

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Национальный исследовательский технологический университет
«МИСиС»

На правах рукописи

ПАЛАНКОЕВ ИБРАГИМ МАГОМЕДОВИЧ

**Обоснование параметров технологии проходки шахтных стволов
в искусственно замороженных породах**

Специальности:

25.00.22- «Геотехнология (подземная, открытая и строительная)»

25.00.20 - «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная
аэрогазодинамика и горная теплофизика».

Диссертация

на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Корчак Андрей Владимирович

Москва 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. Современное состояние теории и практики строительства стволов способом искусственного замораживания пород	16
1.1. Общие сведения о проходках стволов в замороженных породах и возникающих при этом аварийных ситуациях	16
1.2. Анализ причин и частоты возникновения аварийных ситуаций при бурении замораживающих скважин	30
1.3. Анализ причин и частоты возникновения аварийных ситуаций в процессе монтажа замораживающих колонок и рассольной сети.....	38
1.4. Анализ возможности и частоты возникновения аварийных ситуаций на стадии активного и пассивного замораживания.....	46
1.5. Аварийные ситуации при ликвидации ледопородных ограждений..	49
1.6. Систематизация аварийных ситуаций при строительстве стволов способом искусственного замораживания	51
Цели и задачи исследования.....	54
2. Исследования процессов деформирования и разрушения ледопородного ограждения и замораживающих колонок при проходке стволов в замороженных породах.....	56
2.1. Виды деформаций замораживающих колонок	56
2.2. Анализ теоретических исследований по деформированию замораживающих колонок	65
2.3. Обзор экспериментальных исследований воздействий взрывных работ на деформируемость замораживающих колонок.....	75
2.4. Влияние буровзрывных работ в стволе на прочность и устойчивость замораживающих колонок	87
Выводы по 2 главе	96
3. Исследования влияния взрывной технологии разработки пород на напряженно-деформированное состояние замораживающих колонок .	98
3.1. Постановка задачи исследования.....	98
3.2. Влияние взрывной волны на замораживающие колонки в однородном замороженном массиве.....	100
3.3. Влияние взрывной волны на замораживающие колонки в неоднородном по глубине массиве замороженных пород	109
3.4. Особенности воздействия взрывной волны на замораживающие колонки в зоне границы раздела пластов горных пород	129
Выводы по главе 3	136
4. Обоснование и разработка методики определения параметров взрывной технологии разработки пород и рекомендаций по повышению устойчивости замораживающих колонок	137
4.1. Общие рекомендации по повышению технико-экономических показателей строительства стволов в замороженных породах	137
4.2. Методы повышения надежности замораживающих колонок.....	142

4.3. Методы снижения воздействия ударной волны на замораживающую колонку	155
4.3. Экспериментальные исследования эффективности использования компенсационных шпуров на безопасность и герметичность замораживающих колонок	161
4.4. Обоснование и разработка параметров технологии буровзрывных работ при проходке стволов в замороженных породах	166
Выводы по главе 4	171
Заключение	173
Список использованной литературы	176
Приложение 1	186
Приложение 2	191
Приложение 3	192

ВВЕДЕНИЕ

Одной из характерных особенностей современного подземного строительства является увеличение глубины месторождений и, как следствие, усложнение горно-геологических условий, что, в свою очередь, сопряжено с увеличением глубины вскрытия неустойчивых обводненных пород, требующих применения специальных способов строительства, в частности, искусственного замораживания пород. Эффективность искусственного замораживания при проходке шахтных стволов в сложных гидрогеологических условиях подтверждается многолетним опытом применения и во многом определяется надежностью работы ледопородного ограждения расчетной толщины.

С применением способа искусственного замораживания были освоены такие месторождения, как Белозерское в Запорожье, Старобинское в Белоруссии, Верхнекамское калийное месторождение (ВМКМС) на Урале, Яковлевское месторождение Курской магнитной аномалии, Добруджанское угольное месторождение в Польше, Паньцзи - Сецяоское угольное месторождение в Китае, многие месторождения в Германии, Канаде, Англии и других странах [2,8,22,33,35,48,85 и др.].

В ближайшее время предстоит освоение калийных месторождений в Волгоградской и Калининградской областях, строительство новых рудников Верхнекамского месторождения, не обойтись без использования способа искусственного замораживания при освоении месторождений редких металлов в Средней Азии, Белозерских железорудных месторождений, месторождений Курской магнитной аномалии, на Дальнем Востоке и в Сибири.

В настоящее время значительно увеличивается глубина замораживаемых пород. Так в Канаде проектируется замораживание на глубину 700-920 м, в нашей стране на Гремячинском месторождении выполнено замораживание до глубины 800 м [72], на Калининградском

месторождении проектируется замораживание водонасыщенных пород до глубины 700 м.

В таблице приведены характерные геологические условия месторождений, разрабатываемых с применением способа искусственного замораживания пород.

Таблица

Условия строительства стволов с применением способа искусственного замораживания горных пород

№	Наименование месторождения	Макс. глубина замораживания, м	Макс. гидро-статический напор, МПа	Ожидаемый приток воды в ствол, м ³ /ч	Мак. температура воды, град.
1	Верхнекамское	490	1,1	800	15
2	Белозерское	350	3,0	200	24
3	Забургское	500	3,5	500	18
4	Качарское	500	1,5	200	15
5	Старобинское	600	1,2	200	26
6	Яковлевское	550	5.5	500	26
7	Усть-Яйвинское	423	5,0	300	24
8	Добруджанское	600	6,0	980	30
9	Паньцзинское	550	3,8	480	18
10	Гремячинское	800	5,0	550	25
11	Калининградское	700	5.6	-	16

Значительный вклад в развитие научных исследований процесса замораживания горных пород внесли такие исследователи, как Баклашов И.В., Бахолдин Б.В., Вялов С.С., Зарецкий Ю.К., Городецкий С.Э., Долгов О.А., Дорман Я.А., Картозия Б.А., Либерман Ю.М., Литвин А.З., Маньковский Г.М., Поляков Н.М., Насонов И.Д., Трупаков Н.Г., Тютюник П.М., Шпарбер П.Л., Шуплик М.Н., Федюкин В.А., Хакимов Х.Р., Ху

Сяндон, Hartikainen J., Sres A. и другие [22,30,35,43,58,71,73,102,104,105,106,132]. Большой объем исследований посвящен вопросам, связанным с контролем процесса замораживания. К таким исследованиям относятся работы П.М. Тютюнника, В.С. Ямщикова, В.М. Варенышева, В.Е. Коновалихина, А.А. Роменского, И .Л. Баркана, М.И. Фридмана и др. [94,106,107,108,11].

Вопросам воздействия взрыва на горные породы и находящиеся в них подземные конструкции посвящены работы таких исследователей, как Белин В.А., Боровиков В.А., Ванягин И.Ф., Вовк А. А., Ефремов З.И., Кутузов Б.Н., Крюков Г.М., Лучко И.А., Мангуш С.К., Мельников Н.В., Мосинец В.Н., Огурцов К.И., Оксанич И.Ф., Покровский Г.И., Родионов В. Н., Садовский М.А., Суханов А.Ф., Тарасенко В.П., Ханукаев А.И., Цейтлин Я.И. и др. [97,117].

Воздействие взрывных нагрузок на замораживающие колонки при проходке стволов изучалось в работах Карасика И.Б., Миронова П.С., Оксанича И.Ф., Фраша Г.Б., Цейтлина Я.И., Чмыгхалова В.С. [112,117]. Потеря устойчивости круговых цилиндрических оболочек (замораживающих труб) рассмотрена в работах отечественных ученых Алфутова Н.А., Андреева Л.В., Вольмира А.С., Григошока А.И. и др., а также зарубежных исследователей Amstutz E., Kyriakides S., Park TD., Yamamoto Y. и др. [17,125,130].

Несмотря на значительный опыт, накопленный в подземном строительстве по применению способа искусственного замораживания, темпы проходки остаются на уровне 90-х годов или изменились весьма незначительно. Наиболее трудоемкая операция проходческого цикла - разработка замороженных пород в забое, ведется, в основном, отбойными молотками. В то же время известно, что применение взрывной отбойки породы в забое позволяет существенно повысить эффективность проходческих работ. Нормативными документами ранее запрещалось

применение взрывной отбойки в замороженных породах крепостью до 3 по шкале проф. М.М.Протодяконова, а в отмененном СНиП III-11-77 «Подземные горные выработки» были введены ограничения по допустимому расстоянию от шпура до замораживающей колонки (от 1,1 до 1,4 м в глинах или скальных породах) и по длине шпура. В действующих в настоящее время нормативных документах [101] и ПБ 03-428-02 никаких ограничений или предостережений по применению БВР нет, что предопределяет актуальность исследований степени влияния буровзрывных работ на герметичность замораживающих колонок.

Взрывные работы оказывают негативное воздействие на защитное ледопородное ограждение и часто являются причиной деформирования и разрушения замораживающих колонок, что, в свою очередь, приводит к тяжелым аварийным ситуациям, связанным с прорывом подземных вод или рассолов, частичным размораживанием ледопородного ограждения и затоплением ствола. Ликвидация последствий аварийных ситуаций, восстановление поврежденных замораживающих колонок связано с большими затратами средств и времени, а также с остановкой горнопроходческих работ на повторный срок активного замораживания, особенно в районе бурения новых замораживающих колонок.

Однако аварийные ситуации при применении взрывных работ происходят только при определенном сочетании горно-геологических условий и приурочены к зонам контактов замороженных пород с различными физико-механическими свойствами.

Следовательно, возможность применения взрывной разработки замороженных пород требует детального изучения процесса воздействия взрывных волн на ледопородное ограждение и устойчивость замораживающих колонок.

В отечественной и зарубежной литературе опубликовано немало данных об исследованиях процесса деформирования ЛПО при воздействии

статических нагрузок таких, как горное давление и напорные воды. Но вопросы теории и практики устойчивости ледопородного ограждения под воздействием взрывных нагрузок изучены недостаточно.

Поскольку замораживающие колонки являются основным и наиболее уязвимым конструктивным элементом ледопородного ограждения, процесс их деформирования под воздействием динамических взрывных нагрузок выбран автором в качестве основного предмета диссертационного исследования.

Таким образом, установление закономерностей и зависимостей влияния взрывных нагрузок на ледопородное ограждение и разработка на их основе параметров безаварийной технологии строительства стволов способом искусственного замораживания является актуальной научной задачей.

Целью работы является установление закономерностей и зависимостей влияния взрывных нагрузок на напряженно-деформированное состояние замораживающих колонок и разработка на их основе параметров безаварийной технологии строительства стволов способом искусственного замораживания, обеспечивающих устойчивость ледопородного ограждения, повышение темпов проходческих работ и сокращение сроков строительства.

Идея работы состоит в том, чтобы назначаемые параметры буровзрывных работ, такие как диаметры отбойных и оконтуривающих шпуров и расстояние между ними учитывали информацию об изменении горно-геологических условий проходки по глубине и в сочетании с дополнительными технологическими мероприятиями обеспечивали напряженно-деформированное состояние замораживающих колонок, гарантирующее их прочность и устойчивость при проходке стволов в замороженных породах буровзрывным способом.

Задачи исследования

- Анализ и математическая обработка статистических данных о возможных аварийных ситуациях, возникающих при строительстве шахтных стволов с применением способа искусственного замораживания пород;
- Анализ причин возникновения аварийных ситуаций, связанных с разгерметизацией и деформируемостью замораживающих колонок;
- Оценка влияния БВР на состояние ледопородного массива в призабойной зоне ствола и герметичность замораживающих колонок;
- Изучение механизма воздействия ударных волн на замораживающую колонку;
- Обоснование безаварийных технологий проходки ствола и технологических мероприятий, исключающих воздействие ударных волн на замораживающие колонки.

Научные положения, разработанные лично соискателем

1. На основании обобщения и анализа опыта строительства стволов способом искусственного замораживания установлено, что 26% аварийных ситуаций при применении БВР возникает вследствие деформирования и разрушения замораживающих колонок с последующим размораживанием стенок ледопородного ограждения. Анализ статистических данных позволил выявить устойчивую закономерность сочетания технических и геологических условий, характеризующихся определенным пространственным взаимоположением литологических границ слоев пород и забоя ствола при ведении взрывных работ, обуславливающих возникновение аварийных ситуаций. Наличие такой закономерности подтверждается однотипным характером деформирования и разрушения замораживающих колонок.

2. Установлена закономерность возникновения условий аварийного состояния замораживающих колонок, характеризуемая наличием в забойной части ствола (по глубине) переслаивающихся пород с различной акустической жесткостью. Основным фактором разрушения замораживающих колонок являются резонансные явления на литологической границе, приводящие к образованию ударных волн. Доказано, что расстояние до литологической границы от забоя ствола по глубине, при котором возникает наибольший риск разрушения колонок, составляет 0,7 максимальной длины взрывной волны.

3. Установлены закономерности формирования области сдвиговых напряжений на контуре замораживающей скважины, смещения которой под действием ударной волны формирует ударный импульс со скоростью движения, равной удвоенной массовой скорости взрывной волны, под действием которого замораживающая колонка теряет устойчивость.

4. Установлено, что при бурении замораживающих скважин дополнительные технологические мероприятия в виде нагнетания в затрубное пространство раствора разработанного состава снижает интенсивность взрывных нагрузок на замораживающую колонку в 1,5-2 раза. Этот эффект обусловлен повышением прочности бурового раствора до 4,9 МПа, вследствие чего образуется мягкая акустическая граница между породным контуром скважины и слоем замороженного раствора, что обеспечивает снижение коэффициента отражения взрывных волн и защиту замораживающей колонки.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются применением апробированных методов геомеханики, использованием современных экспериментальных методов и аппаратуры, а также удовлетворительной сходимостью результатов расчетов с данными практики и результатами исследований других авторов, наличием трех патентов на изобретения РФ.

Научная новизна.

1. На основании обобщения опыта проходки 579 стволов предложена систематизация возможных аварийных ситуаций при строительстве глубоких шахтных стволов с применением способа искусственного замораживания. Установлено, что нарушение герметичности замораживающих колонок чаще всего происходит при ведении буровзрывных работ и при наличии в геологическом разрезе зоны контакта слоев пород с различной акустической жесткостью.

2. Изучение статистических данных позволило выявить факторы, вызывающие аварийные ситуации при проходке стволов с применением способа искусственного замораживания, наиболее значимыми из которых являются ослабление массива замороженных пород вследствие бурения замораживающих скважин и недостаточная прочность ледопородного ограждения в замковой части. Скорректирована существующая расчетная схема прочности ледопородного ограждения с учетом фактора ослабления прочности ледопородного ограждения на контуре скважины.

3. Впервые установлены закономерности напряженно деформированного состояния слоистого замороженного массива вокруг замораживающей скважины в условиях динамического нагружения забоя взрывом. Доказано, что одним из основных волновых эффектов, приводящих к разрушению замораживающих колонок, является толщинный резонанс, выражающийся в резком увеличении амплитуды колебаний внутри слоя. Установлены особенности распространения взрывных волн в волноводе между свободной поверхностью забоя ствола и горизонтальной границей раздела слоев замороженных пород с различными физико-механическими характеристиками. Доказано, что при изменении расстояния от забоя ствола до вертикальной границы раздела в диапазоне от 0,1 до 4 м наблюдается ярко выраженная канализация

волновой энергии внутри волновода, который ослабевает лишь на расстоянии более 4 м от забоя ствола.

5. Установлено, что при ведении взрывных работ в стволе, проходимом способом замораживания, отраженные волны растяжения в зоне забоя ствола образуют зону разрушенных пород в пределах 0,2-0,4 м, которую необходимо учитывать в расчете толщины ледопородного ограждения.

6. Впервые установлено, что при воздействии на замораживающую колонку ударной волны, напряженно-деформированное состояние замораживающей колонки изменяется качественно и количественно. В начале процесса динамического воздействия, пока контур скважины устойчив, колонка, в силу инерции, перемещается относительно контура скважины против хода ударной волны, что приводит к обжатию прослойки затрубного глинистого раствора во фронтальной части и отслоению замороженного глинистого раствора от замораживающей колонки в тыльной части. При этом колонка деформируется с уменьшением диаметра вдоль направления распространения волны и с увеличением диаметра при распространении волны в поперечном направлении, что неизбежно сопровождается повышением напряжений в колонке. При возрастании напряжений выше допустимых происходит деформирование и разрушение замораживающей колонки.

7. Уточнен механизм возникновения сейсмической многоимпульсной ударной волны от одноимпульсного источника при прохождении взрывной волны через границу раздела сред, преломлении и сложении волн в результате возникновения эффекта толщинного резонанса с образованием ударного волновода.

8. Уточнен механизм воздействия дифракционных волн разряжения, образующихся вокруг буровой скважины, при этом учтены эллипсовидные области разрушения породы сдвиговыми напряжениями и обосновано

образование ударного импульса с удвоенной массовой скоростью ударной волны при отколе вещества породы.

Научное значение работы заключается в дальнейшем развитии существующих представлений о формировании напряженно-деформированного состояния ледопородного ограждения и замораживающих колонок под воздействием взрывных работ при строительстве подземных сооружений в сложных горно-геологических условиях при наличии литологической границы пород вблизи забоя ствола, что позволяет разработать принципиально новые параметры безаварийной технологии проходки шахтных стволов буровзрывным способом.

Доказано, что для предотвращения деформации и разрушения замораживающих колонок при обнаружении ниже забоя ствола литологической границы пород с резко изменяющейся акустической жесткостью на глубине, не превышающей 4 м, необходимо использовать щадящие способы взрывания.

Практическое значение работы заключается в разработке:

- «Методики определения параметров взрывной технологии разработки пород» при проектировании строительства вертикальных шахтных стволов калийных рудников, позволяющей обеспечить устойчивость и герметичность замораживающих колонок, повысить темпы проходки ствола до 70 м/мес. и сократить более чем в 2 раза общий срок строительства стволов;

- рекомендаций по выбору параметров технологии проходки стволов в замороженных породах, позволяющих обеспечить устойчивость и герметичность замораживающих колонок, повысить скорость проходки ствола и снизить капитальные вложения за счет минимизации возможных аварийных ситуаций;

- обоснования рациональной конструкции шпуров с концентраторами энергии для локализации волн напряжений и технологии их бурения при

помощи специального устройства на штанге бурового инструмента.

Реализация результатов работы Результаты исследований использовались при обосновании параметров технологии замораживания горных пород Нивенского месторождения ОАО ЕвроХим (времени активного замораживания пород, толщины ледопородного ограждения, необходимой прочности замороженных пород), а также при разработке рекомендаций по проходке ствола буровзрывным способом, которые включены в ТО для проектирования строительства скипового ствола рудника «Удачный» ОАО АЛРОССА.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы обсуждались на технических совещании ЗАО «ОШК «Союзспецстрой», IV уральский горнопромышленный форум. Горное дело. Технологии. Оборудование. Спецтехника. Межрегиональная специализированная выставка-конференция, 12-14 октября 2011, заседаниях кафедры СПС и ГПШ МГГУ 2012-2015 годах, на международных конференциях «Неделя горняка - 2012», «Неделя горняка - 2014», «International Conference on Safety Design and Construction of Underground Structures», проходившей в Чешском Техническом Университете в Праге (Czech Technical University in Prague) в июле 2014 г; «Conference on New Advances in Acoustics» в феврале 2015 в г.Шанхай, Китай ; «5th International Conference on Nanotech and Expo», г. Сан-Антонио, США, ноябрь 2015.

Публикации. Основное содержание диссертации отражено в 12 печатных трудах, в том числе 4-х статьях в изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России, а также в трех патентах РФ на изобретение.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 51 рисунка, 16 таблиц и список литературы из 142 наименований.

Автор выражает глубокую благодарность и искреннюю признательность коллективу кафедры "Строительство подземных

сооружений и шахт" МГГУ, ныне МГИ НИТУ МИСиС и лично заведующему кафедрой СПСиШ, научному руководителю докт.техн.наук, проф. А.В.Корчаку, докт. техн. наук, проф. М.Н.Шуплику, докт. техн. наук, проф. Б.А.Картозия за постоянное внимание к проводимым исследованиям, научные консультации, советы и замечания, которые способствовали написанию данной работы.

1. Современное состояние теории и практики строительства стволов способом искусственного замораживания пород

1.1. Общие сведения о проходках стволов в замороженных породах и возникающих при этом аварийных ситуациях

Несмотря на большие достижения отечественной шахтостроительной школы в совершенствовании технологического процесса замораживания пород, практически нет ни одного ствола с глубиной замораживания более 100 м, на котором не возникали бы те или иные осложнения и даже аварии.

Случаев внезапного разрушения в целом ледопородного ограждения (в прямом смысле этого слова) до настоящего времени в мировой практике не было зарегистрировано. Однако в технической литературе по замораживанию пород приведены десятки примеров временного затопления стволов в результате прорыва подземных вод или рассолов через так называемые «окна» в ледопородном ограждении, как правило, приуроченные к местам разрыва замораживающих колонок. Поэтому даже временный выход из строя замораживающей колонки может привести к затоплению находящегося в проходке ствола, что недопустимо. Анализ частоты возникновения аварийных ситуаций при проходке вертикальных шахтных стволов с применением способа искусственного замораживания, пройденных трестом «Шахтспецстрой» и «ОШК «СОЮЗСПЕЦСТРОЙ» за период с 1948 по 2014 г. , приведен в табл.1.1 [106,113,116]. Достоверность приводимых статистических данных, представленных в табл.1.1, подтверждается достаточностью выборки, определяемой количеством исследуемых стволов – 579 шт.

Таблица 1.1

Исследование количества аварий при строительстве вертикальных стволов за период с 1948 по 2014 гг.

Период	Анализируемые стволы		Произошедшие аварии		
	Общее кол-во	Глубина < 150 м />150 м	Всего аварий	Разрыв замор. колонок	Другие виды аварий
1948-1958	143	137/7	46		39
					5
1958-1968	194	165/ 29	62	1	35
				12	14
1968-1978	96	74/ 22	50		26
				11	13
1978-1988	37	35 / 5	21		7
				4	11
1988-2005	60	54/ 6	26		21
				3	2
2005-2009	18	11/ 7	15		9
				2	4
2009-2014	31	19/12	21		15
				2	4
1948-2014	579	476/ 76	242	20	11

Анализируя данные табл.1.1, можно констатировать следующее:

- до 1958 г 94% проходимых стволов не превышали 150 м, число аварий было минимальным, а разрывов замораживающих колонок не

наблюдалось, при этом основной способ разрушения породы в забое – ручными перфораторами;

- в последующем (в период 1958-1968 г.) увеличивается процент проходимых глубоких стволов (до 15%), зафиксировано 49 произошедших аварий, и впервые фиксируются аварийные разрывы замораживающих колонок;

- с 1968 по 1978 г. происходит дальнейший рост строительства глубоких стволов (до 23%), вместе с тем, увеличивается доля аварий при строительстве стволов, возрастает число разрывов замораживающих колонок, при этом основной способ разрушения пород - буровзрывной;

- с 1978-1988 год уменьшается процент (14%) глубоких стволов по сравнению со стволами до 150 м, что можно объяснить преобладанием заказов по строительству стволов метрополитена и стволов городских подземных сооружений. Однако на глубоких стволах увеличивается число разрывов замораживающих колонок;

- с 1988 г по 2005 уменьшается общая доля строительства стволов, уменьшается количество глубоких стволов, однако общий процент аварийных стволов уменьшается так же, как и процент разрывов замораживающих скважин, что является следствием развития технологии замораживания, преобладанием совмещенной схемы проходки стволов, улучшением конструкции тубинговой крепи и отказом от применения передовой бетонной крепи;

- в период с 2005 по 2009 г практически не ведется строительства шахтных стволов, а данные об аварийных ситуациях не публикуются в открытой печати

- в период с 2009 по 2014 г начинается строительство двух стволов Гремячинского калийного месторождения, клетового ствола Усольского калийного комбината Верхнекамского калийного месторождения ОАО «ЕвроХим», двух стволов Усть-Яйвинского месторождения ОАО

«Уралкалий». Нужно отметить, что для минимизации аварийных ситуаций при проходке клетового ствола Усольского калийного комбината впервые применен стволопроходческий комбайн АСП-8,0.

По результатам исследования статистических данных построены гистограммы происходящих аварийных ситуаций (Рис.1.1).

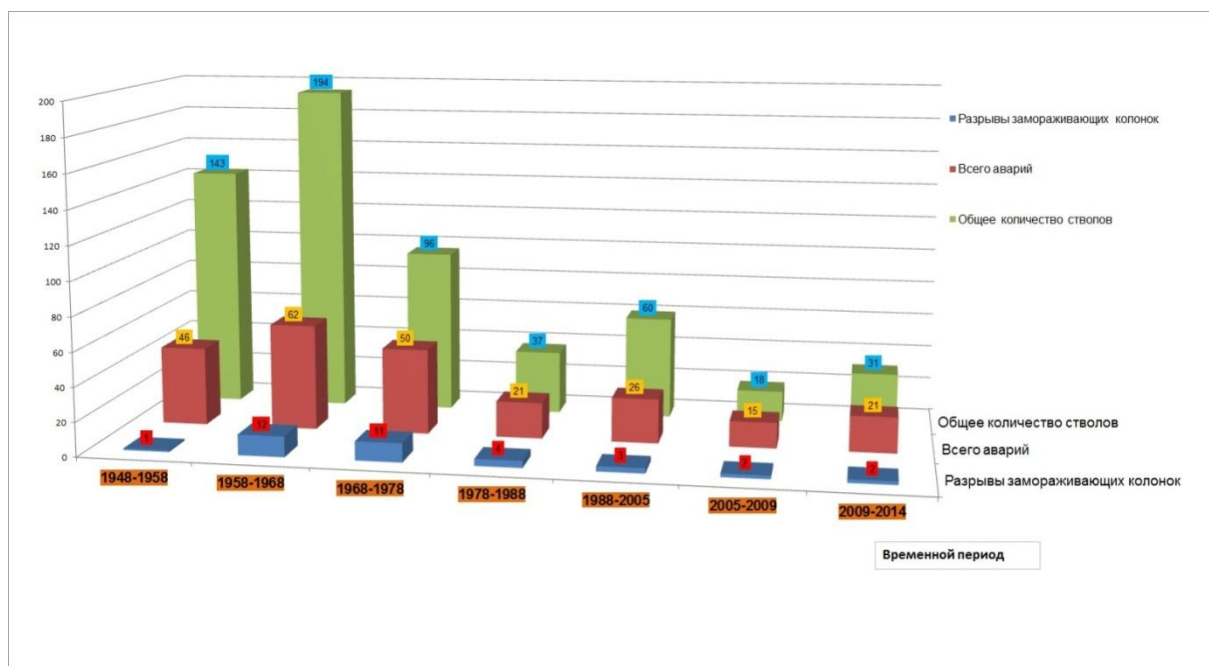


Рис.1.1. Гистограмма произошедших аварийных ситуаций с разрывами замораживающих колонок по годам.

Как показали результаты математической обработки статистических данных, для большинства приведенных аварийных ситуаций характерны следующие технологические и геологические условия: глубина проходки стволов специальным способом более 200-400 м; проходка стволов по параллельной технологической схеме; применение старой тубинговой крепи, состоящей из нормальных, опорных, верхних и нижних пикотажных тубингов; исключение из расчетов основных параметров ЛПО «сухих» пропластков водоупорных пород (глин); применение буровзрывного способа разрушения пород в забое.

Анализ распределения основных видов аварий показал: аварии, связанные с неравномерностью процесса замораживания и оттаивания, проявляющиеся в разрушении временной крепи, составляют 106 случаев

(44%), аварии, связанные с разрушением замораживающих колонок - 63 случая (26%), аварии в виде внезапного прорыва воды или рассолов в ствол - 31 случай (14%) , и аварии, связанные с деформацией поверхности и поднятием копров – 15 случаев (6%).

Системный анализ причин возникновения аварийных ситуаций при строительстве стволов способом искусственного замораживания проведен в работе [58].

В зарубежной технической литературе также опубликованы данные о сходных аварийных ситуациях. Так, в Китае, в Паньцзы-Сецяоском угольном бассейне, из 416 замораживающих колонок (по 10 стволам) разрушено 123 шт. (29%) [39]. Аварийные деформации замораживающих колонок фиксировались при строительстве стволов в Германии, Польше и др. странах.

В *Приложении 1* приведены примеры возникновения аварийных ситуаций на наиболее значимых стволах, проанализированы применяемые методы ликвидации аварий и продолжительность строительства с учетом времени на возмещение последствий аварий.

Для того чтобы выявить факторы, способствующие развитию аварийных ситуаций, были проанализированы основные технологические параметры аварийных стволов: диаметр стволов в проходке, составы обводненных пород, глубина замораживания, технологические схемы замораживания, способы разрушения пород в забое.

Влияние глубины и диаметра ствола и глубины замораживания пород. Рассматривались стволы различных диаметров: от 4.5м до 7.5м. Установлено, что диаметр ствола не влияет на проявление и частоту аварийных ситуаций.

Глубина ствола, напротив, имеет непосредственное влияние на частоту возникновения аварий. Как известно из практики, повреждения в

крепи на стволах ЗЖРК начинались с глубин 142,8 – 265,1 м, на стволах Яковлевского рудника - с 360 м.

Влияние глубины замораживания проявляется в увеличении числа произошедших аварий с глубиной замораживания.

Состав обводненных пород и степень однородности породного массива

Анализ опыта проходки стволов в различных горно-геологических условиях показал, что слабым и наиболее опасным местом в ледопородном ограждении является контакт двух пластов горных пород с разными модулями деформаций, например, там, где чередуется песчаник и глинистые или буроугольные пласты, а также контакт аллювиальных и крепких пород. Особенно это характерно в случае залегания в основании пласта аллювиальных отложений глины. В результате воздействия внешнего давления на контакте таких пластов пород происходит скольжение мягких горных пород по поверхности более крепких. В этих же местах наиболее часто наблюдается и прорыв воды или рассола в ствол.

В шахтостроительной практике известны неоднократные случаи, когда контакты неустойчивых и крепких горных пород являлись причиной осложнений при проходке шахтных стволов буровзрывным способом. Такие авторы, как Н.Г.Трупак [108], считали опасными все контакты пород, что опровергается данными практики. Например, В.А.Федюкин [114], описывая разрывы колонок на стволе №2 БКК № 2 буровзрывными работами на контактах пород 270,4 м, особенно подчеркивал, что при проходке ствола в зоне замораживания до глубины 220 м, никаких осложнений не было, хотя на глубине 18 м был контакт глины и алевролита. Затем, до 69 м, наблюдались частые контакты алевролита и песчаника, далее 18 м переслаивающегося песчаника и известняка, затем, до глубины 156 м, постоянные переслаивания небольших пропластков алевролита, аргилита и известняка; ниже – переслаивание мергелей и ангидрита. При

этом в описании аварий не упоминается о том, что на контакте пород в стенках стволов было зафиксировано смещение пород. Необходимо также обратить внимание и на такой факт, как опасность прорыва воды в зонах контакта пород при применении взрывных работ, которые подвергаются сотрясению и нарушаются в еще большей степени. Поэтому взрывные работы на контакте указанных выше горных пород необходимо производить с большой осторожностью [68].

Следовательно, можно предположить, что наличие контактов слоев усугубляет разрушительное воздействие взрывных работ на герметичность замораживающих колонок.

Для доказательства данного предположения рассмотрим два характерных случая применения способа замораживания пород при строительстве вертикальных шахтных стволов: вертикальный вентиляционный ствол «Ново-Гродовка» в Донбассе и один из трех вертикальных стволов Яковлевского железорудного месторождения Курской магнитной аномалии.

Рассмотрим горно-геологические условия выбранных примеров строительства.

Первый пример представлен практически однородным слоем обводненного глинистого песка. На (Рис. 1.2.) приведена литологическая колонка по стволу «Ново-Гродовка» в Донбассе.

Строительство ствола осуществлялось с применением буровзрывного способа разрушения пород, однако никаких аварийных ситуаций в процессе строительства не возникло.

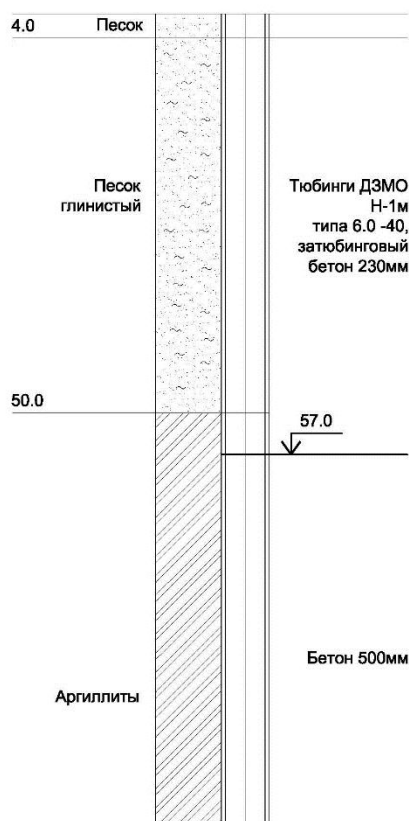


Рис. 1.2. Продольный разрез по стволу «Ново-Гродовка» в интервале глубин 0 – 65 м при глубине замораживания 57 м.

Во втором случае геологический разрез представляет собой неоднородный породный массив, представленный чередованием таких пород, как глинистые и мелкозернистые пески, песчаники, плотные аргиллитовые и сланцевые глины. Основную сложность представляли собой разнотернистые, глинистые, водонасыщенные и неустойчивые пески общей мощностью более 150м, распространенных на глубину 511,5 м, пучащие глины, высоконапорные подземные воды, величина напора которых превышает 500 м, большие водоприток в ствол, составляющие больше $900 \text{ м}^3/\text{час}$, в том числе – $385,0 \text{ м}^3/\text{час}$ из песков келловейского горизонта.

На (Рис.1.3,1.4,1.5) показаны продольные разрезы по стволу №2 Яковлевского рудника КМА в интервалах от -52м до – 556,2 м.

Как видно из приведенных ниже геологических разрезов, сложность вскрытия Яковлевского месторождения заключалась в том, что рудное

тело находилось под толщей осадочных неустойчивых пород мощностью около 600 метров, вмещающих восемь водоносных горизонтов с гидростатическим напором до 5,5 МПа и суммарным водопритокком в ствол до 900 м³/час.

