЛ-157
Основной рабочий орган	Долото	Долото	Вибромолот	Долото
Грузоподъемность лебедки, т	2,8	2,5	4	2,5
Частота вращения, об./мин.	100; 197; 300	110; 190; 314	58; 98; 124; 245; 390	106; 177
Масса станка, т	10,5	10,05	9,9	7,96

*В числителе – при шнековом бурении; в знаменателе – при колонковом бурении

До глубины обсадки каждую скважину бурят диаметром 350–400 мм. Скважины обсаживают трубами нефтяного сортамента, а цементирование затрубного пространства – расширяющимся цементным составом. Разбуривание цементной пробки и добуривание скважины осуществляется диаметром 250–300 мм до глубины заложения заряда. Скважина считается подготовленной к производству взрывных работ, если она герметична, а искривление ствола не превышает 1–2°.

Роторная установка УРБ-3АМ (рис. 8.4) смонтирована на автомашине МАЗ-500 и рассчитана на проходку скважин глубиной до 500 м. Роторная установка УРБ-2А применяется для бурения скважин при строительстве хранилищ методом камуфлетных взрывов глубиной до 200 м.

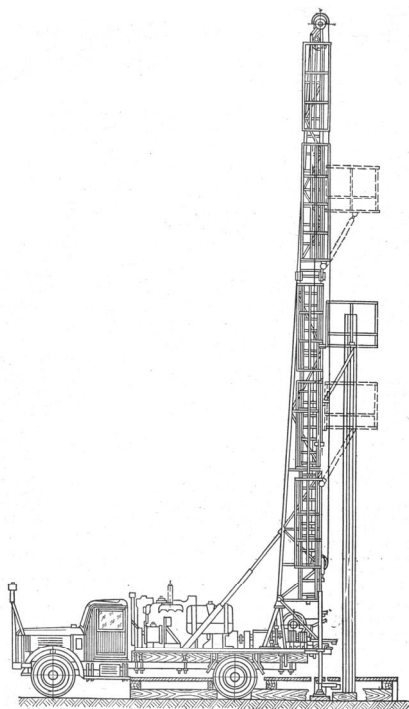


Рис. 8.4. Общий вид установки УРБ-3АМ [29]

Самоходная буровая установка УШБ-16 (рис. 8.5) позволяет бурить скважины шнековым или роторным способом глубиной до 80 и 300 м, а также бурить шурфы диаметром 1 200 мм до глубины 50 м. Установка оснащена вибровращателем, что повышает производительность шнекового бурения в вязких породах. Буровой инструмент для роторного бурения – лопастные и шарошечные долота, для шнекового – комплект шнеков и породоразрушающие инструменты (долота). Конструкция бурового инструмента детально изложена в литературе [119].

В мягких, средней крепости грунтах и глинистых породах для проходки шурфов целесообразно использовать станки КШК-30А и КШК-40, предназначенные для проходки шахтных колодцев сухим способом на глубину 30–40 м (рис. 8.6).

Рабочим органом машины является раскрывающийся бур, выполняющий одновременно с резанием грунта и его набор. Бур

работает с цикличной (прерывистой) транспортировкой грунта из шурфа на поверхность земли при помощи моторной лебедки.

Технические характеристики станка КШК-30А приведены в табл. 8.3.

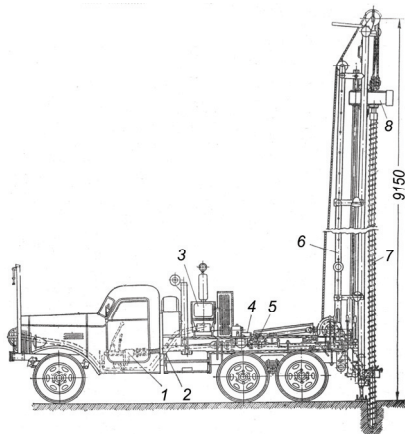


Рис. 8.5. Буровая установка УШБ-16 [29]:

1 – коробка отбора мощности; 2 – карданный вал; 3 – насос буровой; 4 – коробка скоростей автомашины, 5 – верхний карданный вал; 6 – мачта; 7 – колонна труб; 8 – подвижный вращатель

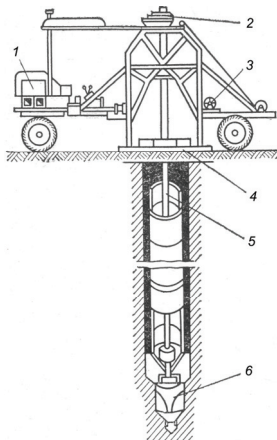


Рис. 8.6. Станок КШК-30А [29]:

1 – двигатель; 2 – верхний редуктор с механизмом вертикальной подачи; 3 – ручная лебедка для опускания обсадных колец; 4 – рама опорная; 5 – буровые трубы; 6 – бур

Таблица 8.3. Технические характеристики станка КШК-30А [29]

Диаметр шурфа, м	0,73–1,3
Максимальная глубина шурфа, м	30
Средняя расчетная скорость проходки м/ч	1,0–1,25
Углубление бура за один цикл, мм	150–200
Подача бура за одно вращение, мм	24
Частота вращения бура, об./мин.	11 и 22
Скорость подъема бура, м/с	0,3
Грузоподъемность моторной лебедки, т	2
Масса агрегата, т	5,98

Установки КШК-30А с успехом применяются при создании подземных хранилищ в моренных суглинках, лессах и других разновидностях глинистых пород.

На втором этапе сооружения емкостей производятся взрывные работы. Создание подземной емкости взрывным способом заключается в том, что в нижней части скважины после взрыва нескольких небольших зарядов ВВ возникает сферическая полость, в которую помещается основной заряд большей величины. При взрыве основного заряда пластичная порода подвергается пластическому течению и уплотнению, в результате чего образуется шарообразная емкость с упрочненными стенками. Ее размеры зависят от величины заряда ВВ и сжимаемости среды.

При образовании подземных емкостей методом камуфлетных взрывов применяются водостойчивые ВВ (аммонит № 6ЖВ, детонит М, аммонал водостойчивый и др.).

Параметры взрывных работ при строительстве подземных хранилищ методом камуфлетных взрывов рассчитываются в следующей последовательности.

1. Масса основного заряда

$$Q = qVe, \quad (8.4)$$

где q – удельный расход ВВ, кг/м³, принимаемый равным обратной величине показателя простреливаемости $q = 1/P_{np}$; V – проектный объем полости, м³; e – коэффициент относительной мощности ВВ.

Показатель простреливаемости P_{np} определяется согласно по табл. 8.4.

Таблица 8.4. Показатель простреливаемости и физико-механические свойства пород [99]

Породы	Весовая влажность, %	Число пластичности	Средняя плотность, г/см ³	Пористость, %	Сцепление, кПа	Предел прочности на одноосное сжатие, МПа	Показатель простреливаемости, м ³ /кг
Моренный суглинок	10,8	8	2,1	28,8	46	0,236	0,2
Пестроцветные глины	21	20	2,01	37,3	4	–	0,25
Аральские глины и суглинки	–	–	–	–	–	–	0,24
Чеганские глины	25,7	31,7	1,96	43,3	120	–	0,24
Делювиальные глины	18,5	18	2,04	37,5	–	–	0,26
Суглинки	25,8	17,7	1,92	43,7	–	–	0,4
Глины третичные	24,8	22,8	1,98	41,6	–	–	0,25
Четвертичные суглинки	18	25	2,06	38	50	0,65	0,34
Скифские глины	18	25	2,06	36	54	0,73	0,23
Лессовидные суглинки	10	11	1,7	40	30	2,6	0,3

Коэффициент относительной мощности ВВ имеет следующие значения [29]:

Аммонит № 6ЖВ	1,0	Гранулит М	1,13
Гранулотол	1,2	Игданит	1,13
Граммонит 50/50-В	1,01	Аммонал водоустойчивый	0,9
Граммонит 79/21	1,0	Детонит М	0,82
Гранулит АС-4	0,98	Граммонал А-8	0,8
Гранулит АС-8	0,89		

2. Найденная величина основного заряда ВВ проверяется по фактору камуфлетности [118]:

$$Q \leq Q_{кам}, \quad (8.5)$$

где $Q_{кам}$ – предельная величина заряда ВВ камуфлетного действия, кг.

3. Предельная масса камуфлетного заряда ВВ

$$Q_{кам} = kH^n, \quad (8.6)$$

где H – глубина заложения заряда, м; k, n – эмпирические константы, зависящие от физико-механических свойств глинистых пород и типа ВВ. Для моренного суглинка $k = 0,04, n = 2,8$, скифских глин $k = 0,04, n = 2,9$, тяжелых разновидностей глинистых пород $k = 0,04, n = 3$.

4. Глубина заложения заряда для глинистых пород, имеющих влажность 10–20 %, плотность не более $2,0 \text{ г/см}^3$, пористость 30 % и показатель простируемости $0,1–0,3 \text{ м}^3/\text{кг}$, определяется из выражения [8]

$$H \geq (48 - 50)R_0, \quad (8.7)$$

где R_0 – радиус сосредоточенного заряда ВВ, м

$$R_0 = \sqrt[3]{\frac{3Q}{4\pi\Delta}}, \quad (8.8)$$

Q – масса сосредоточенного заряда, кг; Δ – плотность взрывчатого вещества, кг/м^3 .

Зависимости предельной массы камуфлетного заряда ВВ от глубины его заложения (при использовании аммонита № 6ЖВ) приведены на рис. 8.7.

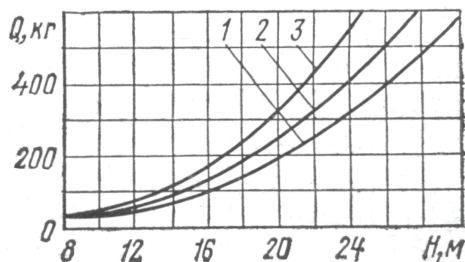


Рис. 8.7. Зависимости предельной массы камуфлетного заряда ВВ от глубины его заложения [29]:

- 1 – для моренных суглинков ($Q = 0,04H^{2,8}$); 2 – для скифских глин ($Q = 0,04H^{2,9}$);
3 – для тяжелых разновидностей глинистых пород ($Q = 0,04H^3$)

5. Объем подземной полости, образуемой внутренним взрывом, вычисляется по формуле

$$V = k \cdot \sum Q_i \cdot \Pi_{np}, \quad (8.9)$$

где V – объем полости, получаемой в результате внутреннего взрыва, м^3 ; k – поправочный коэффициент, равный 0,8 для заряда величиной 100–1 500 кг; $\sum Q_i$ – суммарная величина заряда, кг; P_{np} – показатель простреливаемости пород, $\text{м}^3/\text{кг}$.

При сооружении подземной полости через шурф диаметр его незакрепленной части позволяет разместить сосредоточенный заряд ВВ, необходимый для сооружения полости проектируемого объема.

При сооружении подземных полостей через буровые скважины диаметром 250–300 мм требуется предварительное образование на забое скважины зарядной камеры для размещения основного заряда ВВ. Для этого скважину предварительно простреливают возрастающими по величине зарядами ВВ.

Число прострелок и величина прострелочного заряда зависят от требуемого объема зарядной камеры для размещения основного заряда ВВ с учетом коэффициента заряжения и удельного расхода ВВ. Общая масса прострелочных зарядов (кг) для образования зарядной камеры определяется по формуле

$$Q_{np} = qQ/\Delta, \quad (8.10)$$

где Δ – плотность заряжения, $\text{кг}/\text{м}^3$.

8.3. Сооружение базы подземных хранилищ камуфлетными взрывами

Подземные емкости, сооружаемые способом внутренних взрывов, бывают как одиночные, так и групповые.

При создании группы (базы) подземных емкостей важное значение имеет определение оптимальных расстояний между ними, выбор схемы пространственного размещения группы, а также последовательность образования подземных емкостей во времени.

Оптимальные расстояния между подземными емкостями обуславливаются такими параметрами, как величина заряда глубинного взрыва и глубина его заложения, характеристика применяемого ВВ, материал забойки скважин, плотность заряжения полости, а также коэффициент простреливаемости, характеризующий полезную толщ глинистых пород с определенными физико-механическими свойствами.

Минимальные расстояния между подземными емкостями приведены ниже:

Радиус проектируемой емкости, м	2,3	2,9	3,3	3,6
Объем проектируемой емкости, м ³	50	100	150	200
Минимальное расстояние между центрами незакрепленных емкостей, м	16	20	23	25

При групповом способе строительства подземных емкостей оптимальное расстояние между ними может быть уменьшено до половины глубины заложения емкости. Такое расстояние обеспечивает в процессе образования емкостей сохранность породных целиков между ними и максимальную плотность размещения емкостей на занимаемой площади.

Сближение емкостей, образуемых внутренними взрывами, возможно, если будут созданы условия для гашения встречных взрывных (ударных) волн и поддержания во всех емкостях группы большого внутреннего противодействия продуктов взрыва.

Группы емкостей образуются как при последовательном взрывании одиночных зарядов, так и при одновременном или короткозамедленном взрывании серии зарядов, причем последнее обеспечивает значительное снижение сейсмического эффекта. Замедления достигаются путем применения детонирующего шнура, электродетонаторов ЭДКЗ и пиротехнических реле КЗДШ.

Чтобы исключить влияние последующих взрывов на уже образованную подземную полость, при короткозамедленном

взрывании сумма замедлений взрываемых n зарядов $\sum_{i=1}^n t_{зам}$

принимается меньшей времени образования полости T

$$T \geq \sum_{i=1}^n t_{зам} \cdot \quad (8.11)$$

Время образования емкости зависит от физико-механических свойств среды и массы заряда ВВ.

При соблюдении условия (8.11) в процессе одновременного образования группы емкостей внутри всех расширяющихся полостей будет поддерживаться большое внутреннее противодействие продуктов взрыва, препятствующее обрушению емкостей при воздействии взрывных волн соседних внутренних взрывов. Следовательно, при такой системе взрывов, емкости на глубине 20 м можно сближать даже на расстояние, равное глубине заложения. В этом случае сокращается протяженность коммуникаций и резко уменьшается площадь застройки самой базы.

Интервалы замедлений при групповом взрывании зависят от массы и числа зарядов в группе, взрываемой в один прием, и составляют 5, 10, 15, 20, 25, 50, 75 мс.