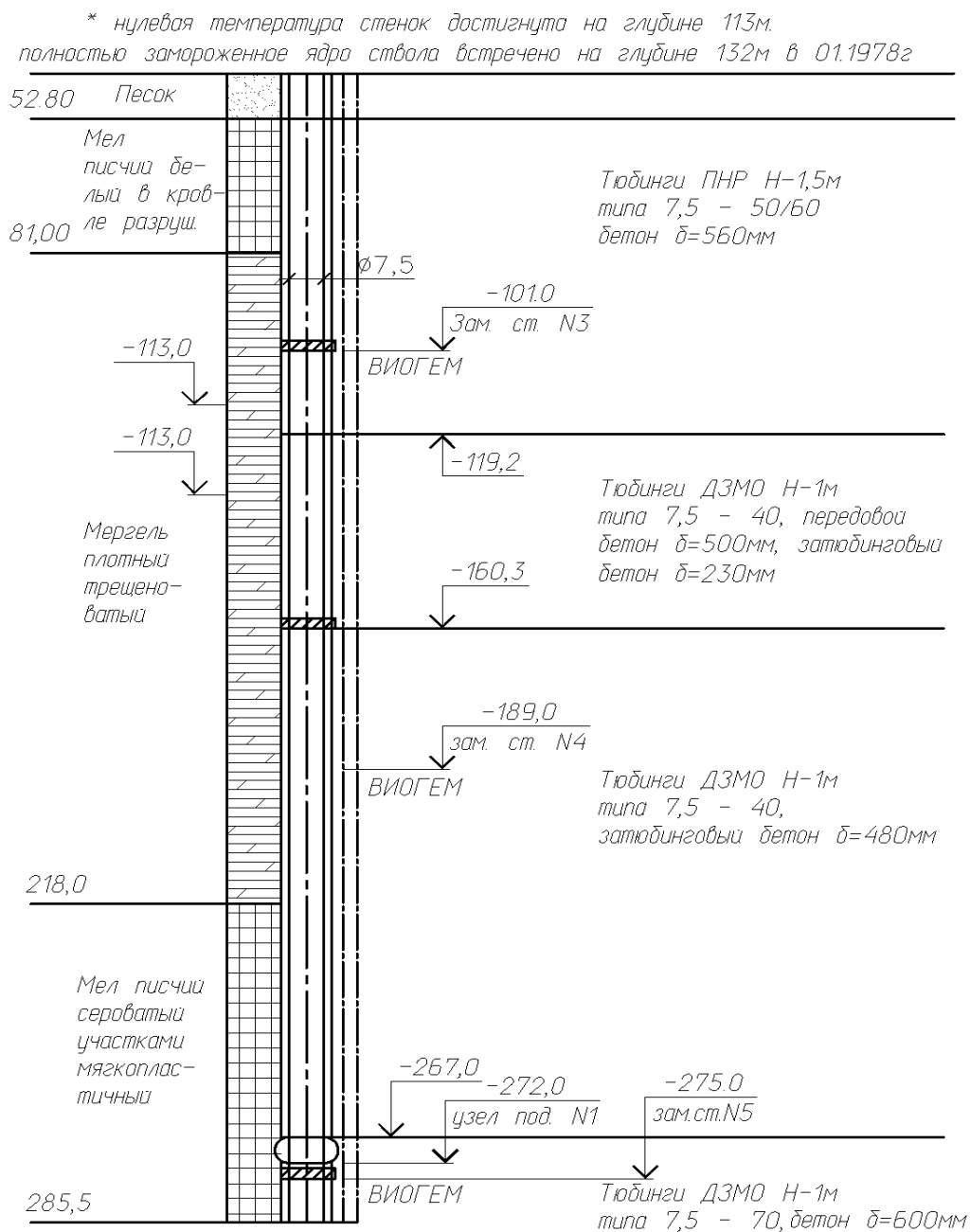


Рис.1.3. Продольный разрез по стволу №2 ЯПР КМА в интервале отметок -52,8 - -285,5

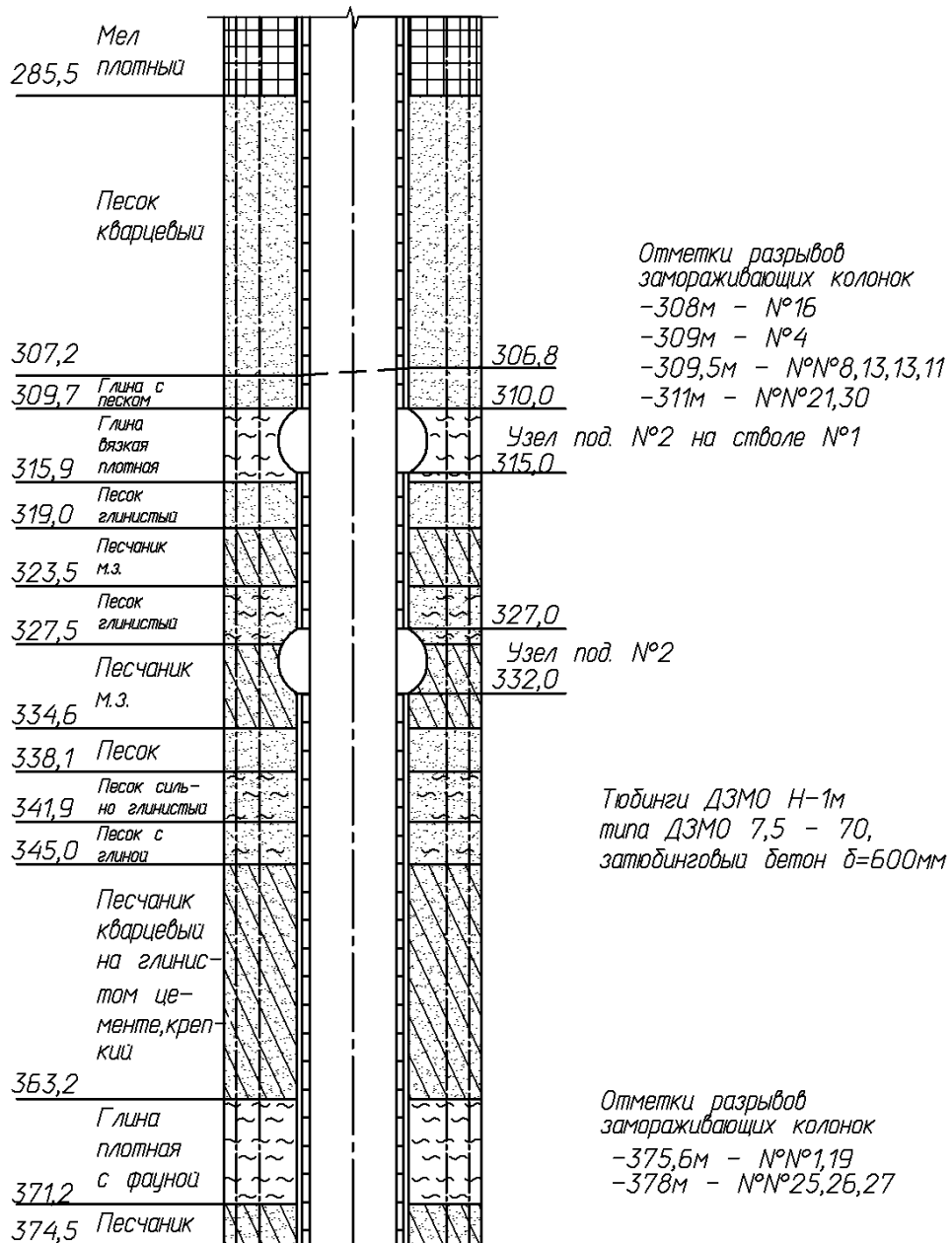


Рис.1.4. Продольный разрез по стволу №2 ЯПР КМА в интервале отметок – 285,5 - 374,5

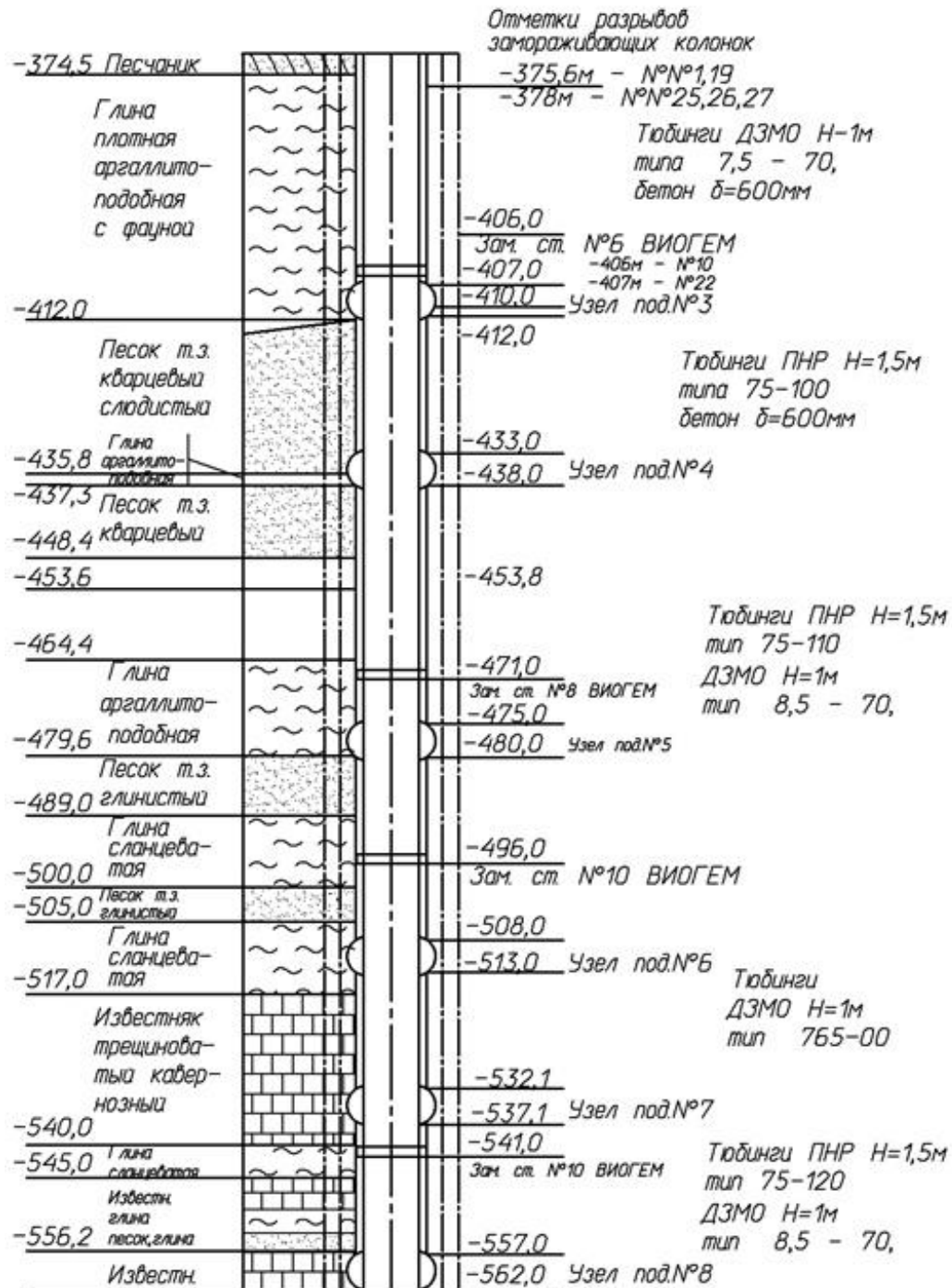


Рис.1.5. Продольный разрез по стволу №2 ЯПР КМА в интервале отметок – 374,5 - -556,2

По рекомендации СНиП III-11-77, для подготовки массива Яковлевского месторождения был применен способ искусственного замораживания грунтов.

Замораживание на каждом из трех строящихся стволов планировалось производить двумя рядами замораживающих скважин,

расположенных на двух concentрических окружностях. Диаметр первой окружности – 14,5 м, а второй – 19 м. Расстояние между рядами 2,25 м. Расстояние между замораживающими скважинами во внутреннем ряду составило 1,38-1,47 м, в наружном - 1,65-1,81 м

Так, например, на стволе №2 замораживание производилось до глубины 620 м. Ствол №2 с глубины 60 м и до конечной глубины проходилась буровзрывным способом, заходками высотой 1,5 м с последующим креплением тубингами. При этом необходимо отметить, что применение буровзрывных работ никак не проявлялось ни при проходке по известковистым мергелям крепостью по шкале Протодяконова до 4 в замороженном состоянии, ни при проходке в мелах, и только на контакте полностью промороженных песков с галькой и вязкой глиной на глубине 309 м произошел срез сразу 6 колонок. В период с сентября по январь было деформировано 15 замораживающих труб. Из поврежденных замораживающих колонок удалось восстановить только одну колонку, которую подключили к внешнему ряду замораживающих колонок.

Необходимо обратить внимание на тот факт, что при проходке по однородным породам таким, как известковый мергель и мел, деформации колонок не фиксировались, а все деформации произошли в глинистых породах на границе чередующихся слоев глин и песков. Восемь колонок деформировались на глубине 308-311 м в глинах нижнего мела, залегающих на глубинах 307,5-311 м. На глубинах 314-316 м ствол проходилась с разработкой породы отбойными молотками, деформаций колонок не наблюдалось.

Аналогичная картина наблюдалась при проходке некоторых стволов за рубежом, например, ствола «Фьёрде» в Германии [8], который находится в северной части шахтного поля «Вальзум».

Проанализированные данные о строительстве стволов в различных горно-геологических условиях (а именно, в однородном породном массиве и неоднородном, с чередованием устойчивых и неустойчивых пород) дают возможность сопоставить данные о влиянии разнообразных геологических условий на степень вероятности возникновения аварийных ситуаций и констатировать, что в монолитном породном массиве буровзрывные работы не приводят к разрыву колонок, в то время как при наличии контактов таких пород, как песок - глины или песок - мергелистые породы [9,110], стабильно наблюдаются разрывы замораживающих колонок.

Состав пород оказывает влияние и на выбор метода ликвидации аварии: в случае присутствия в водоносных пластах включений гальки возможно ограничиться тампонированием закрепного пространства нарушенного участка крепи, а в случае напластования глинистых и мергелистых пород необходимо применять нескольких способов борьбы с аварией – от создания бетонной подушки из забоя ствола до бурения дополнительных замораживающих скважин и увеличения срока активного замораживания.

Влияние схемы замораживания: Проанализированы различные схемы замораживания пород: на всю глубину водоносных горизонтов, зональная и локальная. Выявлено, что применение зональной схемы замораживания приводит к более серьезным аварийным ситуациям и требует более длительных мероприятий по их ликвидации, так как все водоносные пласты объединяются пробуренными скважинами и по ним идет перетекание вод водоносных горизонтов с разными статическими напорами.

Как следует из анализируемых статистических данных, характер проявления аварийных ситуаций изменяется от внезапно увеличивающегося притока воды в ствол до внезапного пучения забоя на значительную высоту и разрывов колец временной крепи. Наиболее часто

встречающийся вид аварийных ситуаций – прорыв воды и рассолов в ствол, вызывающий в дальнейшем нарушение процесса замораживания.

Методы ликвидации аварий следующие: переход на малые заходки при проходке ствола по параллельной схеме, создание бетонной подушки, дополнительное бурение замораживающих скважин и увеличение сроков активного замораживания.

В зависимости от масштабов аварий и характера их проявлений общий срок строительства стволов увеличивался от 42 суток до 22 месяцев (Приложение 1).

Для оценки возможности возникновения аварийных ситуаций при проходке стволов воспользуемся методологическим подходом, предложенным проф. Корчаком А.В. [54], который заключается в процедуре последовательного исследования всех звеньев технологической цепочки с выявлением причинно-следственных связей между ними (Рис.1.6).

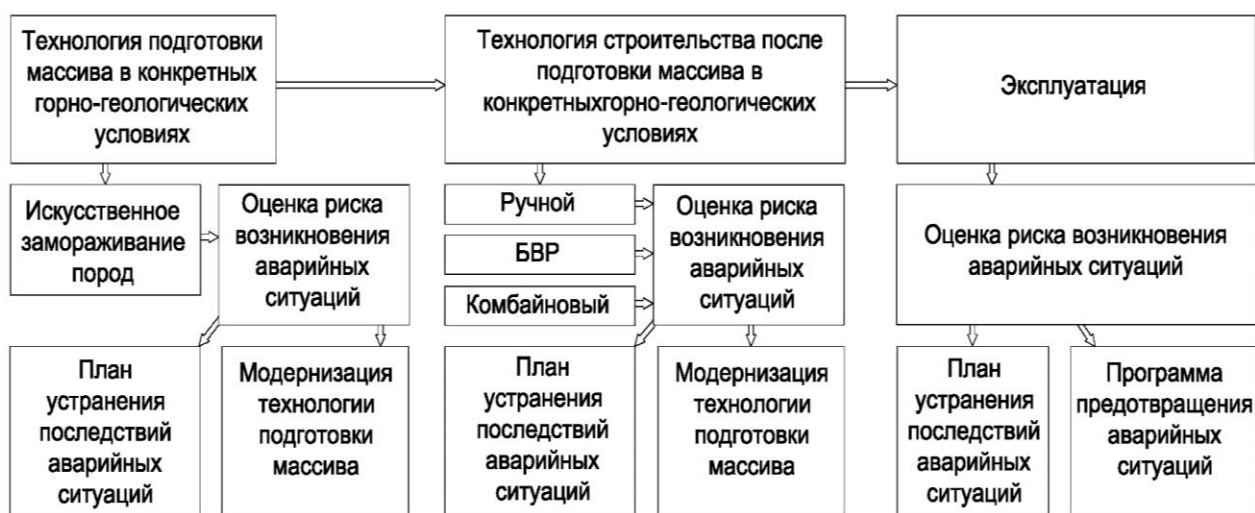


Рис.1.6.Выбор технологии подготовки массива, строительства и эксплуатации подземного сооружения при строительстве вертикальных шахтных стволов способом искусственного замораживания.

Ниже будут проанализированы основные технологические операции подготовки массива способом замораживания и проходки ствола под защитой ЛПО, исключая вопросы крепления и армировки ствола,

поскольку они не входят в задачу исследования данной диссертационной работы.

1.2. Анализ причин и частоты возникновения аварийных ситуаций при бурении замораживающих скважин

Одним из важнейших видов работ по замораживанию является бурение замораживающих скважин, качество которого определяется произошедшими отклонениями направления замораживающих скважин от вертикали [106,113], что, в свою очередь, определяет сплошность ЛПО и оптимальные сроки замораживания пород (Рис.1.7).

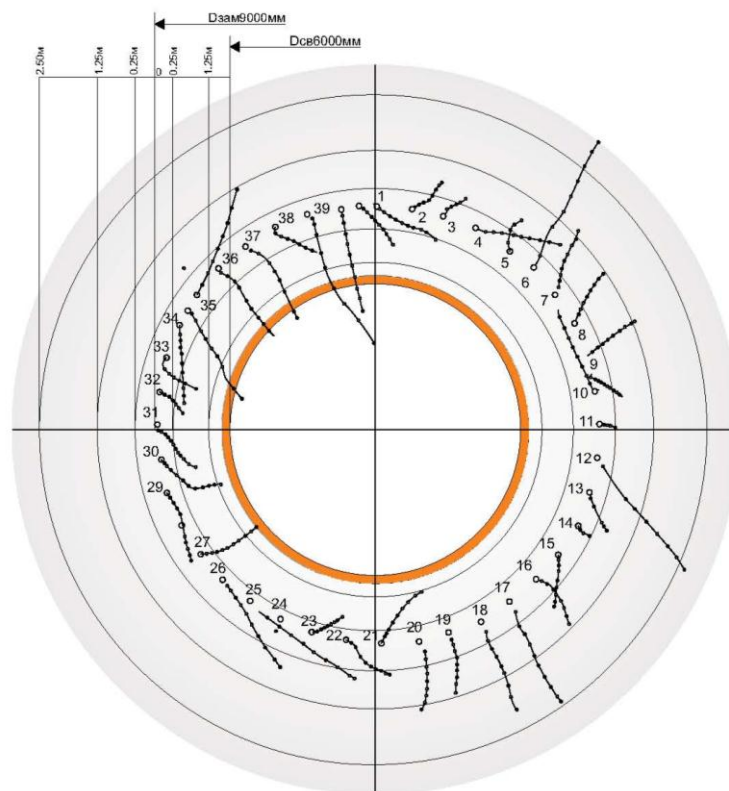


Рис. 1.7. Пример отклонения замораживающих скважин от вертикали.

На стадии бурения замораживающих скважин могут произойти следующие виды аварийных ситуаций: отклонение вертикального направления буровых скважин, вызывающее появления «окна» в ледопородном ограждении (Рис. 1.8) из-за расхождения концов двух или нескольких замораживающих скважин; ослабление массива вследствие

чрезмерного разбухания массива; объединение водоносных горизонтов по необсаженным скважинам (Рис.1.9).

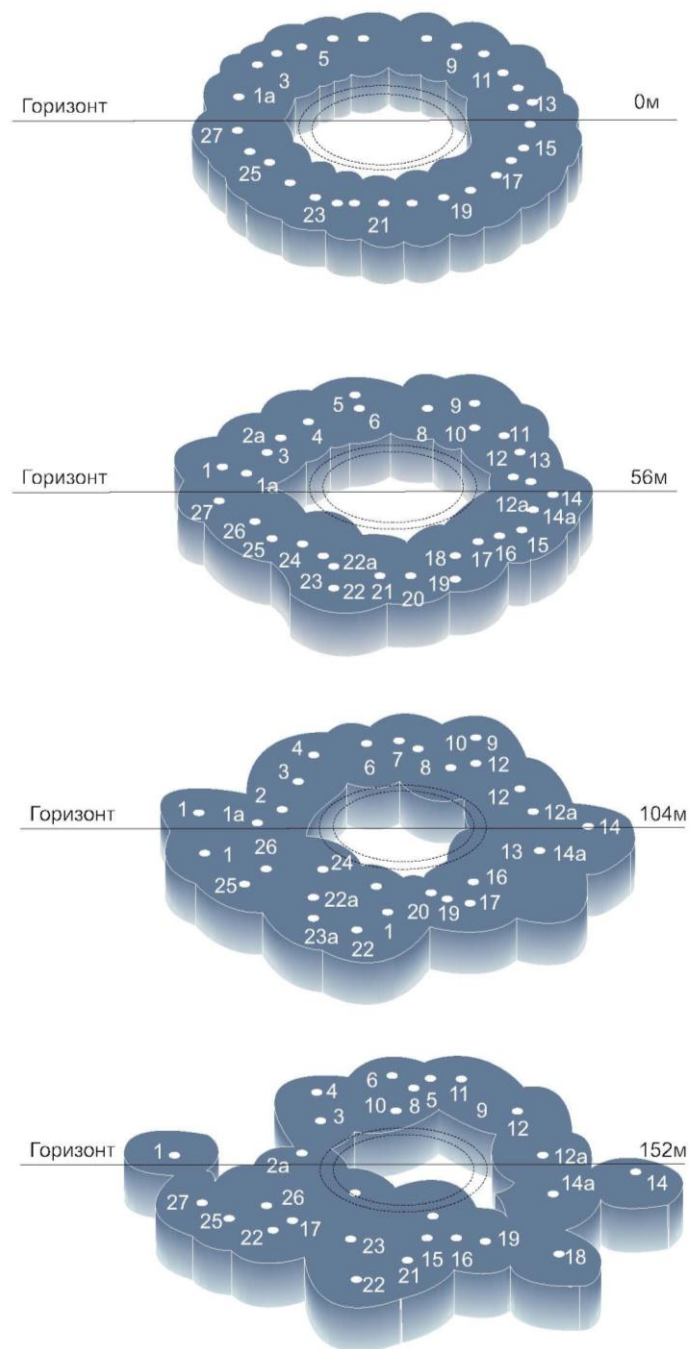


Рис. 1.8. Положение замораживающих скважин на различных горизонтах и образование «окон» в ледопородном ограждении.

При проходке ствола через непромороженный участок возможны случаи прорыва пльвуна, что приводит к авариям, начиная от увеличения срока замораживания до возможного прорыва пльвуна в ствол.

Независимо от глубины скважин не допускается отклонения их от вертикальной оси более 0,6 м. В глубоких стволах допустимые отклонения фактически реализованы уже на глубине 200-300 м, а ниже, как показывает анализ данных практики, отклонение принимает слишком большие значения, и их трудно, а иногда и невозможно исправить, поэтому производится бурение новых скважин, что, в свою очередь, вызывает разубоживание массива и, как следствие, его подтопление.

На (Рис.1.8) показана схема расположения замораживающих скважин, пробуренных вокруг ствола на глубинах 56м, 104 м и 152 м [108]. Измерения кривизны скважин производились гирокомпасом. При построении окружностей радиус распространения холода от замораживающей скважины принят 1,5м. На схеме видно, что удовлетворительную толщину лодопородное ограждение имеет только на участке от земной поверхности до глубины 56 м. Ниже этого уровня некоторые скважины отклоняются настолько, что на глубине 104 м между скважинами №1 и №2 образовано «окно». Такое положение является результатом отклонения скважин №2 – на 5,23 м (3.5%) и №3 – на 4,7 м (2,97%). На глубине 152 м, кроме указанного участка, неблагополучен участок между скважинами №12-15. Скважина №13 отклонилась от вертикали на 4,14 м (2.6%), №14 – на 2.96 м (1,87%) и №15 – на 5.07 м (3,83%). Таким образом, из пробуренных 28 скважин оказались пригодными только 10 скважин.

Главными причинами отклонения скважин от первоначального направления являются следующие [108,113]:

- наличие крупных включений валунов, глыб в рыхлых породах;
- переслаивание круто лежащих пластов крепких и слабых пород;
- геологические нарушения в виде сбросов, трещин, карстов и каверн;
- технологические нарушения процесса бурения: неправильная установка кондуктора при забурировании, искривление обсадных труб,

большой зазор между стенками скважин и рабочим инструментом, чрезмерное давление на буровой инструмент, забивка обсадных труб вместо плавной посадки, применение глинистого раствора несоответствующей концентрации, применение насосов с большим барометрическим давлением.

Вследствие того, что замораживающие скважины располагаются на ограниченной площади, порода между ними нарушается из-за близости скважин между собой. В результате этого возникают пустоты, в которые отклоняются обсадные трубы вследствие меньшего сопротивления.

Необходимо также учитывать, что скважины меньшего диаметра получают большие отклонения. Скорость бурения также влияет на процент отклонившихся скважин. Так, при максимальной скорости бурения 1,73 м/ч отклонение одной скважины от вертикали составило 2,05 м, а при минимальной скорости 0,8 м/ч отклонение было 1,7 м

Для того чтобы исключить возможность отклонения скважин, рекомендуется применять ударные способы бурения крестообразными долотами.

При сильном искривлении скважины приходится бурить новые. Для ликвидации слабых мест в ледопородном ограждении, образовавшихся при расхождении скважин увеличивают продолжительность активного замораживания, понижают температуру замораживания, а также повышают скорость движения рассола в замораживающей колонке.

В расчетах времени создания ЛПО расстояние между скважинами принимается равномерным по всей глубине ствола, при этом даже минимально разрешенное отклонение скважин от вертикали не учитывается. Например, если расстояние между скважинами на поверхности принято 1 м, на глубине 100 м допустимое расстояние 1,7 м, а на глубине 300 м отклонение 2.2 м.

С применением новых установок для бурения, таких как DBA-4 (Германия), AD-1A (Япония), Дупа (USA), DZJ-500, DZJ- 500-1000 и гиро приборов для измерения направления замораживающих скважин типа ГОТ-Ш, ГОТ-3А и JDT-5, качество бурения значительно улучшилось, но еще рано говорить, что на сегодняшний день эта задача уже полностью решена.

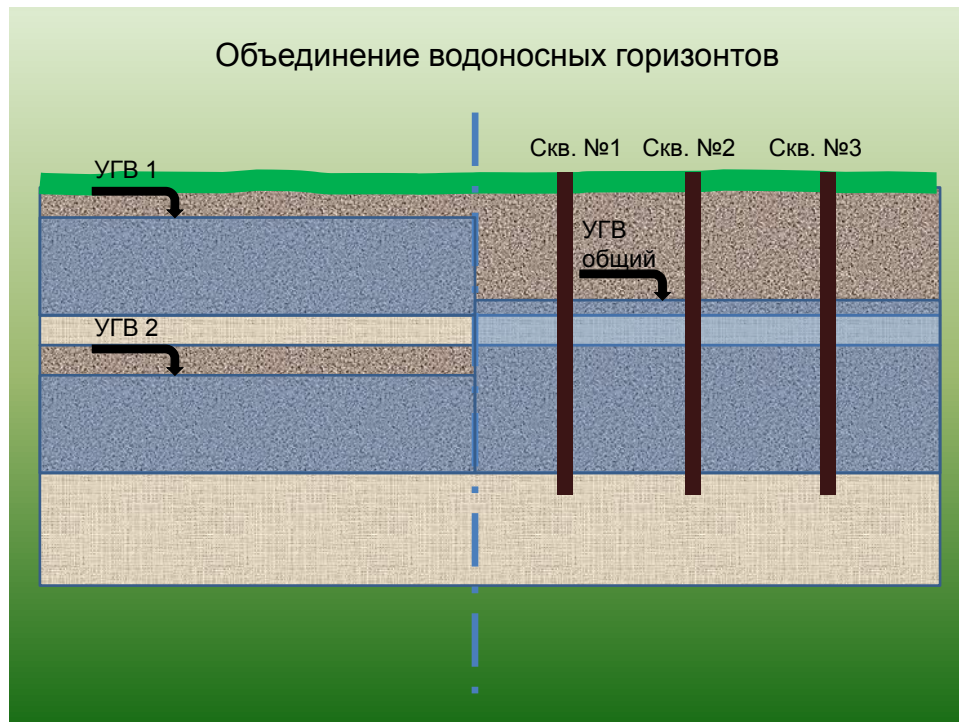


Рис.1.9. Объединение водоносных горизонтов при бурении замораживающих скважин

Из данных практики известно, что в процессе бурения скважина приобретает больший диаметр, чем предусматривается в проекте, вследствие осыпания пород, поэтому фактический объем скважины часто бывает больше расчетного. Особенно неблагоприятны в этом отношении слабые породы, плывуны и породы, растворимые в воде (каменная соль, соляные глины). Факт ослабления горного массива и возможность возникновения аварийной ситуации недостаточно изучен и требует проведения дополнительных исследований. При бурении скважин по слабым, обводненным породам часто происходит объединение водоносных горизонтов по скважинам (Рис. 1.5). Последнее приводит к

тому, что процесс замораживания массива начинается значительно позже расчетного срока, и к заданному сроку толщина ледопородного ограждения недостаточна. Известны случаи прямого затопления стволов по указанной причине в Соликамске [63] и в Китае [39].

В существующей расчетной схеме (Рис. 1.10) возможное отклонение скважин от вертикали не учитывается, а ледопородное ограждение рассматривается как однородный цилиндр замороженных пород. При этом в главной плоскости ожидается самая низкая температура возле «впаянной в массив» замораживающей колонки [108]. Естественно, и самая высокая прочность замороженной породы должна быть также в этой плоскости.

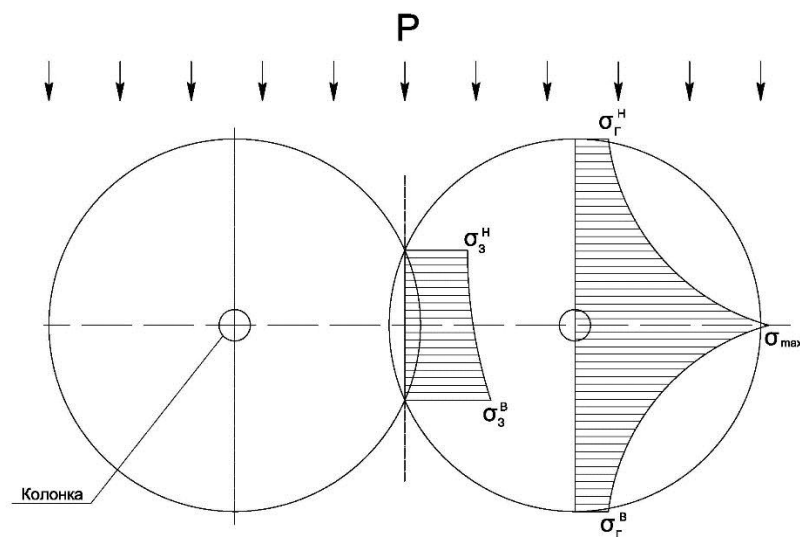


Рис.1.10. Схема, иллюстрирующая распределение напряжений ледопородного ограждения по существующей методике.

P – нагрузка σ_{23}^e – верхнее напряжение в главной плоскости, σ_n^e – нижнее напряжение в главной плоскости σ_3^e – верхнее напряжение в замковой плоскости, σ_3^H – нижнее напряжение в замковой плоскости.

Принимая во внимание выявленный факт ослабления породного массива при бурении замораживающих скважин, уточним, что замораживающая колонка (источник минимальной температуры) не впаяна в породный массив, а отделена буровой скважиной (обычно диаметром 200 мм) от массива. Вокруг колонки находится не порода, а буровой раствор,

прочность которого при замораживании всегда ниже, чем прочность замороженного массива пород. При температуре до -10°C прочность раствора составляет 0,7-0,8 МПа, а при температуре -20°C - не превышает 1,8 МПа. Для сравнения - прочность песка в аналогичных условиях 14 МПа, а глины 7 МПа.

Сжимающие напряжения в замороженном цилиндре в зависимости от внешней радиальной нагрузки изменяются: в замковой плоскости они будут расчетные, а на контуре кольцевого ослабления буровой скважиной в главной плоскости они значительно ниже, что необходимо учитывать, задав коэффициент концентрации напряжений около отверстия равный 2.

При рассмотрении монолитного цилиндра в главной плоскости по существующей расчетной схеме [123] прочность в песке составляет 14 МПа при температуре -20°C . В реальной практике на контуре ослабления скважины прочность составляет 4,6 МПа. Таким образом, предположение о том, что замковая область является самой надежной по прочностным характеристикам, является недостаточно обоснованным. Недостаточная прочность ледопородного цилиндра в замковой части понизит проектную скорость создания ЛПО. Этот факт должен учитываться в методических указаниях по расчетам параметров процесса замораживания.

На (Рис. 1.11) представлены эпюры нормальных и тангенциальных напряжений, показывающие области наиболее высоких и наиболее низких напряжений, иллюстрирующие значение прочностных характеристик, вычисленных по предлагаемой методике учета ослабления массива вокруг замораживающей колонки.

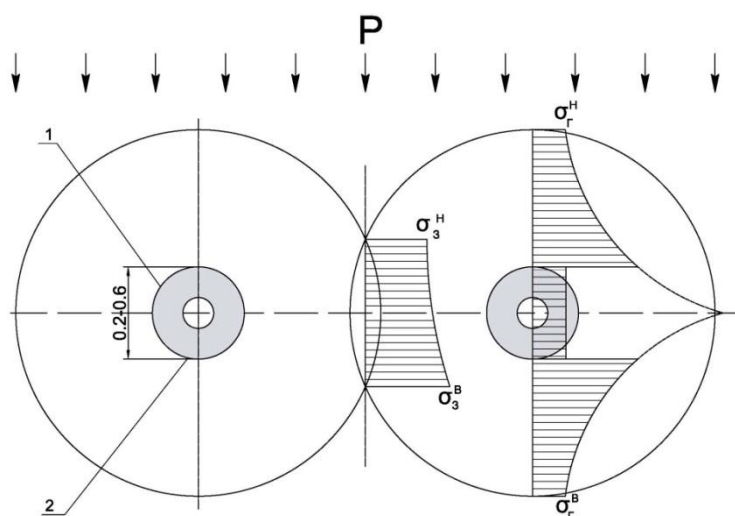


Рис.1.11.Предлагаемая схема, учитывающая слой замороженного бурового раствора в скважине.

P –нагрузка σ_{23}^6 - верхнее напряжение в главной плоскости, σ_n^2 - нижнее напряжение в главной плоскости σ_3^6 верхнее напряжение в замковой плоскости, σ_3^H - нижнее напряжение в замковой плоскости.

Вычисленные характеристики хорошо коррелируют с показаниями скоростей акустических волн и температурных замеров, полученными П.М.Тютюником [115], который установил основные закономерности изменения скорости продольных акустических волн в зависимости от напряженного состояния породы.

Исследования скоростей акустических волн в замороженных породах, находящихся в объемном напряженном состоянии, производились на образцах песка средней крупности и в супеси при температуре замораживания - 10°C. В результате испытаний были построены графики зависимости скоростей продольных акустических волн от главного нормального напряжения $\sigma_1=0,8$ МПа, при постоянных нормальных $\sigma_2 = \sigma_3=4$ МПа и выделены области, соответствующие упругому, упругопластическому и пластическому состояниям замороженных пород.

Автором [114] были установлены следующие закономерности:

- скорость распространения ультразвука существенно зависит от вида напряженного состояния;

- в стадии упругопластического деформирования происходит увеличение скорости ультразвука на 20-27%, а в стадии пластического состояния замороженных пород скорость возрастает на 65-70%. На пределе упругого состояния приращение скорости ультразвука изменяется от 13 до 55%. При переходе в пластическое состояние приращение скорости составляет 20-70 %, что означает начало пластического течения.

Следовательно, можно использовать скорости продольной волны в качестве информативного параметра контроля напряженно-деформированного состояния ледопородных ограждений при сооружении стволов шахт, подземных сооружений, а также с их помощью производить оценку устойчивости замороженных пород и прогнозировать возможность разрушения замораживающих колонок.

1.3. Анализ причин и частоты возникновения аварийных ситуаций в процессе монтажа замораживающих колонок и рассольной сети

После бурения замораживающих скважин процесс создания ледопородного ограждения включает в себя операции по монтажу рассолопроводов, подключения замораживающей станции, монтажа замораживающих колонок в замораживающих скважинах и работу замораживающей системы в активном режиме.

Вертикальная замораживающая колонка, как известно, состоит из замораживающей трубы, башмака, головки и питающей трубы, у которой нижний конец открыт и расположен на расстоянии 0,4-0,6 м от башмака.

При опускании в скважину верхние части замораживающих труб подвергаются растяжению, при этом напряжение растяжения увеличивается с возрастанием глубины [109]. Максимальное значение этих напряжений достигается при постановке труб на забой скважины. При

соприкосновении с забоем скважины в трубах возникают напряжения от продольного изгиба колонн. Напряжения изгиба будут тем значительнее, чем больше глубина скважины и чем больше диаметр замораживающих труб. Затем происходит перераспределение напряжений, и колонка в нижнем сечении начинает испытывать наибольшие продольные сжимающие напряжения, которые при приближении к устью скважины будут снижаться, а затем перейдут в растягивающие.

Колонку обычно опускают в скважину, заполненную буровым раствором, а замораживающие трубы обычно бывают заполнены раствором хлористого кальция. Вес колонки с жидкостью определяется по формуле:

$$Q = 9,81 \cdot \left[H g k + \frac{\pi \cdot d_{\text{в}}^2}{4} \cdot H \gamma_{\text{ж}} \right], \quad (1.1)$$

где H - высота колонки замораживающих труб, м;

g - удельная масса замораживающих труб, т/м³;

k - коэффициент, учитывающий массу соединений труб ($k = 1,1$);

$d_{\text{в}}$ - внутренний диаметр замораживающих труб, м;

$\gamma_{\text{ж}}$ - плотность раствора хлористого кальция, т/м³ ($\gamma_{\text{ж}} = 1,3$ т/м³).

Выталкивающая сила в глинистом растворе равна

$$Q_0 = \frac{9,81 \pi \cdot d_{\text{н}}^2}{4} H \cdot \gamma_{\text{р}}, \quad (1.2)$$

где $d_{\text{н}}$ - наружный размер замораживающей колонки, м;

$\gamma_{\text{р}}$ - плотность глинистого раствора ($\gamma_{\text{р}} = 1,2 \div 1,3$) т/м³

Истинный вес замораживающих труб при опускании их в скважину, заполненную глинистым раствором, будет равен

$$Q_1 = Q - Q_0$$

Подставляя в это уравнение их значения из (1.1) и (1.2), получим

$$Q_1 = 9,81 H \left[g k + 0,785 d_{\text{в}}^2 \cdot \gamma_{\text{ж}} - 0,785 d_{\text{н}}^2 \cdot \gamma_{\text{р}} \right], \quad (1.3)$$

При опускании замораживающей колонки в скважину на нее также действует сила трения, направленная в противоположную сторону от силы тяжести, которая в общем случае вычисляется по формуле :

$$T = 103\pi d_n HS, \text{ кН} \quad (1.4)$$

где S – сила трения, отнесенная к единице площади поверхности замораживающей колонки, МПа

Тогда сила, вызывающая напряжение растяжения в колонке

$$Q_p = Q - T = Q - 0,2Q = 0,8Q \text{ или}$$

$$Q_p = 7,8H[(gk + 0,785d_B^2\gamma_{ж}) - 0,785d_H^2\gamma_p], \quad (1.5)$$

Напряжения растяжения σ_p , возникающее в верхней части колонки при ее опускании в скважину, определяется из уравнения

$$\sigma_p = \frac{Q_p}{F_0} = \frac{0,785H[(gk + 0,785d_B^2\gamma_{ж}) - 0,785d_H^2\gamma_p]}{F_0}, \quad (1.6)$$

где F_0 – площадь кольцевого поперечного сечения замораживающей колонки, м^2 .

Необходимо соблюдать условие, что в самом опасном поперечном сечении колонки допускаемое напряжение растяжения от собственного веса не должно превышать 50% предела текучести τ материала труб, т.е. $[\sigma_p] \ll \frac{\tau}{2}$

Тогда напряжения, возникающие в верхней части колонки при ее опускании в скважину только от собственного веса, без учета сил трения

$$\sigma_p' = \frac{Q_P}{F_0} = \frac{\tau}{2}, \quad (1.7)$$

Напряжения в теле колонки, соединенной сваркой, с учетом сил трения вычисляются по формуле:

$$\sigma_p' = \frac{Q_P}{F} = \frac{7,8[(gk + 0,785d_B^2\gamma_{ж}) - 0,785d_H^2\gamma_p]}{F}, \quad (1.8)$$

Расчетные напряжения σ'_p не должны превышать допустимого напряжения растяжению материала колонки; для труб из стали марки Д $\sigma'_p = 120$ МПа

Из уравнений 1.7 и 1.8 можно определить предельную глубину опускания замораживающих колонок, при превышении которой может произойти разрыв этих труб от действия собственного веса:

$$H_{\pi} = \frac{\tau \cdot F_0}{15,6 [(gk + 0,785d_{\text{в}}^2\gamma_{\text{ж}}) - d_{\text{н}}^2\gamma_p]}, \quad (1.9)$$

где τ – предел упругости (текуести) материала стали ($\tau = 320 \div 400$ МПа).

При опускании колонки она будет удлиняться под действием собственного веса, пока не достигнет дна скважины.

Максимальное приращение длины Δl колонка получит тогда, когда фонарь замораживающей трубы будет находиться над забоем скважины.

Абсолютное удлинение замораживающей колонки по закону Гука можно выразить:

$$\Delta l_{\max} = 0,00981 \frac{Q_p \cdot H}{E \cdot F_1}, \quad (1.10)$$

где E - модуль упругости материала замораживающей колонки (для стали $E=2,1 \cdot 10^5$ МПа);

F_1 –площадь кольцевого поперечного сечения тела замораживающей трубы, м^2 , $F_1 = 0.785 (d_{\text{нар}}^2 - d_{\text{вну}}^2)$

Для оценки удлинения колонки на практике, рассчитаем параметр $\Delta l_{\max}$ на глубине 1000м. Примем $g = 0,029$ т/м³, $K=1,1$. $d_{\text{н}} = 146$ см, $d_{\text{в}} = 0,013$ см, $E=2,1 \cdot 10^5$ МПа, $F=0.785 (14^2-13^2)=0,00355$ м²

Тогда $\Delta l_{\max}=0,34$ см

В период эксплуатации замораживающие колонки неоднократно подвергаются температурному воздействию. В летнее время температура замораживающих труб может достигать $+30^{\circ}\text{C}$, а в зимнее – до -30°C .

После спуска в скважину температура труб повысится до температуры горных пород на конечной глубине скважины. В результате нагревания высота H колонка удлинится на величину Δl . (При температуре 30°C $\Delta l = 0.117$ м. При температуре -30°C $\Delta l = 0,82$ м.

При движении по замораживающим трубам охлажденного рассола температура колонки T_r также понизится до температуры T_1 охлаждающего рассола. В результате охлаждения длина замораживающих труб сократится, а в теле колонки возникнет напряжение растяжения.

Величину сокращения длины трубы вычисляют по формуле [32,109]

$$\Delta l = H\alpha(T_r - T_1), (1.11)$$

В начале процесса активного замораживания расчетную температуру -20°C хладоноситель принимает через 10 суток. При охлаждении замораживающей колонки на 1°C абсолютное укорочение трубы длиной 1м составит 0,0000117 м, сокращение трубы длиной 1000 м при начальной температуре $T_r = +40^{\circ}\text{C}$ и конечной температуре рассола $T_1 = -50$, $\Delta l = 1,17$ м.

После оттаивания массива длина колонки снова увеличивается.

За время активного замораживания и оттаивания замораживающие колонки трижды испытывают температурные воздействия, приводящие к линейным деформациям, превосходящим размеры линейных деформаций от веса собственного тела.

При установке на забой скважины башмака трубы колонка перестает растягиваться, подвергается продольному изгибу от развивающихся напряжений изгиба, которые значительно возрастают в случае ухода глинистого раствора из затрубного пространства в каверны или другие полости.

Критическая нагрузка, при которой колонка теряет устойчивость и приобретает эллиптическую форму, определяется по формуле Эйлера:

$$P_{кр} = \frac{1000EI\kappa}{H^2}, (1.12)$$

где E - модуль упругости стали ($2,1 \cdot 10^5$ МПа);

I - полярный момент инерции трубы, m^2 , зависящий от внутреннего и наружного диаметров трубы.

Зная критическую нагрузку, можно вычислить критическую длину колонки, при которой она изогнется под действием собственного веса.

$$H_{кр} = 1632 \sqrt[3]{\frac{I}{g}}, (1.13)$$

Известно, что колонка, сжимаемая под действием собственного веса, проверяется на условие устойчивости $\sigma = \frac{Q_1}{F} \ll [\sigma_y]$

где $[\sigma_y]$ – допускаемое напряжение при расчете на устойчивость, а так как $[\sigma_y]$ составляет всего 0,2-1,0 допускаемого напряжения $[\sigma_{сж}]$, то проверку на прочность колонки можно не производить.

Допускаемая стрела прогиба замораживающей колонки диаметром $d_{тр}$ в скважине диаметром $D_{ск}$

$$f_{пр} = \frac{D_{ск} - d_{тр}}{2}, (1.14)$$

Тогда критическая глубина опускания колонки с учетом стрелы прогиба трубы вычисляется по формуле:

$$H'_{кр} = \frac{100\sigma_c}{\left(\frac{f}{W} + \frac{1}{F}\right) \cdot \left(1 - \frac{\gamma_{ж}}{\gamma_c}\right) \cdot g} (1.15)$$

где σ_c - предел упругости стали, МПа;

f – возможная стрела прогиба, м;

W – полярный момент сопротивления труб, m^3 .

Если заданная глубина опускания колонки не превышает критической ($H'_{кр}$), разрушения произойти не может [25].

При эксплуатации в замораживающей колонке циркулирует хладоноситель, а в затрубном пространстве находится буровой глинистый раствор, при этом внутреннее давление в замораживающей колонке и внешнее давление бурового раствора уравниваются. Но часто, особенно в неустойчивых породах, при бурении разбуривается и вымывается значительный объем породы, происходит образование карстовых пустот и ухода глинистого раствора в эти пустоты. Вследствие этого внутреннее давление хладоносителя на больших глубинах может вызвать деформацию труб. Давление хладоносителя в трубе можно рассчитать по следующей формуле:

$$P_1 = P + 0,0098 H \gamma_p, (1.16)$$

где P - давление в трубах, вызываемое насосом, МПа;

H — высота колонны замораживающих труб;

γ_p .- плотность хладоносителя, т/м³.

При глубине замораживания $H = 1000$ м и $\gamma_p = 1,286$ т/м³ давление хладоносителя 13,8 МПа.

Предельное давление, при котором может начаться деформация трубы, по известной формуле Мариотта, вычисляется как

$$P_{кр} = 2\sigma_s \frac{\delta}{d_b}. (1.17)$$

где σ_s — предел текучести материала замораживающих труб ($\sigma_s = 380 \div 550$ МПа);

δ — толщина стенки труб;

При трубах ТЗК-2 с толщиной стенки 13 см, диаметром 146 мм и пределом текучести 40 МПа, предельно внутреннее давление 49 МПа. Следовательно, допускаемое внутреннее давление 24,5 МПа.

В практике шахтного строительства встречались случаи [56] выхода хладоносителя из замораживающей колонки и смятия замораживающих труб от внешнего гидростатического давления.

Предельное давление на смятие определяется по формуле

$$P_{\text{см}} = 2,48Ek^3, (1.18)$$

где E – модуль упругости материала трубы ($E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$);

k – отношение толщины стенки трубы к ее внешнему диаметру.

Предельная глубина понижения уровня хладоносителя в трубе можно определить из

$$H_{\text{пр}} = 10,3 \frac{P_{\text{см}}}{\gamma_1 n}, (1.19)$$

где γ_1 – плотность жидкости в затрубном пространстве, кг/см^3 ;

n – коэффициент запаса прочности ($n = 1,3 \div 1,5$)

Следовательно, замораживающая труба выдерживает сминающую нагрузку, если глубина понижения уровня жидкости в затрубном пространстве не превышает предельной глубины $H_{\text{пр}}$.

Предусмотрев проектом мероприятия (Рис. 1.12), ограничивающие нагрузки от сжимающих напряжений при навинчивании муфт с натягом, от растягивающих напряжений при свободном провисании трубы в скважине и от напряжений продольного изгиба при опирании колонки башмаком на забой скважины до $\sigma_p' = 120 \text{ МПа}$ (допустимого напряжения для стали марки «Д») возможно исключить риски возникновения аварийных ситуаций и повысить надежность работы замораживающих колонок. Для этого можно изменить конструкцию муфтового соединения, применив литые головки, предусмотреть способ опоры колонки на башмак через специально вваренный стержень, а также заменить обычные трубы на специализированные типа ТЗК-2. Однако, как показывает производственный опыт, даже эти трубы не обеспечивают достаточной

надежности замораживающих колонок, так как и при их использовании фиксируются разрывы последних.



Рис.1.12.Схема причин разгерметизации замораживающей колонки при монтаже и методы предотвращения аварий.

Процесс монтажа рассолопроводов и пуска замораживающей станции достаточно хорошо описан в технической литературе [32, 85], поэтому в данной работе заметим только, что нарушение циркуляции рассола в замораживающей колонке происходит вследствие трех причин: засорения отверстий питающих труб, повреждения запорной арматуры и разрыва замораживающей колонки. Первые два нарушения легко диагностируются и ремонтируются на поверхности, третье же нарушение требует бурения новой скважины.

1.4. Анализ возможности и частоты возникновения аварийных ситуаций на стадии активного и пассивного замораживания

В процессе создания ледопородного ограждения аварийные ситуации могут возникнуть вследствие неравномерности процесса замораживания. Там, где скважины сближаются, процесс замораживания и, следовательно,

образование льда идет интенсивнее. Одностороннее давление льда в этом случае проявляется в выпучивании крепи, появлении трещин в тубингах и выжимании свинцовой прокладки, поднятии поверхности и перекосе копров.

И при равномерном охлаждении может возникнуть одностороннее давление на крепь в результате увеличения объема пород и выпучивание породных стенок. Особенно это характерно для водонасыщенных пород.

В работе [2] указывается, что увеличение объема пород при замораживании приводит их в движение. Так, например, при проходке шахт в Березниках (глубина замораживания 152-158 м) было отмечено поднятие копров в результате расширения пород. На шахте №1 – на 124 мм, на шахте №2 – на 165 мм.

При строительстве стволов могут применяться последовательная, параллельная и совмещенная схемы проходки, хорошо известные из технической литературы [55,64].

Анализ опыта строительства стволов в замороженных породах показал, что последовательная схема применялась в 8% случаев строительства проходки стволов, параллельная схема – в 56% случаев. Так как при проходке стволов по параллельной схеме предусматривается раскрытие стенок ствола на 35-40 м без постоянного крепления, при такой технологической схеме фиксировались аварийные ситуации с разрушением передовой бетонной крепи и разгерметизацией замораживающих колонок. В настоящее время проходку стволов в замороженных породах осуществляют по совмещенной схеме строительства с использованием полутораметровых тубингов конструкции «Шахтспецстройпроекта» с толщиной спинок от 30 до 120 мм из модифицированного чугуна марок от СЧ20 до СЧ35. Для предотвращения вертикальных просадок тубинговой колонны предусматриваются узлы вертикальной податливости. Монтаж тубинговой крепи осуществляется

методом подвески на забое с заполнением затюбингового пространства литой бетонной смесью через заливочные отверстия М100 в тубингах. Однако и при такой технологии проходки стволов фиксируются аварийные разрушения замораживающих колонок, особенно при применении взрывного разрушения замороженных пород в забое ствола.

Возникающие аварийные ситуации в процессе проходки ствола представлены на рис. 1.13.



Рис. 1.13. Виды возникающих аварийных ситуаций в процессе проходки ствола под защитой ледопородного ограждения.

Шелушение стенок ствола при проходке в замороженных породах является признаком того, что ледопородное ограждение в своей основной

несущей зоне теряет водонепроницаемость, и с этого момента только наружная часть ледопородного ограждения может обеспечивать водонепроницаемость. Но наружная часть составляет всего 0,4 от расчетной, поэтому становится актуальным вопрос о достаточности наружной части для обеспечения водонепроницаемости в целом. В какой-то мере шелушение стенок замороженной породы может быть предвестником возможного разрыва колонок, но это происходит далеко не всегда и не может служить критерием опасности разрыва колонки.

Преждевременное оттаивание ледопородного ограждения свидетельствует о том, что произошла разгерметизация какой-то колонки на определенной глубине и нарушена система циркуляции хладоносителя. В этом случае для предотвращения утечки хладоносителя в забой отключают аварийную колонку от общей сети. Начало разрушения ледопородного ограждения требует мероприятий по восстановлению или интенсификации процесса замораживания, либо мероприятий по временной консервации ствола для предотвращения прорыва в ствол подземных вод и выноса песка. В случае начала внезапного затопления ствола обязательно принимаются меры по уменьшению доли выноса песка из околоствольного массива и ликвидации угрозы просадки поверхности, для чего производят засыпку забоя ствола с поверхности. В некоторых случаях временно приостанавливают проходку ствола и производят дополнительную герметизацию забоя путем устройства водонепроницаемой подушки и бурения новых замораживающих скважин.

1.5. Аварийные ситуации при ликвидации ледопородных ограждений

В работе [2], на основе наблюдений за состоянием тубинговой крепи, приводится факт оседания поверхности в процессе оттаивания. При этом особое внимание уделяется необходимости равномерного оттаивания

пород как по окружности, так и по длине ствола. Как показывают наблюдения, по мере оттаивания массива происходит уплотнение горизонтальных швов между кольцами тубинговой крепи и сжатие тубинговой колонны из-за оседания пород в пределах оттаивающего массива, что вызывает ослабление болтовых соединений.

При неравномерном оттаивании замороженного массива нарушается равновесие окружающих пород, что зачастую приводит к возникновению односторонних нагрузок на крепь ствола [48].

По вопросу целесообразности ликвидации замораживающих скважин существуют несколько точек зрения [119,128]. В немецкой практике считалось целесообразным извлекать замораживающие колонки и обсадные трубы с одновременным тампонированием скважин. Однако после двух крупных аварий, имевших место при извлечении труб на шахтах «Франс Ганиель» и «Августа-Виктория», от извлечения труб отказались. В настоящее время в Германии ликвидация замораживающих скважин производится следующим образом. После извлечения питающих труб замораживающие колонки заполняются на всю глубину медленно схватывающимся цементным раствором. В колонку опускается специальное взрывное приспособление (торпеда), состоящая из 10 зарядов, расположенных по спирали через 1-1,5 м. При взрывании зарядов замораживающая колонка простреливается, цементный раствор заполняет зазор между колонкой и стенками скважины, и все трещины вокруг скважины. Описанная технология позволяет предотвратить сообщение водоносных горизонтов через замораживающие скважины. Таким способом были ликвидированы замораживающие скважины на шахте «Рейнпрейсен» ствол №9 [35].

Извлечение замораживающих труб ведет к образованию пустот значительного объема. Например, при подъеме замораживающих труб на стволе №1 Березниковского калийного рудника (при глубине

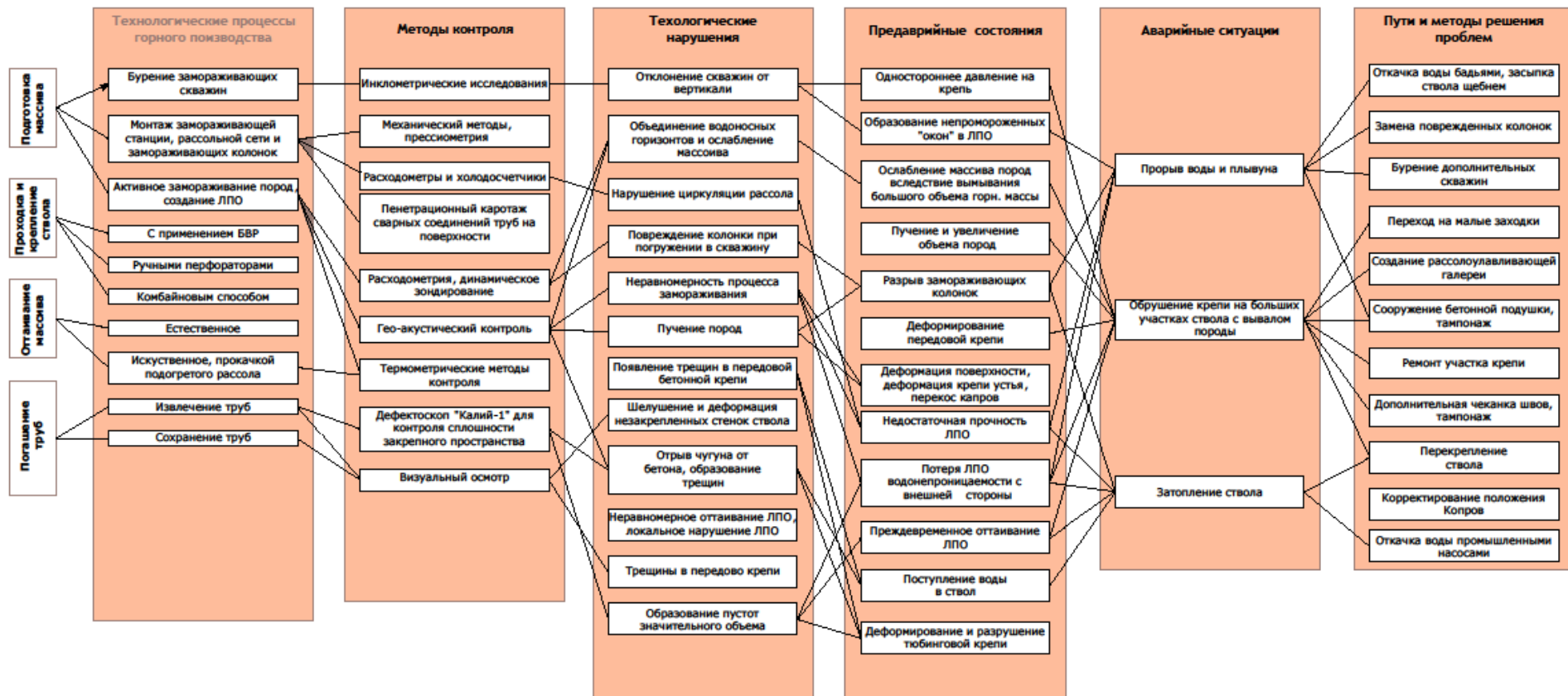
замораживания 158 м) израсходовано на тампонаж 30-ти скважин 140 м³ глины, при этом в некоторые скважины требовалось от 11 до 15 м³ (против расчетных 2,6 м³). Такие пустоты, особенно в плывунах, могут служить причиной обрушения значительных масс породы. Если смещение и обрушение пород происходит с одной стороны, то оно вызывает односторонние напряжения в тубинговой крепи, которые приводят к ее поломке. Именно по этой причине была разрушена тубинговая крепь на шахте «Франц-Ганиель» в Германии [7,13]. Следовательно, извлечение замораживающих труб нежелательно.

1.6. Систематизация аварийных ситуаций при строительстве стволов способом искусственного замораживания

На базе проанализированного производственного опыта проведена систематизация аварийных ситуаций, рассматривающая все технологические процессы проходки ствола, возможные нарушения технологии на каждом этапе, возможные аварийные проявления вследствие таких нарушений, основные признаки наступающих аварийных ситуаций и методы ликвидации последствий аварий. Графическое изображение предлагаемой систематизации приведено на (Рис 1.14). Приведенная систематизация позволяет оценивать возможность возникновения аварийных ситуаций при помощи методов неразрушающего контроля на всех этапах технологической цепочки проходки стволов способом искусственного замораживания и предусматривать меры для купирования развития аварийных ситуаций, так как в нормативных документах, регламентирующих проектирование, как правило, не учитываются возможные технологические нарушения и их аварийные последствия. Необходимо также проводить проверку расчетов крепи на возможность возникновения аварийных нагрузок оттаивания, чтобы исключить появление деформаций в чугунных тубингах.

Как показывают статистические данные, такой вид аварий, как деформация и разрушение замораживающих колонок происходит достаточно часто - более чем в 26 % всех аварийных ситуаций. Несмотря на применяемые дополнительные меры по предотвращению создания аварийных ситуаций, такие, как удаление замораживающих колонок от внутреннего контура ствола на 5-6 м, дополнительное закрепления породных стенок замороженного ствола высокопрочными бетонными блоками с податливыми тонкими древесно-стружечными прокладками, двухрядное расположение замораживающих скважин, специальные трубы из высокопрочной стали для замораживающих колонок - разрывы замораживающих колонок происходят. Следовательно, вопрос о деформировании и выходе из строя замораживающих колонок является не столько вопросом безопасности проходки, сколько вопросом экономическим. Увеличение срока активного замораживания до одного года или бурение двух рядов замораживающих скважин в течение 2-3 лет несет за собой многомиллионные затраты. При положительном эффекте с экономическими затратами можно смириться, но практика показала, что поставленная цель сохранения колонок не достигнута, а поэтому можно считать, что затраты не оправдали себя.

Систематизация причин возникновения аварийных ситуаций на различных технологических этапах строительства стволов способом искусственного замораживания



Цели и задачи исследования

Изучение перспектив строительства стволов с применением способа искусственного замораживания пород показал, что объемы их будут неукоснительно возрастать, при этом резко увеличиваются глубины и усложняются гидрогеологические условия их строительства. Анализируя современный уровень аналитических и экспериментальных исследований, а также практики применения способа искусственного замораживания горных пород в шахтном строительстве, следует отметить, что в наибольшей степени исследованы и разработаны расчетные методы по определению толщины ледопородного ограждения, мощности и времени работы замораживающей станции. При этом, технико-экономические показатели строительства стволов остаются неудовлетворительными, скорости проходки не превышают 40-45 м/мес. Одной из главных причин таких неудовлетворительных показателей является несовершенство способов разработки замороженных пород и, как следствие, использование погрузчиков малой мощности и невысокой скорости. Одним из рациональных путей повышения технико-экономических показателей способа искусственного замораживания является внедрение буровзрывного способа разрушения пород. Однако на практике имеют место аварийные разрушения замораживающих колонок при применении взрывных технологий вследствие недостаточной изученности степени влияния действия взрыва на ЛПО, отсутствия надежных, обоснованных расчетных методов, отражающих влияние различных геологических, гидрогеологических, технических факторов на напряженно-деформированное состояние ЛПО и замораживающих колонок. Имеющиеся немногочисленные исследования в данном вопросе являются либо аналитическими, либо сугубо эмпирическими и дают весьма

ограниченные сведения и противоречивые результаты, не позволяющие сделать обобщения и выводы.

Таким образом, все возрастающие объемы замораживания горных пород на больших глубинах с одной стороны и увеличивающиеся при этом число аварийных ситуаций при проходке стволов с другой стороны ставят вопрос о необходимости решения задачи, связанной с выявлением закономерностей поведения замораживающих колонок в массиве замороженных пород в зависимости от технологии ведения горнопроходческих работ, обеспечивающей безаварийные условия проходки и повышение технико-экономических показателей строительства.

Для достижения поставленной цели в работе сделана попытка решить следующие задачи:

- Анализ и математическая обработка статистических данных о возможных аварийных ситуациях, возникающих при строительстве шахтных стволов с применением способа искусственного замораживания пород;
- Анализ причин возникновения аварийных ситуаций, связанных с разгерметизацией и деформируемостью замораживающих колонок;
- Оценка влияния БВР на состояние ледопородного массива в призабойной зоне ствола и герметичность замораживающих колонок;
- Изучение механизма воздействия ударных волн на замораживающую колонку.
- Обоснование и выбор безаварийных технологий проходки ствола и технологических мероприятий, исключающих воздействие ударных волн на замораживающие колонки.

2. Исследования процессов деформирования и разрушения ледопородного ограждения и замораживающих колонок при проходке стволов в замороженных породах

2.1. Виды деформаций замораживающих колонок

Замораживающая колонка представляет собой конструкцию, состоящую из башмака, питающей и отводящей труб, которые через специальные головки соединяются с распределительным и отводящим трубопроводами, а последние через рассолопровод - с испарителем холодильной установки. К этому необходимо добавить затрубный слой из смеси воды и бурового раствора, находящейся в свободном или замороженном состоянии в пространстве между замораживающей скважиной и замораживающей колонкой. .

В работах [60,64,85,87,96,107,110] , в соответствии с результатами анализа нарушений замораживающих колонок, указываются следующие характерные повреждения:

- разрыв замораживающей трубы;
- срезывание тела замораживающих колонок со смещением двух частей труб одной относительно друг друга;
- смятие колонок с приобретением ими U-образной формы без разрыва сплошности
- смятие замораживающих колонок с образованием трещин (часто продольных);
- оваллизация и нерегулярное деформирование сечения замораживающих колонок.

В работе [110] отмечается, что не всегда удастся установить, какой вид деформации получила та или иная колонка, так как замораживающие колонки извлекаются лишь в редких случаях.

Первые 4 вида повреждений являются причиной нарушения целостности конструкции замораживающих колонок (Рис.2.1).

Смещения частей замораживающих колонок при разрыве и срезе бывают настолько большими (до 100 мм), что не позволяют опустить в замораживающие колонки трубы меньшего диаметра. При таких деформациях из труб выходит хладоноситель (рассол) в замороженные горные породы, с вытекающими из этого неприятными последствиями.

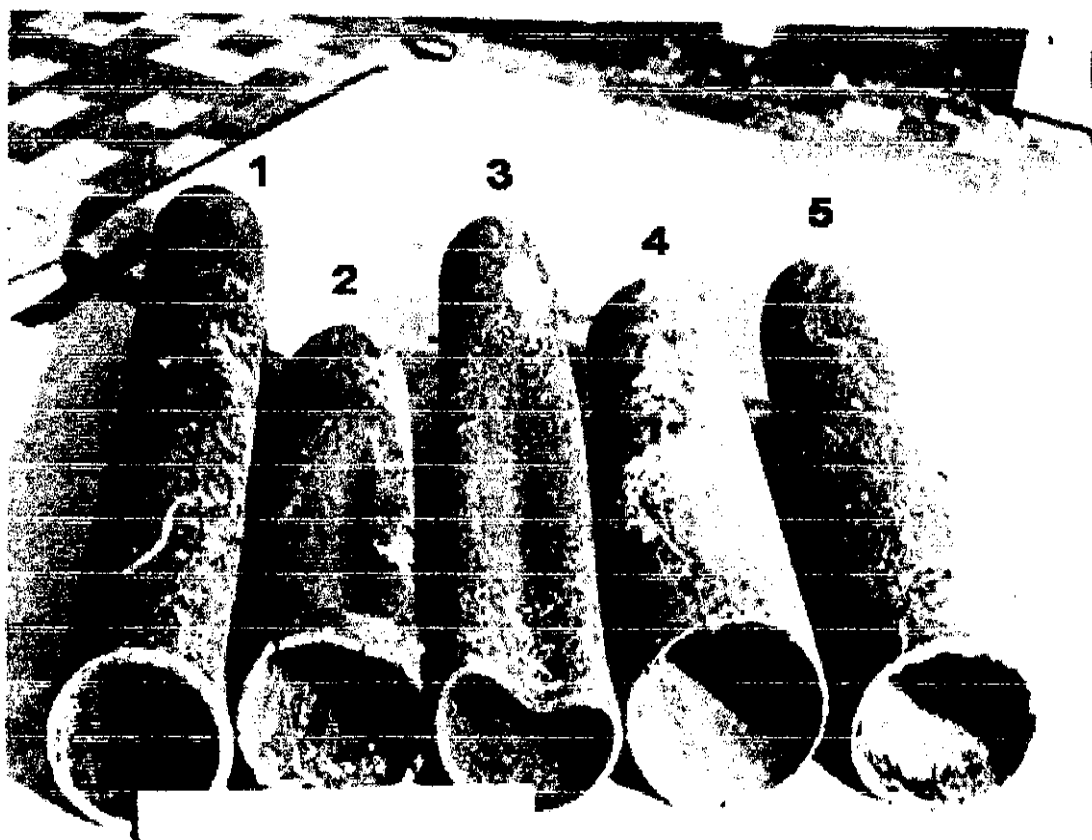


Рис.2.1. Характерное повреждение замораживающей трубы в виде разрыва [64]: 1- продольная трещина, 2 и 3 – продольная вмятина, 4- нерегулярное деформирование, 5-овализация трубы

При смятии замораживающих колонок, которое может распространиться более, чем на половину диаметра трубы ($\delta D \sim 3/4D$) без разрыва сплошности, могут быть повреждены питающие трубы, в результате чего нарушается нормальная циркуляция охлаждающего рассола. Размеры вмятин колеблются по глубине - 7÷58 мм, по длине -

440÷530 мм и по ширине - 85÷ 120 мм.

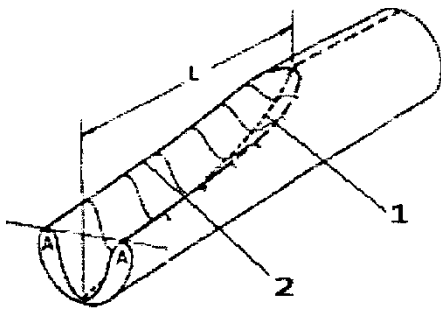


Рис. 2.2. Схема образования глубокой вмятины 1- центральная трещина, 2-наружная грань вмятины.

В работе [42] проанализированы случаи деформирования замораживающих колонок путем их смятия и высказана гипотеза, что такие нарушения могут произойти вследствие крупных сдвижений породных стенок ствола или при попытках извлечь из скважин прихваченные породами колонки.

В [64] отмечается, что в большинстве случаев повреждения извлеченных замораживающих колонок оказались в местах соединений труб. Все они носили характер разрыва или среза с разрывом колонки по нитке резьбы и торца муфты. Поперечные смещения разорванных концов колонки во всех случаях были ориентированы в направлении ствола. Продольное смещение этих концов от торцов муфт в одном случае составило 12 мм, а во всех других не превышало 5 мм. В одном из новых случаев повреждений обнаружено продольное смещение до 35 мм, Поперечные смещения достигали 35-50 мм. Из осмотренных 11 повреждений 10 произошли в соединениях муфт с трубами, которые выполняются в заводских условиях на специальных станках. В [64,79,110] делается вывод, что наиболее напряженным местом колонки является поперечное сечение по нитке резьбы у торца муфты, в частности, в месте заводского соединения муфты с колонкой и что на колонку действуют поперечные срезающие и продольные растягивающие усилия.

Отмечается также, что эти усилия в основном являются следствием деформаций пород – их перемещений в сторону незакрепленного участка ствола. При этом колонки подвергаются резкому местному изгибу и срезу. Кроме того, продольные усилия растяжения возникают вследствие невозможности температурного укорочения колонки при условии ее достаточно жесткого прихвата породами на различных участках в скважине.

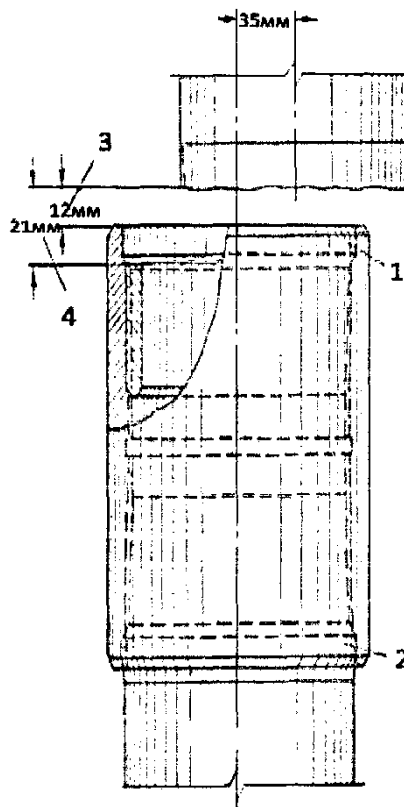


Рис.2.3. Деформация среза трубы в муфтовом соединении. 1- тело трубы, 2-муфта, 3- разрыв трубы, 4-фланец.

В [64] приведены следующие причины возникновения повреждений вида 1 и 2:

- деформирование пород и недостаточная прочность труб;
- режим замораживания пород;
- отклонение скважин от вертикали;
- производство буровзрывных работ в непосредственной близости от колонки.

В глинах произошло до 85,5% всех повреждений указанного вида (130 случаев из 152), из них 49% - на контактах с более устойчивыми породами, в том числе и с замороженными песками. В крепких и устойчивых породах (песчаниках, известняках, доломитах и др.) – менее 10% повреждений. Эти данные показывают преимущественное влияние деформации пород, в частности, глин и особенно на контактах их с более устойчивыми породами. Повреждения колонок в крепких, практически недеформирующихся породах говорят о том, что на колонки действуют значительные продольные усилия, достигающие величин разрушающих усилий.

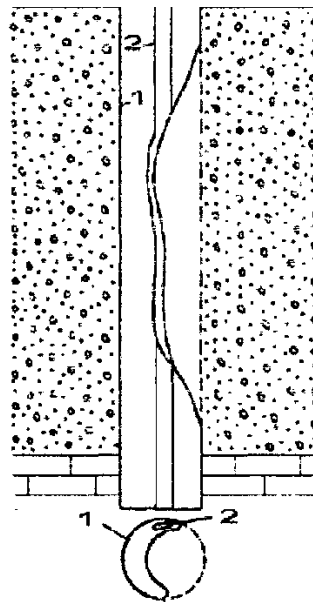


Рис.2.4. Смятие замораживающих (1) и питающих (2) труб [110]

Деформации пород условно разделяются на 3 вида:

1. Нарушения структуры пород на обнаженной поверхности – развитие мелкой трещиноватости, слоистости, частичное разрыхление на глубину до 25-30 см от поверхности. Наблюдаются в бурых углях, плотных глинах и мергелях в замороженном состоянии. Перемещения стен ствола - до 50-70 мм. При этих деформациях произошло 23,7% повреждений колонок (27 случаев из 114).

2. Плавное развитие – вспучивание – на заходках ствола. Наблюдается во всех пластических породах в талом и замороженном состоянии. Пе-

ремещения стен ствола достигают 300 мм (стволы ЗЖРК № 1); вспучивание забоя в некоторых случаях достигает 1100 мм (ствол В). При этих деформациях произошло 56,9% повреждений; из них – 35% при пучении только стен ствола, и 21,9% при пучении только забоя ствола или стен и забоя ствола одновременно.

3. Внезапное и кратковременное проявление деформаций (19,4% повреждений) с большими перемещениями пород, образованием крупных трещин и вывалов породы. Отмечены такие деформации в талых и слабо замороженных глинах на стволах: ЗЖРК № 1, клетевом шахты № 8 в Шурабе (Польша). Они приурочены к малым заходкам (высотой до 6 м) и связаны с осуществлением зонального замораживания. Предварительные признаки таких деформаций до момента проявления их на заходках практически отсутствуют.

Влияние деформаций от производства буровзрывных работ в непосредственной близости от колонки отмечается в 22 случаях, почти 20% всех повреждений.

Замораживание пород на глубинах свыше 200 м в определённых геологических условиях по технико-экономическим показателям осуществляется зональным способом. Однако обстоятельства повреждений колонок на этих объектах свидетельствуют о серьёзных технологических недостатках при использовании данной схемы.

Изучение режима замораживания пород позволило установить следующие общие явления:

- 1) повреждения колонок произошли после перехода на замораживание пород вторых и последующих зон при неизменном, как правило, направлении циркуляции рассола в колонках - подаче по питающим трубам к нижним границам зон;

- 2) почти все повреждения колонок произошли после резких изменений температур циркулирующего рассола, вызванных

изменением числа работающих агрегатов или полными остановками замораживающих станций, отключением части колонок и, особенно, переходом на замораживание новых зон пород или на новый низкотемпературный режим работы (с двухступенчатым сжатием аммиака);

3) повреждения колонок обнаруживались по появлению рассола в стволе спустя 2-5 суток после указанных резких изменений в режиме замораживания.

Отмеченная закономерность повреждений объясняется наличием температурных напряжений в трубах колонок, когда последние прихватываются замерзающими породами на разных участках длины и не могут свободно укорачиваться при дальнейшем понижении температуры рассола [51,64].

Известно, что медленное замораживание глин способствует миграции влаги в них в сторону пониженных температур и развитию явлений пучения [42,74]. Отмеченные интенсивные деформации пород промежуточной зоны на стволах ЗЖРК № 1 полностью подтвердили это. В данном случае тяжелые условия работы колонок из-за температурных напряжений усугублялись проявлением интенсивных деформаций частично подмороженных глинистых пород на очень малых заходках.

На ряде объектов отклонения скважин от вертикали оказывают влияние на повреждения колонок. Данные показывают, что до 85% колонок, отклонившихся к стволу, получают повреждения. Ряд повреждений колонок произошло в скважинах, не имевших больших отклонений к стволу, но характерных резкими изменениями азимутов отклонений в плане - до 180-360° на протяжении 100-150 м по глубине.

При низкотемпературном замораживании на стволах калийных месторождений все породы замораживаются до такого состояния, что деформаций стенок глинистых пород и мергелей не происходит, к тому же

не происходит и заземления временной крепи.

Интерес представляет также возможность образования трещин с учетом охрупчивания стали при отрицательных температурах [24] и динамических нагрузках [18,23,91,132] по линиям вмятины: главной продольной вмятины и линии перегиба при применении буровзрывного способа разрушения пород. При этом наблюдается одна особенность - разрыв колонок происходит на контакте пропластков гипса с мергелем, глины и песка, и т.д. В монолитном породном массиве буровзрывные работы не приводят к разрыву колонок. Несмотря на то, что это явление зафиксировано, объяснения этому нет. Поэтому не дано и практических рекомендаций, исключающих разрыв колонок на контакте пластов пород.

В работе [42] приведены данные о проходке стволов способом искусственного замораживания на 3-х стволах Яковлевского рудника КМА. Шахтные стволы сооружались в водоносных неустойчивых породах. Рудное тело (железная руда) залегает на глубине около 720 м. Обводненные и неустойчивые покровные горные породы, представленные песками, глинами, мелом и мергелем залегают на глубине 570-585 м. Ниже находятся коренные породы, в верхней части сильно выветрелые, частью разрушенные, малоустойчивые. На Яковлевском железорудном месторождении КМА сооружались три ствола: два из них - скиповой №1 и клетевой №2 располагались на одной строительной площадке, а третий - северный вентиляционный - на фланге.

Замораживание производилось двумя рядами замораживающих скважин, расположенных на двух concentрических окружностях. Диаметр первой окружности - 14,5 м, а второй - 19 м. Расстояние между рядами 2,25 м. Расстояние между замораживающими скважинами во внутреннем ряду составило 1,38-1,47 м, в наружном - 1,65-1,81 м.

Ствол №2 с глубины 60 м и до конечной глубины проходиллся буровзрывным способом, заходками высотой 1,5 м с последующим

креплением тубинговой крепью. Применение буровзрывных работ никак не влияло на герметичность колонок ни при проходке по известковистым мергелям крепостью по шкале Протодяконов до 4 в замороженном состоянии, ни при проходке в мелах, и только на контакте полностью промороженных песков и вязкой глиной на глубине 309 м произошел срез сразу 6 колонок. При следующем взрыве вышло из строя еще две колонки на глубине 311 м. Затем на глубинах 375,6 м и 376,5 м вышло из строя 3 колонки, потом на глубине 406 м - еще 2 колонки. С выходом из строя пятнадцати колонок внутреннего ряда (из общего количества по проекту 34 колонки), внутренний ряд практически перестал существовать, и его отключили, перейдя на замораживающие колонки наружного ряда по диаметру 19 м. Буровзрывные работы продолжались, но колонки наружного ряда при этом не разрушались. Объяснение причин описанного явления отсутствует.

По рассмотренному объекту в работе [64] поставлен вопрос: почему в одинаковых условиях деформировались не все замораживающие трубы? На этот счет приведены следующие соображения:

1. Неодинаковое качество материала замораживающих труб в различных замораживающих колонках.
2. Неоднородность глины на отдельных участках расположения замораживающих колонок.
3. Низкий предел прочности малоувлажненных глин даже в замороженном состоянии.
4. Присутствие в геологическом разрезе глин с высокой молекулярной влагоемкостью, замерзающей лишь при температуре -78°C .
5. Искусственное увлажнение глин во время бурения замораживающих скважин, благодаря чему в районе таких скважин предел прочности замороженной глины повысился.

Благодаря сближению замораживающих скважин площадь давления,

приходящаяся на одну замораживающую трубу, а, следовательно, и внешнее давление на нее оказываются меньше, чем на других участках.

В связи с этим можно заключить, что при прогнозировании поведения замораживающих колонок в ледопородном массиве необходимо учитывать разброс в значениях физико-механических свойств мёрзлых пород, стали замораживающих труб, свойств их соединений, а также параметров взрывных нагрузок.

2.2. Анализ теоретических исследований по деформированию замораживающих колонок

Анализируя современную научно-техническую литературу, посвященную вопросу надежности работы ледопородного ограждения, можно выделить два основных теоретических направления, объясняющих причины деформирования замораживающих колонок.