Сооружение подземных емкостей взрывом для хранения светлых нефтепродуктов с высокой упругостью паров снижает стоимость строительства, а также потери от испарения (по сравнению с потерями при хранении в наземных стальных резервуарах обычного типа). Стоимость подземных емкостей, сооружаемых способом внутренних взрывов, заметно снижается с увеличением их объема. В отличие от других способов сооружения подземных хранилищ в горных породах этот способ обладает простотой технологии и быстротой создания, маневренностью, а также малыми начальными капитальными вложениями.

При сооружении подземных емкостей камуфлетными взрывами применяются сосредоточенные заряды водоустойчивых ВВ (тротил прессованный и гранулированный, алюмотол, некондиционные пироксилиновые пороха и др.), которые тонут в воде и хорошо в ней детонируют. Взрывание зарядов производится электрическим способом с применением водостойких электродетонаторов.

После проведения взрывных работ и создания полости приступают к монтажу технологических трубопроводов и обвязке устья скважины. Залив топлива в подземные емкости осуществляется порциями из наземных резервуаров с последующими замерами уровня топлива. Наблюдения показывают, что потери дизельного топлива в емкостях составляют 0,9 %, причем большая часть потерь (0,6–0,8 %) приходится на первые месяцы хранения.

Топливо при хранении в подземных емкостях в состоянии покоя и в процессе многократных перекачек находится в пределах кондиции. При этом содержание в нем механических примесей составляет не более 0,005 %, что соответствует требованиям ГОСТа.

8.4. Безопасность взрывных работ при сооружении хранилищ камуфлетными взрывами

Большая часть взрывных работ по строительству подземных емкостей камуфлетными взрывами, в частности транспорт, хранение взрывчатых материалов и производство прострелок в скважинах, достаточно полно регламентирована Едиными правилами безопасности при взрывных работах.

Однако при производстве взрывных работ по образованию

подземных полостей возникает ряд специфических вопросов, касающихся техники безопасности.

К таким вопросам в первую очередь необходимо отнести специфику заряжания полости основным зарядом взрывчатого вещества. Заряжание скважин основным зарядом ВВ должно производиться в определенной последовательности: сначала загружается половина массы заряда ВВ и опускается первый боевик; затем загружается четвертая часть массы заряда ВВ, опускается второй боевик и оставшаяся часть заряда ВВ. В свою очередь снаряжение боевиков производится на месте работ примерно в 50 м от заряжаемой скважины.

При сохранении общей последовательности заряжания рекомендуемые дозы ВВ могут в отдельных случаях несколько изменяться.

Для взрывания на глубинах до 25 м боевики изготавливаются в мягкой герметичной оболочке, при взрывании на больших глубинах применяются боевики в герметичных жестких оболочках, опускаемые воротком или механической лебедкой.

Опускание патронов-боевиков в скважину производится, как правило, при помощи прочной пеньковой веревки или стального троса, снабженного крючком, который легко освобождается от ушка патрона после его опускания. Трос и веревка для спуска боевиков обычно тарируются. Диаметр боевика выбирается с таким расчетом, чтобы он был меньше минимального диаметра скважины на 50 мм. В каждый боевик помещается, как правило, два водоустойчивых электродетонатора, соединенных между собой параллельно. Для изготовления боевиков применяются ВВ, безотказно детонирующие от электродетонатора.

В качестве забойки используется вода (гидрозабойка), являющаяся наиболее экономичным и эффективным забоечным материалом. Вода заливается в простреливаемую скважину перед спуском заряда. Взрывом она полностью выбрасывается на поверхность и вновь заливается в скважину перед каждой последующей прострелкой. Гидрозабойка позволяет получить правильную сферическую конфигурацию емкости, предохраняет поверхность получаемой емкости от излишнего разрушения у устья. Кроме воды эффективным материалом для забойки является глинистый раствор.

При камуфлетных взрывах образованные сейсмические волны могут вызвать разрушение сооружений, находящихся в районе

взрывных работ. В этой связи должны быть решены вопросы обеспечения безопасности различного рода сооружений, расположенных в опасной зоне.

Сейсмический эффект взрывов зависит от физико-механических свойств среды и типа применяемого ВВ. Сейсмобезопасные расстояния r_c (м) при взрывах сосредоточенных зарядов в пластичных глинистых породах рассчитываются по следующим формулам [29]

$$r_c = 16 \sqrt{\frac{\bar{H}}{u_0}} \sqrt[3]{Q} \quad \text{при } \bar{r} < 20; \quad (8.12)$$

$$r_c = k_1 \sqrt{\frac{Q}{u_0}} \quad \text{при } \bar{r} > 20, \quad (8.13)$$

где $\bar{H} = H/\sqrt[3]{Q}$ – приведенная глубина заложения заряда ВВ; H – глубина заложения заряда, м; Q – масса заряда ВВ, кг; $\bar{r} = r/\sqrt[3]{Q}$ – приведенное расстояние; r – расстояние от места взрыва до точек наблюдения, м; u_0 – допустимое значение скорости смещения, см/с, величина которой различна для разных типов сооружений; k_1 – эмпирический коэффициент, равный 30 при $\bar{H} > 5$.

Сейсмобезопасные расстояния при создании подземных полостей в толще моренных суглинков с использованием аммонита № 6ЖВ могут быть определены по табл. 8.5.

Таблица 8.5. Сейсмобезопасные расстояния при создании хранилищ камуфлетными взрывами [29]

Масса заряда ВВ, кг	Сейсмобезопасные расстояния r_c (м) в зависимости от величины u_0 , см/с			
	0,15	0,1	0,05	0,03
200	40/45	48/55	66/70	87/89
400	50/55	61/65	83/90	110/113
600	58/65	69/75	95/101	126/128
800	64/70	77/85	104/115	140/142
1 000	69/75	82/90	112/125	150/153
1 500	78/85	94/101	130/140	170/175
2 000	87/95	105/115	142/155	190/195
2 500	93/100	112/121	153/165	205/210
3 000	100/110	118/130	162/175	215/220
4 000	110/120	130/141	180/191	240/242
5 000	117/130	141/155	192/210	255/261

Примечание. В числителе даны расстояния для $\bar{H} = 2,7$, в знаменателе для $\bar{H} = 3,2$

8.5. Обеспечение герметичности и прочности подземных емкостей, сооружаемых камуфлетными взрывами

Надежность подземных емкостей, образованных камуфлетными взрывами, обеспечивается их герметичностью, прочностью и устойчивостью. Хотя хранилища данного типа выгодно отличаются по ряду технико-экономических показателей от известных способов строительства, однако и при использовании таких емкостей возникает ряд проблем, связанных в основном с проявлением горного давления и деформациями подземных полостей с течением времени.

Наблюдения за состоянием подземных полостей показывают, что они относительно устойчивы в течение двух-трех лет. С течением времени незакрепленные полости деформируются за счет обрушения отдельных блоков породы с контура полости. При этом процесс вывалообразования зарождается в своде подземной полости и постепенно охватывает весь контур. Следовательно, обеспечение эксплуатационной надежности хранилищ данного типа требует применения соответствующих мер по искусственному укреплению контура подземной полости, предназначенной для использования в качестве газонефтехранилища.

В бывшем СССР были опробованы и прошли опытную проверку ряд способов закрепления емкостей: термический, нанесение облицовочных материалов механическим путем и формирование бетонной крепи взрывом.

Термическая обработка стенок позволяет продлить срок службы подземных емкостей. Процесс осуществляется в три этапа. Сначала из приконтурного массива в течение 48 ч при температуре 105...110 °С выпаривают воду, затем в течение 40 ч при температуре 900...950 °С глинистый слой переводят в камнеподобное состояние и далее при температуре до 1 100 °С производят оплавление стенок полости.

В 60-е годы XX столетия были опробованы такие способы, как нанесение облицовочных материалов механическим способом и формирование бетонной крепи взрывом.

Сущность технологии сооружения подземных емкостей камуфлетными взрывами с доступом человека в емкость приведена в работе [114] и сводится к следующему. С поверхности земли до определенной глубины $H_{об}$ станком проходят шурф 1,2×1,3 м и обсаживают его металлическими трубами или железобетонными кольцами (рис. 8.8).

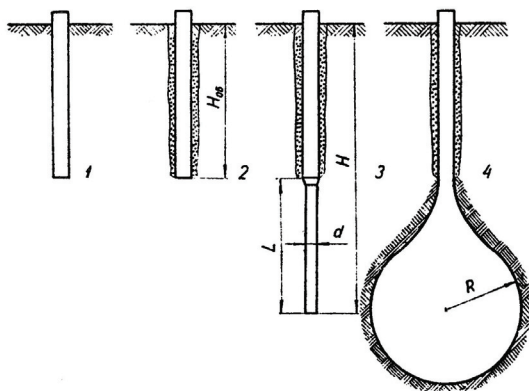


Рис. 8.8. Технологическая схема сооружения подземной емкости с применением камуфлетного взрыва с последующим ее креплением [114]:

- 1 – бурение шурфа начальным диаметром; 2 – обсадка шурфа и цементация затрубного пространства; 3 – бурение шурфа конечным диаметром до глубины заложения заряда; 4 – подземная емкость после взрыва заряда

После закрепления и цементации затрубного пространства шурф углубляют диаметром 0,8 м до проектной глубины заложения заряда H . Нижнюю незакрепленную часть шурфа заряжают необходимым количеством ВВ, создают забойку и производят взрыв. В результате образуется подземная камуфлетная выработка сферической формы радиусом R , сообщающаяся с поверхностью земли посредством закрепленного шурфа. После проветривания подземной полости выполняют работы по ее искусственному укреплению путем нанесения на стенки полости набрызг-бетона с помощью сжатого воздуха (рис. 8.9).

Через шурф в полость опускают оборудование, монтируют подмости, опускают монтажную бригаду, выполняющую работы по нанесению на стенки набрызг-бетона. Закрепление подземных емкостей с механическим возведением бетонной крепи предусматривает использование малоэффективного оборудования, поэтому процесс крепления характеризуется большой трудоемкостью, что снижает эффективность применения взрывного способа сооружения подземных хранилищ камуфлетными взрывами.

При строительстве подземной емкости с применением камуфлетного взрыва с одновременным формированием бетонной крепи с поверхности земли на необходимую глубину проходится

шурф, в котором взрывом заряда ВВ образуется камуфлетная полость. Объем полости должен быть таким, чтобы в ней разместились бетон крепи проектируемой емкости и заряд ВВ. Созданная взрывом камуфлетная полость заполняется бетонной смесью и в центре ее помещается заряд ВВ (рис. 8.10).

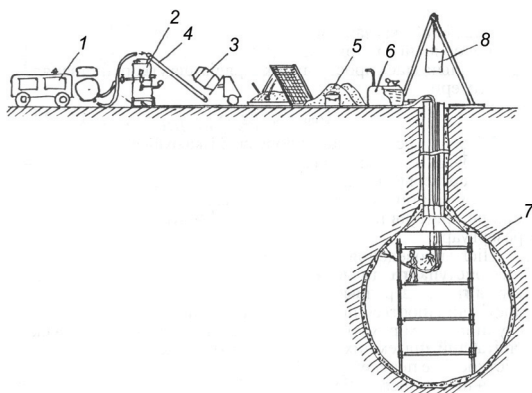


Рис. 8.9. Схема закрепления стенок подземной емкости слоем бетона, наносимого механическим способом [55]:

1 – компрессор; 2 – бетоно-шприцмашина; 3 – бетономешалка; 4 – транспортер; 5, 6 – подготовка материалов для бетонной смеси; 7 – подземная емкость; 8 – емкость для спускоподъемных операций

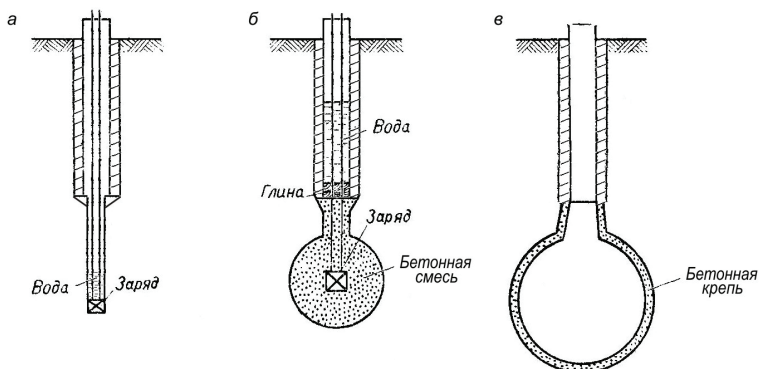


Рис. 8.10. Технологическая схема сооружения подземной емкости сферической формы взрывом с одновременным формированием бетонной крепи [11]:

а – проходка шурфа и размещение заряда для образования камуфлетной полости; б – загрузка бетонной смеси в камуфлетную полость; в – подземная емкость с бетонной крепью, полученной с помощью взрыва

В результате взрыва заряда ВВ, находящегося в центре сферы с бетонной смесью возникает расширяющаяся сфера взрывных газов. Под давлением этих газов грунт уплотняется через бетонную оболочку. Отодвигая границы раздела бетон – грунт, сфера взрывных газов деформирует твердеющий бетон, уменьшая толщину его оболочки до тех пор, пока не прекратится процесс расширения. По окончании формирования емкости в грунте бетон распределяется слоем определенной толщины между грунтом и сферой взрывных газов. По мере увеличения прочности бетона надежность крепления и устойчивость полости повышается. По достижении бетоном проектной прочности емкость используется для эксплуатации.

Разработанный метод позволяет сооружать емкости не только сферической формы, но цилиндрической и конической.

В работе [120] разработана методика расчета и технология сооружения вертикальных подземных камер цилиндрической и конической формы с одновременным формообразованием бетонной крепи. Технологическая схема работ по сооружению вертикальных подземных полостей приведена на рис. 8.11.

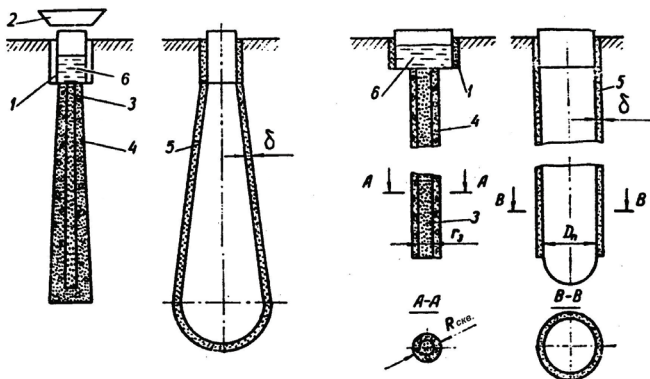


Рис. 8.11. Технологическая схема сооружения подземной полости конической (а) и цилиндрической (б) формы [120]:

- 1 – креп устья ствола; 2 – приемный бункер; 3 – заряд взрывчатого вещества;
4 – бетонная смесь; 5 – бетонная креп; 6 – вода; δ – толщина бетонной крепи

Устье камеры предварительно крепят на глубине трех радиусов полости. Радиус передового шурфа

$$R_{ш} = 1,1\delta\sqrt{D_n/\delta + 1}, \quad (8.14)$$

где 1,1 – коэффициент, учитывающий объем заряда ВВ и неравномерность толщины бетонной оболочки; δ – толщина крепи проектируемой полости, мм; D_n – диаметр проектируемой полости, мм.

Погонная масса заряда ВВ

$$Q_n = \pi R_n^2 / \Pi_{np}, \quad (8.15)$$

где R_n – радиус проектируемой полости, м; Π_{np} – показатель проницаемости грунта, м³/кг.

Расход бетона V_{δ} (м³) на крепление одного метра полости определяют по формуле

$$V_{\delta} = \pi (R_{ш}^2 - r_3^2) h, \quad (8.16)$$

где $R_{ш}$ и r_3 – радиус шпура и заряда, соответственно; $h=1,0$ м.

Применение способа строительства подземной емкости с одновременным возведением бетонной крепи камуфлетным взрывом исключает опускание человека в незакрепленную емкость и позволяет возводить бетонную крепь взрывом.

Разработан взрывной метод создания подземных полостей с грунтополимерной отделкой [121]. В основе метода – химическое закрепление околополостного массива грунта для создания противофильтрационных экранов при сооружении подземных хранилищ жидких и газообразных продуктов камуфлетными взрывами. Этот метод может применяться для получения как сферических выработок взрывом сосредоточенного заряда, так и цилиндрических – взрывом заряда с осевой симметрией. В момент создания полости ее приповерхностный слой покрывается смесью грунт – вяжущие вещества, образуя органоминеральную отделку, значительно изменяющую физико-механические и фильтрационные свойства приконтурной зоны полости. Основными функциями такой отделки являются закрытие пор и трещин, через которые может перемещаться хранимый продукт, а также повышение прочности пород, окружающих выработку.

Технология сооружения подземных хранилищ цилиндрической формы кассетного типа (рис. 8.12) взрывным способом приведена в работе [122].

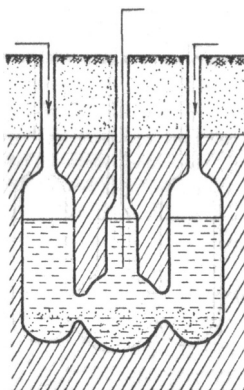


Рис. 8.12. Подземное хранилище кассетного типа [122]

Применение данной технологии исключает необходимость предварительного прострела зарядной камеры.

В таких хранилищах сохраняются положительные свойства индивидуальных полостей и достигаются дополнительные эксплуатационные преимущества за счет наличия нескольких связей с дневной поверхностью через сохраняющиеся части зарядных скважин. С целью увеличения объема хранилищ целесообразно производить взрывы нескольких зарядов с разрушением стенки между отдельными полостями.

Наиболее рационально создание кассетных хранилищ объемом 2 000–2 500 м³.

Возможность строительства подземных хранилищ в непосредственной близости от мест добычи полезных ископаемых обеспечивает сокращение транспортных расходов.

8.6. Эксплуатация подземных емкостей, образованных камуфлетными взрывами

Закачка топлива, поступающего на хранение в подземный резервуар, осуществляется, как правило, насосом 1 (допускается самотечный способ заполнения) (рис. 8.13).

Насос 1 можно использовать также для заполнения буферной емкости 2 и подачи топлива непосредственно потребителю. Отбор топлива из подземного резервуара производится погружным насосом 4, подающим топливо непосредственно потребителю или в буферную

емкость, или же параллельно в буферную емкость и потребителю. Из буферной емкости 2 топливо потребителю подается насосом 3. Схема обвязки емкости позволяет использовать насос 3 для слива продукта из подземный резервуар из буферной емкости.

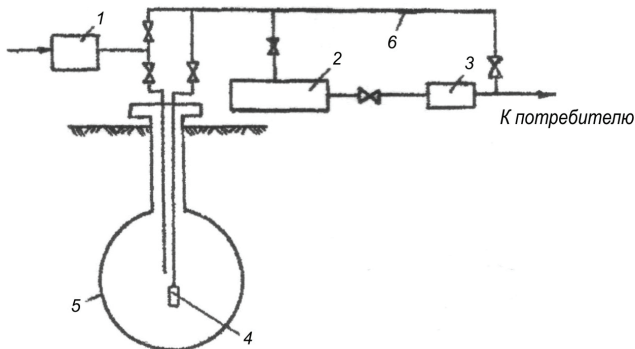


Рис. 8.13. Схема эксплуатации подземного хранилища, образованного камуфлетным взрывом, с использованием погружного насоса [55]:

1 – насос для закачивания углеводородов в подземную емкость; 2 – буферный наземный резервуар; 3 – насос для закачивания углеводородов из буферного резервуара в подземную емкость; 4 – погружной насос для отбора продукта; 5 – подземная емкость; 6 – технологический продуктопровод

При использовании струйных насосов для отбора жидких продуктов из подземного резервуара схема эксплуатации приведена на рис. 8.14.

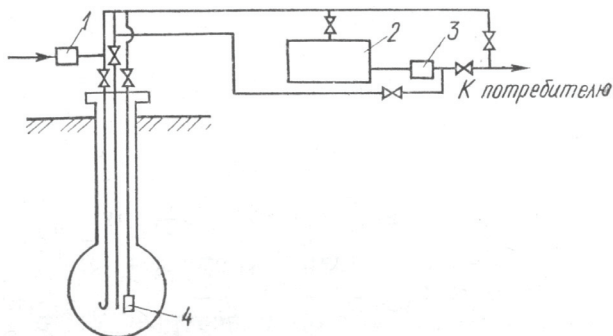


Рис. 8.14. Схема эксплуатации подземного хранилища с использованием струйного насоса [99]

Рабочая жидкость к струйному насосу подается насосом 3, который отбирает ее из буферной емкости 2. Топливо, отобранное из подземного резервуара струйным насосом, подается в буферную емкость, потребителю или же частично в буферную емкость на поддержание уровня рабочей жидкости. В данной схеме насос 3 используется как для подачи рабочей жидкости на струйный насос, так и для подачи топлива из буферной емкости потребителю.

Анализ возможных вариантов эксплуатации подземных хранилищ, образованных методом камуфлетных взрывов, в частности выбор наиболее приемлемого способа отбора топлива, подтвердил технологические, эксплуатационные и экономические преимущества струйных установок, технические характеристики которых приведены в табл. 8.6.

Таблица 8.6. Технические характеристики струйных установок [99]

Размеры поперечного сечения, мм	90×150
Диаметр рабочего отверстия насадки, мм	11
Расход жидкости на 1 струйный насос, м ³ /ч:	
рабочий;	13,5
эжектируемый	14,5
Коэффициент подмешивания	1,07
Расход жидкости на два струйных насоса, м ³ /ч:	
рабочий;	33
эжектируемый	27
Коэффициент подмешивания	0,82

Условия эксплуатации установок

Глубина заложения резервуара, м	28
Хранимый продукт	Дизельное топливо
Производительность центробежного насоса ПСГ-60/130; м ³ /ч	58
Напор, м	88

Существуют и более экономичные способы отбора топлива из подземных хранилищ, например сжатым воздухом. Однако, как показали опытные работы, воздух неблагоприятно влияет на качество нефтепродуктов.

Раздел 9

ПОДЗЕМНЫЕ ХРАНИЛИЩА В ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ПОРОДАХ

9.1. Общие сведения и характеристика пород

Во второй половине XX века началось освоение нефтегазовых месторождений, расположенных за Полярным кругом. Здесь, в условиях вечной мерзлоты и сильных морозов при температуре до -50° началась добыча нефти и газа. В бывшем СССР, а затем и в России, были освоены уникальные крупные месторождения Уренгой, Самотлор, Ямбург, Ямал. Обустройство газоконденсатных и нефтяных месторождений, отдаленных от основных промышленных районов, обусловило необходимость создания в этих районах крупных резервуарных парков для хранения жидких углеводородов. Кроме того в районы Крайнего Севера и северо-восточной части России горючее завозят преимущественно танкерами в период короткой летней навигации. Поэтому возникает необходимость сооружать резервуары, обеспечивающие хранение годового запаса нефтепродуктов.

Создавать резервуарные хранилища из металлоконструкций, вследствие значительной удаленности от поставщиков, связано с существенными затратами. Техническую сложность представляет также эксплуатация резервуаров в условиях низких температур. В связи с этим проблема создания больших объемов баз хранения углеводородов решалась путем строительства подземных ледопородных хранилищ.

За многие годы был накоплен значительный опыт строительства подземных хранилищ в условиях многолетнемерзлых пород. Так, эксплуатация подземного хранилища дизельного топлива на севере Магаданской области показала целесообразность применения технологии подземного хранения. Суммарный объем шахтных резервуаров, построенных в отработанных и переоборудованных золотодобывающих шахтах, составляет 300 тыс. м³.

Вечномерзлые горные породы, в которых предусматривается размещение выработок-емкостей, должны удовлетворять следующим требованиям:

- находиться в естественном твердомерзлом состоянии;
- иметь экранирующую способность (непроницаемость);

- быть химически нейтральными по отношению к продукту, предназначенному для хранения.

Максимальная естественная температура вечномерзлых горных пород, при которой допускается строительство в них подземных хранилищ, должна быть ниже температуры их оттаивания. Мощность пород, в которых размещается подземная емкость, должна составлять не менее 0,8 м. Глубина залегания кровли составляет от 10 до 40 м.

Однокамерные подземные ледопородные хранилища строят на один продукт, многокамерные – на несколько видов. Размеры междукамерных целиков для обеспечения длительной устойчивости камер принимают не менее 15 м. При хранении в многокамерных емкостях продуктов нескольких видов выработки-емкости изолируются друг от друга герметичными перемычками.

9.2. Технология строительства подземных хранилищ в вечномерзлых породах

В условиях вечномерзлых пород сооружают подземные хранилища следующих типов: шахтные, траншейные, в пластовых льдах через скважины.

9.2.1. Ледопородные хранилища шахтного типа

Ледопородное шахтное хранилище состоит из подземных резервуаров, вскрывающих выработок, охлаждающих устройств, наземных зданий и сооружений, подъездных путей, инженерных коммуникаций и трубопроводов.

В зависимости от типа вскрывающей выработки подземные хранилища могут быть с вертикальным (рис. 9.1) и наклонным (рис. 9.2) стволами. Число вскрывающих выработок обычно не более одной. Допускается применение большего числа вскрывающих выработок, если оно обосновано технико-экономическими расчетами.

Емкости подземных хранилищ представляют собой горизонтальные выработки длиной около 200 м. Ширина пролета емкости устанавливается исходя из геологических и геокриологических условий, но не более 8 м. В хранилищах такого типа давление насыщенных паров хранимых нефтепродуктов не должно превышать $9,31 \cdot 10^4$ Па.

Конструкцию хранилища и способы производства работ принимают в зависимости от геологических и горнотехнических

условий, назначения и объема хранилища. Технологические процессы строительства подземного хранилища аналогичны горному, но с учетом специфических свойств многолетнемерзлых пород.

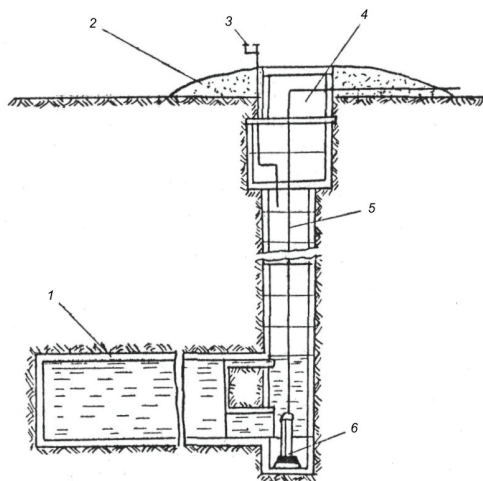


Рис. 9.1. Схема подземного ледопородного хранилища шахтного типа, вскрытого вертикальным стволом [55]:

- 1 – ледяная облицовка; 2 – термоизоляционная засыпка; 3 – дыхательный клапан;
4 – ствол; 5 – продуктопровод; 6 – глубинный насос

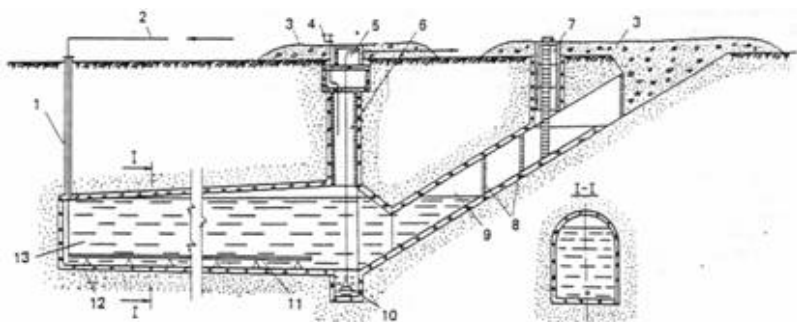


Рис. 9.2. Схема подземного ледопородного хранилища шахтного типа, вскрытого наклонным стволом [150]:

- 1 – технологическая скважина; 2 – трубопровод для залива нефтепродукта;
3 – теплоизоляция оголовка; 4 – дыхательный клапан; 5 – оголовок колодца;
6 – эксплуатационный колодец; 7 – смотровой колодец наклонного ствола; 8 – перемычки;
9 – наклонный ствол; 10 – насос в зумффе; 11 – распределительное устройство для слива
нефтепродукта; 12 – ледяная облицовка; 13 – выработка-емкость с нефтепродуктом

Вертикальные и горизонтальные выработки проходят при помощи буровзрывных работ. Для уменьшения трещиноватости от прямого действия взрыва вокруг приконтурной зоны емкости применяется контурное взрывание, предварительное щелеобразование и короткозамедленное взрывание зарядов.

Емкости в подземных ледопородных хранилищах изолируют и герметизируют перемычками и ледяной облицовкой стен. Ледяная облицовка предохраняет хранимый продукт от механического загрязнения и обеспечивает герметичность хранилищ. В связи с этим температура хранимого нефтепродукта не должна превышать 0 °С.