Первое направление объясняет случаи аварийного деформирования замораживающих колонок на больших глубинах увеличением внешнего давления на ледопородное ограждение, следствием чего является смещение ледопородного ограждения при его обнажении на высоту незакрепленной заходки. При этом замораживающая колонка изгибается в пределах высоты незакрепленной заходки, а концы ее вытягиваются из замороженного массива. Однако вытягиванию колонки препятствует сила сцепления стенок колонки с замороженным глинистым раствором, что является причиной возникновения продольной растягивающей силы. Суммируя напряжения от поперечного изгиба колонки, напряжения от продольного растяжения колонки и температурные напряжения, оценивают вероятность разрушения колонки [76] .

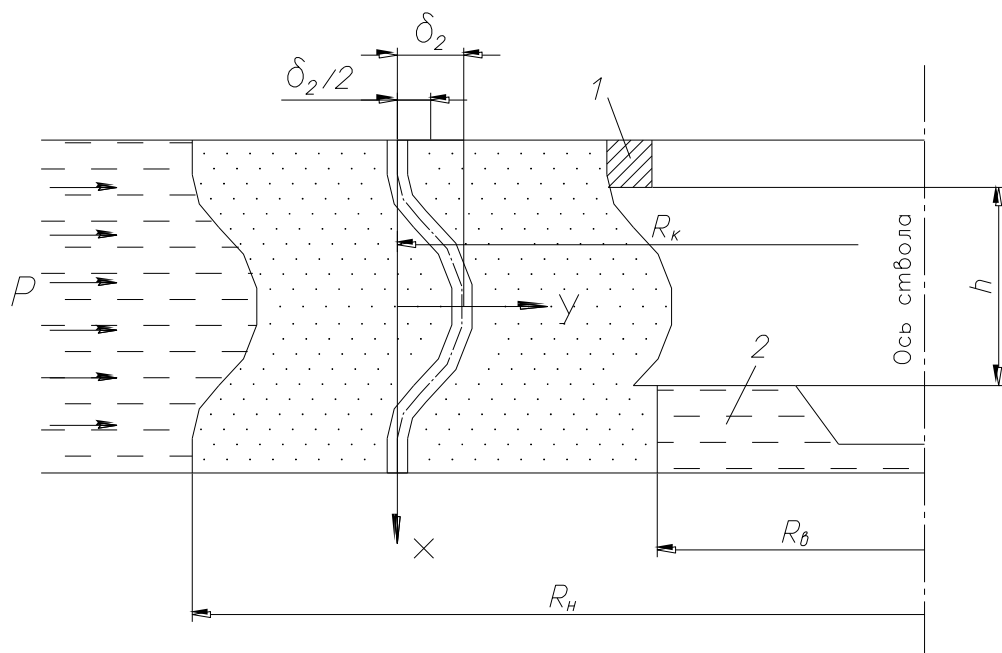


Рис. 2.5.Схема смещения ледопородного цилиндра.

где 1- постоянная крепь, 2-забой ствола, σ_1 - радиальное смещение колонки выше незакрепленной заходки относительно ее первоначального положения, h - высота незакрепленной заходки, м.

Современная технология шахтного строительства перешла на совмещенную схему проходки и крепления ствола. При этой технологии обнажение стенок ствола происходит на величину не более 1,5-3 м, что исключает деформирование стенок ледопородного ограждения. Поэтому предположение о деформировании ледопородного цилиндра не обосновано

Второе направление рассматривает деформирование замораживающих колонок как следствие действия динамической нагрузки, возникающей от движения большой массы пород при взрыве [47] .

В отечественной и зарубежной литературе имеются отдельные краткие сведения о применении взрывной технологии при проходке стволов в искусственно замороженных породах. Взрывные работы при проходке ствола выполнялись в Англии на шахте «Котгрейв» [1,96].

Взрывались замороженные мергели с большим содержанием гипса, песчаники и известняки. Замораживание осуществлялось до глубины 268 м. За цикл бурились 65 шпуров глубиной 2 м. заряд в шпуре составлял 1 кг гелигнита. Шпуры располагались на расстоянии не менее 2 м от замораживающих колонок, расход составил 1 кг на 1 м³ породы. На шахте «Вермаус» взрывались желтые пески (пывуны) и магнезитовые известняки. Незамороженную часть ствола разрабатывали вручную, а остальную часть - с использованием взрывов шпуровых зарядов глубиной 1,7-2м. В Канаде при проходке ствола «Оджибуэй» в рыхлых замороженных породах шпуры глубиной 0,9 м располагались уступообразно. В этом случае взорванная порода амортизировала удары породы от противоположных зарядов. На один взрыв затрачивалось 61,3 кг ВВ.

В СССР и в России при строительстве Соликамского рудника [96] взрывные работы производились в мерзлых мергелях с коэффициентом крепости 1,6-3. Скорость бурения в мергелях достигала 37 шпурометров в смену, в стволе шахты «Щегловская» в мерзлых песчаниках с коэффициентом крепости 4-6 и песчаном сланце – 20 шпурометров в смену. Расход аммонита в этих породах составлял 0,25-0,5 кг/м³. У контура ствола с целью предупреждения нарушения замораживающих колонок оставлялись целики шириной около 0,4 м. При проходке ствола №2 на четвертом Солигорском калийном комбинате производили взрывные работы в мерзлом трещиноватом меле. Всего бурили 36 шпуров; 6-врубовых, 12- вспомогательных и 16- оконтуривающих. Оконтуривающие шпуры располагались на расстоянии 0.9м от контура ствола в проходке. Фактическое расстояние от ближайшей замораживающей колонки на горизонте 114 м составляло 1,85 м. Глубина врубовых шпуров составляла 2,2 м, вспомогательных и оконтуривающих – 2м. Коэффициент использования шпура составил 0,95, а удельный расход ВВ -0,46 кг/м³.

Из обзора литературных источников об успешных проходках с взрывными работами в породах, с коэффициентом крепости 1,5-3 по шкале проф. М.М Протодяконова, известно, что расход аммонита составлял: в мелах 0,46 кг/м³, в мергелях 0,53кг/м³, в песчаниках 1,55 кг/м³, в каменной соли 1,7 кг/м³, в гипсах 1,33 кг/м³.

Обоснованию возможности применения буровзрывного способа разрушения пород, расчетам скоростей смещений ледопородного ограждения и напряжений, вызываемых ударными волнами в массиве замороженных пород посвящены труды Терехова П.М. [106], исследующие распространение волн в мерзлых песках объемным весом 1,9 кгс/см³ и весовой влажностью 20%. В экспериментальные шпуры помещалось по 1 кг аммонита 6 ЖВ в патронах диаметром 32 мм, длина заряда составляла 1,2 м, остальная часть шпура заполнялась забойкой. На основе обработки результатов экспериментов Терехов П.М. предложил следующие формулы для расчета напряжения и скорости смещения породного контура:

$$V_r = \frac{5 \cdot 10^5}{r^{1,9}} \quad (2.1)$$

$$\sigma_r = \frac{2,42}{r^{1,9}} \quad (2.2)$$

где V_r — скорость смещения, см/с;

σ_r — напряжение, кгс/см²;

r - относительное расстояние до колонки, зависящее от радиуса заряда и расстояния до замораживающей колонки, см

Формулы (2.1) и (2.2) являются частным случаем известных формул профессора М.А.Садовского [103], выведенные из предположения о том, что если увеличивать радиус заряда ВВ в определенное число раз, то в это

же число раз изменится радиус полости разрушения, а на границе области разрушения будут одинаковые напряжения и скорости смещения массива

$$V_r = k_1 \left(\frac{r_0}{r_p} \right)^n \quad (2.3)$$

$$\sigma_r = k_2 \left(\frac{r_0}{r_p} \right)^n \quad (2.4)$$

где v_r и σ_r – соответственно, скорости смещения и напряжения частиц на границе области разрушения, см/с и кгс/см²;

r_0 – радиус заряда, мм;

r_p – радиус разрушения, м;

k_1 и k_2 – коэффициенты пропорциональности, зависящие от свойств грунтов;

n – показатель взрываемости, равный для близких расстояний 2 и для дальних -1,5.

Эта формула получила распространение в расчете скоростей смещений и напряжений для области разрушения и для области упругих колебаний. Изменения коэффициента k_1 и показателя n с расстоянием показывает недостаточную строгость этих формул. Мироновым П.С. сделана попытка скорректировать приведенные выше формулы путем выражения скорости смещений как произведения функции затухания колебания за счет поглощения энергии, веса заряда и потока энергии на границе с зарядом.

$$V = k_0 \frac{\sqrt{Q}}{r^{n(r)}} \cdot \frac{1}{\sqrt{r+0,5L}} \cdot f_{кзв} \cdot f_{гл} \quad (2.5)$$

где k_0 – эмпирический коэффициент, принимаемый для грунтов 400, а в случае их обводненности грунтов 800;

Q – общий вес взрывчатого вещества, кг;

r – кратчайшее расстояние до заряда, м;

L – длина взрываемого участка, м;

$f_{кзв}$ – функция снижения колебаний за счет короткозамедленного взрывания.

Цейтлин Я.И. [125] скорректировал данные формулы путём уточнения значения коэффициента k_0 , принимая его равным 330.

И.Б. Карасик [47] впервые попытался количественно оценить действие взрывов на замораживающие колонки. В основу его расчета прочности колонок положено условие, по которому поток энергии через единицу сечения не должен превышать ударной вязкости материала труб.

Известно, что ударная вязкость является лишь показателем сопротивления распространению трещин при циклическом нагружении. При статическом нагружении разрушение по трещинам не может произойти, так как колонка работает на изгиб. Из ранее приведенных примеров разрушения замораживающих колонок не выявлено случаев хрупкого разрушения (как стекла) замораживающих колонок. Тем не менее, по критерию И.Б.Карасика получается, что чем больше скорость в породе, тем больше энергия. Тогда колонки должны были бы разрушиться в самых прочных породах, замороженных песках, так как температура там ниже, чем в других породах. Но разрыв колонок преимущественно наблюдался на контакте глин и песков. Следовательно, теоретическая предпосылка Карасика противоречит практике.

Совсем другой подход к данной проблеме предложен Цейтлиным Я.И.[124], рассматривавшим две основные причины разрушения замораживающих колонок:

- накопления напряжений в металле под действием разных статически действующих сил и деформаций пород, которые приводят металл к состоянию текучести;
- действие сейсмических волн взрывов.

Автор считает, что критическая величина $E_{кр}$ плотности потока энергии сейсмической волны должна определяться из условия поглощения колонкой энергии, равной работе пластической деформации металла трубы

вплоть до разрушения. При этом в первом приближении упругой работой можно пренебречь, считая ее малой по сравнению с пластической.

В качестве критерия давления взрыва принимается величина потока энергии, необходимого для разрушения стальной трубы (диаметром 146 мм и толщиной стенки 11 мм), проходящего через 1 см² площади и равного $E = 3,6 \times 10^9$, при $a = 9$ эрг/см² [106].

Исходя из приведенных предпосылок получена зависимость допустимого заряда ВВ от расстояния до замораживающих колонок.

$$Q = 0,4 a r^2. (2.6.)$$

где Q- масса заряда, кг;

a - расстояние между зарядами, м;

r - расстояние от заряда до замораживающей колонки, м.

В формуле не учитывается статическое напряженное состояние колонок, но главное, не даются методики корректировки критического потока энергии при наличии статического напряженного состояния колонок.

В работе [34] дано расширенное толкование критического потока энергии, исходя из оценки деформирования стальных нефтепроводов диаметром 800 мм. Автор оговаривает, что до получения новых экспериментальных данных целесообразно для грунтов оставить ту же критическую плотность энергии, что и для воды, то есть $E_{кр} = 300 \cdot 10^6$ Дж/м³.

Расчетную величину критической плотности потока энергии определяют по формуле

$$(E_{кр})_{расч} = 0,01 K_1 K_2 K_3 K_4 \delta E_{кр} (2.7)$$

где K₁- коэффициент хладостойкости, учитывающий уменьшение ударной вязкости (величины, пропорциональной E_{кр}) при понижении температуры ((K₁=0,25 при t = - 50⁰C);

K₂ – коэффициент, учитывающий повторяемость нагрузки ($K_2 = \frac{1}{3}$)

K_3 – коэффициент, учитывающий запас прочности, $K_3 = 0,3$

K_4 – коэффициент, зависящий от физико-механических свойств металла, для стали Д принимают $K_4 = 1$

$E_{кр}$ – нормативная критическая плотность потока энергии на 1 м толщины трубы, Дж/м³

δ – толщина стенки колонки, м

Подставив принятые им величины в формулу, получаем

$$(E_{кр})_{расч} = 7,5 \cdot 10^4 \delta \quad (2.8)$$

При этом если отдельные заряды по массе не превышают 5 кг, то получена формула

$$E = 1.1 V^2 \quad (2.9)$$

Где E – плотность потока энергии, Дж/м²;

V – максимальная векторная скорость смещения частиц грунта, см/с

Отсюда получают формулу критической скорости в зависимости от толщины стенки колонны

$$V_{кр} = 250 \sqrt{\delta}, \text{ см/сек} \quad (2.8)$$

Для определения критической скорости необходимо исходить из условия, что металл трубы может работать не только в области упругих деформаций, но и пластических. Иными словами, допускается появление остаточных деформаций в результате сейсмического воздействия взрывов. Тогда предельно допустимая масса шпурового заряда находится по формуле:

$$Q_{\max} = \frac{175aB^{3/2}}{\kappa\Delta} \frac{1}{Ks} \delta^{3/4} \alpha r^2, \quad (2.10)$$

где α – расстояние между шпурами в ряду, м;

B – степень экранизации;

K – коэффициент сейсмичности, зависящий от нагрузки на заряд и физико-механических свойств пород,

Δ – коэффициент, зависящий от плотности заряжания выработки,

K_S – коэффициент, зависящий от отношения s ($s = \frac{R}{r + R}$),

r – расстояние от линии скважин до замораживающей колонки, м.

Пример. Диаметр проходки ствола $D_{пр} = 8,6$ м, $D_{зам.колон.} = 12,6$ м, расстояние между шпуровыми зарядами, $a = 0,93$ м, расстояние между рядами $0,8$ м, $r = 2,3$ м.

$$S = \frac{4}{4 + 2,3} = 0,63 \text{ м}, K_S = 0,83$$

Толщина стенки трубы в выточке муфтового соединения – $7,9$ мм. Подставив данные в формулу, получаем, что при мгновенном взрыве оконтуривающего ряда заряд одного шпура $Q_{\max}$ не должен превышать $4,2$ кг. Известно, что допустимая масса заряда в шпуре при разработке замороженных пород не должна превышать $1,2$ кг. Это доказывает ошибочность формулы.

Далее автор подчеркивает, что при глубоком бурении замораживающие скважины часто отклоняются от вертикали, что изменяет величину r для данного цикла проходки. Опасны отклонения скважин в сторону ствола. Для приведенного выше примера, если расстояние r вместо 3 м составит $1,5$ м, то допустимая масса заряда в шпуре уменьшится с $4,2$ до $2,25$ кг. В случае если отдельная колонка недопустимо приближается к контуру ствола, при проходке последнего в соответствующем месте рекомендуется оставлять целики, которые затем разбираются вручную.

Необходимо обратить внимание, что в работе [34] не учитывается тип пород, а только расстояние до колонок. Поэтому, если $r > 1,5$ м, то можно взрывать $2,25$ кг ВВ. Автор считает, что опасно для колонок только взрывание оконтуривающих шпуров.

Следует отметить, что на практике при строительстве стволов способом замораживания масса ВВ оконтуривающих шпуров больше $1,2$ - $1,5$ кг никогда не применяется.

В работе И.З. Драговейко [33] указывает, что на БКК 3 на глубинах 233 и 245 метров при расстоянии от заряда до колонки 1,63м, расстоянии между шпурами 0,95 м и массе шпурового заряда 1,2кг, произошли разрывы замораживающих колонок (табл. 2.1). Необходимо отметить, что породы в рассматриваемом разрезе представляли собой прослаивание слабых мергелей, мергелистых глин, известняков, гипсов.

Случаи повреждения замораживающих колонок на Березниковском калийном комбинате. Таблица 2.1

Глубина места разрыва	Расстояние от заряда оконтуривающих шпуров	Расстояние между оконтуривающими шпурами	Масса шпурового заряда	Удельный расход ВВ
310	1,08	0,92	1,2	1,38
310	1,3	0,92	1,2	1,38
323	1,63	0,95	1,2	1,34
345	1.67	0,95	1,2	1,34
364	1.07	0,95	1,2	1,34
390	1,0	1,0	1,2	0,8
Среднее	1,28	0,95	1,2	1,26

По мнению автора, разрушение замораживающих колонок зависит от массы зарядов в оконтуривающих шпурах. Но массы зарядов в оконтуривающих шпурах составляют всего 1,2 кг, что не должно привести к разрушению замораживающих колонок по Цейтлину Я.Н. Известно, что вес заряда пропорционален энергии, а по энергии коэффициент запаса принят 3, следовательно, разрушение могли произойти только при трехкратном превышении критического заряда.

Однако факт разрушения замораживающих колонок на стволах зафиксирован, а причины не выяснены.

В настоящее время технология строительства стволов шахт с применением способа искусственного замораживания значительно усовершенствована. Так, например, применяется совмещенная схема проходки, позволяющая уменьшить высоту незакрепленной заходки до 1.5-3 м; реже применяется зональная схема замораживания, при которой «сухие» участки массива остаются непромороженными; разработаны специальные рекомендации к расчетам параметров БВР, уменьшающие сейсмическое воздействие взрыва, однако разрывы замораживающих колонок не прекращаются. Следовательно, выявлены не все причины разрывов замораживающих колонок. Например, нет учета влияния горно-геологических условий на частоту деформирования замораживающих колонок. Проведенные исследования по использованию БВР при проходке стволов способом искусственного замораживания не дают достаточного представления о характере воздействия взрывов на герметичность замораживающих колонок, поэтому необходимо теоретическое исследование этого явления.

2.3. Обзор экспериментальных исследований воздействий взрывных работ на деформируемость замораживающих колонок.

Вопросу влияния буровзрывных работ на деформации замораживающих колонок были посвящены многие работы, в частности, исследования института ВИОГЕМ [42], задачей которых было обоснование возможности применения буровзрывных работ при проходке стволов с применением искусственного замораживания по породам, с коэффициентом крепости $f \leq 2$ по шкале профессора Протодяконова. Исследования эти основывались на успехе проходки буровзрывным способом по мергелистым и глинистым породам наклонных стволов № 1 и №2 Михайловского ГОКа.

Было выбрано направление экспериментального исследования напряженного состояния ледопородного ограждения при взрывных

работах при проходке стволов малой глубины с помощью тензометрических и сейсмических исследований. Предполагалось, что, зная напряженное состояние и допустимое напряжение для замороженного массива и колонок, можно будет установить значение критического напряжения разрушения колонок. Далее определялись условия, при которых обеспечивается сохранность ледопородного ограждения.

В эксперименте были применены обычные методы изучения сейсмических и взрывных волн, базирующиеся на регистрации сейсмических и взрывных воздействий датчиками давления и тензодатчиками. Скорость смещения частиц грунта определялась индукционными датчиками скорости, изготовленными в лаборатории, при этом магниты, используемые в датчиках, намагничивались с помощью импульсной установки. Сигнал подавался на электронный осциллограф С8-1 и на осциллограф Н-115, где для записи осциллограмм применялось специальное устройство для фотографирования изображения на высокочувствительную аэрофотопленку «Изохром» тип 22 (чувствительность 1200 ед.). При этом регулярная погрешность эксперимента оценивалась авторами в 14-18%.

Дальнейшие замеры производились на специальном полупромышленном стенде. Тем не менее, получены уникальные результаты, описывающие физический процесс воздействия взрыва на ЛПО. Замерены фактические параметры воздействия от взрывов врубовых, отбойных и оконтуривающих рядов и получены параметры этих воздействий. Эти замеры позволяют утверждать, что воздействие от взрыва врубовых шпуров может быть значительнее воздействия от взрыва оконтуривающих зарядов, что противоречит некоторым теоретическим утверждениям предыдущих исследователей.

После замораживания породного массива горизонтального стенда (Рис. 2.6) производились взрывы с последующим визуальным осмотром труб. Получены следующие результаты:

- При взрывах отдельных шпуровых зарядов на расстоянии более 40 см остаточных деформаций в трубах не наблюдалось.
- При взрыве 1,5 кг скального аммонита №1 в замороженном песке на расстоянии 20 см в трубе диаметром 152х8 образовалась вмятина, длиной 520 мм, шириной 85 мм и глубиной 7 мм.
- При взрыве 1,2 кг детонита 10А в замороженном песке на расстоянии 12 см в трубе диаметром 146 х8 мм образовалась вмятина шириной 120 мм, длиной 440 мм, глубиной 58 мм).
- При взрыве на наклонном стволе №2 Михайловского ГОКа, на расстоянии 12 см от колонки, в песке, в трубе ТЗК-2 (146х8) в месте большого предварительного наклепа образовалась трещина длиной 398 мм и шириной 12 мм.

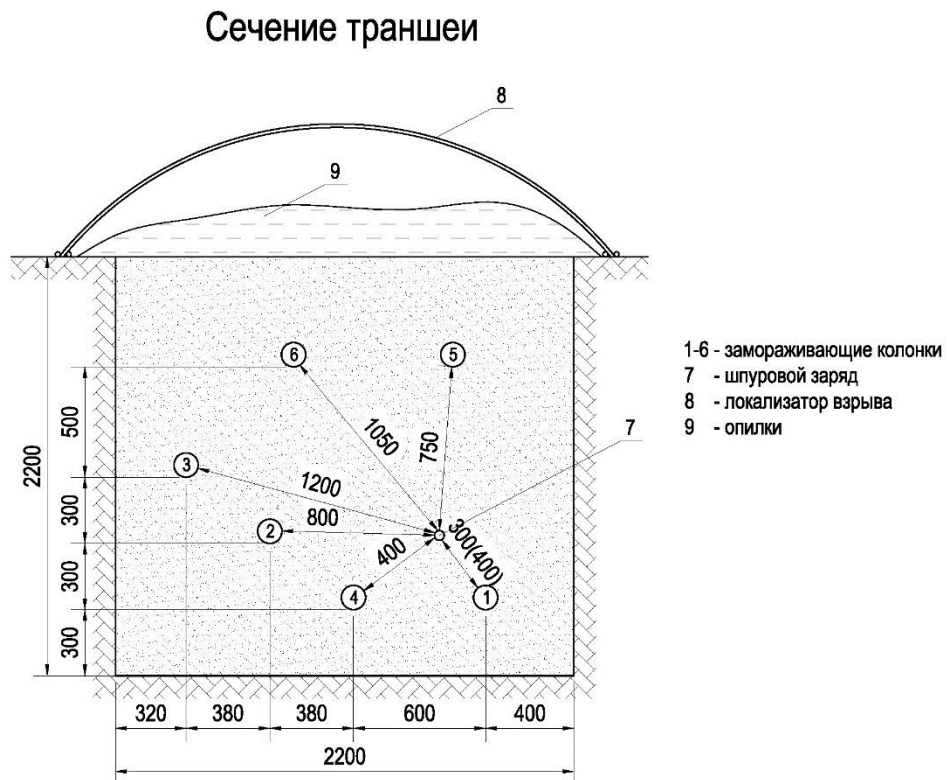


Рис. 2.6. Схема горизонтального стенда

Результаты экспериментальных взрывов приведены в табл. 2.2., из которой видно, что образование вмятины происходит при взрывании более 1,5 кг взрывчатого вещества на расстоянии менее 20 см от замораживающей колонки. На более значительных расстояниях (более 30 см) повреждений колонок не зафиксировано. Следовательно, прямой ударной волной невозможно разрушить замораживающие колонки, расположенные на расстоянии более 1,5 м, как бывает на практике.

Таблица 2.2.

Параметры деформаций труб при взрыве на стенде.

№	Кол. ВВ, кг	ВВ	Расстояние до замораживаю щих труб, см	Тип труб	Вид деформации и размеры, мм
1	1,5	Детонит А10	12	ТЗК-2	Вмятина
				146x8	520x120x58
2	1,2	Скальный аммонит	20	152x8	Вмятина
					520x85x7
3	1,9	Скальный аммонит	12	ТЗК-2	Трещина
				146x8	610x85x8
4	1,2	Аммонит 6ЖВ	20	ТЗК-2	Вмятина
				146x8	500x120x42
5	2	Скальный аммонит	20	ТЗК-2	Трещина
				146x8	570x90x8
6	1,8	Аммонит 6ЖВ	16	ТЗК-2	Вмятина
				146x8	500x108x12
7	1,5	Аммонит 6ЖВ	12	ТЗК-2	Вмятина
				146x8	520x85x7
8	2	Скальный	16	152x8	Трещина

		аммонит			605х40
9	1,2	Скальный аммонит	16	152х8	Вмятина
					520х85х7
10	1,2	Детонит А10	12	152х8	Вмятина
					520х85х7

На основании полученных результатов деформации замораживающих труб, обычно применяемых в шахтном строительстве, можно констатировать, что под действием динамического нагружения одиночного взрыва в непосредственной близости от эпицентра (40 см при массе заряда до 2-х кг) колонка, теряющая устойчивость, получает одну глубокую вмятину, что соответствует критической потере устойчивости третьей переходной формы. Тем самым подтверждается вывод А.С.Вольмира [23], что при динамическом нагружении оболочки образуются более глубокие вмятины, чем при статическом нагружении. В работе Х.Линка также упоминается, что наряду с основными формами имеются и переходные формы критической потери устойчивости, при этом деформация при переходной форме может быть более глубокой, чем при основной.

Второй натурный эксперимент [42] был выполнен в стволе В-4 Первомайского рудника. В стенках забоя ствола, а также в самом забое за оконтуривающим рядом были установлены индукционные датчики скорости на расстоянии 50 см вглубь ледопородного ограждения на различных расстояниях от груди забоя, позволяющие установить закономерности деформаций, возникающих в замороженных породах при взрывах. Зная напряженное состояние массива и колонок, а также допустимые напряжения массива и колонок при условиях взрывного нагружения, можно установить возможность разрушения колонок при взрыве. По результатам проведенных экспериментов получены следующие практические данные:

- сейсмограммы от взрыва всех основных видов шпуров: врубовых, промежуточных (третьего и пятого) ряда и оконтуривающих;
- сейсмограммы от взрыва забоя в стенках незакрепленной части ствола на различных расстояниях от груди забоя;
- исследована зона трещинообразования на внутреннем контуре ледопородного ограждения от БВР;
- получены формы и виды деформации замораживающих труб при действии сосредоточенного заряда ВВ.

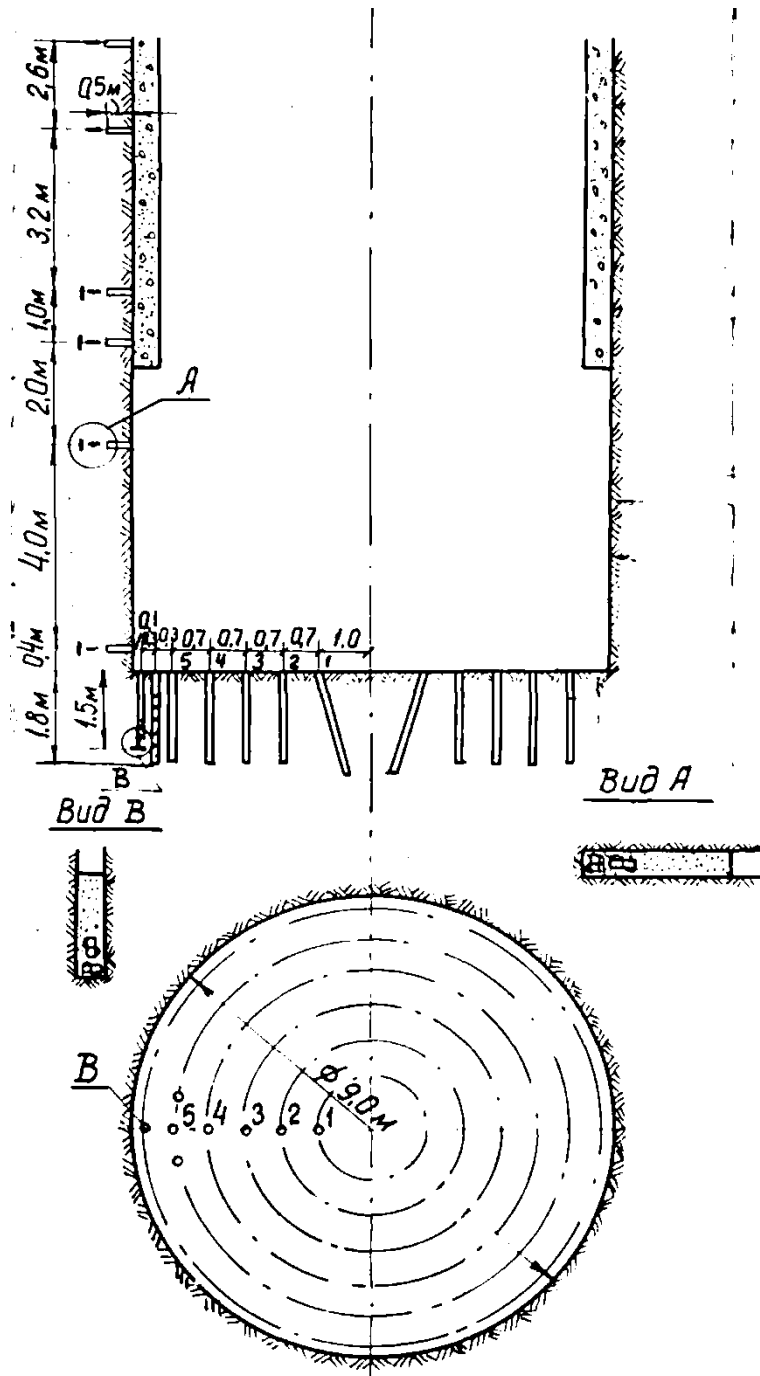


Рис. 2.7. Схема установки индукционных датчиков в стволе.

Для каждого ряда шпуров были определены зависимости скорости смещения грунта от расстояния до забоя по следующим зависимостям:

$$\begin{cases} V_{r_k}^{max} = Ar_k \cdot e^{-\alpha l_k Z} \\ V_{Z_k}^{max} = AZ_k^{max} \cdot e^{-\alpha l_k Z} \end{cases} \quad (2.11)$$

$$\begin{cases} V_{r_k}^{cp} = Ar_k^{cp} \cdot e^{-\beta l_k Z} \\ V_{Z_k}^{cp} = AZ_k^{cp} \cdot e^{-\beta l_k Z} \end{cases} \quad (2.12)$$

где $V_{r_k}^{max}$ – максимальные значения амплитуд скоростей смещения для каждого ряда в радиальном и вертикальном направлениях, см/сек;
 $AZ_k^{max}, Ar_k^{cp}, AZ_k^{cp}$ – постоянные коэффициенты для каждого ряда ;
 $\alpha l_k Z$ - коэффициент затухания для каждого ряда;
 Z - расстояние от точки наблюдения до забоя в вертикальном направлении.

Значения коэффициентов, которые определялись по методу наименьших квадратов по формулам (2.10) и (2.11), приведены в табл.2.3

Амплитуда скорости смещения A первого ряда шпуров (врубовые) почти ничем не отличается от амплитуды скорости взрывания оконтуривающих шпуров и предыдущих отбойных рядов. Заряды вруба взрываются в зажиме без ЛНС, и поскольку для них характерна небольшая концентрация ВВ на единицу объема взрываваемой породы, то колебания от взрыва одиночных шпуров вруба складываются в единый нагрузочный импульс.

Таблица коэффициентов

Таблица № 2.3

№№	A_r^{max}	A_z^{max}	A_r^{cp}	A_z^{cp}	α_r	α_z	β_r	β_z
1	71,93	64,72	50,91		0,78	0,65	0,67	
2	51,42	72,97	41,98	40,25	0,66	0,76	0,76	0,67
3	56,26	76,71	55,70	43,33	0,65	0,70	0,77	0,67
4	66,02	79,84	56,91	53,91	0,69	0,64	0,74	0,67
5	76,71	74,44	63,82	67,83	0,68	0,61	0,84	0,80
6	75,94	72,97	58,32	52,67	0,68	0,63	0,80	0,78

По результатам замеров сделан вывод: « Воздействие на ЛПО при взрывании вруба может оказаться больше, чем последующих рядов, несмотря на то, что шпуры вруба расположены на наибольшем расстоянии от контура заходки» [35].

Экспериментальные данные позволили выявить следующую закономерность: по разности времени прохождения волны в точках наблюдения, отстоящих друг от друга на определенном расстоянии, можно установить скорость распространения волны в незакрепленной части

заходки. В среднем, скорость распространения равна $4,1 \cdot 10^3$ м/сек, что соответствует скорости распространения продольных волн в замороженном песке. Ниже, в таблице 2.4., приведены величины периодов колебаний скоростей смещения породного контура в зависимости от расстояния от оси шпуров до контура породных стенок ствола.

Таблица № 2.4

Средние периоды колебаний в радиальном направлении	г,м	3,7	3,0	2,3	1,6	0,9	0,2
	Т,мс	2 ,41	1,62	1,67	1,7	1,39	1,46
Средние периоды колебаний в вертикальном направлении	г,м	3,7	3,0	2,3	1,6	0,9	0,2
	Т,мс	2 ,47	1,92	1,89	1,74	1,58	1,82

Следовательно, воздействие отраженных сейсмических волн от предыдущего взрыва на незакрепленную часть стенки ствола в ледопородном ограждении распространяется вверх по ледопородному ограждению ствола на расстояние, равное радиусу ствола в проходке. При этом ледопородное ограждение в пройденной и закрепленной части ствола не испытывает воздействия продольных и поперечных волн при взрыве забоя ствола.

«Сферический излучатель упругих волн» предусматривает излучение прямой волны по радиусу от точки взрыва. При этом неупругие деформации массива при взрыве сферического заряда возможны только в ближней зоне до 20-30 см при массе ВВ до 5 кг. Далее прямые волны распространяются в виде упругого сжатия, и они никак не могут вызвать развитие трещин или отколов, которые могут возникнуть только под воздействием отраженных волн. Следовательно, в незакрепленной части заходки датчики регистрируют скорость распространения продольной волны, а не поперечной, как предполагалось ранее. Нужно отметить, что в проанализированной отечественной [37, 92] и зарубежной [116] научной

литературе рассматривается воздействие на замораживающие колонки только прямой взрывной волны сжатия при малых величинах шпурового заряда (1-5кг). При этом замороженный массив рассматривается как монолитный и прочный.

По данным эксперимента на стволе В-4 в данной диссертации построена схема распространения продольных волн при проходке ствола диаметром 9м буровзрывным способом шпурами 1,8 м в обводненных песках, на которой показано положение замораживающих колонок и толщина ледопородного ограждения. На Рис.2.8. показано возможное прохождение взрывной волны от каждого из зарядов (патрона) в шпуре, как от сферического излучателя прямых и преломленных волн, которые от наружного контура ледопородного ограждения, как от отраженной поверхности, возвращаются к стенкам ствола в проходке.

Следовательно, датчиками, установленными на вертикальной стенке забоя на расстоянии 0,4; 2,4м; 3,4м, как показано на (Рис.2.8), регистрируются волны, отраженные от внутренней поверхности ЛПО. Из предлагаемой схемы очевидно, что отраженная волна не воздействует на датчики, расположенные на расстоянии 6,6 м от забоя.

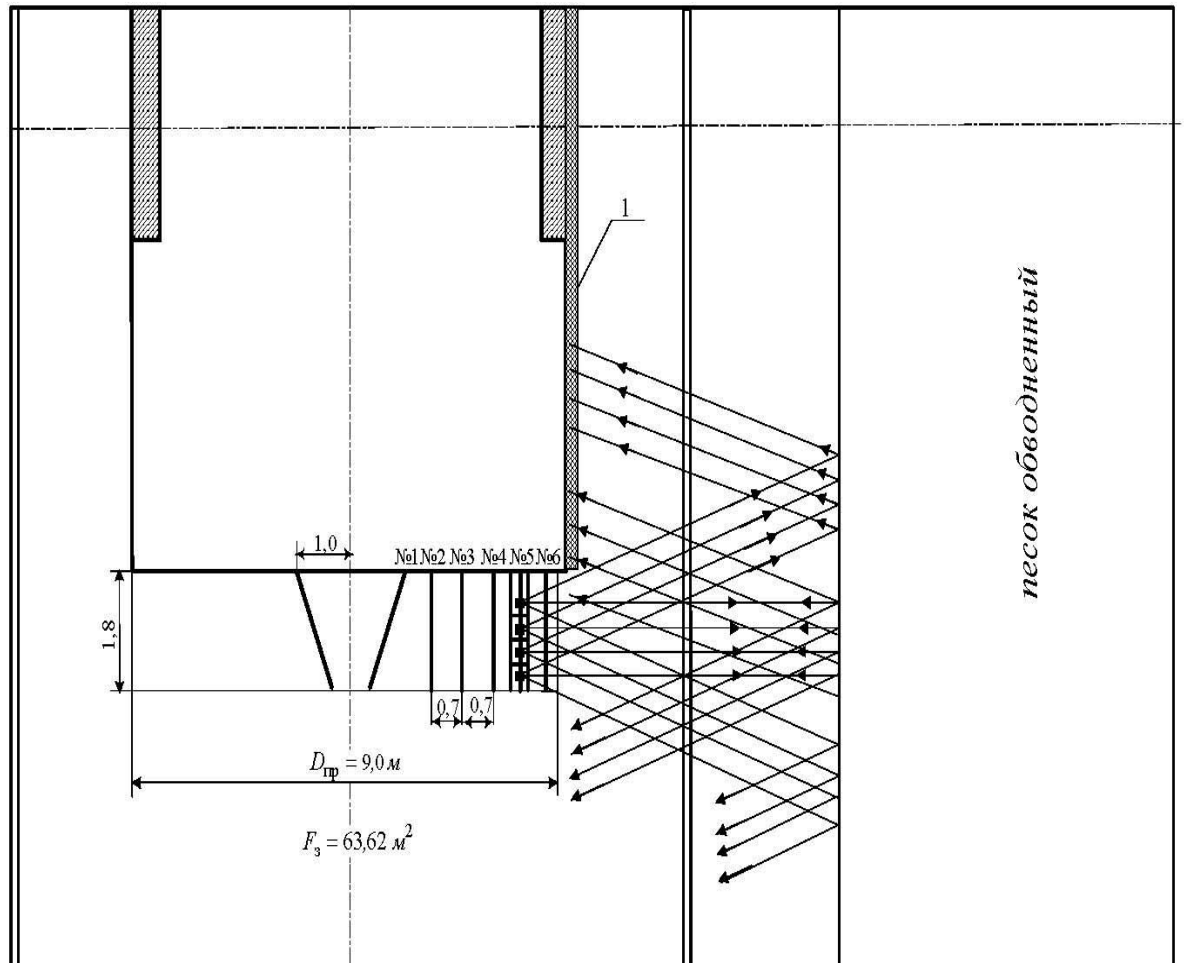
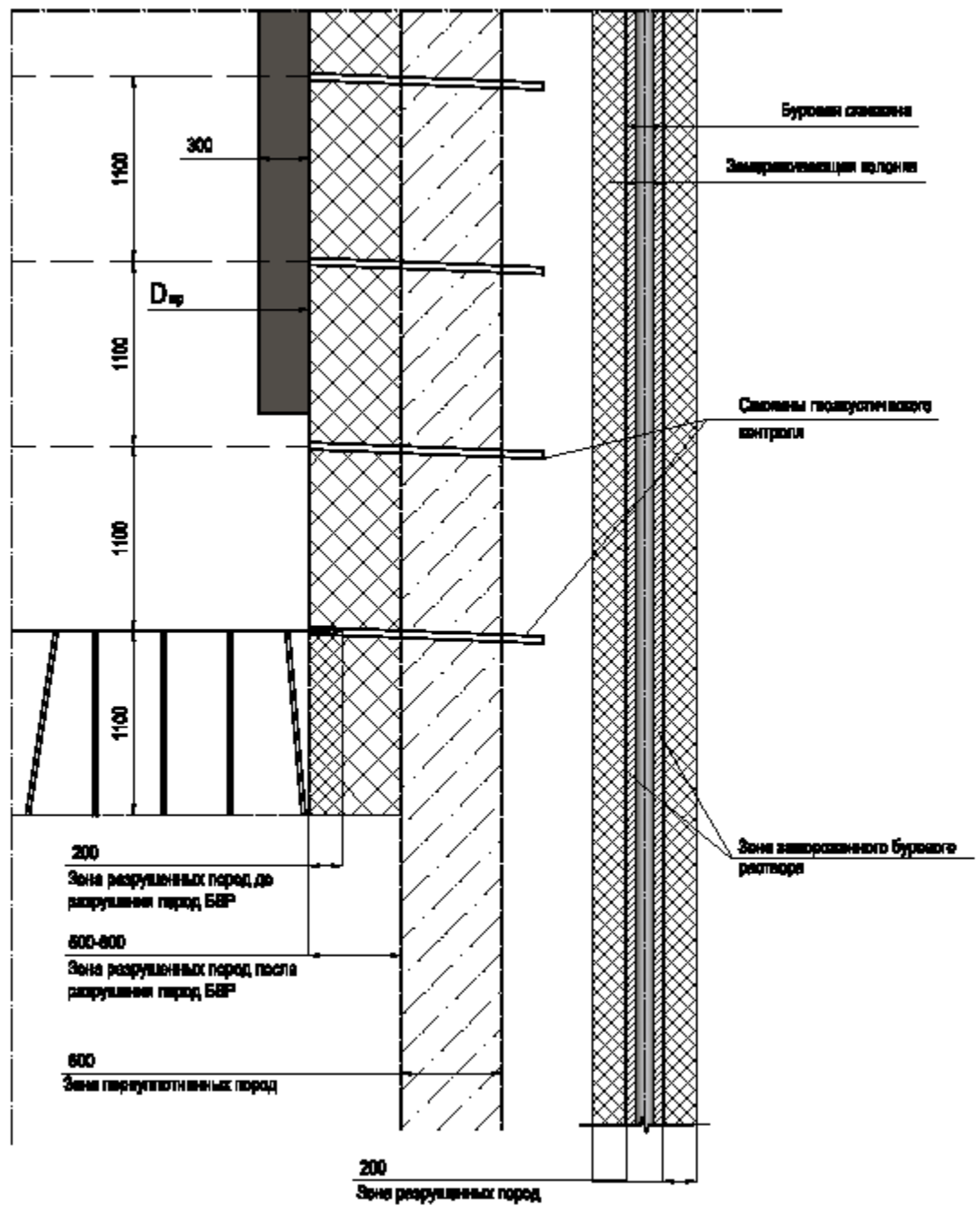


Рис. 2.8. Схема отражения продольных волн от внутренней поверхности ЛПО.