Ледяная облицовка хранилищ проводится после их сооружения. Толщина льда не менее 3 см. Ледяную облицовку, обеспечивающую герметичность, намораживают обычно в зимнее время.

Проходка камер-емкостей ледогрунтовых хранилищ шахтного типа производится и в летнее время. При этом вход в ствол тщательно изолируется и в выработки нагнетается охлажденный воздух.

Для закачки воды применяют металлическую или деревянную опалубку. Температура воды должна быть близкой к нулю. Воду заливают порциями, чтобы толщина одновременно намерзающего слоя не превышала 1 см.

Ледяную облицовку производят после охлаждения стенок камеры холодным воздухом, подаваемым с поверхности. Намораживание выполняют тонкими слоями, начиная с верхней части камеры, причем струю холодного воздуха подают по вентиляционным трубам непосредственно на место набрызга воды. В последнюю очередь намораживают лед на днище камеры.

Для ускорения процесса намораживания между стенкой выработки и опалубкой закладывают битый пресный лед слоями толщиной до 10 см и заливают его водой. После замерзания очередного слоя процесс намораживания повторяют.

Процесс облицовки подземных хранилищ льдом выполняется в две стадии: охлаждение воды до температуры замерзания; непосредственно наращивание ледяной облицовки. Фактическую толщину облицовки рассчитывают по формуле

$$\delta_0 = \frac{F_e(H-h)}{\beta_n S} - \frac{VC_e(t_e - t_\phi)}{W_n S}, \quad (9.1)$$

где F_e – площадь поперечного сечения замораживаемой выработки;

H – текущая отметка уровня воды во вскрывающей выработке в момент определения толщины облицовки; h – начальная отметка уровня воды во вскрывающей выработке при окончании залива водой; $\beta_{л} = 0,09$ – коэффициент расширения воды при замерзании; S – площадь всей смоченной внутренней поверхности подземного хранилища; V – объем залитой воды; $C_{в}$ – теплоемкость воды; $t_{в}$ – температура заливаемой воды; $t_{ф}$ – температура замерзания залитой воды с учетом ее минерализации; $W_{л}$ – теплота таяния льда с учетом минерализации.

Самые высокие точки камер могут быть соединены с поверхностью буровой дыхательной скважиной. Камеры оборудуют дыхательным трубопроводом, чтобы не образовались газовые «мешки».

Емкость считается выдержавшей испытание, если после удержания давления на протяжении 24 часов и последующего дня, падение давления не превышает 1 % от нормативного с учетом барометрического давления.

Результаты исследований, проведенных на перспективных площадях строительства подземных хранилищ шахтного типа в условиях Крайнего Севера, показали пригодность инженерно-геологических условий для этого строительства. Естественная температура многолетнемерзлых пород изменяется в диапазоне минус 3 – минус 5 °С. Рабочие толщи пород слагаются мелкодисперсными породами (пески, супеси, суглинки, глины) и льдом, не содержащими твердых включений (валуны, галька, гравий), что позволяет применять наряду с буровзрывной, комбайновую технологию проходки выработок.

Одной из проблем строительства и эксплуатации подземных хранилищ шахтного типа в условиях вечной мерзлоты является обеспечение устойчивости выработок-емкостей.

При заложении хранилищ в глинисто-суглинистых отложениях на глубине 12–15 м и параметрах емкостей 8,0×7,2 м устойчивость выработок обеспечивается при ширине междукамерных целиков равной 8,0 м, при глубине более 20 м ширина целиков должна быть не менее 16 м.

В пластовых льдах на глубинах до 23,0 м при размерах выработок-емкостей 6,0×7,0 м устойчивость емкостей обеспечивается при ширине междукамерных целиков равной 15,0 м.

Технология проведения выработок-емкостей шахтного типа в условиях многолетнемерзлых породных массивов и изменений температурного режима выдвигает необходимость применения различных методов крепления стенок камер с целью повышения прочности и герметичности. Так, в условиях низких температур приемлемо применение анкерных крепей и набрызг-бетона. Наиболее эффективным считается применение железобетонных анкеров и анкеров с омоноличивающими составами на основе полимерных смол. Положительные результаты были получены при технологии возведения набрызг-бетонных крепей при отрицательных температурах скальной поверхности и воздушной среды в выработках до минус 10 °С. В состав набрызг-бетона в выработках с отрицательной температурой породы и воздуха включались добавки, обеспечивающие защиту бетона от промерзания.

9.2.2. Траншейные ледопородные хранилища

Хранилища представляют собой протяженную горизонтальную выработку (траншею), сооружаемую открытым горным способом с ледовым перекрытием в форме свода. Хранилище сооружается при отрицательной температуре (рис. 9.3).

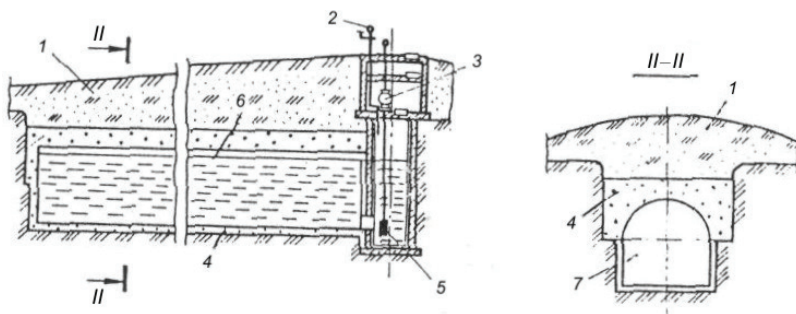


Рис. 9.3. Схема траншейного ледопородного хранилища [55]:

1 – термоизоляционная засыпка; 2 – дыхательный клапан; 3 – электродвигатель;
4 – ледяная облицовка; 5 – погружной насос; 6 – уровень продукта в подземном хранилище; 7 – подземный резервуар

Ширина хранилища устанавливается в зависимости от реологических свойств льда, но не более 5 м. Внутреннюю поверхность хранилища облицовывают слоем пресноводного льда

толщиной 0,05 м или льдом из морской воды. Облицовку стенок льдом и оборудование свода выполняют при средней температуре воздуха не более -5°C . Лед на стенки и своды емкости намораживают путем заливания воды в пространство между опалубкой и почвой.

Ледяное перекрытие емкости сооружается сводчатой формы с опиранием на грунтовые бермы шириной не менее 1 м, оставляемые по контуру траншеи. Свод верхней части должен иметь толщину не менее 1,5–2,0 м. Верхнюю образующую ледяного покрытия предусматривают на 0,5 м ниже поверхности земли.

На ледяное покрытие сверху наносят мерзлый грунт, слой торфа или другого теплоизоляционного материала. Термоизоляцию рассчитывают так, чтобы на ледяной поверхности свода температура не превышала минус 3°C .

Поступление продукта в резервуар предусматривается самотеком. Продукт из резервуара отбирают при помощи погружных, артезианских или обычных насосов, размещенных в подземных камерах.

При сооружении ледопородных хранилищ учитывают температурные режимы эксплуатации резервуаров.

В ледопородные резервуары сливают, как правило, нефтепродукты с отрицательной температурой. Охлаждение нефтепродуктов производится с применением природных хладореагентов (мерзлый грунт и лед) и комбинированным способом (криогенным в сочетании с искусственным охлаждением).

Испытания подземных ледопородных хранилищ на герметичность проводят до нанесения ледяной облицовки. Предварительно герметизируют все каналы, соединяющие емкость с поверхностью земли. Давление при испытаниях составляет 0,025 МПа для шахтных резервуаров и 0,002 МПа – для траншейных.

Траншейные ледопородные хранилища по капитальным вложениям и эксплуатационным затратам более эффективны, чем шахтные.

9.2.3. Подземные хранилища, образованные в пластовых льдах посредством скважин

Разрабатываемые и осваиваемые нефтяные месторождения за Полярным кругом охватывают значительные площади многолетнемерзлых пород, являющиеся благодаря своим прочностным свойствам и непроницаемости, надежной средой для

строительства подземных хранилищ углеводородов.

Характерной особенностью геологического строения перспективных площадей российской Арктики является распространение залежей пластовых льдов, достигающих мощности 27 м, с глубиной залегания от 12 до 19 м и колебанием температуры минус 3,5 – минус 6 °С.

Уникальная технология строительства подземных емкостей в пластовых льдах приведена в работе [123]. Сущность ее заключается в том, что производится бурение скважины, герметично обсаживаемой с поверхности колонной труб. Через скважину, до сопряжения с кровлей пласта льда, по паропроводу, оборудованному в нижней части перфорированным наконечником, подается пар от парогенераторной установки.

Образование подземной емкости происходит в результате плавления льда при подаче и конденсации пара. По окончании формирования полости заданного объема, вода откачивается насосом.

Технология прошла испытание в натуральных условиях и показала высокую эффективность по сравнению с сооружением емкостей горнопроходческими работами и особенно, по сравнению со строительством наземных резервуаров.

Эффективным и перспективным вариантом технологии строительства хранилищ в пластовых льдах считается бурение направленных наклонно-горизонтальных скважин по подошве пластового льда.

Раздел 10

ИЗОТЕРМИЧЕСКИЕ ХРАНИЛИЩА

Для повышения эффективности и надежности систем газоснабжения и газопереработки в настоящее время сооружаются крупные товарно-сырьевые склады объемом более 200 тыс. м³ для хранения пропана, изобутана, пентана, широкой углеводородной фракции и других продуктов нефтепереработки. Решать проблему хранения такого большого количества газа с помощью газгольдеров и стальных резервуаров малой вместимости экономически нецелесообразно.

Укрупнение товарно-сырьевых складов, увеличение единичной

вместимости резервуаров обуславливает внедрение прогрессивных способов хранения в охлажденном и сжиженном состоянии.

Такие углеводороды, как пропан, пропилен, бутан, изобутан, находящиеся при нормальных условиях в газообразном состоянии, при создании соответствующих температур и давления (или одного из этих факторов) сравнительно легко могут быть переведены в жидкое состояние.

Способность углеводородных газов переходить в жидкое состояние при нормальной температуре и невысоком давлении значительно облегчает их хранение.

В зависимости от давления и температуры, при которых хранятся сжиженные газы, существуют два основных способа их хранения:

- под повышенным давлением и при температуре окружающей среды;
- под давлением, близким к атмосферному, и при соответствующей низкой температуре (низкотемпературное или изотермическое хранение).

Для хранения углеводородных газов в жидком состоянии при атмосферном давлении необходимо поддерживать их температуру в пределах от $-0,5$ до -42 °С.

В мировой практике накоплен значительный опыт изотермического хранения сжиженных газов. Более 30 лет эти хранилища эксплуатируются в Канаде (Монреаль), США (штат Юта), Алжире (Аржев). Опыт строительства низкотемпературных подземных хранилищ был накоплен и в бывшем СССР. Первое опытно-промышленное изотермическое хранилище сжиженного газа пропана объемом $2\ 000\ \text{м}^3$ в ледопородном массиве было построено в 1978 г. Хранилище обеспечивало охлаждение поступающего пропана до температуры -40 °С, при давлении 2–5 кПа.

10.1. Основные характеристики изотермических хранилищ

Принцип изотермического хранения состоит в поддержании низкой температуры хранимой жидкости в пределах, близких к атмосферному давлению. Такие хранилища (рис. 10.1) сооружаются как в вечномёрзлых породах и грунтах, так и в обычных грунтах с предварительным их замораживанием.

Изотермическое хранилище представляет собой вырытый в земле котлован, с образованным внутри него цилиндром из замороженных пород. В таких хранилищах хранят пропан, пропанобутановые смеси,

пропилен, при давлении насыщенных паров газа 0,102–0,105 МПа и температуре кипения не выше минус 10 °С.

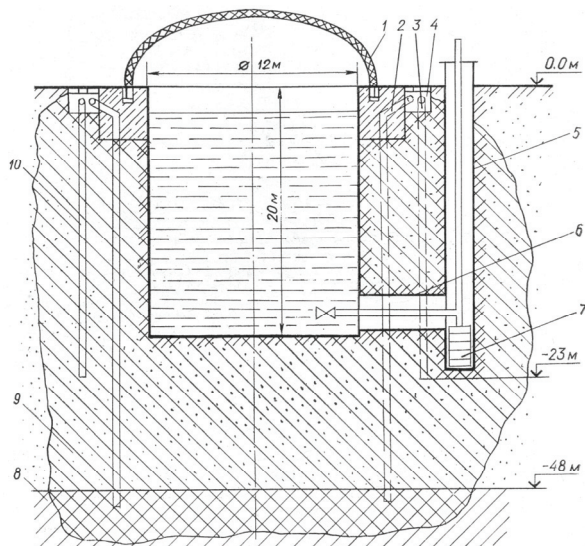


Рис. 10.1. Схема изотермического хранилища сжиженных газов [99]:

1 – теплоизолированное покрытие; 2 – железобетонное кольцо; 3 – кольцевые рассолопроводы; 4 – галерея; 5 – насосная скважина; 6 – сбойка; 7 – погружной электронасос; 8 – водоупор; 9 – замороженный грунт; 10 – замораживающая колонка

В состав изотермического хранилища входят подземный ледогрунтовый резервуар (предварительно замороженный грунт), охлаждающие агрегаты и приспособления, наземные строения и сооружения, инженерные коммуникации, подъездные пути и трубопроводы.

Подземные изотермические хранилища сжиженных газов в зависимости от геометрического объема подразделяются на две группы: I – от 50 000 до 100 000 м³; II – до 50 000 м³. Основные технико-экономические показатели подземных изотермических хранилищ приведены в табл. 10.1.

Проектирование изотермических хранилищ производится на основе данных инженерно-геологических и гидрогеологических изысканий. Сооружение допускается в рыхлых водонасыщенных (коэффициент водонасыщения больше 0,8), однородных по литологии

и выдержанных по мощности грунтах, подпираемых водоупором, при условии, что скорость движения грунтовых вод не превышает 2,5 м/сут., а также в слабообводненных (коэффициент водонасыщенности менее 0,8) грунтах без прочных структурных связей (обломочные, органогенные, песчаные грунты) при условии их искусственного обводнения.

Таблица 10.1. Характеристика подземных изотермических хранилищ [55]

Параметр	Значения для								
	метана			этилена			пропана		
	Объем хранилища, тыс. м ³								
	10	30	100	10	30	100	10	30	100
Диаметр хранилища, м	25,5	41,2	7,11	25,7	42,8	74,8	26,9	46,3	–
Глубина хранилища, м	19,4	22,4	25,0	19,0	20,3	22,2	17,5	17,6	18,8
Толщина теплоизоляции, м									
стенки	0,41	0,26	0,05	–	–	–	–	–	–
дна	0,63	0,63	0,62	0,17	0,16	0,16	–	–	–
перекрытия	1,0	1,1	0,61	0,61	0,61	0,62	0,24	0,26	0,26
Толщина предзамороженной оболочки, м	3,1	6,0	12,0	3,0	5,6	11,0	2,9	5,0	9,6
Скорость испарения, м ³ /сут.	0,13	0,09	0,06	0,15	0,1	0,07	0,14	0,09	–

Для сооружения резервуаров-хранилищ наиболее приемлемы песчано-гравийные грунты с влагонасыщенностью 60–90 % при наличии в них не более 20 % мелкодисперсных глинистых частиц.

Инженерно-геологические условия участка строительства низкотемпературного резервуара должны обеспечивать непроницаемость и длительную прочность ледопородной оболочки в процессе эксплуатации.

10.2. Технология сооружения изотермических хранилищ

Разработке технологии сооружения изотермических хранилищ предшествуют работы по изучению физико-механических и тепловых характеристик мерзлых горных пород предполагаемой площадки строительства (предел прочности на сжатие, влажность, пористость, теплопроводность, температуропроводность, теплоемкость).

Процесс сооружения изотермического хранилища сжиженных газов разбивается на следующие основные этапы: бурение скважин и установка замораживающих колонн; монтаж холодильной установки

с обвязочными трубопроводами; искусственное замораживание грунта для создания ледопородного ограждения хранилища; выемка грунта в чаше будущего хранилища; монтаж блоков кровли; заполнение хранилища охлажденным продуктом и сдача его в эксплуатацию.

Основной технологической операцией строительства подземных изотермических хранилищ является бурение скважин, установка замораживающих колонок и непосредственно процесс замораживания. Бурение замораживающих скважин осуществляется ударным, вращательным или турбинным способами. При глубинах до 50 м предпочтительнее применять вращательное бурение как способ, дающий значительную скорость при сравнительно небольших отклонениях скважин от вертикали.

Для создания мерзлотной зоны заданной толщины не допускается отклонения оси скважины от положения, заданного проектом.

После завершения работ по бурению скважин приступают к установке замораживающих колонок, используемых для циркуляции хладагента и передачи холода окружающему грунту. Применяют стальные цельнотянутые трубы внутренним диаметром 100–150 мм с толщиной стенки 5...6 мм.

Охлаждающий раствор поступает в замораживающие колонки из распределительного трубопровода диаметром 150–200 мм. Для присоединения к распределителю питательных и отводящих труб к замораживающим колонкам приваривают штуцеры диаметром 25–37 и длиной 100–150 мм. На штуцеры навертывают запорные краны. Количество штуцеров с кранами принимают с запасом 5–10 % от общего количества действующих замораживающих колонок.

Для замораживания грунтов в качестве хладоносителя обычно применяют растворы хлористого кальция, концентрация которых зависит от рабочей температуры циркулирующего раствора. Плотность хладоносителя составляет 1,23–1,25 кг/л при температуре замерзания минус 28 – минус 35 °С.

Схема обвязки морозильной колонки показана на рис. 10.2.

Хладагент подается по внутренней трубе и отбирается по межтрубному пространству. Поднимаясь по затрубному пространству к горловине скважины, хладагент отбирает тепло у грунта. Далее он поступает по коллектору в холодильную установку.

Начальной герметизирующей оболочкой будущего хранилища и одновременно подпорной стенкой является мерзлотный цилиндр.

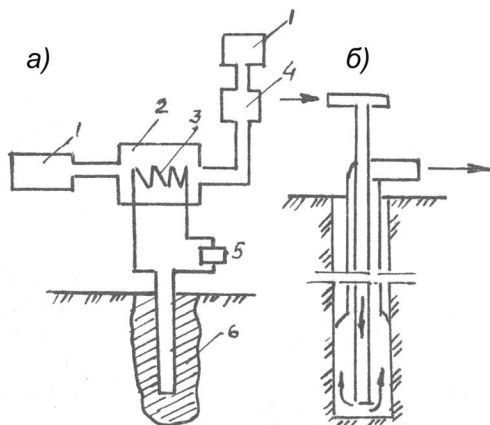


Рис. 10.2. Схема обвязки морозильной колонки [55]:

а) – морозильная камера; б) – морозильная колонка;

1 – баллон с аммиаком; 2 – холодильная камера; 3 – змеевик; 4 – компрессор; 5 – насос;
6 – замораживаемый грунт

Скорость нарастания мерзлого грунта по радиусу вокруг замораживающей колонки зависит от температуры хладоносителя, расстояния между колонками и теплофизических свойств грунта и устанавливается расчетом.

Проектную толщину замороженной стены устанавливают по результатам наблюдений температуры в контрольных скважинах.

Минимальную толщину δ (м) стенки мерзлого цилиндра (участок АВ на рис. 10.3) определяют по формуле

$$\delta = 1,1R \left\{ \left(\frac{\sigma_{cm}}{\sigma_{cm} - 2P} - 1 \right)^{1/2} \right\}, \quad (10.1)$$

где R – внутренний радиус мерзлого цилиндра, м; σ_{cm} – допустимое напряжение сжатия замороженной породы ($\sigma_{cm} = 8,5 - 23,5$ МПа); P – внешнее горное давление на стенку мерзлого цилиндра, МПа.

Давление P определяется по формуле

$$P = \gamma H \operatorname{tg}^2 \frac{90 - \varphi}{2}, \quad (10.2)$$

где γ – плотность грунта, кг/м³; φ – угол естественного откоса, град.;
 H – глубина хранилища, м.

При расчетах значение плотности и влажности грунтов принимается согласно табл. 10.2.

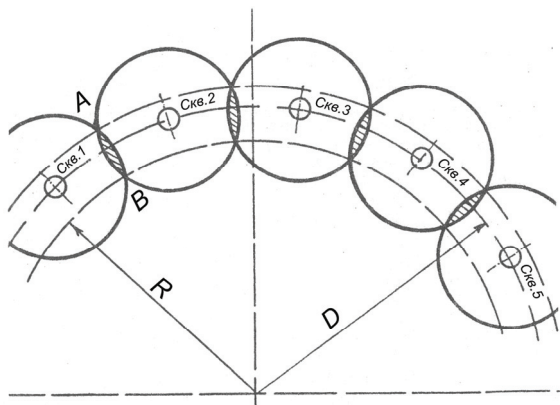


Рис. 10.3. Схема к расчету параметров формирования мерзлого цилиндра [55]:
 D – расстояние от центра емкости до замораживающей скважины; Скв. 1–Скв. 5 – замораживающие скважины

Таблица 10.2. Плотность и влажность грунтов, пригодных для сооружения изотермических хранилищ [55]

Грунт	Влажность, %	Плотность грунта, кг/м ³
Песок		
плотный	7	1640
морской	14	1585
карьерный	10	1520
„-“	15	1520
„-“	20	1520
„-“	23	1520
гравелистый	2	2060
Глина влажная	6	1460
„-“	15	1460
„-“	22	1460
„-“	35	1460
Суглинок	10	1540
„-“	20	1540
„-“	28	1540
Галька (щебень)	10	2040
Грунты пылеватые	6	1330

Радиус распространения замороженных пород, обеспечивающих

создание необходимой толщины ледопородного цилиндра, определяется из выражения

$$R = \sqrt{(0,6\delta)^2 + (l/2 + d)^2}, \text{ м} \quad (10.3)$$

где d – допустимое отклонение скважины, % (принимается обычно 1 % от глубины); l – расстояние между скважинами (принимается равным 1,8–2,5 м).

После достижения проектной толщины замороженной цилиндрической оболочки хранилища приступают к разработке грунта.

Анализ схем выемки грунта из котлована показывает, что при объеме подземных изотермических резервуаров до 50 тыс. м³ наиболее целесообразна схема организации работ с разработкой грунта бульдозером по всей площади забоя, погрузкой грунта в бадьи экскаватором с прямой лопатой. Грунт в бадьях перемещается самоходными стреловыми кранами, на поверхности он разгружается в промежуточные бункеры, затем доставляется в отвал автотранспортом (рис. 10.4).

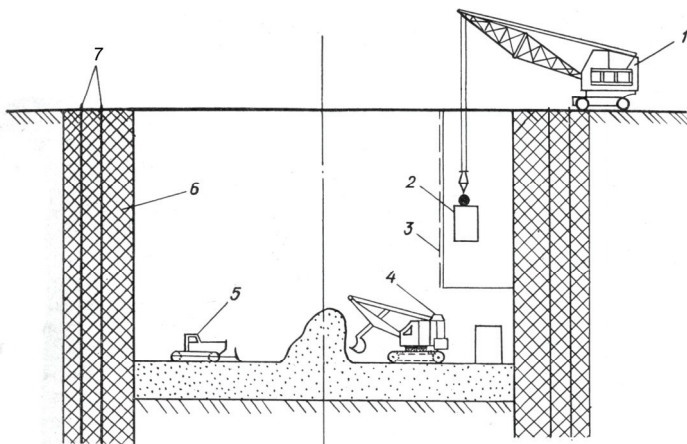


Рис. 10.4. Схема выемки грунта при сооружении изотермического хранилища [55]: 1 – самоходный стреловидный кран; 2 – емкость для грунта; 3 – отделение для грунтовой емкости; 4 – экскаватор; 5 – бульдозер; 6 – ледопородный цилиндр; 7 – замораживающие скважины

Особой частью изотермического хранилища является

перекрытие. Основная часть затрат (до 40 %) идет на сооружение перекрытия, вследствие чего изотермические резервуары предпочтительно сооружать малого диаметра.

Перекрытия резервуаров выполняются разных конструкций: плоские, купольные, конические сложной формы, понтонного типа, опирающиеся на изоляцию или железобетонное кольцо, уложенное на изоляцию. Применяется также конструкция перекрытия из железобетонных блоков. Монтаж узла сопряжения перекрытия с резервуаром выполняется таким образом, чтобы герметизировать внутреннее пространство резервуара. При замораживании производят теплоизоляцию поверхности земли в месте укладки труб.

Хранение сжиженных газов в подземном котловане с замороженным грунтом дешевле по сравнению с обычными методами хранения газа в наземных резервуарах, подземных емкостях, сооруженных в грунте, песчанике, известняке, или в емкостях, размытых водой. Потери от испарения за счет тепла, поступающего через грунт, постепенно уменьшаются до 0,5 % в сутки в зависимости от объема всего хранилища. Эти потери не выше, чем в наземном изотермическом резервуаре такого же объема. Испарившийся из хранилища газ можно использовать в качестве топлива или вернуть в хранилище через холодильную установку.

Основным недостатком существующих подземных низкотемпературных резервуаров является высокий приток теплоты к ним из окружающей среды. Чтобы избежать этого, всю площадь ограждающих поверхностей теплоизолируют. В качестве теплоизоляционных материалов применяют пеностекло, перлит, ячеистый бетон.

10.3. Эксплуатация изотермических хранилищ

Технологические схемы эксплуатации изотермических хранилищ позволяют обеспечить: прием в низкотемпературную емкость сжиженного пропана из резервуаров наземного металлического парка (емкостью 8 тыс. м³) или перевалочной базы производительностью 20–70 т/ч (в зависимости от времени года); прием из железнодорожных цистерн, минуя наземные резервуары (в этих случаях перекачка осуществляется насосами типа 4ХГВ); хранение сжиженного пропана в емкости емкостью 2 тыс. м³ под давлением до 5 МПа при температуре -42 °С; налив пропана за 6 ч в изотермические газовозы емкостью 2–3 тыс. м³ с

применением погружных электронасосов; наполнение полуизотермических газозов сжиженным пропаном из металлических емкостей наземного резервуарного парка и охлажденным пропаном из подземной емкости; подачу сжиженного пропана из подземной емкости в металлические резервуары.

Технологический комплекс изотермического хранилища приведен на рис. 10.5.

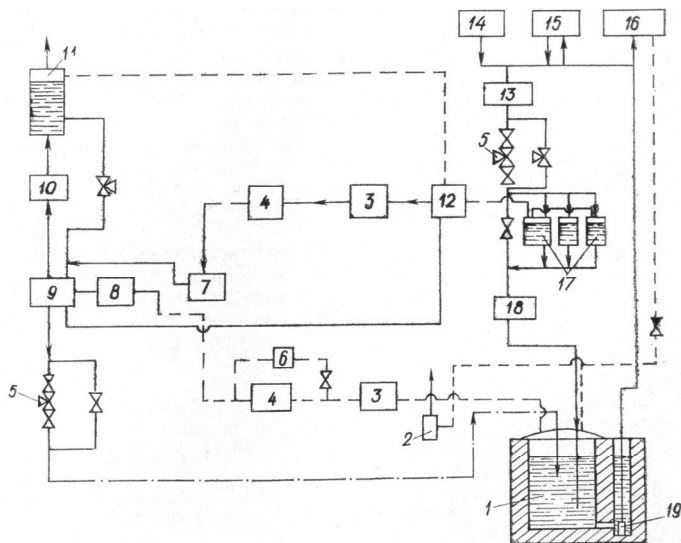


Рис. 10.5. Схема эксплуатации подземного ледогрунтового низкотемпературного хранилища [99]:

- 1 – емкость; 2 – предохранительный клапан; 3 – теплообменник; 4 – компрессор; 5 – дроссельный вентиль; 6 – ресивер; 7, 8 – конденсаторы; 9 – ресивер; 10 – насосная; 11 – ректификационная тарельчатая колонна; 12 – отделитель жидкости; 13 – насосная; 14 – железнодорожные цистерны; 15 – резервуары наземного парка; 16 – изотермический газопровод; 17 – сепараторы-вымораживатели; 18 – фильтры; 19 – погружной электронасос

Охлаждение сжиженного пропана, подаваемого из резервуаров или железнодорожных цистерн, осуществляется на станции сжижения, являющейся одним из важнейших комплексов как подземного ледопородного, так и любого другого низкотемпературного хранилища (с металлическими или железобетонными резервуарами). В станции сжижения газов рабочим телом является хранимый продукт, а испарителем – ледопородная емкость.

Подача сжиженных газов в ледопородную емкость осуществляется из напорных резервуаров или железнодорожных цистерн. Для предотвращения образования гидратов, закупорки трубопроводов и запорных устройств предусмотрена система осушки пропана.