Из рассмотренного нами материала следуют следующие выводы:

1. Наружная поверхность ледопородного ограждения с температурой, близкой к нулю, является поверхностью отражения продольных волн сжатия при ведении взрывных работ в забое ствола.

2. При применении БВР отраженная волна растяжения в зоне, равной радиусу ствола в проходке, образует зону разрушенных пород в стенках ствола в пределах 0,2-0,4 м (Рис.2.9.), которую надо учитывать в расчете ледопородного ограждения.



2.4. Влияние буровзрывных работ в стволе на прочность и устойчивость замораживающих колонок

Анализ статистических данных, проведенный в главе 1 показал, что в большинстве случаев массовые разрушения замораживающих колонок происходят при применении буровзрывного способа разрушения замороженных пород в забое ствола. В нормативной литературе не указывается на какие - либо особенности взрывания замороженных пород.

В немногочисленных статьях профессиональных взрывников утверждается только, что деформирование замораживающих колонок возможно ударной волной, а это 25-30 см от центра шпура. Теоретически, упругой прямой волной на расстоянии, большем 30 см от центра шпура, разрушить такую жесткую конструкцию, как стальная замораживающая колонка диаметром 100-140 мм при толщине стенки 5-9 мм, невозможно.

При проходке ствола буровзрывным способом от взрыва шпуровых зарядов образуются ударные волны сжатия, формирующие напряженно-деформированное состояние замороженного массива горных пород.

Согласно волновой гипотезе разрушения [15], в первоначальный момент от стенок зарядной скважины начинает распространяться ударная волна. Под действием давления на фронте этой волны замороженный массив разрушается. Зону разрушения пород в результате действия сжимающих напряжений ударной волны называют зоной раздавливания. Исследованиями [33] установлено, что обычно зона разрушения не превышает размеров $2-5 r_{\text{заряда}}$. К зоне раздавливания непосредственно примыкает зона трещинообразования, в пределах которой сжимающие напряжения на фронте ударной волны меньше пределов прочности пород в массиве. Размеры зоны трещиноватости не превышают $10-15 r_{\text{заряда}}$. За пределами трещиноватой зоны ударная волна становится пластической, а

затем переходит в упругую [34]. Далее за этой зоной распространяются продольные и поперечные волны с постоянной скоростью. Зоны разрушенных пород от взрыва шпуровых зарядов - это зоны, которые приурочены к зоне выемки пород при проходке и они не влияют на состояние замораживающих колонок. Для решения практических задач по определению условий герметичности замораживающей колонки необходимо изучить явления, происходящие в ближней и дальней зоне влияния взрыва.

Распространяющаяся при взрыве ударная волна представляет собой однократный импульс. Фаза сжатия радиальных напряжений представляет собой полуволну с крутой головной частью. По мере удаления волны от места взрыва экстремум волны убывает и перемещается в среднюю часть. Величина максимальных напряжений возрастает с увеличением жесткости пород и мощности ВВ.

В зоне неупругих деформаций волна напряжений представляет собой однократный симметричный импульс, состоящий из фаз сжатия и растяжения, длина волны имеет max значение при значении напряжений, равному пределу упругости пород. В момент распространения продольной волны частицы массива совершают колебательные движения вдоль направления волны, а материал испытывает напряжения сжатия и растяжения. В поперечной волне материал испытывает деформацию сдвига. В результате воздействия прямых падающих волн напряжений на свободную поверхность вдоль этой поверхности начинают распространяться боковые поверхностные упругие волны, называемые волнами Релея. Скорость распространения волн Релея всегда меньше скорости продольной и поперечной волны.

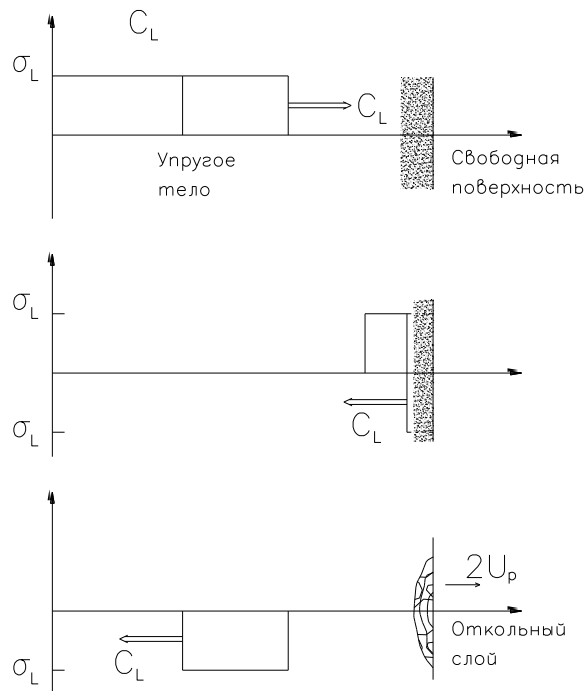
Интенсивность затухания этих волн значительно меньше, поэтому эти волны при наличии свободной поверхности могут распространяться с колебаниями значительных амплитуд. При распространении упругих волн

в однородном массиве разрушения колонок не происходит. Если на пути распространения волны встречается свободная поверхность (трещина), то возникает концентрация напряжений и очаг разрушений.

Простая волна сжатия распространяется с постоянной скоростью C_L в однородной среде. Давление P_1 , плотность Q и массовая скорость U_L увеличиваются в области сжатия в волне и возвращаются к своим начальным значениям после прохождения волны. Массовая скорость (скорость материальных частиц) существенно меньше скорости распространения волны. Направление массовой скорости U_L в волне сжатия продольное, вектор скорости параллелен направлению распространения проходящей волны.

На Рис.2.9.а) показано, как прямоугольный импульс сжатия подходит к свободной поверхности и полностью отражается в виде импульса растяжения. Для любой волны, упругой или нет, падающей на границу раздела двух сред, свойства которых сильно различаются, должны выполняться законы сохранения определенных физических величин. Когда импульс подходит к границе раздела, рождается новая упругая волна, которая поддерживает нулевое нормальное напряжение. Так как упругие волны в одном случае должны распределяться влево или вправо со скоростью C_L , а импульс, образовавшийся на свободной поверхности и движущийся вправо, не может влиять на напряжения в упругой среде, на поверхности возникает импульс, движущийся влево. Для поддержания нулевого нормального напряжения на границе необходимо, чтобы этот импульс был растягивающим для обеспечения равенства нулю суммы двух продольных напряжений с амплитудой σ_L .

а) Отражение упругой волны от свободной поверхности



б) Отражение импульса давления от поверхности раздела между высоко и низкоскоростным материалом

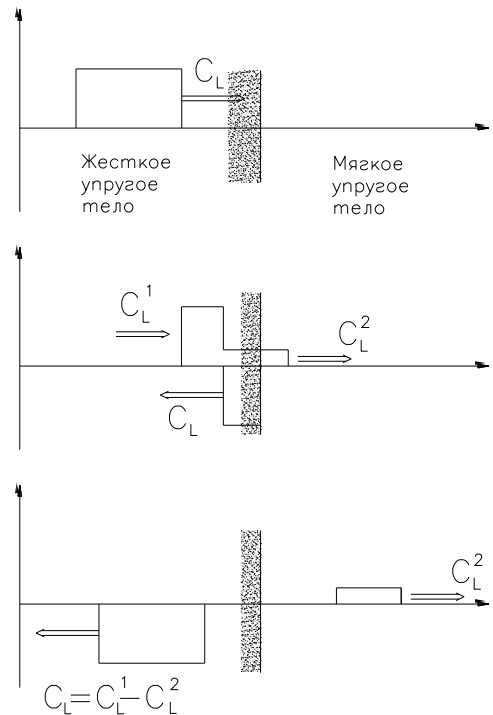


Рис.2.9. Отражение импульса давления от поверхности раздела.

C_L - отраженная скорость

σ_l - амплитуда напряжения.

U_p - массовая скорость

После образования на границе растягивающегося импульса он без изменений распространяется влево, так как в среде нет других источников упругих волн. Растягивающий и сжимающий импульсы, движущиеся соответственно влево и вправо на протяжении некоторого короткого времени, перекрываются. Так как волны линейны, полное напряжение является суммой напряжений в каждом из импульсов в данный момент времени. Хотя нормальное напряжение на свободной поверхности равно нулю, массовая скорость имеет конечную величину.

Массовая скорость в импульсе сжатия в правой части определяется уравнением $\sigma_L = -\rho_0 U_L C_L$, равна $U_L = \frac{\sigma_L}{\rho_0 C_L}$.

Однако, в этой части импульс растяжения также создает массовую скорость U_L , в результате противоположности знаков как напряжения, так и направления распространения. Полная массовая скорость в течение времени взаимодействия в правой части равна $2U_L$.

Этот результат известен в физике как правило удвоения скорости.

На (Рис.2.9. б) показано взаимодействие прямоугольного импульса сжатия, движущегося вправо с границей раздела двух сред, где скорость справа (850 м/сек) меньше скорости слева (4300 м/сек). Случай б) подобен отражению от свободной поверхности, за исключением того, что непрерывность массовой скорости и нормального напряжения при переходе через границу требует возникновения третьего, распространяющегося вправо от границы раздела импульса сжатия. Как и прежде, импульс растяжения отражается влево от границы [57]. Так как энергия первичного импульса делится между прошедшими сжимающими и отраженным – растягивающим импульсом, отраженный импульс в этом случае по амплитуде меньше, чем при отражении от свободной поверхности. Отсюда, для нашего примера, отраженная растягивающая скорость $C_L = 4300 - 850 = 3450$ м/сек, что составляет 80% от сжимающей скорости прямой волны.

Обрабатывая результаты натурных измерений, определена амплитуда отраженной волны, которая для второго – шестого рядов соответственно имеет значения 0,76; 0,77; 0,74; 0,84; 0,8. В среднем амплитуда составляет 0,78. По нашим значениям 0,8.

Таким образом, для конкретного ствола В-4 отраженная скорость составляет 0,8 C_L (сжатия).

Определим напряжения на контуре скважины при воздействии продольных сейсмических волн.

При нормальном расположении замораживающих колонок от внутреннего контура ствола в проходке при взрывных работах по выемке пород в забое ствола к контуру буровой скважины подходит волна сжатия. При этом, как показали исследования различных авторов, в случае рассредоточенных зарядов в стволе до колонок распространяются цилиндрические волны, которые на расстоянии $\approx 1\text{ м}$ образуют общий фронт одномерной волны с характерным одноимпульсным воздействием. В забое одновременно с одним замедлением взрывается один ряд буровых скважин. Таким образом, на буровую скважину воздействует не более 5-6-кратных импульсов, определяемых замедлением между взрывами очередных рядов.

Скорость продольной волны сжатия пропорциональна модулю объемного сжатия и модулю сдвига μ . На контуре буровой скважины при нормально работающей системе замораживания температура минимальна и почти равна температуре стенки колонки. При этом и прочность замороженной породы на контуре буровой скважины максимальная.

В результате распространения упругой волны сжатия от взрыва вруба замороженный породный массив подвергается однократному попеременному воздействию напряжений сжатия и растяжения. При этом скорость упругой волны определяется модулем объемного сжатия K_0 на контуре ствола в проходке, где температура пород в 2 раза выше, чем на контуре скважины. При движении этой волны сжатия происходит некоторое уплотнение замороженного массива пород.

В момент, когда фронт падающей волны сжатия достигает контура буровой скважины (контур сечения которой близок к круговой), напряжение сжатия становится в 2-3 раза больше, чем в однородном замороженном массиве при более низких температурах. В этот момент на

контуре буровой скважины происходит « вырождение» волны сжатия и «зарождение» отраженной волны растяжения. При одноимпульсной волне сжатия с продолжительностью воздействия $\approx 0,1$ сек разрушение замороженного массива на контуре произойти не может.

В процессе образования отраженной одноимпульсной волны растяжения наступает момент, когда энергия падающей волны сжатия исчезает, а силы упругости, противодействующие смещению контура скважины, достигают максимального значения. В этот момент контур скважины сначала останавливается, а затем начинает движение в обратном направлении, стремясь вернуться в первоначальное положение. В момент остановки контура дальнейшее формирование отраженной волны растяжения прекращается, и вся волна начинает перемещаться вглубь замороженного массива. В момент, когда напряжения на фронте одноимпульсной отраженной волны достигнут предела прочности пород на растяжение, в приконтурной части массива, параллельно контуру скважины, появляется трещина, которая в дальнейшем при новых импульсах либо может развиваться, либо может перерасти в откол.

При следующем воздействии одноимпульсной волны сжатия от взрыва первого контура отбойных шпуров массив вокруг буровой скважины работает как составной с первой трещиной. При воздействии волны сжатия на массив происходит развитие трещины, а в заключительной стадии отражения происходит деформация кольца и его скол без перемещения. Третий взрыв производит откол и развитие в массиве второй трещины откола. Четвертый взрыв производит смещение по второй трещине и намечает скол. При пятом взрыве происходит откол со смещением. При шестом взрыве оконтуривающих шпуров намечается третья трещина, и процесс максимального воздействия на замороженный массив на этом заканчивается (Рис.2.10.).

При взрывании следующей заходки на данное место воздействуют уже преломленные волны отражения или преломленные волны сжатия, а они, как минимум, на 0,7-0,8 меньше предельного воздействия.

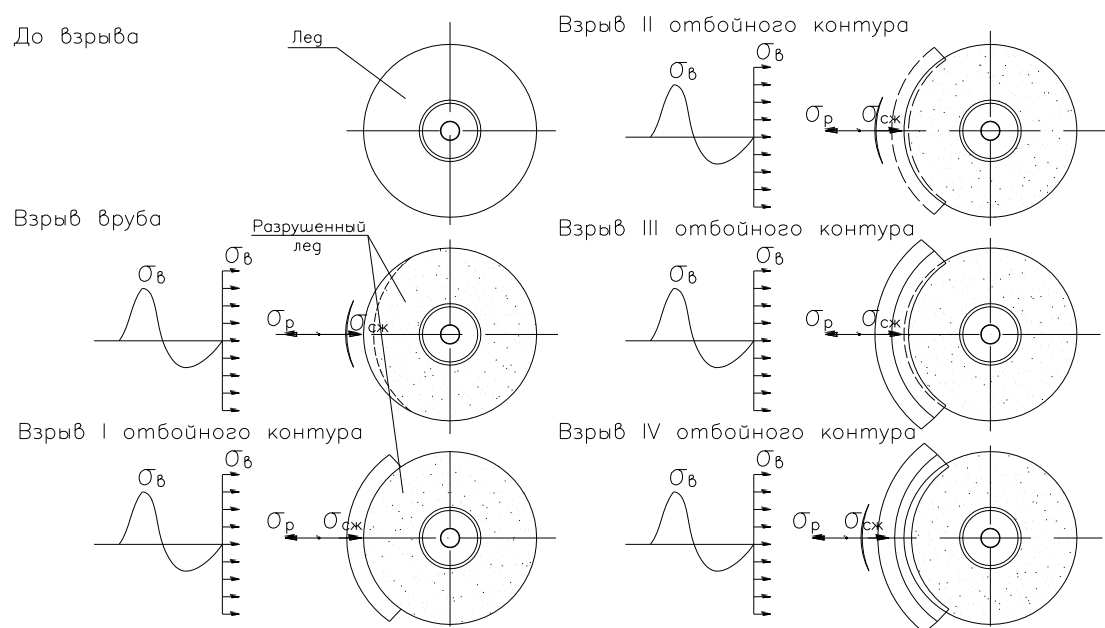


Рис.2.10. Воздействие ряда импульсов взрывной волны на замораживающую скважину.

В работе Г.В.Фраша [118] проанализированы особенности взрывания мерзлых грунтов. Он подчеркивает, что процессы в них протекают иначе, чем в талых и прочных породах. Автор отмечает, что « деформирование мерзлого грунта в ближней зоне происходит так же, как и в других средах, но при этом необходимы дополнительные затраты энергии на фазовое превращение льда, что уже на этой стадии повышает энергоемкость процесса разрушения. Размер полости, получаемой в мерзлом грунте, в

1,5-1,7 раза меньше, чем в талом. Это является следствием большей прочности льда и вязкости».

И еще одно наблюдение Г.В.Фраша нужно отметить: «Вследствие больших скоростей нагружения в мерзлом грунте не успевает произойти перекристаллизация льда и переориентировка кристаллов с образованием плоскостей ослабления, слабо сцементированных между собой, что ведет к повышению сопротивляемости его деформированию». Следовательно, мгновенный взрыв не может привести к разрушению ледопородного массива: в нем сохраняются упругие свойства.

В твердомерзлых грунтах практически не происходит перемещение незамерзшей и образующейся в результате таяния льда воды, в пластично мерзлых же грунтах это имеет место в непосредственной близости к полости. Основным видом деформации мерзлого грунта в этой области является его уплотнение, то есть переупаковка частиц скелета с взаимным их смещением и затратой значительной части энергии на преодоление сил сцепления и внутреннего трения между ними, которые значительно выше, чем в талых грунтах. Вследствие больших затрат энергии на необратимую деформацию давление на фронте взрывной волны резко падает, и на расстоянии $R_0 = (0,6-0,8)$ м ударная волна переходит в волну сжатия, а затем в упругую, не производящую необратимых деформаций».

В работе [106] автор отмечает, что при ведении взрывных работ в полностью замороженном массиве радиус сферы сжатия в твердомерзлых породах находится в пределах $r = (2-3) r_3$ (где r_3 -радиус заряда, 18-20 мм), а в пластично мерзлых $r = (6-8) r_3$. При размещении заряда под твердомерзлыми породами в талом массиве радиус камуфлетной полости несколько больше $R_k = (7-9) r_3$. При этом автор отмечает, что «при работе в двухслойном массиве, представляющем грунтовые полупространства, покрытые слоем замороженного грунта толщиной H (м) с иными физико-механическими свойствами, надо

учитывать отражение и преломление взрывных волн при переходе их через границу раздела». Формально получается, что в двухслойном массиве основное влияние оказывает большая или меньшая камуфлетная полость возле заряда. Почему разрушаются на контакте двух сред при взрывании замораживающие колонки, тем не менее, из этих объяснений непонятно.

Проводимые исследования действия взрывных работ в вертикальном стволе, проходимом способом замораживания, выявили некоторые практические трудности. Главной причиной, обуславливающей эти трудности, является необходимость предварительной установки сейсмических и тензометрических датчиков, а также невозможность установки в вертикальном стволе регистрирующей аппаратуры и присутствия человека.

Проведенные исследования по использованию БВР при проходке стволов способом искусственного замораживания не дают достаточного представления о характере воздействия взрывов на герметичность замораживающих колонок. В связи с этим необходимо провести исследование по определению количественных зависимостей, отражающих воздействие взрывных нагрузок на замораживающие колонки.

Выводы по 2 главе

Рассмотрены основные нагрузки на замораживающую колонку, возникающие в процессе опускания ее в замораживающую скважину и в момент достижения колонкой забоя скважины; а также при эксплуатации, в зависимости от наличия в затрубном пространстве глинистого раствора, вызывающие напряжения растяжения, сжатия и изгиба в материале замораживающих труб. Получены зависимости возможной стрелы прогиба замораживающей колонки от критической глубины опускания колонки.

Определены условия равновесия внутреннего давления хладоносителя в колонке и внешнего давления в затрубном пространстве.

Рассмотрены характерные сложные горно-геологические условия строительства стволов с использованием метода искусственного замораживания, иллюстрируемые литологическими колонками; определена степень влияния неоднородного строения замораживаемого массива горных пород на возможность возникновения аварийных ситуаций.

Наружная поверхность ледопородного ограждения с температурой, близкой к нулю, является поверхностью отражения продольных волн сжатия при ведении взрывных работ в забое ствола

При применении БВР отраженная волна растяжения в зоне, равной радиусу ствола в проходке, образует зону разрушенных пород в стенках ствола в пределах 0,2-0,4 м, которую надо учитывать в расчете ледопородного ограждения

При одноразовых воздействиях 5-6 кратных импульсов волн сжатия на контур буровой скважины не может образоваться зона разрушенных пород, способных сформировать ударное воздействие непосредственно на замораживающую колонку.

Разрушающее воздействие на колонку может создать лишь действие ударных волн вследствие формирования динамического поля напряжений вокруг колонки. Ударные волны при взрыве скважинных зарядов возможны лишь при наличии границ раздела двух сред с различными физико-механическими свойствами и различными значениями скоростей

Последние выводы подтверждаются экспериментальными исследованиями [42], приведенными в главе 1.

3. Исследования влияния взрывной технологии разработки пород на напряженно-деформированное состояние замораживающих колонок

3.1. Постановка задачи исследования

Как было отмечено выше, при применении буровзрывных работ для рыхления замороженных пород в ряде случаев наблюдается разрушение замораживающих колонок, часто находящееся на границе раздела пород. В то же время, когда слоистость пород в геологическом разрезе отсутствует, разрыва замораживающих колонок не наблюдается.

Физическое объяснение данного явления возможно на основе рассмотрения волновых процессов, возникающих в конкретных условиях строительства шахтных стволов при применении буровзрывного способа разработки пород. Ниже будет рассмотрена качественная картина волнового процесса вблизи забоя ствола в двух случаях: без наличия горизонтального раздела слоев пород и при наличии границы. Решение такой задачи вследствие ее чрезвычайной сложности выполнено при определенных допущениях, общепринятых при теоретических исследованиях рассматриваемых ниже волновых процессов, тем более при решении инженерной задачи.

В качестве физической модели рассматриваемого объекта была выбрана так называемая «акустическая среда», в которой рассматриваются только продольные упругие волны без учета сдвиговых и, соответственно, обратных волн.

Как геометрические, так и физико-механические параметры объекта выбираются соответственно средним характеристикам реального объекта. Примем в качестве основных физических и акустических характеристик замороженных и талых пород [112]: скорость продольных волн в замороженном песке $C_{песк}^{зам} = 5600$ м/с; скорость продольных волн в замороженных глинах $C_{гл}^{зам} = 2800 - 3200$ м/с; скорость продольных волн

в талых глинах $C_{\text{гл}}^{\text{мл}} = 2300$ м/с; плотность замороженного песка $\rho_{\text{пес}}^{\text{зам}} = 2,6 \cdot 10^3$ кг/м³; плотность глины $\rho_{\text{гл}} = 2,0 \cdot 10^3$ кг/м³.

Решение задачи проведено в плоскости, соответствующей вертикальному сечению объекта.

В качестве источника волновых процессов в данной модели рассматривается взрыв ВВ в сферической плоскости, характеризующийся приблизительно круговой диаграммой направленности $\Phi(\Theta) \approx 1$ и в дальнейшем считающимся точечным сферическим пульсирующим излучателем, создающим сферические волны при взрыве заряда ВВ в грунте или замороженной породе вблизи зарядной камеры. В зоне, приблизительно равной 3-7 радиусам заряда, формируется ударная волна [71]. В дальнейшем ударная волна преобразуется в упруго-пластичную волну сжатия, для которой, начиная с расстояния $R \approx (1-2)\sqrt[3]{Q}$, где Q - масса заряда ВВ кг, характерно почти упругое поведение. Так для зарядов с массой 1-2 кг данная зона рассматривается в диапазоне $R = 0,794 - 1,6$ м. Данная зона в дальнейшем будет рассматриваться в виде границы очага сейсмических колебаний.

В связи с тем что длительность взрывного импульса давления внутри взрывной полости мала, то и функция давления $P_{\text{взр}}$ от времени приближается по форме к δ -функции, и можно считать, что функция возбуждения при взрыве в ближней зоне характеризуется весьма широким спектром, содержащим самые разные частоты. Кроме того, уже в упруго-пластической зоне взрывные импульсы представляют собой волновые дуги с квазигармонической заполняющей, соответствующей резонансным колебаниям взрывной полости. Вследствие этого дальнейшее решение волновых задач для данного объекта будет производиться для гармонического источника.

На основании многочисленных экспериментальных исследований по изучению видимой частоты сейсмического взрывного импульса, проведенных как в натурных условиях, так и на моделях [99,124], было получено, что для зарядов массой 1-2 кг видимая частота сейсмического импульса соответствует $f = 4000 \text{ Гц}$. Далее именно данное значение частоты будет соответствовать источнику волновых процессов в рассматриваемой физической модели исследований.

3.2. Влияние взрывной волны на замораживающие колонки в однородном замороженном массиве

В случае отсутствия горизонтальной границы раздела ниже забоя ствола основные волновые процессы в результате произведенного взрыва возникают в вертикальном неоднородном слое, примыкающем к боковой границе (стенке ствола).

Данный слой, ширина которого h_g варьируется от 0.2 до 0,3 м и характеризуется двумя акустическими границами раздела: 1) резкая граница (1), на которой наблюдается резкий скачок скорости продольных волн, состоит из двух частей: а) при $Z \leq l_3$ акустически мягкая граница с коэффициентом отражения по давлению $V \approx -1$; б) при $Z > l_3$ - акустически жесткая граница $V \approx 1$; 2) нерезкая граница (2), на которой имеет место плавный переход скорости C_p от значений в талых породах $C_{gl}^{тл} = 2300 \text{ м/с}$ до средних значений в замороженных породах $C_{gl}^{зам} = 3000 \text{ м/с}$. Данный слой называется градиентным или переходным слоем.

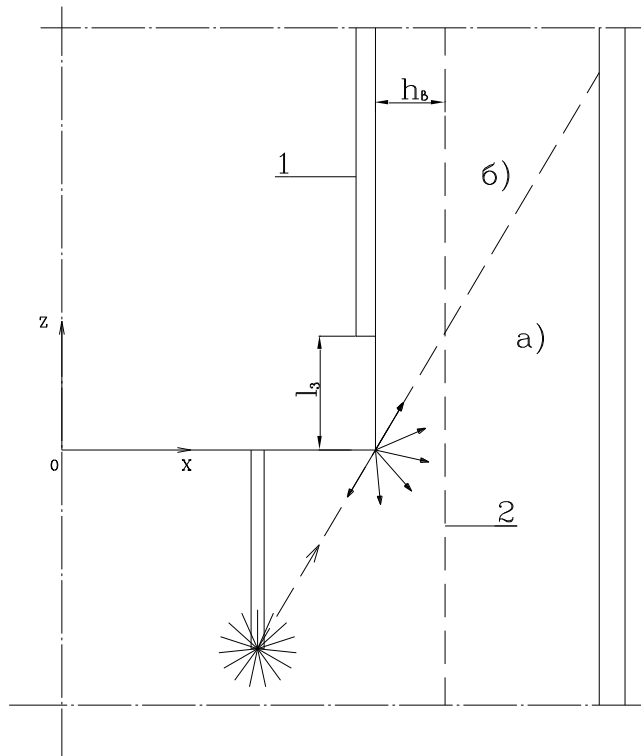


Рис.3.1. Физическая модель объекта при отсутствии горизонтальной границы раздела. 1- крепь ствола, 2- ледопородное ограждение

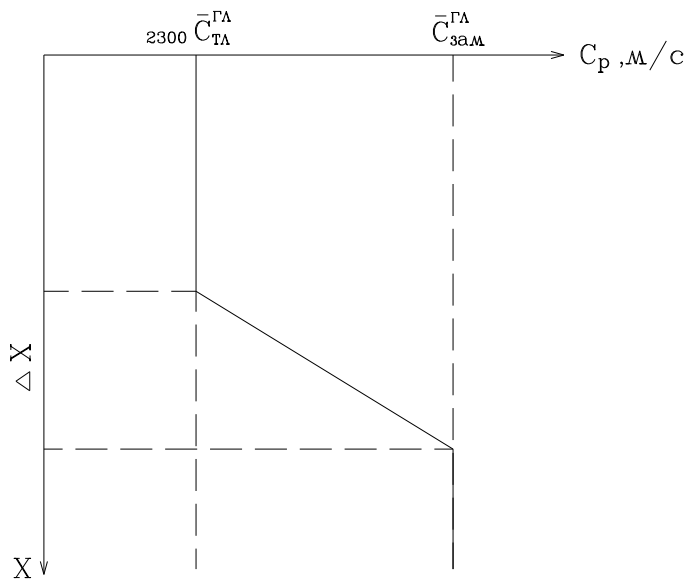


Рис.3.2. Разделение скорости на нерезкой границе слоя.

При действии точечного гармонического источника с частотой возбуждения f внутри рассматриваемого слоя возможно возникновение трех основных волновых процессов:

1. дифракция волн на краю полуплоскости – на внешнем ребре забоя ствола.

2. волноводное распределение волн вдоль слоя как в приповерхностном канале.

3. возникновение толщинного резонанса.

На основании теории дифракции Рубиновича-Кирхгофа, при взаимодействии падающей сферической волны на краю полуплоскости пространство за ним разбивается на две зоны: а) - зону света и б) - зону тени. При этом в зоне тени и зоне света будет создаваться дополнительное дифракционное поле ψ_g , возникающее на самом краю полуплоскости, которое достаточно равномерно во все стороны рассеивает падающую волну. Приблизительно это поле определяется следующим образом [11].

$$\psi_g \approx -\frac{1}{2\sqrt{2\pi k}} \cdot \frac{e^{-j\left(kR + \frac{\pi}{4}\right)}}{\sqrt{\rho_0 r_0 R}} \operatorname{tg}\left(\frac{\varphi - \varphi_0}{2}\right), \quad (3.1.)$$

где $k = \frac{\omega}{C_{zl}^{m,l}}$ - волновое число, ρ_0 - кратчайшее расстояние от края полуплоскости до источника I ; r_0 - кратчайшее расстояние от точки наблюдения до края полуплоскости; R - расстояние между источником и точкой наблюдения; φ_0 - угол падения волны между плоскостью, проходящей через дифрагирующий край, и направлением на источник; φ - полная координата точки наблюдения.

Расчет ψ_g показывает, что дифракционный член поля в каждом направлении переизлучения падающей волны значительно меньше поля падающей волны, то есть поля в зоне света ψ_0 .

При волноводном распределении в градиентной среде при линейном возрастании скорости на второй границе раздела:

$$C(x) = C_{zl}^{m,l} \left(1 + \frac{a}{x}\right), \quad (3.2.)$$

где $a = \frac{1}{\Delta x} \frac{(\bar{C}_{\text{зл}}^{\text{зам}} - \bar{C}_{\text{зл}}^{\text{мл}})}{\bar{C}_{\text{зл}}^{\text{мл}}}$ - относительный градиент скорости (3.3.)

в случае лучевого приближения будет наблюдаться периодическое искривление звуковых лучей и их переотражение на другой (резкой) границе данного слоя (Рис.3.3.).

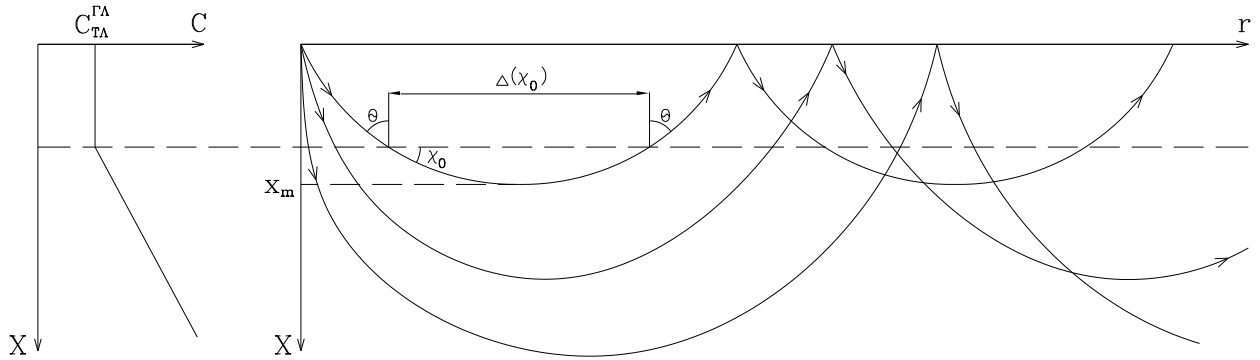


Рис.3.3. лучевая картина волноводного распределения в вертикальном слое с линейно неоднородной границей.

Уравнение луча в этом случае будет определяться углом скольжения точки наблюдения $X(x)$ и углом выхода каждого луча из источника X_0 [11].

$$r = \frac{1}{a \cos X_0} [\sin X_0 + \sin X(x)] \quad (3.4.)$$

Длина цикла каждого луча $\Delta(X_0)$ и координата точки заворота этого луча определяются по формуле:

$$\Delta(X_0) = \frac{2 \operatorname{tg} X_0}{a}; X_m = \frac{1 - \cos X_0}{a \cos X_0}, \quad (3.5)$$

В результате, часть волновой энергии, попадающей под разными углами скольжения $X(x)$ внутрь вертикального слоя мощностью h_e , будет распространяться внутри этого слоя, мало проникая за вторую градиентную границу.

Одним из основных волновых эффектов, приводящих к разрушению замораживающих колонок, является толщинный резонанс, возникающий при прохождении упругих волн через слой. Сущность толщинного резонанса заключается в том, что если при падении на слой гармонической волны частотой f_p толщина данного слоя h_g будет составлять половину падающей на слой длины волны λ_p ,

$$h_g = n \frac{\lambda_p}{2} = n \frac{C_p}{2f_p}, n=1,2,3,\dots (3.6.)$$

то в слое будут иметь место резонансные явления, выражающиеся в резком увеличении амплитуды упругих колебаний внутри слоя.

Причиной толщинного резонанса будет служить эффект образования стоячих волн внутри слоя вследствие совпадения по частоте f_p фазы, падающей и отраженной от внутренней границы слоя волн. Так если коэффициент отражения от границы слоя $|V|=1$ и амплитуда отраженной волны A_{omp} равна амплитуде падающей волны $A_{nad} = A_{omp}$, то в слое будет наблюдаться классическая стоячая волна:

$$\psi_{cm} = \psi_{nad} + \psi_{omp} = 2A \cos(kx - \alpha) \cos(\omega t - \beta), (3.7.)$$

где α, β - возможные начальные фазовые сдвиги стоячей волны.

Если $|V| < 1$ и $A_{nad} \neq A_{omp}$, помимо стоячей волны в слое образуется также еще и бегущая волна с амплитудой a , что приводит к уменьшению амплитуды стоячей волны $B (B < 2A)$:

$$\psi_{cm} = \psi_{nad} + \psi_{omp} = B \cos(kx - \alpha) \cos(\omega t - \beta) + a \cos(kx - \omega t - \gamma), (3.8)$$

В этом случае степень проявления резонанса несколько ниже, чем при $|V|=1$. При этом, чем меньше величина коэффициента отражения от границы слоя, тем в меньшей степени проявляется толщинный резонанс.

Таким образом, для оценки возможности проявления толщинного резонанса в слое с нерезкими границами необходимо оценить коэффициент отражения от такой градиентной границы.

Задача сводится к решению волнового уравнения:

$$\Delta\Psi + k^2(X)\Psi = 0 \quad (3.9)$$

при заданном законе изменения величины волнового числа $k(X) = \frac{\omega}{C(x)}$ в зависимости от координаты x , вдоль которой наблюдается изменение скорости $C(x)$.

Решение уравнения (4.9) находится методом разделения переменных $\Psi(x, z) = X(x)Z(z)$ при этом функция $X(x)$, в которую входит зависимость, $K(x)$ преобразуется в гипергеометрическое уравнение

$$\frac{d^2 F}{d\xi^2} - \frac{(\alpha + \beta + 1)\xi - \gamma}{\xi(1-\xi)} \frac{dF}{d\xi} - \frac{\alpha\beta}{\xi(1-\xi)} F = 0 \quad (3.10)$$

где α, β, γ - параметры, ξ - переменная.

Решение данного уравнения позволяет определить коэффициент отражения от неоднородного слоя с непрерывным изменением скорости $C(x)$ на границе, в частности для случая переходного слоя с характером зависимости скорости $C(x)$, аналогичным зависимости, представленной на (Рис.3.2.). Так модуль коэффициента отражения от границы в виде переходного слоя определяется следующим образом [62]:

$$|V| = \frac{Sh\left[\frac{\pi S}{2}(\cos\theta_0 - \sqrt{\cos^2\theta_0 - N})\right]}{Sh\left[\frac{\pi S}{2}(\cos\theta_0 + \sqrt{\cos^2\theta_0 - N})\right]}, \quad (3.11)$$

где θ_0 - угол падения волны на неоднородный слой; S, N - параметры пространственного распределения скорости $C(x)$ на нерезкой границе.

Данное распределение задается графически как функция $\frac{(1-n^2)}{N}$ от переменной $\frac{mx}{4\pi}$, в которой $n^2(x) = \frac{K^2(x)}{K_0^2}$, где $K_0 = \frac{\omega}{C_0}$ - волновое число

среды со стороны падающей на слой волны. Вид этой зависимости представлен на (Рис. 3.4.). Использовать данную зависимость можно следующим образом. При известной ширине градиентной зоны ΔX , определяемой по реальной зависимости $C(x) = f(x)$, на основании

значений C_0 и $C_{\max}$ по кривой (Рис.3.4.), определяют величину $\frac{m\Delta X}{4\pi}$.

Отсюда определяют параметр гипергеометрического уравнения (3.10) - m .

На основании полученной величины m рассчитывают параметр распределения S , входящий в выражение (3.11) $S = \frac{2K_0}{m}$.

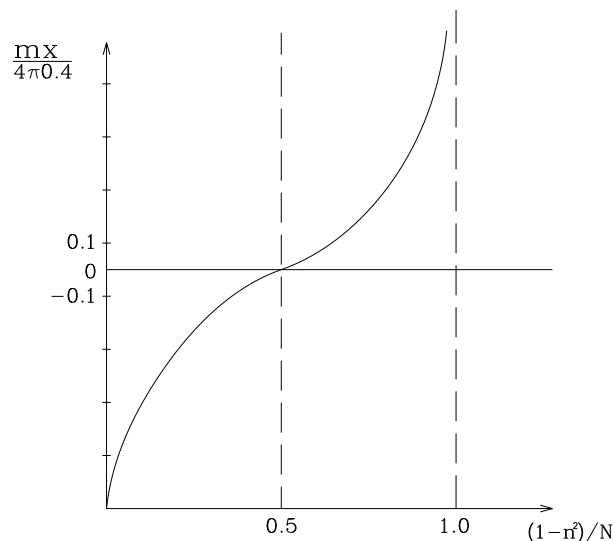


Рис.3.4. графическое изображение пространственного распределения коэффициента преломления в неоднородном переходном слое.

Зная величину максимального коэффициента преломления $n = \frac{C_0}{C_{\max}}$, определяют параметр N и рассчитывают искомый модуль коэффициента отражения от переходного слоя $|V|$ согласно (3.11).

Так, при заданных характеристиках переходного слоя изучаемого объекта: $C_0 \equiv \bar{C}_{zl}^{ml} = 2300 \text{ м/с}$; $C_{\max} \equiv \bar{C}_{zl}^{zam} = 3000 \text{ м/с}$, параметры, входящие в распределение на (Рис.3.4.) имеют следующие значения:

$$n = \frac{C_0}{C_{\max}} = 0,77; N = 1 - n^2 = 0,412; K_0 = \frac{\omega}{C_0} = 10,92 \cdot 10^{-1}; \frac{m\Delta X}{4\pi} = 0,8$$

Максимальный эффект толщинного резонанса в слое наблюдается при угле падения волны на неоднородную границу слоя $\theta_0 = 0$ нормально границе. В этом случае выражение (3.11) записывается в виде

$$|V| = \frac{\text{Sh}\left[\frac{\pi S}{2}(1 - \sqrt{1 - N})\right]}{\text{Sh}\left[\frac{\pi S}{2}(1 + \sqrt{1 - N})\right]}, \quad (3.12)$$

Результаты расчетов величины $|V|$ согласно (3.12) для различных значений ширины переходного слоя ΔX представлены на рис.3.4., из которого видно, что в диапазоне значений $\Delta X = 0,1 - 0,3 \text{ м}$ коэффициент отражения при нормальном падении волны на слой изменяется в пределах от 0,125 до 0,09. В работе [12] методом эквивалентных параметров было доказано, что при изменении модуля коэффициента отражения от границ упругого слоя в пределах от 0,091 до 0,904 в данном слое возможно возникновение толщинного резонанса. При этом амплитуда стоячей волны внутри такого слоя будет не менее, чем в 2 раза превышать амплитуду волны на частотах вне резонанса. Таким образом, можно сделать вывод о том, что внутри вертикального неоднородного слоя, примыкающего к

стенкам ствола, возможно возникновение эффекта толщинного резонанса при нормальном падении волны на данный слой.

При возможном изменении скорости в породе для данного слоя, в диапазоне значений от $C_{\text{эл}}^{\text{млmin}} = 1800 \text{ м/с}$ до $C_{\text{эл}}^{\text{млmax}} = 3200 \text{ м/с}$, длина волны на частоте $f_0 = 4000 \text{ Гц}$ изменяется в пределах от $\lambda_{\text{min}} = 0,45 \text{ м}$ до $\lambda_{\text{max}} = 0,8 \text{ м}$. Следовательно, ширина данного слоя, в котором возможен толщинный резонанс, должна лежать в пределах $h_{\text{г}} \cong 0,2 - 0,4 \text{ м}$, что соответствует реальным условиям рассматриваемого объекта. Однако при отсутствии горизонтальной границы раздела пород ниже забоя ствола при максимальной ширине вертикального слоя $h_{\text{г}} = 0,3 \text{ м}$ и при средней глубине заложения зарядов ВВ $l_B = 2 \text{ м}$ минимальный угол падения волны от взрывного источника составляет около $\theta_{\text{min}} = 80^\circ$. Хотя при таком угле падения на градиентную границу слоя коэффициент отражения от нее $|V \rightarrow 1|$, и появление толщинного резонанса, возникающего при падении на слой волн в освещенной зоне, практически невозможно.

Несмотря на это, на границу слоя падают волны под углами, близкими к нормальному падению, возникающие вследствие явления дифракции на горизонтальном ребре забоя, рассмотренного выше. Однако амплитуда данных волн будет достаточно мала, поэтому вклад толщинного резонанса в общее воздействие взрывных волн на замораживающие колонки будет незначительным. А с учетом оттока энергии взрывной волны в виде каналовых волн внутри неоднородного слоя суммарное воздействие энергии зарядов ВВ на замораживающие колонки не приведет к их разрушению.

3.3. Влияние взрывной волны на замораживающие колонки в неоднородном по глубине массиве замороженных пород

При наличии горизонтальной границы раздела ниже слоя ствола в замороженных породах имеет место наличие волноводной зоны с резкими горизонтальными границами раздела. Нижней границей в данном волноводе служит граница между породами различного типа, т.е. между замороженной глиной и замороженным водонасыщенным песком. Верхняя граница образована плоскостью забоя, она является абсолютно мягкой границей с коэффициентом отражения по давлению V .

Длина волновода соответствует диаметру плоскости забоя $L = D = 7$ м. На обоих концах волновод сопрягается с вертикальным слоем мощностью h_g с неоднородной границей раздела, волновые процессы в котором были рассмотрены выше. Высота горизонтального волновода h_z в зависимости от технологии проходки ствола может колебаться в диапазоне от 2 до 4 м. Таким образом, имеет место следующее соотношение между мощностями волновода и слоя $\frac{h_z}{h_g} \geq 1$. Модель объекта в рассматриваемом случае в горизонтальном сечении представлена на (Рис.3.5.)

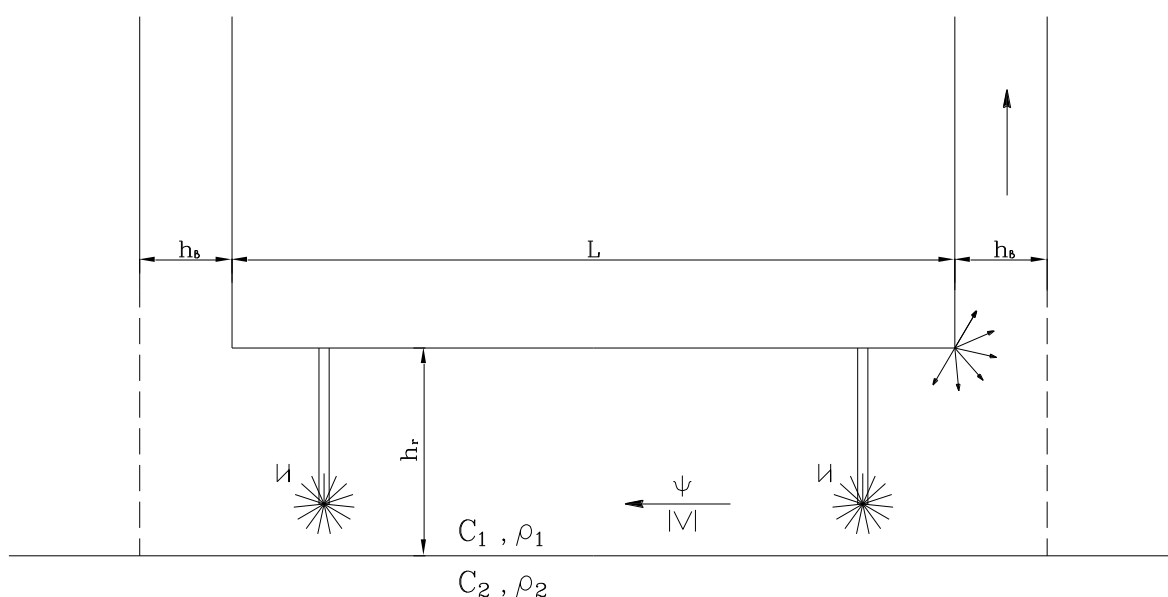


Рис.3.5. Модель объекта при наличии горизонтальной границы раздела.

Для характеристики нижней границы волновода и, следовательно, для классификации его типа оценим коэффициент отражения от этой границы.

При вариации скорости продольных волн в замороженной глине в диапазоне $C_1 = C_{2л}^{зам} = 2800 - 3200$ м/с и при скорости в замороженном песке $C_2 = C_{пес}^{зам} = 5600$ м/с коэффициент преломления Р-волны составляет

$n = \frac{C_1}{C_2} = 0,5 - 0,7$, среднее значение $n = 0,536$, а при отношении

плотностей замороженного песка $\rho_{пес} = 2,6 \cdot 10^3$ кг/м³ и глины

$\rho_{2л} = 2,0 \cdot 10^3$ кг/м³ равно $m = \frac{\rho_{пес}}{\rho_{2л}} = 1,3$. В этом случае коэффициент

отражения по давлению определяется

$$V_{cp} = \frac{(\rho_{пес} C_{пес}) - (\rho_{2л} C_{2л})}{(\rho_{пес} C_{пес}) + (\rho_{2л} C_{2л})} = 0,312 - 0,22$$

Таким образом, нижнюю границу можно отнести к разряду «сильной» границы, а данный волновод по соотношению акустических характеристик составляющих его сред аналогичен так называемому приповерхностному каналу с верхней свободной границей (верхняя среда - воздух) и с нижней резкой границей, на которой $n < 1$.

При взрыве заряда ВВ на каждом из концов волновода возникает сложное интерференционное волновое поле, состоящее из теоретически бесконечной суммы нормальных волн различных номеров l . Каждая нормальная волна номера l является бегущей вдоль оси волновода (вдоль координаты X) со своей фазовой скоростью C_l , которая зависит от номера волны l , частоты источника f , высоты волновода h и свойств среды внутри волновода. В то же время каждая нормальная волна номера l является стоячей по толщине волновода h (вдоль оси Z). Так, например, в простейшем случае, когда коэффициент отражения от нижней абсолютно жесткой границы $V_2 = 1$, а коэффициент отражения от верхней границы раздела $V = -1$, как и в рассматриваемой задаче, потенциал Ψ внутри волновода определяется:

$$\Psi = \frac{2\pi i}{h} \sum_{l=0}^{\infty} Chb_l Z_0 \cdot Chb_l Z \cdot H_0^{(1)}(\xi_l r), \quad (3.13)$$

$$b_l = \frac{i\left(1 + \frac{1}{2}\right)\pi}{h}; \xi_l = h\sqrt{b_l^2 + K^2}; K = \frac{\omega}{C}$$

Z_0 - координата точечного источника; Z - координата точки наблюдения (Рис. 3.6.);

$H_0^{(1)}(\xi_l r)$ - функция Хенкеля.

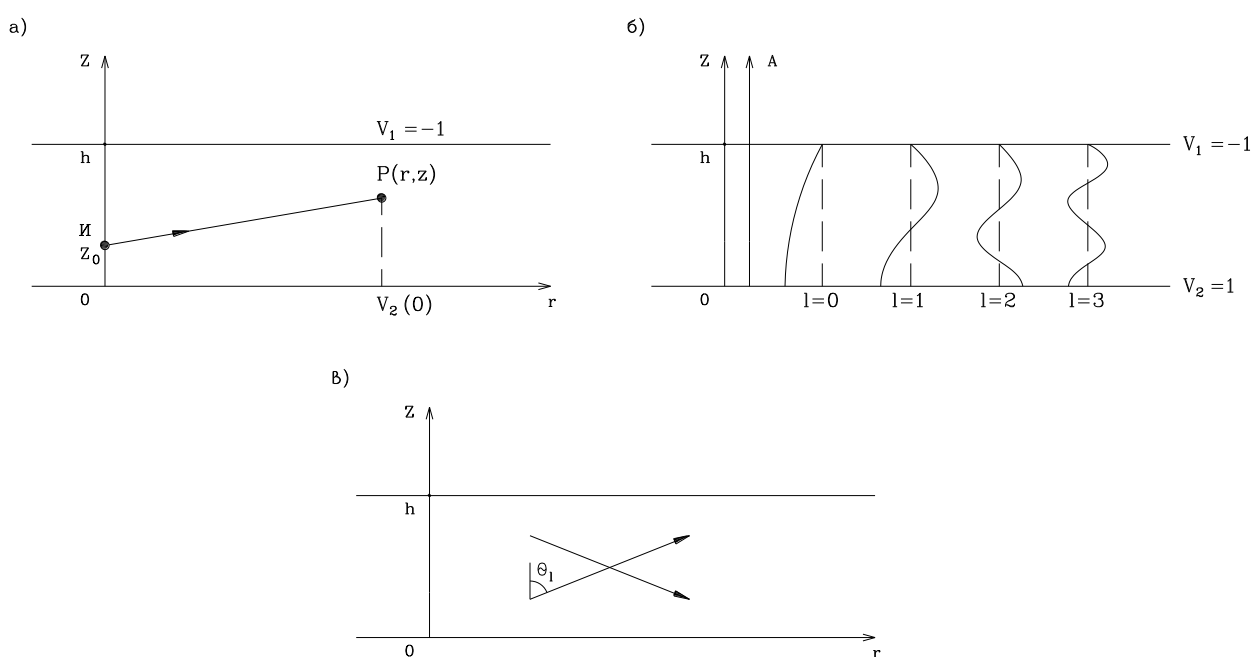


Рис.3.6. Расположение излучателя I и приемника P внутри волновода (а); распределение амплитуд первых нормальных волн в волноводе со свободной границей (б); представление нормальной волны номера l как суммы бегущих волн (в).

В этом случае распределение амплитуды давления вдоль оси Z для нормальных волн различных номеров имеет вид, показанный на (Рис.3.6.б).

При этом каждая нормальная волна номера l распространяется вдоль слоя со скоростью:

$$C_l = \frac{\omega}{\xi_l} = \frac{C}{\sqrt{1 - \left(\frac{l\lambda}{2h}\right)^2}}, \quad (3.14).$$

где C - скорость волн в среде, заполняющей волновод; λ - длина волны,

$$\lambda = \frac{C}{f}$$

Причем каждую нормальную волну номера l можно представить в виде суммы двух бегущих плоских волн с одинаковыми углами наклона θ_l к границам волновода (Рис.3.6.в), величина которых зависит от номера волны l .

$$\theta_l = \arccos \frac{l\pi}{Kh}, \quad (3.15)$$

При увеличении номера нормальной волны l угол θ_l уменьшается, то есть каждая плоская волна падает на границу под большим углом. Максимальной амплитудой характеризуется первая (основная) нормальная волна (номера $l = 0$ или $l = 1$).

В рассматриваемой нами модели волновода нижняя граница характеризуется конкретным значением коэффициента отражения V_1 , который в общем случае определяется следующим образом:

$$V_1 = \frac{m \cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{m \cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}, \quad (3.16)$$

где $n = \frac{C}{C_1}$; $m = \frac{\rho_1}{\rho}$; θ – угол падения волны на границу.

Аналогичное выражение можно записать и для коэффициента отражения от второй границы V_2 .

При наличии у волновода двух границ с произвольными коэффициентами отражения V_1 и V_2 поле нормальных волн внутри волновода определяется в общем виде по следующей формуле [12]:

$$\Psi = \pi K \sum_l \left[\frac{(e^{-bZ_0} + V_1 e^{bZ}) (e^{-bZ} + V_1 e^{bZ})}{V_1 \frac{\partial}{\partial \theta} (V_1 V_2 e^{Zbh})} \right] H_0^{(1)}(Kr \sin \theta_l) \sin \theta_l, \quad (3.17)$$

где $b = ik \cos \theta$; θ_l – корни дисперсионного уравнения

$$1 - V_1(\theta) \cdot V_2(\theta) e^{2ikh \cos \theta} = 0, \quad (3.18)$$

В случае, когда верхняя граница абсолютно мягкая ($V_2 = -1$), на достаточно больших расстояниях от источника ($\frac{r}{\lambda} > 1$), при которых можно воспользоваться асимптотическим представлением функции Хенкеля в (3.17), выражение для нормальных волн в таком волноводе имеет вид [81,84]:

$$\Psi = \sum_{l=1}^{\infty} \frac{2\pi}{h} \sqrt{\frac{2}{\pi K_l r}} \left\{ \frac{X_l \sin \left[X_l \left(1 - \frac{Z}{h} \right) \cdot \sin \left[X_l \left(1 - \frac{Z_0}{h} \right) \right] \right]}{X_l - \sin X_l \cos X_l - \frac{\sin^2 X_l \operatorname{tg} X_l}{m^2}} \right\} e^{-j \left(\omega t - K_l r - \frac{4}{\pi} \right)}, \quad (3.19)$$

где Z_0, Z - координаты расположения соответственно излучателя и приемника волн;

$$X_l = kh \cos \theta_l; K_l = k \sin \theta_l k \sqrt{1 - \left(\frac{X_l}{kb} \right)}, \quad (3.20)$$

При этом считается, что поле внутри волновода создается точечным (сферическим) источником:

$$\Psi_0 = A_0 \frac{e^{jkR}}{R}; R = \sqrt{(Z - Z_0)^2 + r^2}, \quad (3.21)$$

где A_0 - амплитуда колебаний источника;

$$A_0 = \frac{Q_0}{4\pi}$$

Q_0 - его объемная скорость, $Q_0 = V_0 S$

S - площадь излучающей поверхности,

V - колебательная скорость на сфере.

В дальнейшем амплитуда первичного поля принимается за единичную ($A_0 = 1$).

Величина X_l является корнем дисперсионного уравнения:

$$\operatorname{ctg} X = \frac{i}{mX} \sqrt{X^2 - (Kh\nu)^2}, \quad (3.21)$$

$$\text{где } \nu^2 = 1 - n^2 : iX = bh; K = \frac{\omega}{C}, \quad (3.22)$$

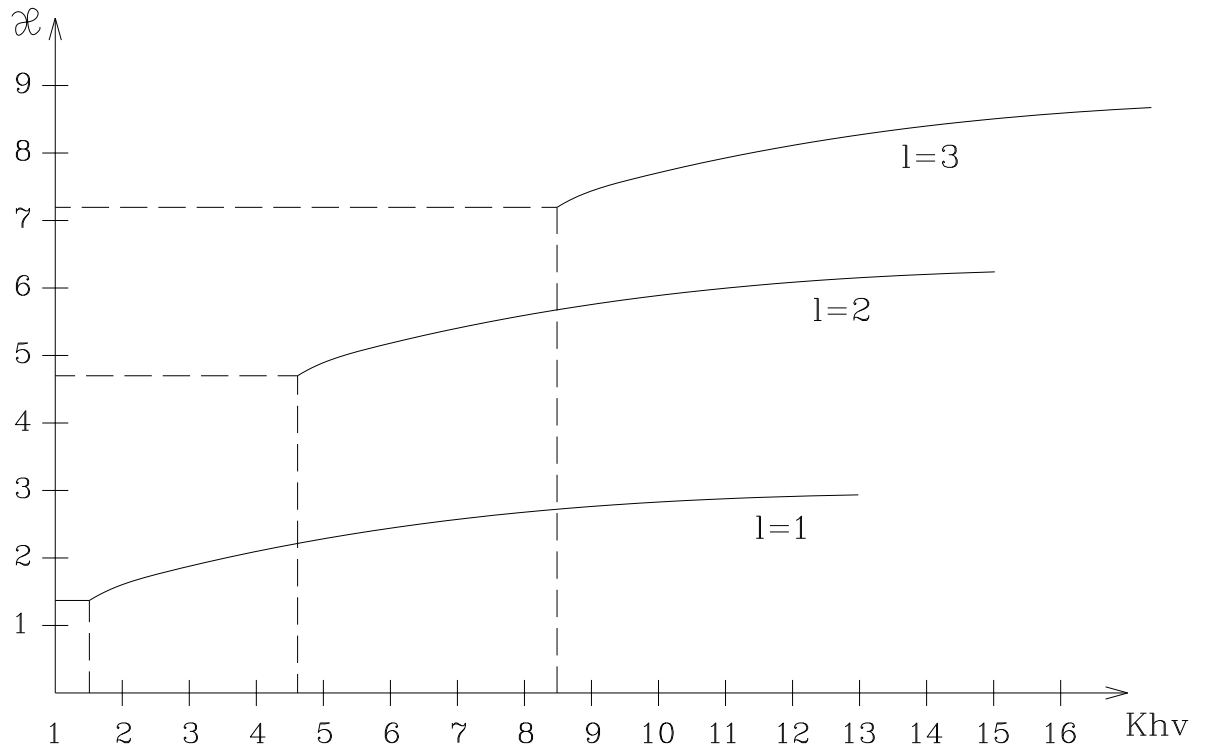


Рис.3.7. Корни дисперсионного уравнения для волновода с верхней абсолютно мягкой границей для первых трех нормальных волн в зависимости от высоты слоя и частоты источника.

Данное уравнение является трансцендентным и решается на комплексной плоскости. На (Рис.3.7.) приведено в графическом виде решение данного дисперсионного уравнения в функции безразмерной величины $Kh\nu$ для первых трех мод нормальных волн в волноводе со свободной верхней границей.

Необходимо отметить, что выражение (3.19) и (3.21) справедливы не только для так называемых «толстых» волноводов, для которых

справедливо $\frac{h}{\lambda} > 1$, но и для волноводов высотой порядка длины волны или меньше ее.

Каждая нормальная волна номера l характеризуется своим распределением амплитуды по толщине волновода (вдоль оси Z) и своей фазовой скоростью C_l , и коэффициентом поглощения β_l :

$$C_l = \frac{KhC}{R_l \sqrt{(Kh)^2 - X_l}}; \beta_l = \frac{\text{Im} \sqrt{(Kh)^2 - X_l}}{h}, \quad (3.23)$$

Для оценки особенностей распространения нормальных волн, создаваемых взрывным источником в волноводе между свободной поверхностью забоя ствола и горизонтальной границей раздела нами были проведены расчеты распределения амплитуд первых трех нормальных волн ($l=1,2,3$) по высоте волновода ($A_l = f(Z)$) для волноводов с различной мощностью h .

При проведении таких расчетов рассматривались средние значения характеристик волноводов $C_1 = \bar{C}_{эл}^{зам} = 3000 \text{ м/с}$; $C_2 = \bar{C}_{нес}^{зам} = 5600 \text{ м/с}$; $f = 4000 \text{ Гц}$; $r = 6 \text{ м}$.

В этом случае $n = 0,536$; $\nu = 0,844$; $K = 8,37 \cdot 10^{-1}$; $\lambda = 0,75$.

Величина корня дисперсионного уравнения для нормальных волн номеров $l=1,2,3$ определялась на основании графического изображения его решения на (Рис.3.7) по соответствующей кривой. Расчеты проводились для волноводов со следующей высотой $h: 0,5; 0,75; 1; 2; 3; 4$. В расчетах принималось условие, при котором координата источника Z_0 соответствует центру каждого слоя. Значения характеристик для каждого волновода и соответствующих нормальных волн приведены в табл.3.1.

Таблица 3.1.

Характеристики волновода и нормальных волн различных номеров l

$h, \text{м}$	$\frac{h}{\lambda}$	$Kh\nu$	l	X_l	$K_l, \text{м}^{-1}$	$Z_0, \text{м}$
0,5	0,67	3,532	1	2,05	5,978	0,25
			2			
0,75	1	7,064	1	2,3	7,788	0,375
			2	4,72	5,518	
1,0	1,33	7,064	1	2,5	7,988	0,5
			2	5,1	6,637	
			3	-	-	
2,0	2,66	14,13	1	3,1	8,225	1
			2	5,4	7,92	
			3	8,9	7,26	
3.0	4	21,19	1	2,9	8,314	1.5
			2	5,8	8,144	
			3	8,4	7,89	
4.0	5,33	28,26	1	5,4	8,26	2
			2	5,9	8,24	
			3	8,5	8,096	

Для оценки возможности возбуждения каждой модой толщинного резонанса в вертикальном слое с неоднородной границей рассчитывались углы θ_l :

$$\theta_l = \arccos \frac{X_l}{Kh}, \quad (3.24)$$

Расчеты проводились в среде Mathcad методом ранжированных переменных.

Результаты расчетов представлены на (Рис.3.8.-3.13).

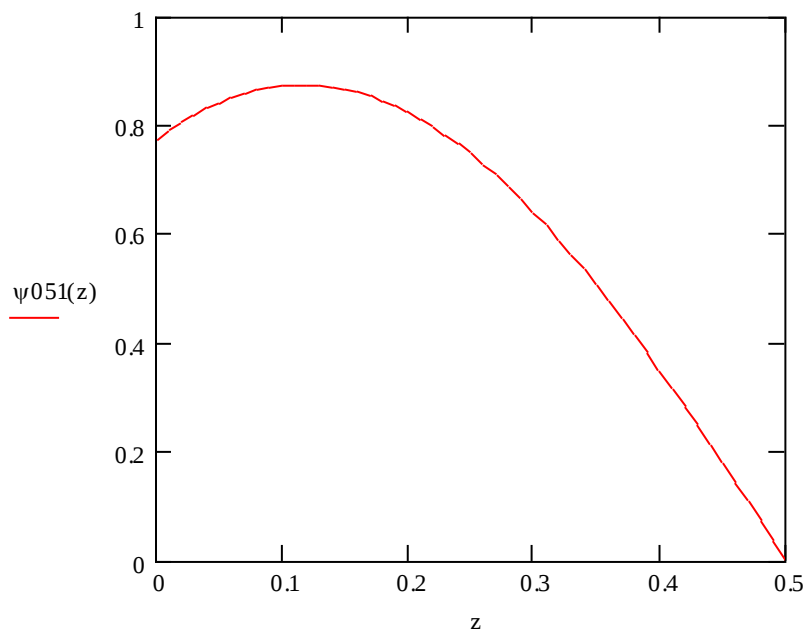


Рис.3.8. Распределение амплитуды первой нормальной волны по высоте волновода ($h = 0,5\text{ м}$, $Z_0 = 0,25\text{ м}$).

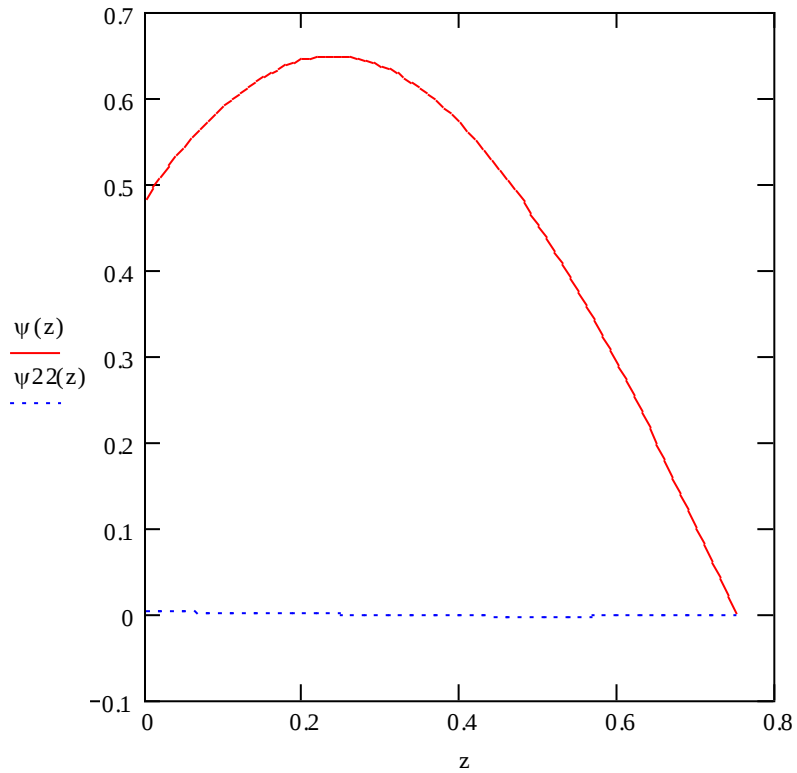


Рис.3.9. распределение амплитуды первых двух нормальных волн по высоте волновода ($h = 0,75\text{ м}$; $Z_0 = 0,375\text{ м}$); $1 - l = 1$; $2 - l = 2$

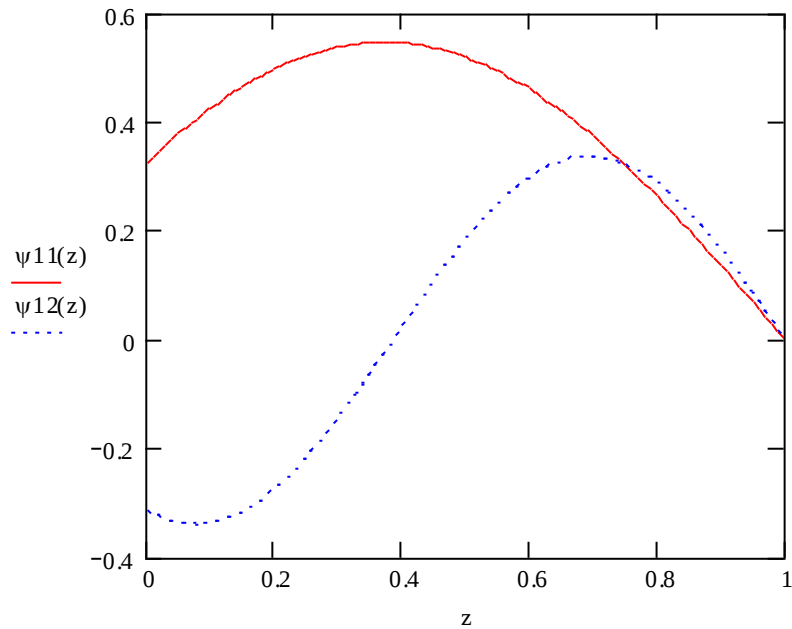


Рис.3.10. Распределение амплитуды первых двух нормальных волн по высоте волновода ($h = 1\text{ м}$; $Z_0 = 0,5\text{ м}$); $1 - l = 1$; $2 - l = 2$

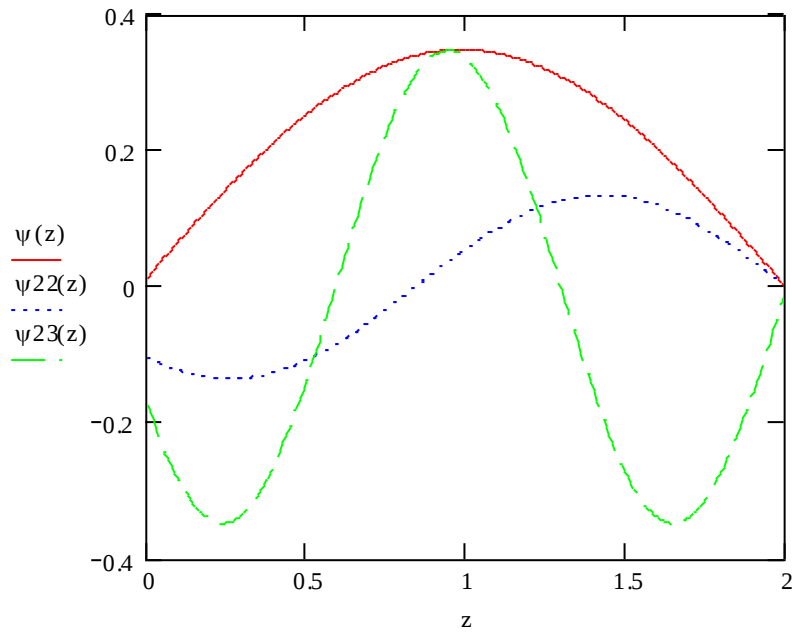


Рис.3.11. Распределение амплитуды первых трех нормальных волн по высоте волновода ($h = 2\text{ м}; Z_0 = 1\text{ м}$); $1-l=1$; $2-l=2$; $3-l=3$

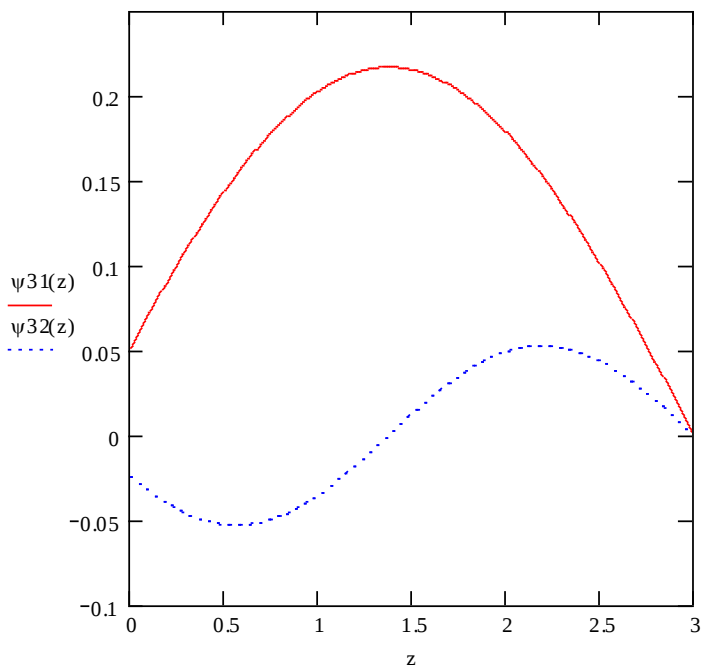


Рис.3.12. Распределение амплитуды первых двух нормальных волн по высоте волновода ($h = 3\text{ м}; Z_0 = 1,5\text{ м}$); $1-l=1$; $2-l=2$

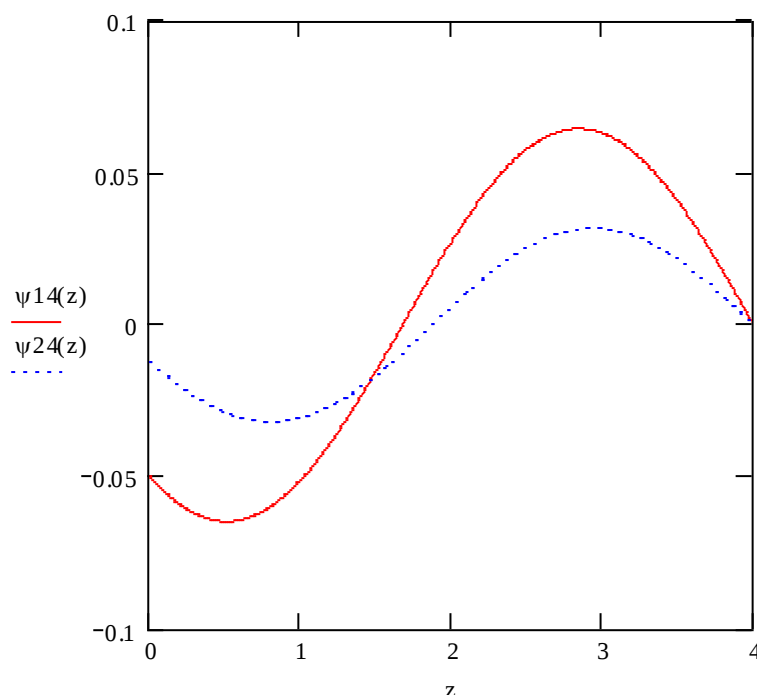


Рис.3.13. Распределение амплитуды первых двух нормальных волн по высоте волновода ($h = 4\text{ м}$; $Z_0 = 2\text{ м}$); $1 - l = 1$; $2 - l = 2$

Из полученных распределений $A_l = f(Z)$ видно, что наибольшая в сечении волновода амплитуда наблюдается во всех случаях у основной ($l=1$) нормальной волны. Причем во всех случаях форма разделения амплитуды по сечению волновода у первой моды в наибольшей степени приближается к поршневому распределению. Величина угла θ_l представлена в табл. 3.2

Из табл. 3.2. видно, что только у нормальных волн номеров $l=1, l=2$ угол θ_l приближается к $\frac{\pi}{2}$, что показывает, что образующие эти моды плоские волны распространяются в направлении, близком к оси волновода, то есть близком к нормальному, к неоднородной границе вертикального слоя.

Третья мода $l=3$ волнового поля в ряде случаев имеет максимальную амплитуду, сравнимую или даже одинаковую с основной модой, например в волноводе с $h=2$ м. Однако угол θ_l у данной моды значительно

отличается от $\frac{\pi}{2}$. Например, у волновода с $h=2$ м для третьей моды $\theta_l \cong 60^\circ$.

Таблица 3.2.

Угол θ_l в зависимости от h

l_1 / h_1 м		0,5	0,75	1,0	2,0	3,0	4,0
1	θ_l	60,72	68,53	72,60	79,34	83,39	80,73
2		-	41,32	52,48	71,22	76,64	79,86
3		-	-		57,86	70,49	75,2

В связи с этим в дальнейшем будем анализировать поведение только двух первых мод ($l=1$ и 2) при изменении высоты волновода. Значения максимальной амплитуды первых двух мод для волновода с различной высотой h представлено в табл.3.3.