Эффект вымораживания достигается дросселированием «теплого» пропана, поступающего из железнодорожных цистерн или резервуаров с помощью дроссельного вентиля до давления 150–108 кПа и подачей охлажденного пропана в вертикальные сепараторы-вымораживатели, где жидкость дополнительно испаряется и охлаждается до температуры -42 °С. При охлаждении выпадает кристаллогидрат и лед. Жидкая фаза пропана, проходя через фильтр, очищается от кристаллогидратов и льда и направляется в ледопородную емкость. Газообразная фаза, проходя отделитель жидкости и теплообменник, отсасывается компрессором, конденсируется и направляется в емкость.

При хранении сжиженных углеводородных газов заданное давление паровой фазы в ледопородной емкости поддерживается с помощью холодильной установки.

Раздел 11

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

В настоящее время в подземных хранилищах освоен широкий диапазон хранения углеводородов: природного газа, нефти, бензина, реактивного дизельного топлива, сжиженных углеводородных газов (пропана, этана, бутана, пропилена, этилена), широкой фракции углеводородов, газового концентрата, концентрата гелия.

К подземным хранилищам предъявляются повышенные требования обеспечения безопасности обслуживающего персонала и населения, предотвращения экологических нарушений окружающей среды, способности противостоять значительным избыточным давлениям и коррозионному воздействию хранимых продуктов.

Подземные хранилища хотя и являются экологически чистыми, пожаро- и взрывобезопасными сооружениями, однако и здесь возможны различные аварийные ситуации, которые могут привести к

потере большого количества хранимых продуктов с нанесением значительного материального ущерба окружающей среде.

Так, за последние 10 лет на подземных газохранилищах Российской Федерации произошло 25 аварий со значительными затратами на восстановление оборудования и ликвидацию последствий аварии [152]. В США в штате Техас в 2004 г. произошла авария на скважине подземного газохранилища, образованного в солях. В результате пожара произошла большая утечка газа и повреждение скважины.

В практике эксплуатации подземных газохранилищ имели место случаи нарушения герметичности крышки емкости и цементного кольца в скважине, при которых газ начинает проникать в вышележащие водоносные горизонты, поступать на поверхность, образуя грифоны.

Опыт использования соляных каверн в качестве подземных хранилищ углеводородов показывает, что одной из важнейших проблем является утечка хранимых продуктов. Утечки (потери) могут быть обусловлены следующими основными факторами: проницаемостью солевого массива, вмещающего емкость; гидроразрывами (макро- и микрорастрескивания) соли в связи с повышением давления жидкости; негерметичностью обсадной колонны на контакте с горными породами, пройденными скважиной в процессе бурения.

Нормативными документами в России регламентируются допустимые уровни потерь хранимого продукта в подземных хранилищах, образованных в каменных солях (табл. 11.1).

Таблица 11.1. Нормативные величины допустимых утечек (потерь) хранимых продуктов в подземных емкостях в каменной соли при максимальном рабочем давлении [152]

Вид флюида	Единица измерения	Срок хранения			
		1 сут.	1 год	50 лет	100 лет
Нефтепродукт	м ³	0,02	7,3	365	730
	т	0,017	6,25	311,5	623
Природный газ	тыс. м ³	0,069	25,2	1260	2520
	т	0,05	18,85	942	1885

Учитывая то обстоятельство, что абсолютную герметичность соляных каверн обеспечить невозможно, необходимо обеспечить оптимальный режим эксплуатации, и в первую очередь, ограничение

максимального давления в емкости, при котором уровень потерь не будет превышать нормативного.

При строительстве и эксплуатации подземного газонефтехранилища в солях аварийные ситуации могут возникнуть ввиду значительного объема несолевых (нерастворимых) прослоев, что при их неконтролируемом обрушении сопровождается обрушением кровли и стенок емкостей. При этом может произойти повреждение системы эксплуатационных колонн труб.

Из опыта эксплуатации зарубежных и отечественных подземных хранилищ установлено, что аварии и аварийные режимы в них связаны с выбросами углеводородов через скважины в атмосферу.

При строительстве подземных хранилищ шахтного типа основными причинами отказов является разгерметизация, нарушение устойчивости кровли и стенок подземных емкостей.

Эксплуатационная надежность и экологическая безопасность любого типа подземного хранилища обеспечивается прочностью и устойчивостью выработок-емкостей; герметичностью подземных резервуаров, т. е. их изолированностью от грунтовых и поверхностных вод и от атмосферного воздуха; сейсмической устойчивостью, минимальным риском при нештатных ситуациях.

Все вопросы, касающиеся охраны окружающей среды и безопасности при строительстве подземных хранилищ, регламентированы действующими законодательством и нормативными актами по охране окружающей среды.

Уже на этапе проектирования подземные хранилища должны располагаться в зонах, обеспечивающих минимальную степень воздействия на недра, почву, атмосферу и воды. При сооружении и эксплуатации подземных хранилищ должен выполняться экологический мониторинг для выявления и оценки реальных изменений в окружающей среде. Контролю подлежат: охраняемые водоносные горизонты, в том числе питьевые воды, почвы, геодинамическое состояние геологической среды, смещение земной поверхности, состав атмосферного воздуха.

Эксплуатация подземных хранилищ должна производиться при строгом соблюдении существующих норм и правил по охране труда, окружающей среды, правил технической эксплуатации. Это объясняется тем, что хранимые продукты (углеводороды) обладают повышенной взрывоопасностью, токсичностью, а технология строительства таких объектов имеет специфические особенности.

Основная задача в области хранения и использования сжиженных газов – создание условий, исключающих образование взрывных концентраций газа и газозвушной смеси, а также появление источников воспламенения этой смеси (пламени, искр). При взрыве газозвушной смеси скорость распространения пламени достигает нескольких сотен метров в секунду и резко повышается давление, разрушающее строительные конструкции, а нагретые горючие газы образуют очаги пожара.

Можно выделить следующие основные причины образования газозвушной смеси в подземных хранилищах:

- разрушение подземной емкости, нарушение ее герметичности;
- попадание сжиженных углеводородных газов или нефтепродуктов в рассольную колонну подземной емкости;
- образование вакуума в ледопородной емкости;
- работа герметичных насосов, установленных на поверхности, и погружных насосов без наличия в них жидкой фазы;
- неплотность и утечки в технологических трубопроводах.

При взрыве газозвушных смесей, находящихся под давлением 0,1 МПа, развивается давление: метан – 0,75, пропан и бутан – 0,95 МПа.

Взрыв газозвушной смеси происходит при определенной концентрации газа в воздухе. Смесь взрывается, если в ней содержится: 5,3–15,0 % метана, 2,1–9,5 % пропана, 1,5–8,5 % бутана [99]. Приведенные пределы взрываемости соответствуют исходному давлению смеси, равному 0,1 МПа. При повышении давления газозвушной смеси пределы взрываемости сужаются.

Особо опасны газообразные вещества примерно с той же плотностью, что и воздух: они располагаются низко над поверхностью земли, пока не нагретятся. Взрыв или пожар возможен только в объеме облака, представляющего собой горючую газозвушную смесь. Объем открытого пространства, заполняемый при этом горючей смесью, в каждый момент определяется скоростью, с которой продукт испаряется и смешивается с окружающим воздухом. Скорость испарения в свою очередь зависит от интенсивности теплового потока (скорости подвода тепла к жидкости) и природы поверхности, с которой идет испарение. Тепловой поток, идущий к жидкости от любой нагретой поверхности, зависит от разности температур поверхности и жидкости.

Повышенная взрывоопасность хранимых продуктов вызывает

необходимость применения искробезопасного взрывозащитного оборудования. Сущность работы искробезопасного оборудования заключается в том, что в нем создаются такие напряжение, сила тока, индуктивность, емкость и частота тока, при которых энергия возможного электрического искрения значительно меньше энергии воспламенения смеси газа с воздухом при наиболее легко воспламеняющихся концентрациях.

Характеристики искробезопасности для некоторых газов, которые необходимо снижать при наиболее опасных условиях воспламенения (при острых контактах и т. п.), приведены в табл. 11.2.

Таблица 11.2. Параметры воспламенения газов [99]

Газ	Минимальная энергия воспламенения, мДж	Сила воспламеняющего тока, мА	Критический пламя-газящий зазор, мм
Метан	0,28	133–158	2,03
Пропан	0,26	120–145	1,18
Бутан	0,26	131–141	1,78
Этан	0,24	–	1,78
Этилен	0,1	76–98	–
Аммиак	680	–	–

Вследствие весьма незначительной энергии, необходимой для воспламенения, и широкого диапазона концентрационных пределов воспламеняемости смесей с воздухом или кислородом особую опасность при эксплуатации оборудования представляет накопление зарядов статического электричества. Электростатические заряды образуются в оборудовании при хранении и переливании жидких продуктов. Во избежание опасности накопления такого электричества все оборудование (в особенности средства перекачки) должно иметь надежное заземление. Требования к заземлению оборудования приведены в «Правилах защиты от статического электричества».

Подземное хранение нефтепродуктов и сжиженных газов по сравнению с хранением в наземных емкостях значительно способствует охране окружающей среды из-за их минимального испарения. Подземные хранилища, образованные в солях размывом, эксплуатируемые по принципу замещения продукта рассолом и рассола продуктом, полностью исключают потери от испарения, так как в этих емкостях отсутствуют большие и малые «дыхания».

Для подземных хранилищ, образованных в солях, согласно строительному законодательству и государственным нормативным

актам, действуют требования по охране окружающей среды. Главное – конструкция всех элементов подземного хранилища и технология их эксплуатации должны обеспечивать минимально возможное техногенное воздействие на природную среду.

Особенностью строительства и эксплуатации подземных хранилищ в солях является удаление рассолов, их утилизация, а также хранение определенного количества для технологических целей в рассолохранилищах. При удалении рассолов без соблюдения правил охраны окружающей среды может произойти засоление почв и водоемов, а также подземных вод.

При эксплуатации подземных хранилищ возможны выбросы некоторого количества продукта. Поэтому следует обеспечивать высокую герметичность и эксплуатационную надежность сооружений, оборудовать скважины и оголовки устройствами, перекрывающими в случае аварийных ситуаций рабочие сечения в скважинах, соединяющих емкости с поверхностью земли.

Список литературы

1. Мазур И. Нефть и газ. Мировая история. – М.: Изд. «Дом, земля и человек. XXI век», 2004. – 896 с.
2. Нагорный В.П., Глоба В.М. Горное дело. Дорога длиною в тысячелетия. – К.: Эссе, 2010. – 288 с.
3. Иванцов О.М. Подземное хранение сжиженных газов. – М.: Недра, 1964. – 148 с.
4. Нагорный В.П., Глоба В.М. Сооружение и эксплуатация подземных хранилищ углеводородов в отложениях каменной соли. – К.: Эссе, 2010. – 176 с.
5. Видгоп Л.Н. Колебания спроса на топливо. – Л.: Недра, 1975.
6. Вопросы развития транспортной сети СССР. – Тр. ИКТП при Госплане СССР. – 1970. – Вып. 19; 1971. – Вып. 21.
7. Казарян В.А. Подземное хранение углеводородов в солевых отложениях. – Изд.: ИКИ, 2006. – 464 с.
8. Добина А.С., Евстропов Н.А. Сооружение подземных хранилищ. – М.: МГИ, 1967. – 129 с.
9. Сохранский В.Б., Черкашенинов В.И. Подземные газонефтехранилища шахтного типа. – М.: Недра, 1978. – 206 с.
10. Ширковский А.И., Задора Г.И. Добыча и подземное хранение газа. – М.: Недра, 1974.
11. Глоба В.М. Сооружение подземных газонефтехранилищ. – Львов: «Вища школа», 1982. – 148 с.
12. Стукалова Н.К., Вилков Г.Н. Научные исследования при проектировании, строительстве и эксплуатации подземных хранилищ углеводородов в отложениях каменной соли. – Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 1977. – № 6. – С. 15–21.
13. Власов А.В., Бакиров Н.С., Вахитов В.Ш. Современное состояние и перспективы развития нефтебазового хозяйства за рубежом. – М.: ВНИИОЭНГ, 1977. – 54 с.
14. Мазуров В.А., Васюта Ю.С., Колосов А.В. Создание подземных емкостей в пластах соли малой мощности. – Газовая промышленность. – 1969. – № 6. – С. 14–16.
15. Гаев А.Я., Щугорев В.Д., Бутолин А.П. Подземные резервуары. – М.: Недра, 1986. – 219 с.
16. Низкотемпературный подземный опытно-промышленный резервуар для хранения сжиженных газов / И.И. Радчик, Н.Е. Сапунов, А.Ф. Капниус и др. // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 1977. – № 3.
17. Сильвестров Л.К., Скосарева Т.В. Определение теплопритока к теплоизолированным подземным резервуарам СПГ. – Газовая промышленность, 1973. – № 7.
18. Нагорный В.П., Глоба В.М., Денисюк И.И. Взрывные работы при добыче природных углеводородов, строительстве магистральных трубопроводов и подземных хранилищ. – К.: Полиграфист, 2009. – 330 с.

19. Краткая объяснительная записка к карте соленосных площадей, пригодных для сооружения подземных хранилищ. – К.: Ин-т Союзгазпроект, 1983. – 20 с.
20. Барон Л.И., Логунцов Б.М., Позин Е.З. Определение свойств горных пород. – М.: Госгортехиздат, 1962. – 332 с.
21. Руппенейт К.В. Механические свойства горных пород. – М.: Углетехиздат, 1956. – 324 с.
22. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород. – М.: Недра, 1967. – 288 с.
23. Спивак А.И. Механика горных пород. – М.: Недра, 1967. – 192 с.
24. Проскуряков Н.М., Пермяков Р.С., Черников А.К. Физико-механические свойства соляных пород. – М.: Недра, 1973. – 272 с.
25. Свойства горных пород и методы их определения / Под ред. Е.И. Ильницкой. – М.: Недра, 1969. – 392 с.
26. Ставрогин А.Н. Экспериментальные исследования ползучести и долговечности горных пород // Исследование реологических свойств грунтов. – 1968. – Вып. 38. – С.11–18.
27. Авгаян Г.М. Физические свойства осадочных пород при высоких давлениях и температурах. – М.: Недра, 1972. – 226 с.
28. Ломтадзе В.Д. Методы лабораторных исследований физико-механических свойств горных пород. – Л.: Недра, 1972. – 312 с.
29. Глоба В.М. Буровзрывные работы при строительстве магистральных трубопроводов и подземных хранилищ. – М.: Недра, 1984. – 238 с.
30. Ментюков В.П. Земляные работы на строительстве магистральных трубопроводов. – М.: Недра, 1972.
31. Добина А.С., Евстропов Н.А. Применение внутренних взрывов для создания подземных полостей. – Шахтное строительство, 1966. – № 7. – С. 40–43.
32. Uhlenbecker F.W. Verformungsmessungen in der Grube und ergänzende Laboruntersbchungen auf dem Haliweru Hattorf (Werra-Revier) im Hinblick auf eine optimale Festlegung des Abbauverlustes bei grossmöglicher Sicherheit der Grubtbau. – Freiberg, 1968. – 184 s.
33. Ставрогин А.Н. Экспериментальные исследования ползучести и долговечности горных пород // Исследование реологических свойств грунтов. – 1968. – Вып. 38. – С. 11–18.
34. Габдрахимов И.Х. Исследование длительной прочности горных пород и совершенствование системы разработки в условиях Верхнекамских калийных рудников: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. – Фрунзе, 1968. – 24 с.
35. Брук Л.М. Критерии оценки пригодности горных пород и условий их залегания для строительства подземных хранилищ жидких углеводородов // Тр. ВНИГРИ. – 1975. – Вып. 3. – С. 66–76.
36. Неяглов А.В., Коваленко Н.Ф., Яушев А.Е. Подземные шахтные хранилища для сжиженных углеводородных газов: Тематический обзор. – М.: ЦНИИТЭнефтехим. 1976. – 162 с.
37. Глоба В.М. К вопросу сооружения подземных газонефтехранилищ в соляных

- породах // Проектирование и строительство трубопроводов и газонефтепромысловых сооружений. – 1974. – № 7. – С. 18–22.
38. Черкашенинов В.И., Сохранский В.Б. Методика исследования проницаемости пород в массиве // Газовая промышленность. – 1967. – № 1. – С. 20–24.
 39. Хапин А.А. Основы учения о породах-коллекторах нефти и газа. – М.: Недра, 1965. – 192 с.
 40. Черкашенинов В.И., Сохранский В.Б. Исследование структуры порового пространства труднопроницаемых пород при создании подземных хранилищ // Тр. ВНИИПромгаза. – 1977. – Вып. 8–9. – С. 75–80.
 41. Сохранский В.Б., Черкашенинов В.И. Оценка пригодности горных пород для строительства газонефтехранилищ // Строительство трубопроводов. – 1972. – № 10. – С. 13–15.
 42. Сохранский В.Б., Черкашенинов В.И., Савин А.К. Исследование проницаемости горных пород в процессе их многолетнего контактирования с углеводородными средами // Тр. ВНИИПромгаза. – 1969. – Вып. 4. – С. 38–44.
 43. Глоба В.М. О деформируемости соляных пород подземных газонефтехранилищ при их длительном контактировании с нефтепродуктами // Проектирование и строительство трубопроводов и газонефтепромысловых сооружений. – 1975. – № 8. – С. 15–19.
 44. Мазуров В.А. О качестве газонефтепродуктов при их длительном хранении в емкостях, выщелоченных в каменной соли. – Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов, 1968. – № 11.
 45. Азев В.С., Стрюк Н.В., Зорина А.С., Кузнецова Л.Н. Длительное хранение этилированного автомобильного бензина в подземной емкости, сооруженной в отложениях каменной соли. – Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья, 1974. – № 5.
 46. Стрюк Н.В., Горобцова Е.Н., Буков К.Г. Стабильность топлив при хранении в подземных емкостях. – Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов, 1977. – № 6.
 47. Гофман-Захаров П.М. Проектирование и сооружение подземных резервуаров нефтегазохранилищ. – Киев: Будівельник, 1973. – 244 с.
 48. Коробцова Н.Г. Хранение нефтепродуктов в контакте с горными породами. – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1968.
 49. Глоба В.М., Петряшин Л.Ф., Иванова А.Н. Изменение свойств нефтепродуктов при хранении в соляных емкостях. – Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья, 1973. – № 8.
 50. Стрюк Н.В., Зорина А.С., Дудка Г.В. Хранение топлива Т-1 в подземной емкости, сооруженной в соляных куполах. – Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов, 1971. – № 6.
 51. Стрюк Н.В., Усачева Е.В. Влияние водной среды на химическую стабильность топлив. – Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов, 1976. – № 5.
 52. Стрюк Н.В., Горобцова Е.П., Дудка Г.В. Качество топлив, хранящихся в

- подземных емкостях, сооруженных в глине и суглинках. – Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья, 1970. – № 9.
53. Зыбинов И.И., Романьков Ю.И., Федоров Г.Н. Химическая стабильность сжиженных углеводородов при хранении их в подземных хранилищах шахтного типа. – Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья, 1976. – № 1.
 54. Азев В.С., Коваленко В.П. О загрязненности нефтепродуктов в подземных хранилищах. – Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья, 1975. – № 8.
 55. Бугай Ю.М., Глоба В.М., Нагорный В.П., Венгерцев Ю.О. Спорудження нафтобаз і газонафтосховищ. – К.: «ВПОЛ», 2000. – 606 с.
 56. Иванцов О.М. Хранение сжиженных углеводородных газов. – М.: Недра, 1973. – 223 с.
 57. Аренс В.Ж., Белов В.М., Зыков В.А. Разработка месторождений каменной и калийной солей методом подземного выщелачивания. – М.: МГИ, 1968. – 136 с.
 58. Кулле П.А. Разработка месторождений соли подземным выщелачиванием // Тр. ВНИИГ. – 1949. – Вып. – 20. – С. 55–61.
 59. Кулле П.А., Королев В.Ф. Скорости растворения поверхностей каменной соли. – М.: Труды Центр. научн.-исслед. лаб. соляной пром-сти. – Госхимиздат, 1940. – С. 3–59.
 60. Колосов А.В., Семенов В.И., Сидоров И.Н. Исследование физико-механических свойств цемента для тампонажа затрубного пространства скважин подземных хранилищ. Использование газа, подземное хранение. – Тр. ВНИИПромгаза, 1973. – Вып. 6.
 61. Сидоров И.Н., Смирнов В.М., Семенов В.И. Технологические расчеты по цементированию обсадных колонн эксплуатационных скважин подземных хранилищ в отложениях каменной соли. – Тр. ВНИИПромгаза, 1973. – Вып. 6.
 62. Мазуров В.А. О нормативных документах по проектированию и строительству подземных газонефтехранилищ в отложениях каменной соли. – Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов, 1967. – № 8.
 63. Баклагин И.М., Борисов В.В. Экспресс-метод испытания на герметичность подземной соляной емкости. – Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья, 1977. – № 6.
 64. Федоров Б.Н. Формообразование подземных емкостей выщелачиванием в отложениях каменной соли с использованием газообразного нерастворителя // Газовая промышленность. – 1967. – № 2. – С. 32–36.
 65. Стулов Т.Т., Поповский Б.В., Иванцов О.М. и др. Сооружение газохранилищ и нефтебаз. – М.: Недра, 1973. – 182 с.
 66. Мазуров В.А. Определение параметров процесса выщелачивания подземных емкостей в отложениях каменной соли. – Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья, 1971. – № 10.
 67. Мазуров В.А., Зыбинов И.И., Черемшанов В.И., Мельников В.Ф. Повышение эффективности подземных хранилищ за счет увеличения сроков хранения

- нефтепродуктов. – Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья, 1979. – № 6.
68. Колосов А.В., Воронов А.Г. Акустическая технология сооружения подземных емкостей нефтехранилищ выщелачиванием в соляных отложениях. – М.: ВНИИОЭНГ, 1973. – 80 с.
 69. Грохотов В.А. Расчет технологии формирования подземных резервуаров в каменной соли // Транспорт и хранение нефти и углеводородного сырья. – М.: ЦНИИЭнефтехим, 1985. – № 3. – С. 9–12.
 70. Кислер Л.Н., Крюкова Н.М., Мазуров В.А. Об оценке прочности емкостей различной формы в соляных отложениях. – Тр. ВНИИПромгаза, 1972. – Вып. 5.
 71. Гальперин А.М., Шафаренко Е.М. Реологические расчеты горно-технических сооружений. – М.: Недра, 1977.
 72. Ержанов Ж.С., Аршинов Г.А., Бергман Э.И. Об оценке устойчивости формы асимметричной полости в соляном массиве. – Изв. АН КазССР, Сер. физ.-мат. наук, 1974. – № 5.
 73. Глоба В.М., Музыкантов И.А., Любов Ю.Г. Научно-технические методы контроля за границей раздела «нефтепродукт – рассол» в подземных хранилищах. – Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья, 1977. – № 6.
 74. Лебедева Л.В., Пузырев П.Ф., Чигиринский Р.Э. Методика звуколокационной съемки подземных емкостей аппаратурой типа «Зонд». – Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья, 1977. – № 6.
 75. Кафаров В.В. Основы массопередачи. – М.: Высш. школа, 1972. – 494 с.
 76. Ямщиков В.С., Воронов А.Г., Колосов А.В., Вологин В.В. Экспериментальные исследования воздействия акустических колебаний на процесс выщелачивания каменной соли // Горный журнал. – 1971. – № 12. – С. 33–37.
 77. Гофман-Захаров П.М., Сидорова Н.К. Перспективы интенсификации процессов сооружения газонефтехранилищ в отложениях каменной соли // Проектирование и строительство магистральных трубопроводов. – 1968. – № 5. – С. 10–14.
 78. Сидорова Н.К. Интенсификация процессов растворения с помощью колебаний, создаваемых электрическим зарядом в воде // Нефтяная и газовая промышленность. – 1967. – № 2 – С. 50–52.
 79. Петрашин Л.Ф., Желтоухов В.В., Поздняков А.Г. Экспериментальные исследования интенсификации процессов выщелачивания в подземных камерах при сооружении газонефтехранилищ // Разведка и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 1976. – Вып. 13. – С. 115–116.
 80. Колосов А.В. Подземное и подводное хранение нефтепродуктов. – М.: ВНИИОЭНГ, 1972. – 80 с.
 81. Михалюк А.В. Горные породы при неравномерных динамических нагрузках. – К.: Наук. думка, 1980. – 154 с.
 82. Михалюк А.В., Нагорный В.П. Неравномерное динамическое нагружение

- солевых и нерастворимых пород при сооружении подземных хранилищ в каменно-соляных структурах. – Киев, 1995. – 16 с. (Препр./АН Украины. Ин-т геофизики им. С.И. Субботина).
83. Токарчук А.В., Яцков А.В., Смагин С.А. Некоторые особенности поведения каменной соли при динамических нагрузках // Теория и практика совершенствования взрывных работ. – К.: Наук. думка, 1990. – С. 102–107.
 84. Михалюк А.В. Торпедирование и импульсный гидроразрыв пластов. – К.: Наук. думка, 1986. – 208 с.
 85. Нагорный В.П. Интенсификация сооружения подземных хранилищ в каменной соли методом размыва. – Газовая промышленность, 2011. – № 7. – С. 59–62.
 86. Ставрогин А.Н., Певзнер Е.Д. Физико-механические свойства, пород при динамических нагрузках в условиях сложных напряженных состояний. – В кн.: Физические свойства горных пород при высоких термодинамических параметрах. – К.: Наук. думка, 1971. – С. 204–206 с.
 87. Писаренко Г.С., Агарев В.А., Квитка А.Л. Сопrotивление материалов. – К.: Вища школа, 1986. – 775 с.
 88. Штамповка взрывом / Под ред. М.А. Анучина. – М.: Машиностроение. 1985. – 153 с.
 89. Нагорный В.П., Кондратенко А.Ю. Разрушение нерастворимых пластов при строительстве подземных хранилищ в каменной соли // Моделирование динамики деформируемых сред. – К.: Наук. думка, 1993. – С.107–113.
 90. Нагорный В.П. Обрушение нерастворимых пластов при выщелачивании подземных хранилищ. – Киев. 1990. – 37 с. (Препр./АН Украины, Ин-т геофизики им. С.И. Субботина).
 91. Рекомендации по торпедированию нагнетальных скважин для увеличения их приемистости / Михалюк А.В., Нагорный В.П., Ильин А.Ф. и др. – К.: Книжн. типогр. науч. книги, 1993. – 18 с.
 92. Прострелочные и взрывные работы в скважинах/Н.Г. Григорян, С.А. Ловля, Г.Г. Шахназаров и др. – М.: Недра, 1992. – 302 с.
 93. Иогансен К.В. Спутник буровика. – М.: Недра, 1990. – 303 с.
 94. Белоцерковская Г.В., Белоцерковский Е.А. О создании подземных хранилищ жидких углеводородов в соляных пластах, содержащих прослой нерастворимых пород // Нефтяное хозяйство. – 1967. – № 12. – С. 46–48.
 95. Царенков Ю.В. Метод обрушения пропластков нерастворимых пород в подземной емкости//Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 1979. – № 5. – С. 10–15.
 96. Временные указания по проектированию и строительству подземных хранилищ в отложениях каменной соли (для нефти, нефтепродуктов и сжиженных газов). СН 320-65. – М: Стройиздат. 1965. – С. 1–42.
 97. Чуриков В.А., Колодий В.И., Черевко М.А. Динамика скважин при взрыво-прострелочных работах. – К.: Наук. думка, 1994. – 172 с.
 98. Михалюк А.В., Нагорный В.П. Взрывные работы при строительстве подземных хранилищ в каменной соли методом размыва. – Киев, 1995. – 26 с. (Препр./АН Украины, Ин-т геофизики им. С.И. Субботина).