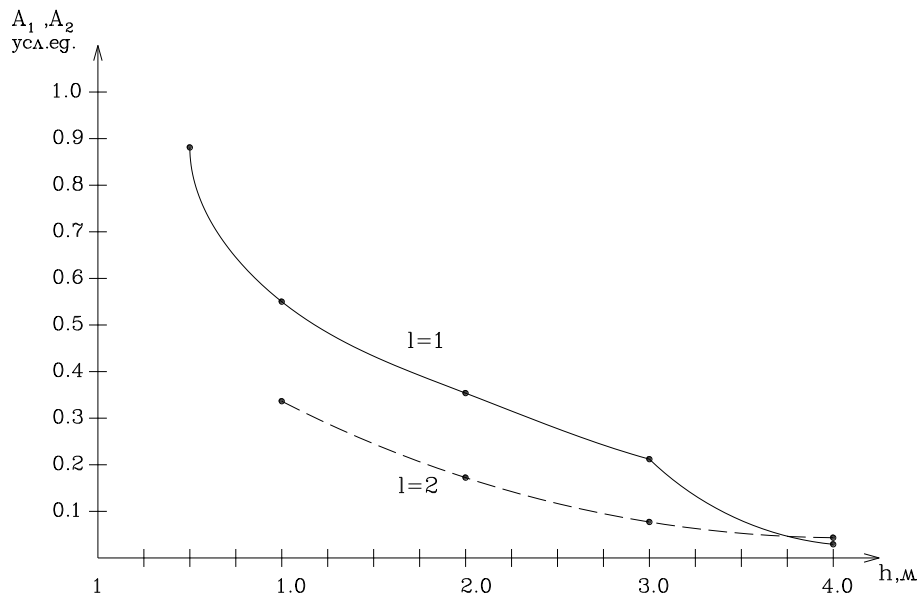


Рис.3.14. Зависимость максимальной амплитуды первых двух нормальных волн от высоты волновода $h(a)$ и сравнение максимальных амплитуд распределения для различных толщин волновода ($б$).

Таблица 3.3.

Зависимость максимальной амплитуды A_l от высоты волновода.

l/h	A_l условные единицы					
	-0,5	0,75	1,0	2,0	3,0	4,0
1	0,877	0,653	0,553	0,356	0,219	0,066
2	-	-	0,344	0,139	0,055	0,033
$A_1(2) / A_1(h_i)$	0,712	0,545	0,644	1	1,625	5,394

Из таблицы и графика видно, что чем меньше высота волновода h , тем больше максимальная амплитуда основной моды. При увеличении высоты волновода вплоть до $h=3$, амплитуда $A_1(h)$ незначительно уменьшается. И только для волновода высотой $h=4$ наблюдается резкое уменьшение амплитуды. Так, отношение амплитуды A_1 для волновода с $h=2$ м к той же амплитуде для волновода с $h=4$ м составляет более 5 раз. Кроме того, у волновода высотой $h=4$ изменяется характер распределения амплитуды основной моды по сечению волновода – оно становится двугорбым. На основании этого можно сделать вывод о том, что при изменении расстояния от забоя ствола до вертикальной границы раздела в диапазоне от 0,5 до 3 м наблюдается ярко выраженная канализация волновой энергии источника внутри волновода, и лишь при расстоянии $h > 4$ м этот волновой эффект практически незаметен.

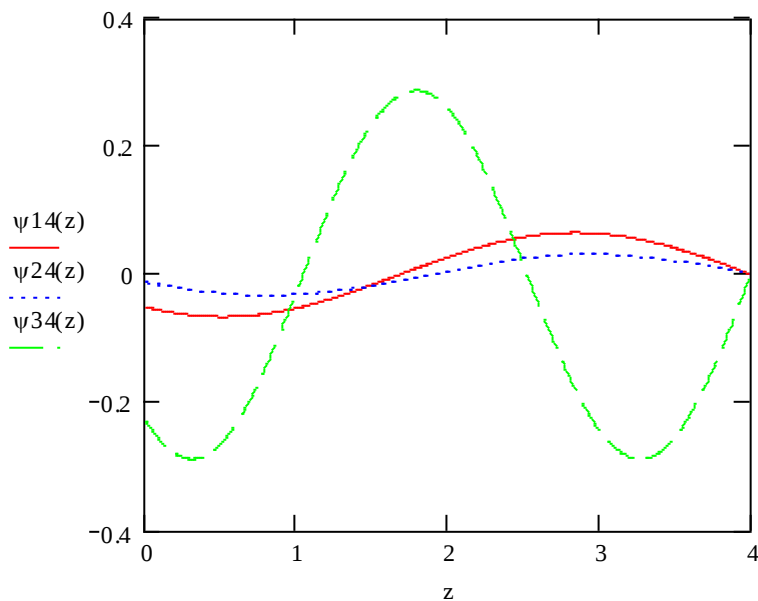
Значительный практический интерес представляет также исследование влияния глубины расположения точечного излучателя (заряда) относительно верхней границы волновода на характер изменения поля первой нормальной волны. Так, из выражения (3.19) видно, что амплитуды всех нормальных волн (следовательно, и полное волновое поле) будут

равны нулю, если источник расположен на верхней границе раздела ($Z_0 = h$), так как при этом коэффициенты возбуждения всех нормальных волн тождественно равны нулю:

$$\sin\left[X_l\left(1 - \frac{Z_0}{h}\right)\right] = 0$$

Для вычисления минимального расстояния от заряда до верхней абсолютно мягкой границы Δh , при котором коэффициенты возбуждения нормальных волн близки к их максимальному значению, равному единице, были построены распределения амплитуд первых двух нормальных волн в зависимости от расстояния источника до верхней границы $Z_0 = (h - \Delta h)$ для граничного случая высоты волновода $h = 4$ м (Рис.3.15)

а)



б)

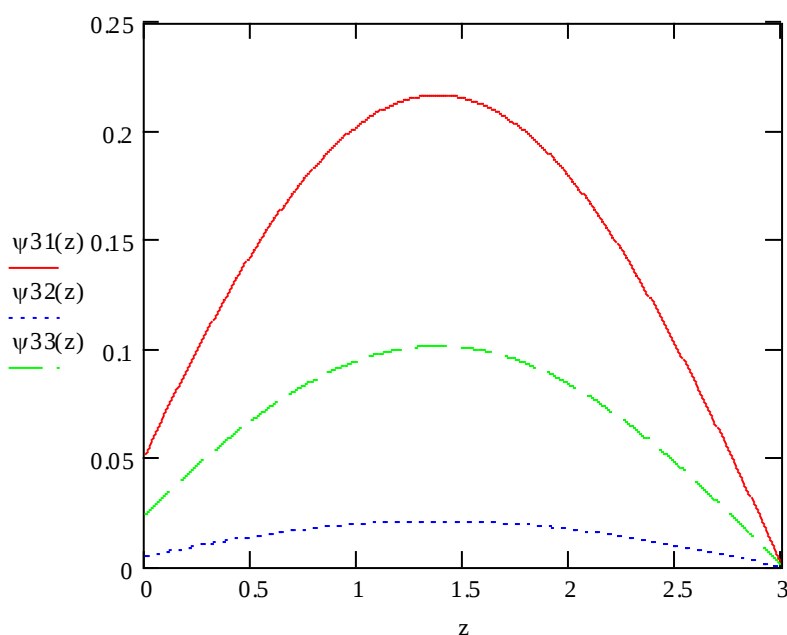


Рис.3.15. Зависимость распределения амплитуды первой нормальной волны ($l=1$) по высоте волновода от координаты источника Z_0

а) $h=4\text{ м}; 1-Z_0=2\text{ м}; 2-Z_0=3,9\text{ м}; 3-Z_0=3,8\text{ м}.$

б) $h=3\text{ м}; 1-Z_0=1,5\text{ м}; 2-Z_0=2,5\text{ м}; 3-Z_0=2,5\text{ м}$

Как показано на рисунке, при длине волны, равной $\lambda=0,75\text{ м}$ и $\frac{\lambda}{4}=0,187\text{ м}$, приближение источника к поверхности на расстояние $\Delta h=0,1\text{ м}$ от поверхности приводит к уменьшению максимальной амплитуды $A_{1\text{ max}}$ в 3,1 раза. Тогда как увеличение этого расстояния до $\Delta h=0,2\text{ м}$ снижает данное отношение до 1.6 раза. Для снижения волноводного эффекта не менее, чем в два раза $\left(\frac{A_1(1,5\text{ м})}{A_1(2,5\text{ м})} \cong 2,011 \right)$, необходимо заглублять заряд ВВ при мощности горизонтального слоя $h=3$ не более чем на $0,5\text{ м}$, что соответствует $\Delta h \approx 0,7\lambda$ (Рис.3.15)

Из проведенных исследований следует, что если расстояние от забоя ствола до нижней границы раздела составляет не более 3 м , то при взрыве

заряда ВВ вдоль горизонтальной границы будут распространяться достаточно интенсивные каналовые волны с траекторией смещения частиц на их фронте, близкой к направлению оси волновода. При выходе из противоположного конца волновода данные волны будут взаимодействовать с вертикальным слоем. Данное взаимодействие может иметь различный характер в зависимости от акустических свойств волноводов.

Из работы [12] известно, что при наличии в волноводе ответвления, в зависимости от длины последнего, коэффициент прохождения нормальных волн в основном волноводе через сечение ответвления может изменяться от 0 до 1. При вертикальной длине ответвления, равной $l = \frac{\lambda}{4}$, коэффициент отражения от сечения равен 0, то есть нормальные волны практически не проходят через вертикальное ответвление. В рассматриваемой нами физической модели исследуемого объекта толщинный резонанс внутри вертикального слоя с неоднородной границей возникает на частотах $\eta \frac{\lambda}{2}$. Отсюда можно сделать вывод о том, что при возникновении толщинного резонанса в вертикальном слое основные моды каналовых волн в горизонтальном волноводе будут проходить участок вертикального ответвления беспрепятственно.

С другой стороны, при возбуждении цилиндрического волновода прямоугольным поршнем, расположенным на боковой поверхности волновода, при работе поршня в резонансном режиме с перестраиваемой частотой $f_{рез}$ возможно эффективное возбуждение в волноводе незатухающих нормальных волн, если частота колебаний поршня соответствует частотам радиальных резонансов волновода [62,89]:

$$f_{ом} = \frac{C}{2a} \alpha_{ом}, \quad (3.25)$$

где C - скорость в среде волновода;

$2a$ - диаметр волновода;

α_{om} - корни характеристического уравнения для волновода:

$$\frac{dI_0(\pi\alpha)}{d\alpha} = 0$$

В частном случае, когда резонансная частота поршня $f_{рез}$ меньше частоты $f_{нор}$ $f_{рез} < f_{нор} = \frac{C}{2a}\alpha_{02}$, где $\alpha_{02} = 1,2197$, в цилиндрическом волноводе возможно возбуждение нормальных волн с плоским фронтом, скорость распространения которых приближается к скорости среды внутри волновода C , то есть волн, аналогичных первым модам нормальных волн в рассматриваемом нами плоском волноводе.

Таким образом, если проводить аналогию между волновыми процессами в цилиндрическом волноводе и в плоском горизонтальном слое данного исследуемого объекта, что вполне уместно, так как физические процессы возбуждения нормальных волн в обоих волноводах и свойства этих волн аналогичны, то можно сделать следующий вывод.

При производстве взрывов по обеим сторонам забоя внутри горизонтального слоя в каждом из вертикальных слоев возникает толщинный резонанс, обусловленный дифракцией ударной волны на краю забоя. При этом частота толщинного резонанса соответствует средней частоте возбуждения нормальных волн в горизонтальном слое. При подходе нормальных волн первых двух мод к соответствующему слою происходит дополнительное возбуждение толщинного резонанса в вертикальном слое, так как составляющие смещения в этих модах почти перпендикулярны вертикальным границам неоднородного слоя.

Возникающий мощный процесс толщинного резонанса, который постоянно подпитывается энергией волноводного импульса внутри горизонтального слоя, будет переизлучать колебательную энергию в

горизонтальный волновод на частоте волнового процесса в волноводе, аналогично поршню. В результате в горизонтальном волноводе возникнут мощные резонансные явления, которые помимо эффекта концентрации волновой энергии внутри горизонтального слоя приведут к преобразованию упруго-пластической волны в ударную, которая, обладая значительной энергией на фронте ударного импульса, является основной причиной разрушения замораживающих колонок.

Для численного подтверждения изложенной гипотезы рассмотрим кинематические соотношения между волновыми процессами в горизонтальном и вертикальном слоях.

Для возникновения толщинного резонанса при толщине слоя $h = 0,4$ м и средней скорости внутри слоя $\bar{C}_{2l}^{зам} = 2300$ м/с необходимо, чтобы продольная волна сделала внутри слоя не менее 3-6 полных отражений от границ. Длительность одного полного отражений от обеих границ слоя составит:

$$t_{\max i} = \frac{2h}{C_p} = 3,47 \cdot 10^{-4} \text{ с.}$$

Принимая за среднее число необходимых полных отражений для возникновения толщинного резонанса $n = 5$, получим суммарное минимальное время резонансного процесса внутри слоя:

$$t_{\Sigma \max} = nt_{\max i} = 1,74 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

Первой в точку наблюдения приходит головная (преломленная) волна, которая большую часть своего пути распространяется в среде под нижней границей раздела (в данном случае с фазовой скоростью $\bar{C}_{nec} = 5600$ м/с). Головная волна имеет значительно меньшую амплитуду, чем нормальные волны внутри слоя, и поэтому не рассматривалась нами выше, но достаточную, чтобы поддержать резонансные явления в вертикальном

слое. После головной волны приходят нормальные волны, распространяющиеся каждая со своей фазовой и групповой скоростями.

Вследствие этого, после взрывного возбуждения к вертикальному слою придет головная волна через время $t_2 = \frac{L}{C_{нес}} = \frac{6}{5600} = 1,07 \cdot 10^{-3}$ с, то есть раньше окончания процесса толщинного резонанса в вертикальном слое.

За головной волной к слою придет первая (основная) нормальная волна, распространяющаяся внутри горизонтального слоя с фазовой скоростью, которая определяется выражением (3.23) и составляет $C_1 = 3038$ м/с. Таким образом, основная нормальная волна придет к вертикальному слою через $t_1 = 1,974 \cdot 10^{-3}$ с, то есть запаздывание относительно времени $t_{\Sigma \max}$ составляет менее 14% от $t_{\Sigma \max}$. Но с учетом времени прихода головной волны можно сделать вывод о реальной возможности возникновения резонансных процессов в данной физической модели исследуемого объекта.

Таким образом доказано, что в случае наличия горизонтальной границы ниже забоя ствола на расстоянии менее 4 м, возможно возникновение толщинного резонанса с резким увеличением амплитуды взрывной волны, что является причиной нарушения герметичности замораживающих колонок. Также установлено, что для снижения волноводного эффекта не менее чем в два раза, необходимо заглублять заряд ВВ при мощности горизонтального слоя $h=3$ не более чем на 0,5 м, то есть глубина шпуров должна быть не более 0,5 м.

3.4. Особенности воздействия взрывной волны на замораживающие колонки в зоне границы раздела пластов горных пород

Рассмотрим случай взаимодействия ударной волны с замораживающими колонками [50, 84].

Как известно, акустическая волна является волной сжатия, которая распространяется с постоянной скоростью C_B , при этом давление P_1 , плотность Q и массовая скорость U_L увеличиваются в области сжатия и возвращаются к своим начальным значениям после ее прохождения. Уравнение, описывающее волну сжатия, можно записать, используя давление P или скорость продольной волны C_ϵ : вид

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = C_B^2 \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}, \quad (3.26)$$

$$\frac{\partial^2 U_L}{\partial t^2} = C_\epsilon^2 \frac{\partial^2 U_L}{\partial x^2}, \quad (3.27)$$

где x – расстояние по направлению распространения волны,

t - время,

C_B - скорость волны.

При этом, в волне давление P и массовая скорость U_L прямо пропорциональны друг другу:

$$P = \rho_o U_L C_B. \quad (3.28)$$

Уравнения (3.26) и (3.27) линейные, поэтому для слабых волн сжатия верен принцип суперпозиции: давления или массовые скорости двух и более волн, одновременно проходящих одну и ту же точку пространства, могут быть соответственно скалярно или векторно суммированы.

Направление массовой скорости U_L в волне сжатия продольное, вектор скорости параллелен направлению распространения проходящей волны. В частности, если акустические жесткости сред равны, то никакого отражения не происходит. Отражение от свободной границы ($\rho_2 C_{p2} \rightarrow 0$) происходит с удвоением перемещений и скорости движения границы раздела сред.

В забое, одновременно с одним замедлением взрывается один ряд шпуров. Таким образом, на буровую скважину воздействует не более 5-6 кратных импульсов, определяемых замедлением между взрывами очередных рядов. На контуре буровой скважины, при нормально работающей системе замораживания, температура минимальна и почти равна температуре стенки колонки. При этом и прочность замороженной породы на контуре буровой скважины максимальная.

В результате распространения упругой волны сжатия от взрыва вруба, замороженный породный массив подвергается однократному попеременному воздействию напряжений сжатия и растяжения. При этом скорость упругой волны определяется модулем объемного сжатия K_0 на контуре ствола в проходке, где температура пород в 2 раза выше, чем на контуре скважины. При движении этой волны сжатия происходит некоторое уплотнение замороженного массива пород. Если амплитуда массовой скорости в волне равна U_B , то для фронтовых параметров напряженного состояния грунта в волне, справедливо соотношение

$$\sigma_B = C_{p1} \rho_1 U_B. \quad (3.29)$$

$$\text{коэффициент отражения волны } K_{omp} = \frac{(\sigma_\epsilon + \sigma_1)}{\sigma_\epsilon} \quad (3.30)$$

При отражении от жесткой границы ($\rho_2 c_{p2} \rightarrow \infty$), напряжение в отраженной волне в соответствии с (3.29) равно напряжению в падающей волне, а коэффициент отражения равен 2, то есть отражение происходит с удваиванием напряжения.

В момент, когда фронт падающей волны сжатия достигает контура буровой скважины, напряжение сжатия становится в 2-3 раза больше, чем в однородном замороженном массиве при более низких температурах. Однако при одноимпульсной волне сжатия с продолжительностью воздействия $\approx 0,1$ сек. разрушение замороженного массива на контуре произойти не может.

В процессе образования отраженной одноимпульсной волны растяжения наступает момент, когда силы упругости,

противодействующие смещению контура скважины, достигают максимального значения. В этот момент контур скважины сначала останавливается, а затем начинает движение в обратном направлении, стремясь вернуться в первоначальное положение. В момент остановки контура, дальнейшее формирование отраженной волны растяжения прекращается, и вся волна начинает перемещаться в глубь замороженного массива. В момент, когда напряжения на фронте одноимпульсной отраженной волны достигнут предела прочности пород на растяжение, в приконтурной части массива, параллельно контуру скважины, появляется трещина, которая в дальнейшем при новых импульсах либо может развиваться, либо может перерасти в откол.

Качественная картина разрушения грунта в выработанном пространстве буровой скважины при интенсивном воздействии ударной волны представлена на (Рис.3.19)

Действие ударной волны на преграду (замораживающую колонку) формирует динамическую нагрузку, которая определяется параметрами ударной волны, формой и размерами преграды. Для того чтобы выявить все особенности действия ударной волны на жесткую преграду в виде свободной поверхности, представим ее сначала в виде жесткого куба.. Процесс взаимодействия ударной волны с жесткой преградой разделяют на две характерные фазы (два периода):

- 1.Фаза дифракции (начальный период) – от момента соприкосновения фронта волны с жесткой преградой до установления сравнительно стабильного процесса обтекания преграды ударной волны;

2. Фаза квазистационарного обтекания (последующий период) – после окончания фазы дифракции до момента окончания действия положительной фазы волны на жесткую преграду.

Сначала ударная волна действует только на лобовую поверхность, затем также на боковые поверхности, а по мере прохождения за преграду

– на тыльную поверхность преграды (3.18). В момент соприкосновения ударной волны с лобовой поверхностью преграды на ней возникает давление отражения и отраженная ударная волна, которая распространяется в обратном направлении. При взаимодействии с боковыми гранями преграды образуется вторичная и дифракционная волны, за фронтом которых формируются волны отражения (разрежения). Разница давлений приводит к возникновению смещающей силы F , действующей на преграду в направлении действия ударной волны.

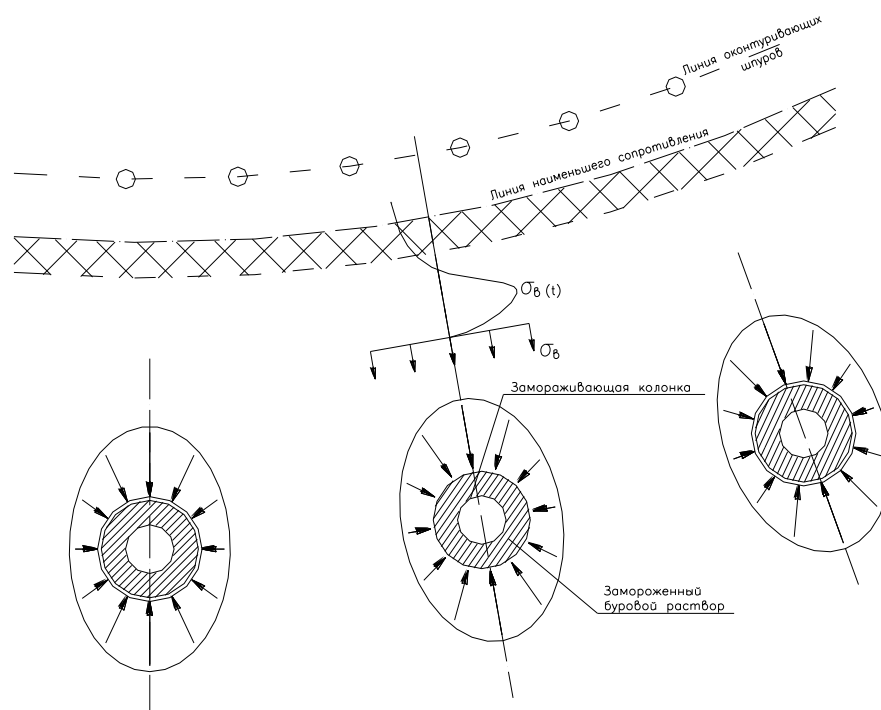


Рис. 3.18. Взаимодействие взрывной волны с замораживающими колонками и замороженным буровым раствором.

Как известно [70,103], граница ударного фронта является поверхностью отражения, за которой скорость волны снижается до обычного значения, соответствующего сейсмической жесткости породы.

Прямая ударная, дифракционные и отраженные волны формируют вокруг буровой скважины зону отраженных ударных волн, которые на линии центров окружностей буровых скважин образуют эллипсовидные области разрушения пород сдвиговыми напряжениями.

Концентрация напряжений на контуре скважины (Рис.3.19) определяется характеристиками породного массива, амплитудно – временными параметрами ударной волны и диаметром буровой скважины (размытой или проектных размеров). При действии ударной волны, наиболее напряженными являются точки контура. области 1- боковые по отношению движения ударной волны, где, как правило, и начинается разрушение грунта под действием растягивающих отраженных от боковых поверхностей волн. Разрушение породы в области 1 носит сдвиговый характер. В области 1, где порода разрушена сдвигом полностью, резко снижается значение напряжения. Граница зоны разрушения принимает волновую нагрузку на себя, то есть сама становится несущим контуром, причем с меньшим радиусом кривизны, чем изначально. Это приводит к дальнейшей концентрации напряжений в этом районе и развитию процесса разрушения сдвигом от контура скважины вглубь массива. Кроме того, от областей первоначального разрушения распространяются волны разгрузки, их взаимодействие приводит к возрастанию разрушения в лобовой и, частично, тыльной части скважины. Эти вторичные разрушения под действием отраженной волны, в основном, носят характер отрыва.

При воздействии на замораживающую колонку ударной волны с высокими параметрами, вызывающей разрушение в околоскважинном пространстве, характер деформирования колонки, ее напряженно-деформированное состояние изменяются качественно и количественно. В начале процесса динамического воздействия, пока контур скважины устойчив, колонка по инерции перемещается относительно контура скважины против хода ударной волны, что приводит к обжатию прослойки глинистого раствора во фронтальной части и отрыву замороженного глинистого раствора от замораживающей трубы в тыльной части. При этом труба деформируется с уменьшением диаметра вдоль направления распространения волны, а при распространении волны в поперечном

направлении - с увеличением диаметра [84]. Потеря несущей способности контуром скважины неизбежно сопровождается повышением напряжений в колонке. При большом объеме разрушений, коэффициент концентрации напряжений на ней приближается к единице.

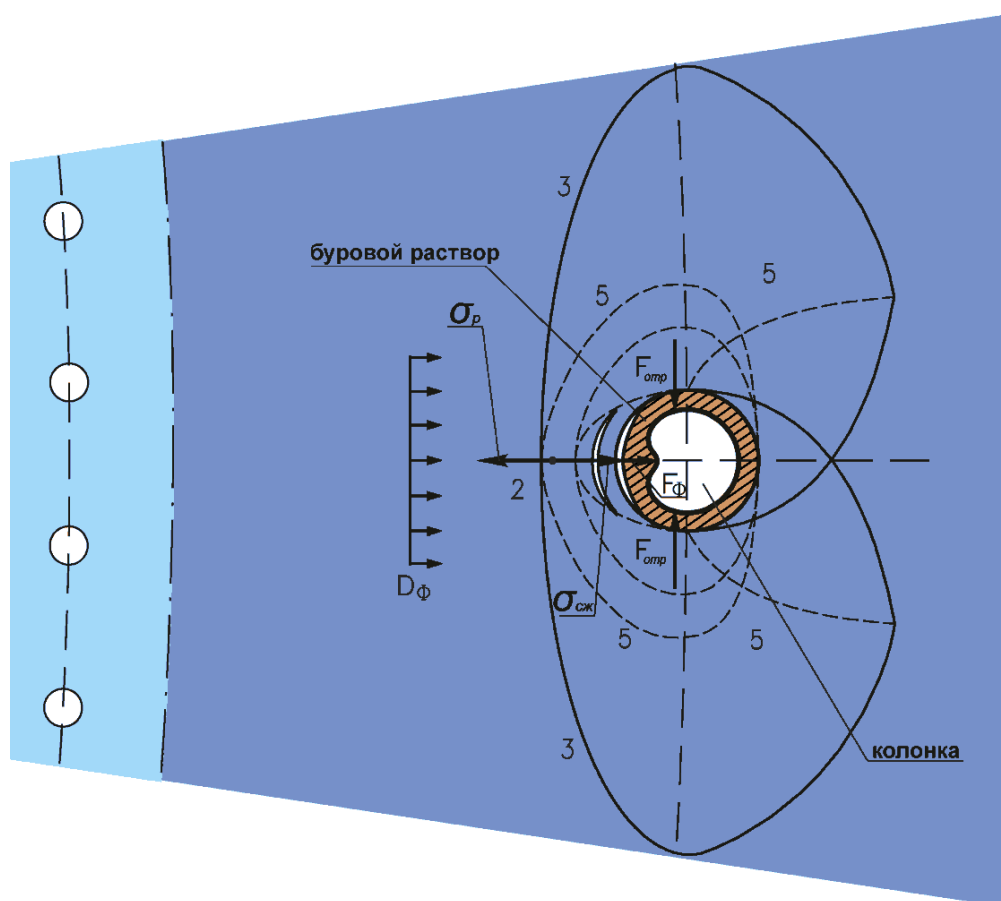


Рис. 3.19 Схема воздействия ударной волны на замораживающую колонку и процесса потери устойчивости колонки с образованием одной вмятины.

D_ϕ – ударная волна, 2-отраженная волна, 3- вторичная волна, 4- дифракционная волна, 5- волна разрежения, F_ϕ – сдвигающая сила, $F_{отр}$ – сила, сформированная волной отражения, σ_p – растягивающее напряжение на контуре скважины, $\sigma_{сж}$ – сжимающие напряжения на контуре скважины.

Выводы по главе 3

Доказано, что замораживающая скважина, в которую помещается замораживающая колонка, должна рассматриваться как неподкрепленное отверстие в породе, то есть как «свободная поверхность».

Разрушающее воздействие на замораживающую колонку создает фронт ударной волны вследствие формирования толщинным резонансом динамического поля напряжений вокруг колонки. Ударные волны при взрыве скважинных зарядов формируются лишь при наличии границ раздела двух сред с различными физико-механическими свойствами и различными значениями скоростей продольных акустических волн.

Доказано, что в случае нахождения замораживающей колонки в зоне толщинного резонанса, неизбежно произойдет разрушение последней вследствие формирования динамического поля напряжений вокруг колонки.

На основании проведенных исследований можно предложить следующие практические рекомендации по совершенствованию технологии проходки ствола в условиях применения способа искусственного замораживания:

- постоянное геоакустическое исследование пород впереди забоя ствола с целью выявления литологической границы пород с различными скоростями прохождения акустических волн;
- применение буровзрывных работ по разрушению замороженных пород в однородных породах;
- в случае наличия впереди забоя ствола горизонтальной границы раздела между замороженными породами, с целью исключения возможного разрушения замораживающих колонок рекомендуется переходить на щадящие методы взрывных работ.

4. Обоснование и разработка методики определения параметров взрывной технологии разработки пород и рекомендаций по повышению устойчивости замораживающих колонок

4.1. Общие рекомендации по повышению технико-экономических показателей строительства стволов в замороженных породах

Известно, что на проходку стволов способом замораживания затрачивается более 60% времени и около 75% стоимости от общих затрат на сооружение ствола. Способ разрушения породы предопределяет и способ ее погрузки: разрушение породы отбойными молотками обуславливает обычную ручную погрузку, так как использование тяжелых погрузочных машин неэффективно из-за больших простоев машины и необходимости большого количества проходчиков на забое. Для повышения темпов проходки стволов в замороженных породах наряду с применяемыми ранее грузчиками с механическим вождением (погрузчики КС-2у/40 и 2 КС-2у/40) , возможно использовать погрузочные машины Блайера и «Виктор» с центральной подвеской рамы грейфера [64] и ствольные погрузочные машины с центральной подвеской радиальной рамы, например, конструкции Хребто И.Ф.

При проектировании параметров процесса замораживания рекомендуется применять высокопроизводительные стационарные и передвижные замораживающие станции. В настоящее время на смену устаревшим передвижным установкам ПХС созданы холодильные установки ТНТ 100 и ТНТ 20 мощностью от 111 кВт (при температуре хладоносителя минус 25С) до 222 кВт.

В настоящий момент используются и винтовые промышленные компрессоры DAIKIN, позволяющие увеличить время работы холодильной

машины до 150 000 часов. Вместе с тем, поскольку конденсатор в холодильных машинах нового поколения ТНТ100 и ТНТ200 воздушного охлаждения, отсутствуют проблемы использования градилен и водопотребления.

В качестве холодоносителя, охлаждаемого в испарителях замораживающей станции до температуры -40°C , принят водный раствор хлористого кальция плотностью 1280 кг/м^3 при $+15^{\circ}$, температура замерзания которого $-50,1^{\circ}$. В последние годы при проектировании замораживания рекомендуется использовать в качестве хладоносителя водный раствор формиата калия с антикоррозионными ингибиторами TYFOXITF50, плотностью $1,36 \text{ г/см}^3$, температурой замерзания -50°C и рабочей температурой -38°C , который охлаждается в замораживающей станции. Для ряда задач используется этиленгликоль 40% и 55%

Для повышения качества бурения замораживающих скважин в настоящее время в зарубежной практике используются универсальные буровые установки типа RB 50 на шасси грузового автомобиля с удлинением мачты и с гидромеханическим приводом, буровые установки турбинного бурения типа DBA-4 (или RB 50), установки PRAKLA RB 50, оснащенные винтовыми забойными двигателями Weatherford 675-LE6754ML. Преимущество этих систем состоит в компактной конструкции при одновременно высокой нагрузке на крюке 500 кН и крутящим моментом на силовой вращающейся головке 31.580 Нм. Допустимое отклонение оси скважины от вертикали ограничивается окружностью радиусом 0,7 м, а в направлении центра ствола это отклонение не должно превышать 0,6 м.

Также при ведении буровых работ рекомендуются установки направленного бурения MWD (Measurement While Drilling) и автономно работающие системы EMS (Electronic Multi Shot). Для постоянного контроля вертикальности скважины возможно ведение измерительных

работ с помощью гирокомпаса. Применение этих технологий позволяет в любое время в процессе бурения получать информацию о направлении бурения и даёт возможность, при необходимости, изменять направление бурения, что способствует точному прохождению буровых скважин с минимальными отклонениями.

Способ разработки пород в забое зависит от свойств пересекаемых пород и степени их промороженности. Разработку мягких непромороженных пород типа песков или илов осуществляют грейферными погрузчиками с ручным или машинным вождением. Гравелистые породы, мел и мергель, а также слабо промороженные (до температуры -2 — -3 °С) пески и глины можно разрушать пневматическими отбойными молотками легкого и тяжелого типов и пневмолوماми, глины и суглинки — пневматическими лопатами с последующей погрузкой породы грейферными погрузчиками.

В настоящее время в нашей стране разработан стволовой проходческий комплекс АСП-8.0 для совмещенного способа проходки и крепления шахтного ствола чугунно-тюбинговой крепью с заполнением литой бетонной смесью, при необходимости, затюбингового пространства каждого кольца. Представленный комплекс обеспечивает полную механизацию погрузочных работ, механизированную установку и точную сборку тюбинговых колец, индустриальный метод качественного заполнения литой бетонной смесью затюбингового пространства.

Агрегат стволопроходческий АСП-8,0 изготовлен предприятием ООО «Скуратовский опытно-экспериментальный завод» (г. Тула) в 2012 г., по заказу ЗАО «Объединенная горно-строительная компания».

Конструкция агрегата АСП-8,0 позволяет производить механизированную проходку стволов круглого сечения диаметром до 10,13 м в необводненных породах с пределом прочности на одноосное сжатие $\sigma_{сж} < 60$ МПа и абразивностью до 15 мг, в т.ч. в условиях проходки

с замораживанием. Конструкция агрегата также позволяет выполнять механизированное сооружение тубинговой крепи диаметром в свету 8,0 м. Сборка тубингов в кольцо на монтажном кольце агрегата выполняется с помощью гидравлического тубингоукладчика грузоподъемностью 5 т, установленного на внутреннем поворотном кольце агрегата (монтажной поворотной платформе). Подъем смонтированного тубингового кольца для присоединения к тубинговой колонне осуществляется опорными вертикальными гидродомкратами агрегата. Количество вертикальных гидродомкратов - двенадцать (шесть пар), грузоподъемностью не менее 19 т каждый. Кроме того, конструкция вышеназванного технического устройства предусматривает возможность использования его монтажного кольца для буровзрывного способа проходки ствола. Агрегат выполнен во взрывобезопасном исполнении и оснащен системой пылеулавливания и пылеподавления.

Применение агрегата АСП-8,0 для проходки ствола и возведения чугунно-бетонной крепи предусмотрено после нижней границы технологического отхода. Проходка и крепление ствола с применением агрегата АСП-8,0 также как и при буровзрывном способе, с применением монтажного кольца производится по совмещенной схеме.

После монтажа и запуска в работу агрегата выполняется первая заходка на глубину 1,7 м (1,5 м высота тубингового кольца, 0,2 м монтажный зазор между кольцами для раскладки на верхнем фланце тубингового кольца горизонтальных гидроизоляционных свинцовых прокладок). Каждая последующая заходка при проходке ствола выполняется на глубину 1,5 м. Сборка каждого тубингового кольца производится, как правило, в 2 раза быстрее сборки нормального кольца при схеме установки тубингов снизу вверх, так как отсутствует горизонтальная свинцовая прокладка, постоянно сдвигающаяся при монтаже сегмента, а главное – сборка всех тубинговых колец

производится с одними и теми же отклонениями по диаметру, что обеспечивает почти идеальную стыковку смежных колец в колонне.

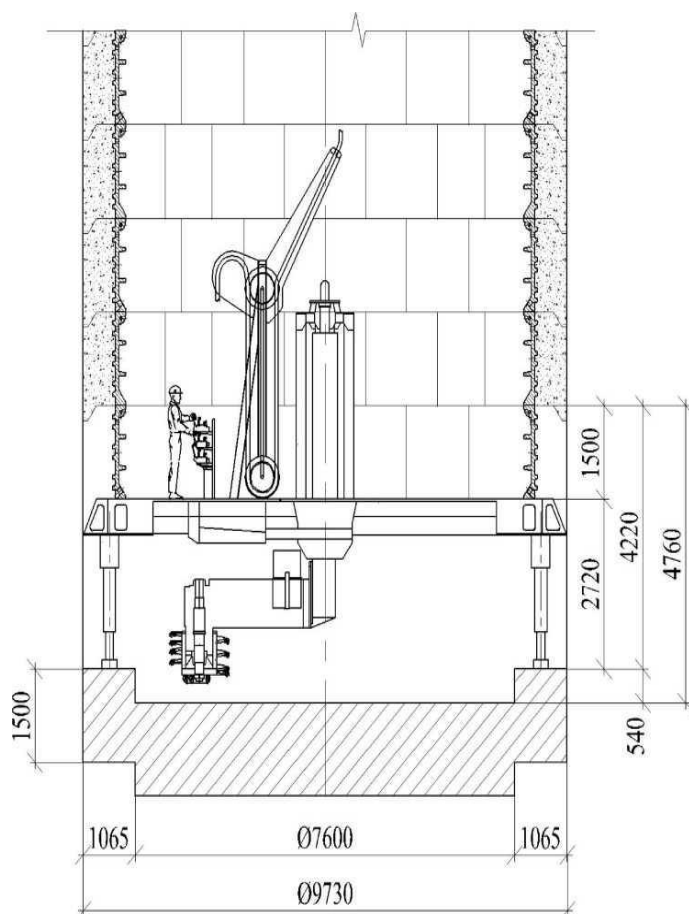


Рис.4.1 . Проходка ствола с применением агрегата стволопроходческого АСП-8,0 заходками по 1500 мм

Спуск бетона до полка может производиться как в бадьях, так и по бетонному ставу, обычно используемому для подачи бетона за опалубку ниже зоны крепления ствола чугунной тубинговой крепью. И в том, и в другом случае подача литой бетонной смеси через наклонное отверстие М100 тубингов возможно только из специального бункера по двум гибким става диаметром 100 мм в патрубке диаметром 80 мм, вворачиваемые в наклонные отверстия. Соединения гибких ставов труб выполнено с быстроразъемными соединениями. Такая система позволяет очень быстро прочистить ставы, если произошло заклинивание щебенки в ставе. При

этом литая бетонная смесь приготавливается на мелком щебне фракций 5-20 мм и с использованием суперпластификаторов, для обеспечения подвижности бетонной смеси в пределах 20-22 см и заданных низких водоцементных отношениях плотных бетонов, применяемых в сильно агрессивных средах.

Несмотря на указанные преимущества комбайнового способа проходки стволов, существенным недостатком применения способа является значительный расход электроэнергии, низкие темпы проходки так как практически невозможно выполнять одновременно разрушение и погрузку породы. Часть забоя остается ствола остается неразрушаемой из-за несовершенства кинематической схемы комбайна.