99. Строительство и эксплуатация подземных хранилищ / В.М. Глоба, Е.И. Яковлев, В.В. Борисов, Л.А. Видовский. – К.: Будівельник, 1985. – 89 с.
100. Коган Р.Г., Шустров В.П., Черкашенинов В.И. Возможности использования подземных вертикальных емкостей для сжиженных газов. – Строительство трубопроводов, 1974. – № 12.
101. СНиП 2.11.04-85. Подземные хранилища нефти, нефтепродуктов и сжиженных газов. – М.: Госстрой СССР, 1988.
102. Фридлянд А.М. Исследование трещиноватости пород в массиве, окружающем выработку. – Шахтное строительство, 1969. – № 5.
103. Коротков Р.П. Определение абсолютной величины горного давления с помощью фильтрации воды. – Уголь Украины, 1964. – № 3.
104. Черкашенинов В.И., Сохранский В.Б. Исследования фильтрационных свойств гипсов. – Труды ВНИИПромгаза, 1977. – Вып. 8–9.
105. Ходот В.В. Вероятный механизм внезапного выброса угля и газа. – В кн.: Вопросы теории внезапных выбросов угля и газа. – М.: Изд-во АН СССР, 1959.
106. Козак В.Н., Молчанова К.П. Метод аналогий для определения размеров устойчивых выработок-емкостей, сооружаемых в слоистой толще горных пород. – Труды ВНИИПромгаза, 1975. – Вып. 7.
107. Беккер Д.И. Определение поперечных сечений выработок-емкостей при проектировании и строительстве газонефтехранилищ шахтного типа. – Строительство трубопроводов, 1975. – № 2.
108. Порцевский А.К. Технологии проведения горизонтальных, вертикальных и горно-разведочных выработок. – М.: МГОУ, 2004. – 69 с.
109. Проектирование взрывных работ / Б.Н. Кутузов, Ю.К. Валухин, С.А. Давыдов и др. – М.: Недра, 1974.
110. Глоба В.М. Совершенствование буровзрывных работ при проходке выработок на калийных рудниках. – Шахтное строительство, 1970. – № 10.
111. Миндели Э.О. Разрушение горных пород. – М.: Недра, 1975. – 600 с.
112. Forsster W., Sitz P. Untersuchungen zur Beanspruchung und Gestaltung von untertägigen Pforten und Dämmen. – Neue Bergbautechnik, 1971. – # 8.
113. Добина А.С., Евстропов Н.А. Образование подземных емкостей в пластичных горных породах способом внутренних взрывов. – Горный журнал, 1966. – № 5.
114. Смирнов В.И. Сооружение подземных емкостей камуфлетными взрывами и выбор методов их закрепления. – Шахтное строительство, 1975. – № 6.
115. Покровский Г.И., Федоров И.С. Действие удара и взрыва в деформируемых средах. – М.: Промстройиздат, 1957. – 276 с.
116. Евстропов Н.А. Взрывные работы в строительстве. – М.: Стройиздат, 1965.
117. Смирнов В.И., Голицинский Д.М., Мельников Л.Л. Строительство подземных сооружений с использованием камуфлетных взрывов. – М.: Недра, 1981.
118. Корыпалов В.Ф., Мельников Л.Л., Овчинников В.М., Писарев Д.О. Механическое действие взрыва камуфлетного заряда в грунтах. – Горный журнал, 1975. – № 12. – С. 8–10.

119. Юшков А.С., Серик Е.Д. Бурение геологоразведочных скважин. – М.: Недра, 1976.
120. Заславский Ю.З., Лысенко И.Т. Сооружение подземных полостей взрывом с одновременным формированием бетонной крепи // Шахтное строительство. – 1978. – № 8. – С. 12–14.
121. Куянцев С.Г. Применение полимерных композиций при строительстве полостей методом взрыва // Нетрадиционные технологии взрывных работ. – К.: Наук. думка, 1993. – С. 147–149.
122. Михалюк А.В., Бузин В.А., Писарев Ю.А. Технология сооружения подземных локализованных хранилищ кассетного типа взрывным способом. – К.: Ин-т геофизики НАН Украины, 1991. – 3 с.
123. Кузьмин Е.В., Хрулёв А.С., Савич О.И., Карпухин А.Н. Перспективы создания подземных камер-хранилищ в отложениях погребенного пластового льда полуострова Ямал // Сборник научных трудов по материалам симпозиума Неделя горняка. – 2007. Семинар №17. Горный информационно-аналитический бюллетень МГУ. – М.: 2008. – С. 331–336.
124. <http://dolgikh.com/index/0-40>
125. <http://svitlytsia.crimea.ua/?section=article&artID=12451>
126. <http://dic.academic.ru/>
127. http://www.distillation.ru/ref/neravnomernosti_gazopotrebleni9.html
128. <http://www.ngpedia.ru/id185026p1.html>
129. <http://ru.wikipedia.org/>
130. <http://www.fibo-futures.ru/pages.php?page=82>
131. <http://kze.docdat.com/>
132. http://ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/6/6391/index.php
133. <http://www.gazprom.ru>
134. <http://m.slovari.yandex.ua/>
135. <http://geoman.ru/books/item/f00/s00/z0000054/st017.shtml>
136. <http://www.giab-online.ru/>
137. <http://geo.web.ru/db/msg.html?mid=1182980&uri=part02.html>
138. <http://www.gazprominfo.ru/articles/gas-storage/>
139. <http://zadocs.ru/geograf/2349/index.html>
140. <http://www.scribu.com/7/25/64938969471.php>
141. http://www.metro.ru/library/stroitelstvo_metropolitenov/501/
142. <http://www.drillings.ru/rtb?razdel=1&object=1>
143. <http://slovno.com.ua/>
144. http://modernlibz.ru/books/bse/bolshaya_sovetskaya_enciklopediya_st/read_25/
145. <http://www.uran.donetsk.ua/~masters/2007/ggeo/yakushin/library/bibl5.htm>
146. <http://vseslova.com.ua/>
147. http://www.msgpa.ru/education/specialities/2011_priem/gornye_machines.php
148. http://knowledge.allbest.ru/geology/2c0b65635a3ac78b4d43b88521206d36_0.html
149. <http://knu.znate.ru/docs/index-449388.html?page=5>
150. http://www.tehlit.ru/1lib_norma_doc/1/1991/
151. <http://vestnik.msmu.ru/files/2/20120202162811.pdf>
152. <http://www.kazedu.kz/referat/69905>
153. <http://www.rcmm.ru/news/2353.html>

Подземные хранилища углеводородов (хронология, цифры и факты)

- 1915 г.** – В Канаде (Онтарио) сооружено первое в мире подземное хранилище газа в истощенном газовом месторождении Уэлленд-Каунти емкостью 62 млн. м³.
- 1916 г.** – В США впервые осуществлено подземное хранение газа в истощенном месторождении вблизи Конкорда для газоснабжения г. Буффало (штат Нью-Йорк).
- 1930 г.** – В США в разных штатах эксплуатировалось 9 подземных хранилищ.
- 1946 г.** – В США (штат Кентукки) создано первое подземное хранилище газа в водоносном пласте.
- 1949 г.** – В Швеции построена первая подземная емкость шахтного типа для хранения нефти.
- 1950 г.** – В США построено первое подземное хранилище для сжиженного газа.
- 1953 г.** – В США в районе Чикаго началась закачка газа в подземное хранилище Хершер, образованное в водоносных песчаных пластах.
- В ФРГ началась эксплуатация Ганноверского подземного газохранилища в водоносных пластах. Было закачано 11 млн. м³ газа.
- 1956 г.** – В СССР трест «Союзбургаз» начал первую разведку структур для создания подземных газохранилищ.
- 1958 г.** – В СССР на базе истощенной газовой залежи было введено в эксплуатацию первое подземное хранилище газа – Башкатовское (Оренбургская область).
- 1959 г.** – В СССР постановлением Совмина было определено начало развития подземного хранения в непроницаемых горных породах. Начато проектирование и строительство первого подземного хранилища в каменной соли в районе г. Ишимбай. Осуществлена промышленная закачка газа в Калужское подземное хранилище, сооруженное в водоносном пласте, объем которого составил 400 млн. м³. Введено в эксплуатацию Касимовское газохранилище с активным объемом газа – 380 млн. м³.

- 1960 г.** – Впервые в СССР группой специалистов (О.М. Иванцов, Н.А. Евстропов и др.) был внедрен метод строительства подземных хранилищ в плотных глинах при помощи глубинных взрывов.
- В США начало функционировать подземное хранилище в отработанной угольной шахте, объем пустот которой составил 4,25 млн. м³.
- 1961 г.** – В США в г. Мэрисвил (штат Мичиган) впервые использованы соляные полости для создания подземных газохранилищ. В отработанной угольной шахте Лейден (штат Колорадо) создано подземное газохранилище объемом 57 млн. м³ природного газа.
- 1962 г.** – Начало строительства в СССР Яр-Бишкадакского подземного хранилища светлых нефтепродуктов в каменной соли.
- 1963 г.** – В СССР на основе теоретических работ Н.А. Чарного впервые в промышленных масштабах вблизи Ленинграда осуществлено хранение газа в горизонтальных и пологопадающих водоносных пластах (Гатчинское подземное хранилище газа).
- В Армении началось строительство Ереванского подземного хранилища природного газа в каменной соли.
- 1964 г.** – В Канаде в провинции Саскачевань введено в эксплуатацию подземное газохранилище в соляных структурах.
- Начало эксплуатации первого в Украине Олешевского подземного газохранилища (Черниговская область), сооруженного в водоносном пласте.
- 1966 г.** – В Норвегии в районе г. Осло вступила в строй первая очередь подземного хранилища нефтепродуктов, сооруженного шахтным способом в плотных горных породах.
- 1968 г.** – Во Франции введено в эксплуатацию подземное хранилище в соляных структурах.
- В США насчитывалось 330 подземных газохранилищ, емкость которых составила 124 млрд. м³.
- 1969 г.** – В СССР в промышленных масштабах эксплуатировалось 12 подземных газохранилищ: 3 – созданных в истощенных газовых залежах; 7 – водоносных пластах; 2 – каменной соли.

- В Германии в районе г. Киль построено подземное хранилище в отложениях каменной соли.
- 1970 г.** – В Украине введено в эксплуатацию Лубенское подземное хранилище нефтепродуктов, образованное в каменной соли.
 - В мировой практике объемы подземных хранилищ, образованных в каменных солях, увеличились до 400 тыс. м³.
- 1973 г.** – Завершено строительство Инчукальского подземного газохранилища в Латвии.
- 1974 г.** – В США по решению Конгресса создается стратегический нефтяной резерв, согласно которому нефть должна закачиваться в четыре подземных хранилища, образованных в соляных куполах и расположенных вдоль побережья Мексиканского залива в Техасе и Луизиане.
 - В ФРГ в соляной шахте Ере (земля Северный Рейн – Вестфалия) образовано подземное газохранилище, в которое в 2009 было закачено 4,7 млрд. м³ природного газа.
- 1975 г.** – В Азербайджане введено в эксплуатацию подземное газохранилище на базе отработанного газового месторождения «Галмаз».
- 1976 г.** – Сдано в эксплуатацию Осиповичское подземное хранилище в Беларуси.
- 1977 г.** – В СССР создано крупнейшее в мире газохранилище в водоносном пласте – Касимовское (Рязанская область), с проектным объемом активного газа – 4,5 млрд. м³.
 - Во Франции введено в эксплуатацию подземное нефтехранилище в г. Маноске емкостью 9 млн. м³.
 - В США после завершения строительных работ вступило в строй первое подземное хранилище для стратегического нефтяного резерва Best Хекберги (штат Луизиана), в которое начала поступать нефть из Саудовской Аравии.
- 1979 г.** – В СССР начато строительство крупнейшего в мире Северо-Ставропольского подземного хранилища газа в истощенном газовом месторождении.
- 1980 г.** – Возросли объемы подземных хранилищ нефти в ряде стран мира. Вместимость их составила: в США – 65; ФРГ – 50; Франции – 25 млн. м³.

- Суммарный объем действующих шахтных хранилищ для сжиженных углеводородных газов достиг: в США – более 2 млн. м³; Франции – 180; Бельгии – 60; Италии – 60 тыс. м³.
 - В Бельгии в старых отработанных угольных шахтах Андерлюс и Пеониф созданы газохранилища, в которые закачано более 283 млн. м³ газа.
- 1982 г.** – Развитие получило подземное хранение нефти и нефтепродуктов в хранилищах шахтного типа. Их объем составил: в Норвегии – 1,4; в Швеции более 3; в Финляндии – 4,5 млн. м³.
- 1983 г.** – В Украине введено в эксплуатацию одно из крупнейших в мире подземных хранилищ газа – Вильче-Волицкое.
- 1990 г.** – В США в соляных формациях начали сооружать емкости объемом до 1 млн. м³.
- 2000 г.** – Резервы нефти США, закачанной в подземные хранилища, составили 702 млн. бареллей (около 100 млн. т). Стратегические резервы размещены в четырех основных хранилищах, состоящих из 62 емкостей (Бил Хилл, Брайон Маунд, Вест Хэбери, Бэйо Хоктоу).
- 2010 г.** – Мировые объемы подземных газохранилищ резко возросли. Из общего объема хранящегося газа (333 млрд. м³) больше трети приходится на США, где расположено около 400 ПХГ, в которых может храниться до 115 млрд. м³ газа. На втором месте находится Россия, располагающая 25 ПХГ с объемом более 66 млрд. м³. На третьем месте с 12 ПХГ находится Украина с активной емкостью 31 млрд. м³.
- В Германии насчитывалось 19 подземных газохранилищ с активным объемом 7 млрд. м³ и самой высокой в мире долей резервирования (более 25 %). Начата закачка газа в подземное хранилище Бад Лаухштадт.
 - В мире действовало 642 подземных газохранилища с активным объемом более 300 млрд. м³, что составило 10 % от общемирового потребления.
- 2011 г.** – В Германии началось поэтапное выщелачивание и ввод в эксплуатацию 10 каверн на Бернбургском месторождении каменной соли. Началось строительство мощного подземного хранилища «Катрина» объемом 586 млн. м³ природного газа.

- В Австрии вступила в строй вторая очередь подземного газохранилища «Хайдак».
 - В Беларуси введена в эксплуатацию вторая очередь Прибужского подземного газохранилища.
 - В мире действовало свыше 600 подземных газохранилищ с общим активным объемом газа 340 млрд. м³.
- 2013 г.** – В Германии, в северной ее части, введено в эксплуатацию крупнейшее в Европе подземное газохранилище «Этцель», в 52 соляных кавернах которого на глубине 1 км создан комплекс емкостей объемом 17 млн. м³.
- На границе Германии и Голландии введены в эксплуатацию первые две, из 10 запланированных, каверны подземного газохранилища в каменной соли в Йемгуме, что открывает возможность прокачки газа магистральным газопроводом «Северный поток» на рынки Западной Европы.
 - В России в Калининградской области введено в эксплуатацию подземное газохранилище.

Научное издание

**Нагорный Владимир Петрович
Глоба Владимир Моисеевич**

Подземные хранилища углеводородов

На русском языке

Наукове видання

**Нагорний Володимир Петрович
Глоба Володимир Мойсейович**

Підземні сховища вуглеводнів

Російською мовою

Підписано до друку 01.04.2014.

Формат 60×84/16. Папір офсетний.

Друк. арк. 17.37; умов. друк. арк. 15.21

Замовлення № 7 від 22.05.2014. Наклад 200 прим.

Віддруковано у друкарні Тов. фірми «Ессе»

Україна, 03142, м. Київ-142,

проспект Вернадського, 34/1