4.2. Методы повышения надежности замораживающих колонок

В первой главе диссертации доказано, что замораживающая колонка отделена буровой скважиной (обычно диаметром 200 мм) от массива. Вокруг колонки находится не порода, а буровой раствор, прочность которого при замораживании всегда ниже, чем прочность замороженного массива пород. При температуре до -10°C прочность бурового раствора вообще не принимается в расчет [ВСН189-78], а при температуре -20°C (обычное замораживание) прочность раствора не превышает 1,8 МПа, в то время как прочность песка в аналогичных условиях - 14 МПа, а глины - 7 МПа.

При рассмотрении монолитного цилиндра в главной плоскости по существующей методике [110], прочность в песке составляет 14 МПа при температуре -20°C ., а в реальной практике на контуре ослабления скважины прочность составляет 4,6 МПа, что может стать причиной разрушения замораживающих колонок под действием БВР.

По гипотезе ослабленного массива, контур буровой скважины становится поверхностью отражения прямой упругой волны взрыва вследствие жесткости границы замороженного массива и ослабленного контура. Поэтому отраженные растягивающие сейсмические волны, появляющиеся в результате отражения ударных волн, мгновенно разрушают лед в буровой скважине и образуют свободно деформируемое пространство. Следствием этого будет разрушение колонки путем образования глубокой вмятины.

Для того чтобы минимизировать отражение упругой волны взрыва на границе замороженного массива, необходимо уменьшить коэффициент отражения ударной волны путем создания более мягкой границы между породным контуром и затрубном пространстве повышая прочность последнего.

Были проведены эксперименты по изменению прочностных свойств глинистого раствора путем введения полипропиленового фиброволокна.

Результаты экспериментальных исследований по определению прочности и водонепроницаемости глинистого бурового раствора, армированного фиброй, при сжатии и температурах -1°C до -20°C представлены ниже.

Способ основан на разных характерах изменения свойств бурового раствора и массива в процессе замораживания. В талом состоянии волновые сопротивления бурового раствора $\rho_{p1} \cdot c_{p1}$ и массива $\rho_{m1} \cdot c_{b1}$ отличаются в значительной степени, и коэффициент отражения от границ их раздела

$$K_1 = \frac{\rho_{m1} \cdot c_{m1} - \rho_{p1} \cdot c_{p1}}{\rho_{m1} \cdot c_{m1} + \rho_{p2} \cdot c_{p2}}$$

По мере снижения температуры будут меняться волновые сопротивления сред, как показано на фиг.3. Волновое сопротивление бурового раствора меняется в меньших пределах (кривая 1), чем волновое

сопротивление массива пород (кривая 2). При определенной температуре их волновые сопротивления будут близки друг к другу и коэффициент отражения уменьшится до 0

Испытуемые образцы размером 70x70x70 замораживали в морозильной камере МК-50 до заданных температур, а в камере БВ-21 запредельного деформирования при объемном сжатии образцов определяли прочность на гидравлическом прессе ЕУ-10. Водонепроницаемость образцов измеряли по коэффициенту фильтрации по ГОСТ 12730584 с помощью прибора фильтрометра ФМ-3 с максимальным испытательным давлением 1,3 МПа. Затвердевший глинистый раствор с фиброй на пятые сутки имеет водонепроницаемость 10^{-6} см/с, модуль деформации $E < 100$ МПа, прочность на одноосное сжатие от 2,8 до 4.5 МПа.

Таблица 4.1.

Пределы прочности при сжатии $\sigma_{сж}$ и водонепроницаемости замороженного глинистого бурового раствора, укрепленного фиброй, в зависимости от температуры.

Глинистый буровой раствор, укрепленный синтетической полипропиленовой фиброй (СПФ), мас %		Пределы прочности при сжатии (в МПа) при температуре, С ⁰				
		От -1 до -5	От -5 до -10	От -10 до -15	От -15 до -20	От -20 до -25
Глинистый буровой раствор	Фибра (СПФ)					

92-91	8-9	0,7-0,85	1,1-1,2	2,1-2.8	2,9-3,4	3,2-3,6
90-88	10-12	1.1-1,6	1,8-2.8	3,1-4,2	4,2-4.8	4,9-5,2
87-85	13-15	1.5-1.8	1,9-3,0	3,2-4.4	4.5-5,5	5.6-6,2
83-80	17-20	2.2-2,6	3,0-3,8	4.0-5.2	5,5-7.2	7,5-9,2
Водонепроницаемость, м						
Глинистый буровой раствор	0.02	0,02-0.04	0,05-0,08	0,09-0,1	0.1-0.2	
Глинистый буровой раствор с фиброй 10-12%	0,09-0.12	0,15-0.17	0,18-0.22	0.26-0.28	0,31-0.34	
Глинистый буровой раствор с фиброй 13-15%	0,15-0.19	0.20-0.24	0.25-0.28	0,34-0.38	0,38-0.41	
Глинистый буровой раствор с фиброй 17-20%	0,18-0,22	0.24-0.31	0,31-0,38	0,34-0,42	0,41-0,44	

Из всех измерений составляем интервальный вариационный ряд.

Величина интервала

$$h = \frac{x_{max} - x_{min}}{1 + 3,2 \lg n} = \frac{5,2 - 0,7}{1 + 3,2 \lg 92} = \frac{4,5}{1 + 3,2 \cdot 1,95} = 0,6$$

Начало первого интервала $Q_1 = x_{min} - \frac{h}{2} = 0,2$

Составляем таблицу интервального ряда

Таблица 4.2

Интервал предела прочности, МПа	Значение середины интервала	Частота, m_i	Частость $W_i = m_i/n$	Накопленная частота
--	-----------------------------------	----------------	---------------------------	------------------------

0,4-1,0	0,7	8	0,09	8
1,0-1,6	1,3	11	0,12	19
1,6-2,2	1,9	13	0,14	32
2,2-2,8	2,5	21	0,22	53
2,8-3,4	3,1	9	0,11	62
3,4-4,0	3,7	8	0,09	70
4,0-4,6	4,3	9	0,1	79
4,6-5,2	4,9	13	0,14	92
Итого		92	1,0	92

Далее вычисляем среднюю арифметическую ряда распределения, дисперсию и стандарт. Для этого составляем упорядоченный вариационный ряд.

Таблица 4.3

Вариант x_i	частота	$m_i x_i$	$x_i - X$	$(x - X)^2$	$(x - X)^2 m_i$
0,7	1	0.7	-2,18	4,75	4,45
0,71	1	0.71	-2,17	4,71	4,71
0,74	1	0,75	-2,14	4,58	4,58
0,75	1	0.75	-2,13	4,54	4,54
0.79	1	0.79	-2,09	4,37	4,37
0,82	1	0.82	-2,06	4,24	4,24
0,84	1	0.84	-2,04	4,16	4,16
0,86	1	0.86	-2,02	4,08	4,08
1.2	2	2,4	-1,68	2,82	2,82
1,4	2	2,8	-1,48	2,19	4,38
1,5	2	3	-1,38	1,9	3,80
1,6	5	8	-1,28	1,64	8,12

1,7	2	3,4	-1,18	1,39	2,78
1,75	1	1,75	-1,13	1,22	1,28
1,8	3	3,4	-1,08	1,17	3,50
1,9	1	1,9	-0,98	0,96	0,96
2,0	3	6	-0,88	0,77	2,32
2,1	2	4,2	-0,78	0,61	1,22
2,2	1	2,2	-0,67	0,46	0,46
2,4	2	4,8	-0,48	0,23	0,46
2,5	2	5	-0,38	0,14	0,29
2,6	4	10,4	-0,28	0,78	0,31
2,7	3	8,7	-0,18	0,032	0,097
2,8	8	22,4	-0,,08	0,0064	0,05
2,9	1	2,9	0,02	0,0004	0,0004
3,0	1	3,0	0,12	0,0144	0,0144
3,1	2	6,2	0,22	0,0484	0,0968
3,2	1	3,2	0,32	0,1024	0,1024
3,3	2	6,6	0,42	0,1764	0,3528
3,4	3	10,2	0,52	0,2704	0,8112
3,8	1	3,8	0,92	0,8464	0,8464
3,9	5	19,5	1,02	1,0404	5,202
4,0	2	8	1,12	1,2544	2,5088
4,1	3	12,3	1,22	1,4884	4,4652
4,2	4	16,8	1,32	1,7424	6,9696
4,6	2	9,2	1,72	2,9584	5,9168
4,8	2	9,6	1,92	3,6864	7,3728
4,9	2	9,8	2,02	4,0804	8,1608
5,0	3	15	2,12	4,4944	13,4832
5,1	2	10,2	2,22	4,9284	9,8565

5,2	4	20,8	2,32	5,3824	21,5296
	92	$\sum 265,06$		91	$\sum 190,9642$

Среднее значение признака $\bar{X} = \frac{\sum x_i m_i}{\sum m_i} = \frac{265,06}{92} = 2,88$

Дисперсия и стандарт распределения

$$\sigma^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2 \cdot m_i}{\sum m_i} = \frac{190,9642}{92} = 2,076$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{2,076} = 1,44$$

Значение коэффициента вероятности и его ошибка

$$V = \frac{\sigma}{\bar{x}} = \frac{1,44}{2,88} \cdot 100\% = 0,5 \cdot 100\% = 50\%$$

$$m_v = \frac{V \cdot \sqrt{0,5 + V/h^2}}{\sqrt{h}} = \frac{0,5 \cdot \sqrt{0,5 + 0,5/92^2}}{\sqrt{92}} = \frac{0,3535}{9,59} = 0,037 \cdot 100\% = 3,7\%$$

$3m_v < V (11,1\% < 50\%)$, следовательно, результаты опробования можно считать надежными.

Находим ошибку среднего арифметического ($\bar{x} = 2,88$) МПа при ряде распределения

$$\sigma_x = \frac{t\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{2 \cdot 1,44}{\sqrt{92}} = \frac{2,8}{9,59} = 0,3 \text{ МПа}$$

$t=2$ – аргумент функции Лапласа при надежности 95%.

Величина среднего арифметического $\bar{X} = 2,88$ МПа с надежностью 95% определена с ошибкой $\sigma_x \pm 0,3$ МПа.

Надежность 95% означает, что в среднем из ста случаев только в 5 случаях будет ошибка, большая, чем $\pm 0,3$ МПа.

Отсюда доверительные границы будут $2,88-0,3$ и $2,88+0,3$ при

$$B = f(t) = 95.5\%$$

Определяем по приведенным данным величину надежности B , с которой может быть гарантирована предельная программа выбора

$$\sigma_x = 1 \text{ МПа}$$

$$\text{Вычислим } t = \frac{\sigma_x}{\sigma} \sqrt{n} = \frac{1 \cdot \sqrt{92}}{1.44} = \frac{9.59}{1.44} = 6.66$$

Подставляя это значение в функцию Лапласа, получаем

$B = f(t) = 99.9$ находим $t = 4$ из выражения

$$t = \frac{\sigma_x \sqrt{n'}}{\sigma}$$

$$n' = \frac{t^2 \sigma^2}{\sigma_x^2} = \frac{4^2 \cdot 2.076}{1} = 33 \text{ образца}$$

Следовательно, должно быть отобрано не менее 33 образцов.

Проведем однофакторный дисперсионный опыт. Полученные значения показаны в табл. 4.4.

При содержании фибры 9%.

Таблица 4.4.

№	Интервал температур				Дисперсия
	-5 ⁰ С	-10 ⁰ С	- 15 ⁰ С	-20 ⁰ С	
1	0,7	1,8	2,1	3,1	
2	0,74	1,5	2,8	3,1	
3	0,71	1,9	2,5	3,4	
4	0,79	2,0	2,8	3,2	
5	0,75	2,0	2,8	3,4	
6	0,82	2,0	2,6	3,1	
7	0,86	2,2	2,9	3,3	
8	0,84	2,1	2,7	3,3	

Определение дисперсии и средних арифметических величин

Таблица 4.5

Группа	Счет	Сумма	Среднее	Дисперсия	Сумма квадратичного отклонения
Столбец 1	8	6,21	0,78	0,0031	0,0056
Столбец 2	8	15,5	1,94	0,0409	
Столбец 3	8	21,2	2,65	0,0603	
Столбец 4	8	25,9	3,24	0,0149	

Среднее арифметическое определяем по формуле для каждого столбца и записываем в строчки:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Дисперсию определяем из выражения:

$$\sigma^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{X})^2 \cdot m_i}{\sum m_i}$$

Для определения критического значения F используем уровень значимости $\alpha = 0.05$

где F - распределение величин;

K_1 - число степеней свободы большой дисперсии,

K_2 - число степеней свободы меньшей дисперсии

$$K_2 = (n - 1), K_1 = m(m - 1)$$

При $m = 4, n = 8$

$$K_1 = m(m - 1) = 8(4 - 1) = 24$$

$$K_2 = (n - 1) = 8 - 1 = 7$$

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{24}{7} = 3.42$$

Критическое значение $F = 9.2$ говорит о том, что температурный фактор существенно влияет на значение предела прочности на сжатие, то есть, с уменьшением температуры предел прочности увеличивается.

Построим эмпирическую кривую по экспериментальным данным. Для этого по оси X отложим температуру, а по оси Y – среднее значение по столбцу при содержании фибры 9%.

При $t = -5$ $\sigma_{\text{сж}} = 0,78$ МПа

При $t = -10$ $\sigma_{\text{сж}} = 1,94$ МПа

При $t = -15$ $\sigma_{\text{сж}} = 2,6$ МПа

При $t = -20$ $\sigma_{\text{сж}} = 3,24$ МПа

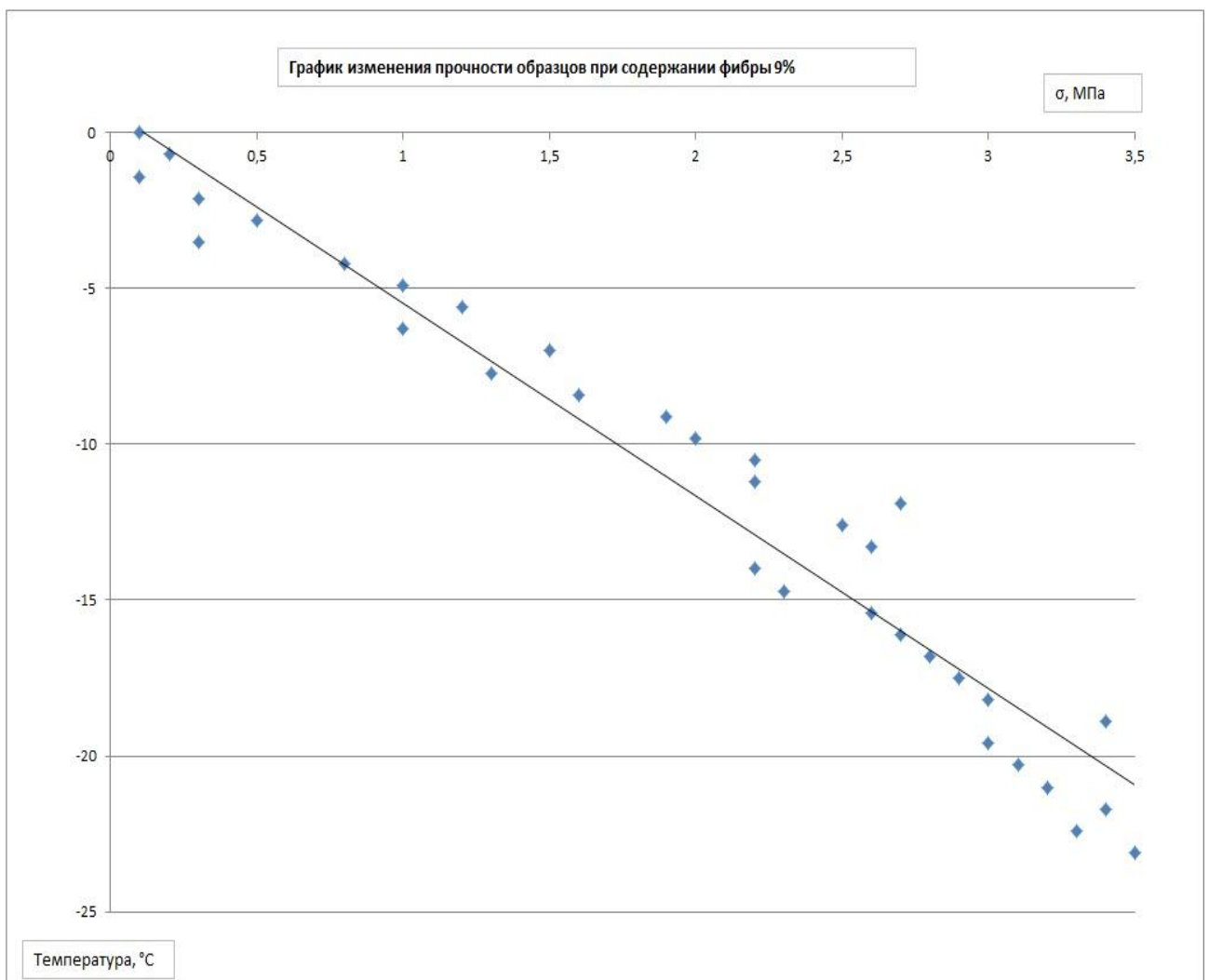


Рис. 4.2. График изменения прочности замороженных образцов глинистого раствора, усиленного 12 % фибры при различных температурах.

При содержании фибры 12 %.

При $t = -5$ $\sigma_{\text{сж}} = 1,44$ МПа

При $t = -10$ $\sigma_{\text{сж}} = 2,66$ МПа

При $t = -15$ $\sigma_{\text{сж}} = 4,02$ МПа

При $t = -20$ $\sigma_{\text{сж}} = 4,98$ МПа

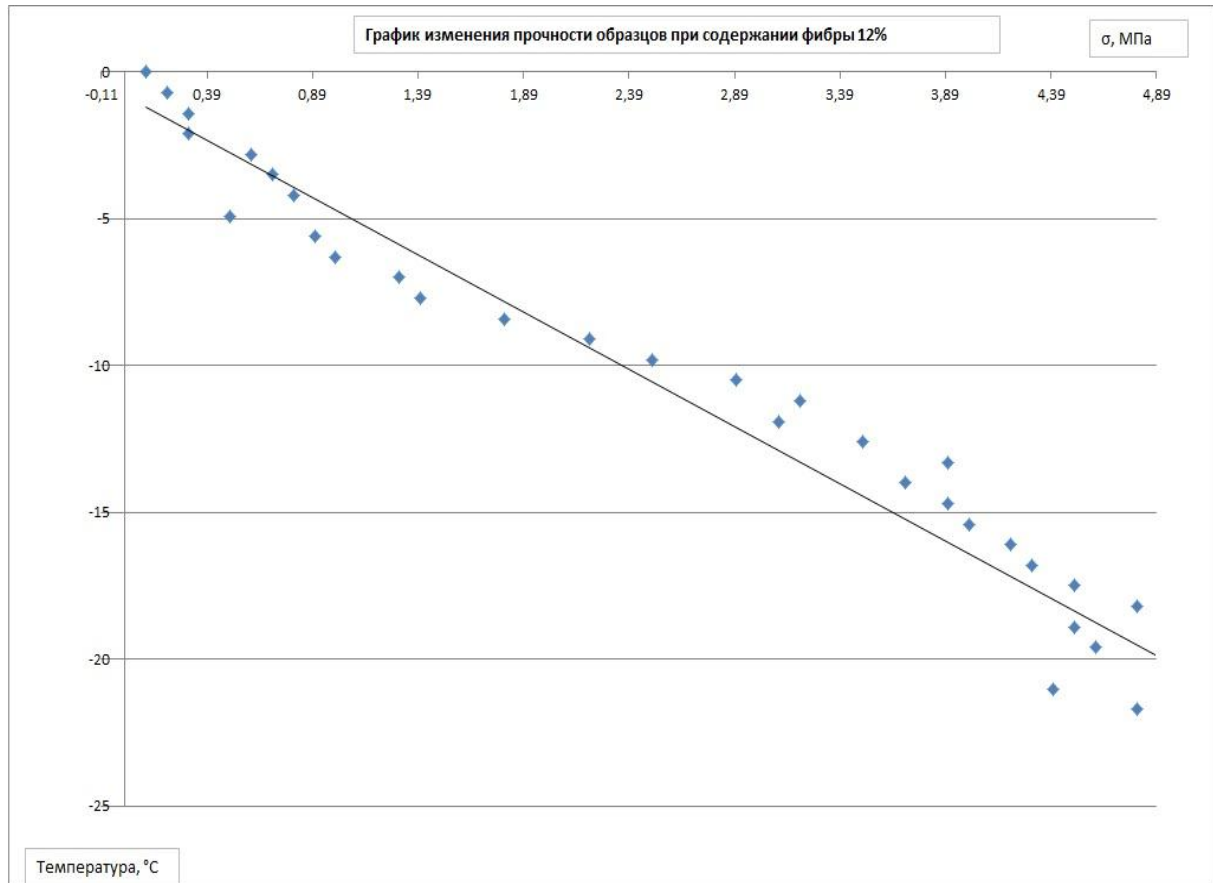


Рис. 4.3. График изменения прочности замороженных образцов глинистого раствора, усиленного 15 % фибры при различных температурах.

При содержании фибры 15 %.

При $t = -5$ $\sigma_{\text{сж}} = 1,99$ МПа

При $t = -10$ $\sigma_{\text{сж}} = 2,3375$ МПа

При $t = -15$ $\sigma_{\text{сж}} = 4,72$ МПа

При $t = -20$ $\sigma_{\text{сж}} = 5,86$ МПа

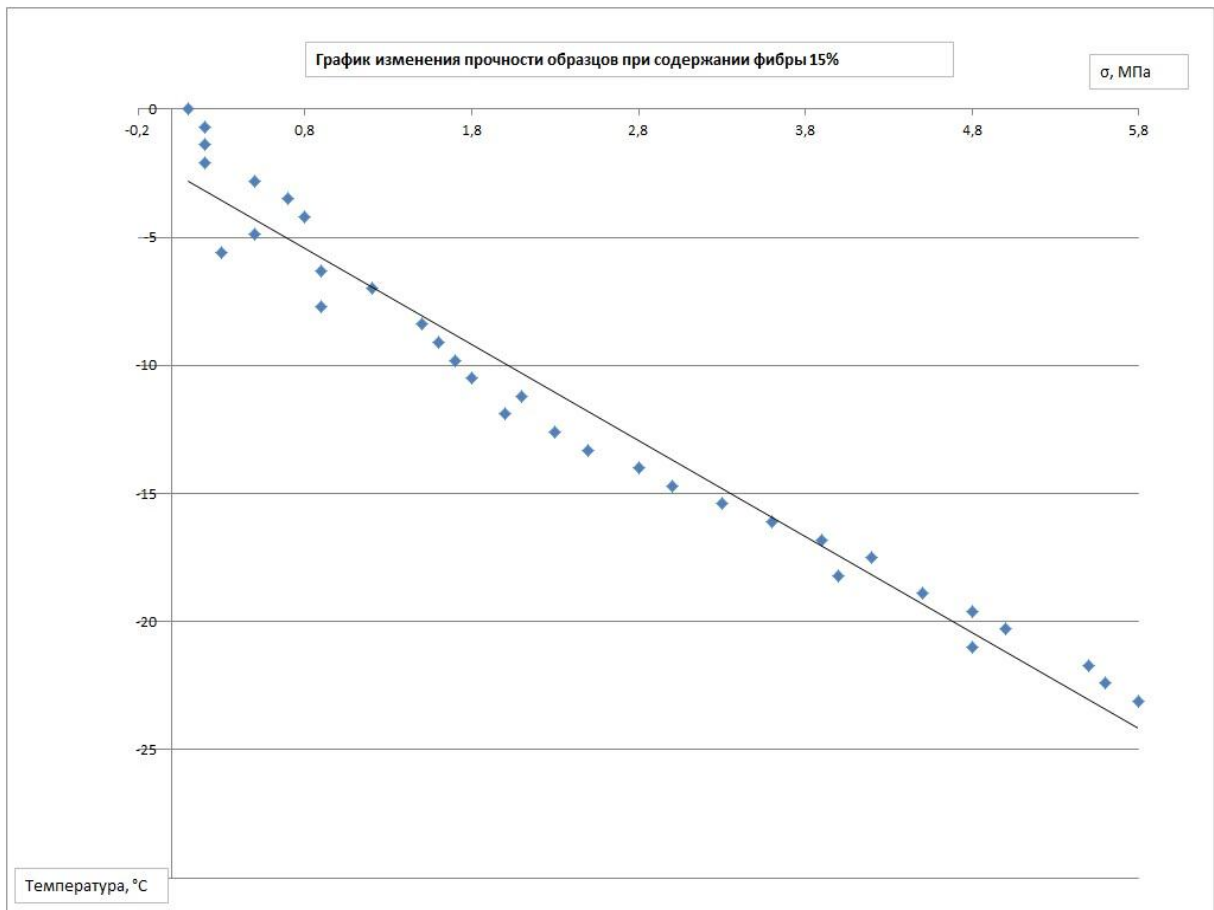


Рис. 4.4. График изменения прочности замороженных образцов глинистого раствора, усиленного 9 % фибры при различных температурах.

Построим эмпирическую зависимость изменения прочности образца при изменении содержания фибры от 9 до 15% при температурах :
 -5°C , -10°C , -15°C и -20°C .

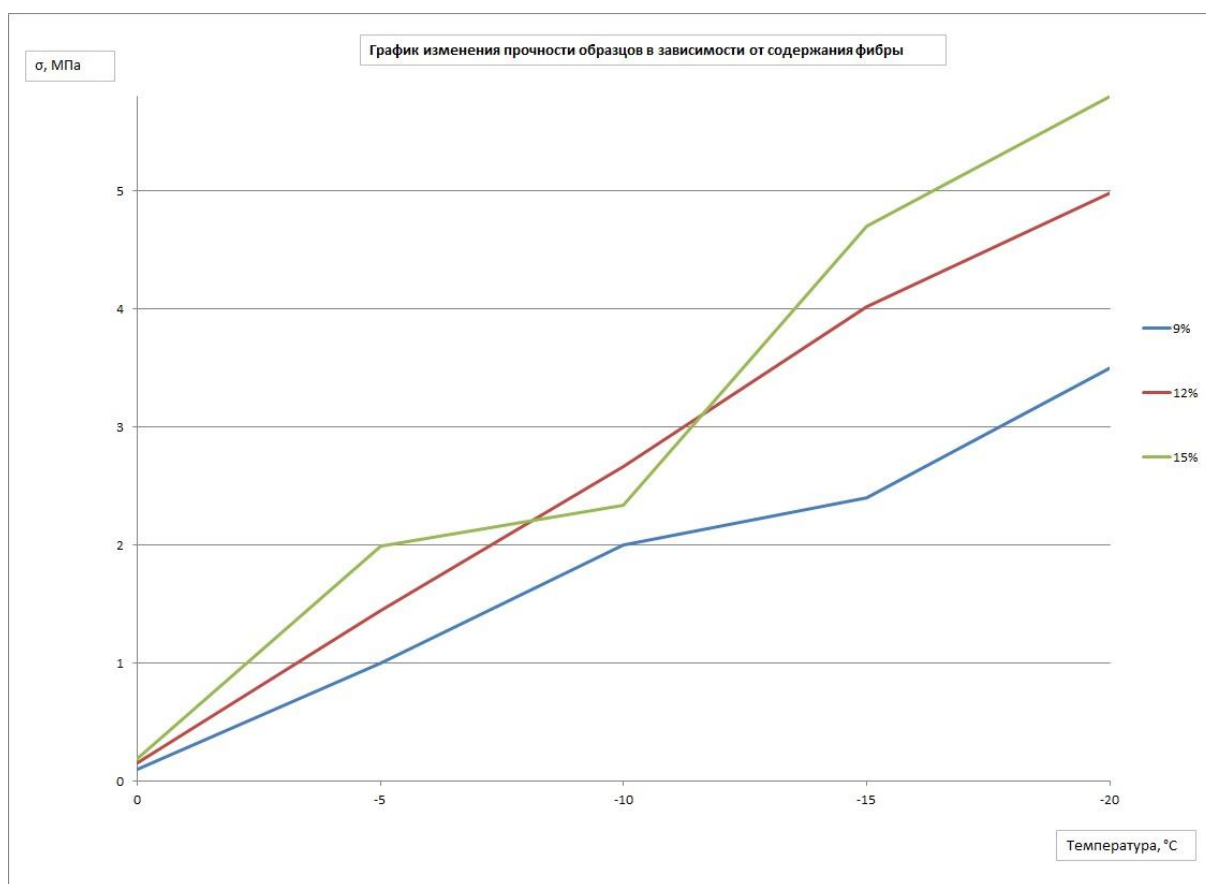


Рис.4.5. График изменения прочности замороженных образцов в зависимости от содержания фибры.

Из графика (Рис.4. 5) видно, что уже при содержании фибры 9% достигается прочность образцов 3.4 МПа при температуре -20°C . а при добавлении полипропиленовой фибры в соотношении 12% к глинистому буровому раствору возможно повысить прочность последнего до значения 4,98 МПа. При такой прочности коэффициенты отражения между породным контуром и слоем замороженного раствора становятся меньше 1, следовательно, образуется мягкая граница между материалами, что обеспечит защиту замораживающей колонки от действия ударной волны.

На предлагаемый способ проходки вертикальных шахтных стволов в неустойчивых и обводненных породах получен патент РФ на изобретение №2534274 29.09.2014[90].

4.3. Методы снижения воздействия ударной волны на замораживающую колонку

Результаты исследований ряда специалистов по разработке методов контурного (щадящего) взрывания [15] показывают, что снижение разрушающего действия контурных шпуров на законтурный массив, а именно, на замораживающие колонки, сводится к поиску методов управления первичным полем напряжений, распространяющемуся от центра шпура (взрыва) к проектному контуру ствола. Достигаться это может различными приемами, в том числе применением зарядов с различными геометрическими формами и конструкциями [36], типа ВВ с меньшей скоростью детонации и теплотой взрывания или уменьшением массы шпурового заряда. Кроме того, часто применяется защита приконтурного массива от действий взрыва путем создания по контуру выработки разгрузочной щели или оконтуривание выработок незаряженными скважинами (шпурами) [22,56,58,]. Однако практика взрывных работ при проходке шахтных стволов показывает [33], что с позиции влияния на сохранность замораживающих колонок взрывы зарядов во врубовых шпурах также оказывают влияние, как и взрывы оконтуривающих шпуров. Если разрушение массива врубовыми и отбойными шпурами произойдет некачественно, то заряды контурных шпуров будут работать при повышенных ЛНС (линии наименьшего сопротивления) либо при отсутствии второй плоскости обнажения. В таких случаях волна напряжения, действующая на колонки, будет иметь более значительную амплитуду (явление «зажима»). Известно также, что из-за повышенного сопротивления породы по подошве шпуров (увеличение «зажима») увеличивается воздействие напряжений на законтурную зону, увеличивается длительность волны напряжений. Один из рекомендуемых приемов для снижения «зажимов» - вертикальное расположение контурных шпуров.

Одним из приемов управления действием взрыва является усиление напряженного состояния разрушаемой породы в заданном направлении, например, в соответствии с проектным контуром ствола при общем снижении массы шпурового заряда.

Указанный эффект может быть достигнут за счет создания на стенках шпура концентраторов напряжений в виде треугольных надрезов на стенках шпура [56].

В работе [56] доказано, что наличие надрезов на стенках шпуров с углами при вершине $\alpha=90^0$ обеспечивает сохранность следов шпуров на контуре горной выработки, удельный расход ВВ при этом снижается более чем на 77% и равен:

$$q_1 = q_0 \cdot K_3, \text{кг/м}^3 \quad (4.1.)$$

где q_0 - нормативный расход ВВ, кг/м^3 .

K_3 - коэффициент снижения энергоемкости разрушения, зависящий от глубины надреза.

При глубине надреза около 3 мм $K_3 = 0,7$ [56].

Надрезы, то есть концентраторы напряжений, направлены в соответствии с проектным контуром ствола, позволяют снизить массу шпурового заряда ВВ и осуществить разрушение горной породы по направлению ориентации надрезов без уменьшения расстояния между шпурами контурного ряда. Благодаря уменьшению массы шпуровых зарядов (или применению маломощных зарядов ВВ) снижается разрушающее действие взрыва на приконтурный массив, то есть повышается его сохранность и надежность (Рис. 4.4).

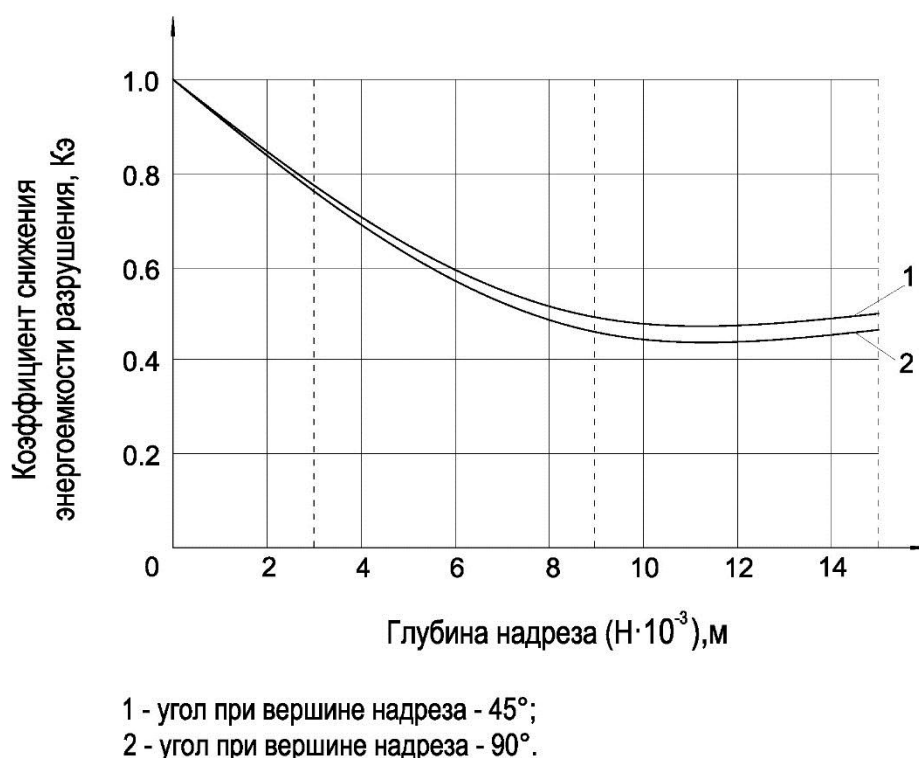


Рис.4.6 Зависимость коэффициента снижения энергоемкости разрушения пород от глубины профильного надреза.

Для условий вентиляционного ствола рудника «Удачный» ОАО АЛРОСА в условиях вечной мерзлоты разработан и применен паспорт буровзрывных работ с использованием шпуров с концентраторами энергии в предконтурном ряду. Расстояние между центрами шпуров врубовых, отбойных и шпуров предконтурного ряда определялось по известным методикам. При бурении цилиндрических шпуров контурного ряда выполнялось условие, при котором центры этих шпуров находились на общем радиусе с центрами шпуров предконтурного ряда, а расстояние между этими центрами было принято не более 2,5-3,0 раз от размера диаметра шпуров контурного ряда. Производилось зарядание и взрывание врубовых, отбойных и шпуров предконтурного ряда. Шпуры контурного ряда не заряжались.

Полученные в результате эксперимента данные подтвердили снижение скорости смещения частиц породного контура более, чем в 2,7

раза. На данное предложение получено положительное решение о выдачи патента №2014109894/03 от 20.02.2015 г.

Достаточно широко освещены в технической литературе методы снижения динамической нагрузки от взрыва путем создания экранирующей щели по контуру горной выработки[28] для защиты законтурного массива (в частности, замораживающих колонок) от действия взрыва. Частным случаем создания экранирующей щели в стволе для снижения нагрузки на замораживающую колонку является бурение незаряженных шпуров по контуру выработки [15,31]. Пробуренные и незаряженные шпуры осуществляют местное усиление волны напряжений и ослабляют общую сопротивляемость породы растяжению, то есть такие шпуры являются центрами для образования будущей щели.

Как известно [29], цилиндрический шпур (отверстие) является концентратором напряжений. На контуре шпура коэффициент концентрации напряжений $k_k=3$ [18], а с увеличением расстояния от центра шпура эта величина уменьшается. На расстоянии большем, чем $(2,5 \cdot d_{\text{шп}})$ от контура шпура, влияние отверстия практически не наблюдается.

Рассмотрим влияние компенсационных оконтуривающих шпуров на снижение параметров взрывной волны напряжений. Волна напряжений от взрыва зарядов ВВ в предконтурных шпурах перемещается к контурным (незаряженным) шпурам, теряя при этом часть своей энергии. Ослабленная волна напряжений, подошедшая к ряду незаряженных контурных шпуров, усиливается в зоне влияния коэффициента концентрации напряжений на контуре шпуров и осуществляет интенсивное дробление породы в зоне контурных шпуров. Общая ширина «В» зоны влияния контурных шпуров составит от центра шпуров:

$$B = (2,5 \cdot d_{\text{шп}}) + d_{\text{шп}} \quad (4.2)$$

где $d_{\text{шп}}$ - диаметр контурных шпуров;

Разрушенная порода изменяет свою плотность, что приводит к резкому затуханию волны напряжений. Таким образом, наличие незаряженных контурных шпуров создает условия, при которых волна напряжений, достигающая замораживающих колонок, не будет превышать допускаемые прочностные нагрузки.

Результаты теоретических исследований [29] и экспериментальных работ [31] по влиянию незаряжаемых шпуров на эффективность трещинообразования вокруг шпура показали, что значительная часть целика породы между заряжаемыми и незаряжаемыми шпурами разрушается на частички размером до десятых долей миллиметра.

Известно, что амплитуда радиальной составляющей волны напряжений σ_r определяется из зависимости [34]:

$$\sigma_r = \rho_{\Pi} \cdot C_{\Pi} \cdot V_r, \text{Па} \quad (4.3)$$

где ρ_{Π} – плотность породы, кг/м³;

C_{Π} – скорость звука в породе, м/с;

V_r – скорость смещения частиц породы в радиальном направлении, м/с.

Следовательно, в раздробленной породе уменьшается σ_r , так как даже при $V_r = \text{const}$ значения ρ_{Π} и C_{Π} будут уменьшаться.

Диаметр окружности контурных (незаряжаемых) шпуров равен:

$$D_{\text{кш}} = D_{\text{пр}} - 2 \cdot r_1, \text{м} \quad (3.32)$$

Диаметр окружности расположения предконтурных шпуров с учетом зависимости (4.3.) равен:

$$D_{\text{пкш}} = D_{\text{кш}} - 2B$$

Пример: Замораживающие колонки расположены на расстоянии $R = 1,0$ м от зарядов предконтурного ряда.

Диаметр окружности цилиндрических контурных шпуров равен:

$$D_{\text{кш}} = D_{\text{пр}} - 2 \cdot r_1 = 6,7 - 2 \cdot 0,3 = 6,1 \text{ м}$$

Ширина зоны «В» между контурными и предконтурными шпурами определяется по (4.3):

$$B = (2,5 \cdot d_{\text{шп}}) + d_{\text{шп}} = 0,14 \text{ м}$$

Предконтурные шпуры имеют на стенках треугольные надрезы глубиной 3 мм, ориентированные вершинами параллельно стенкам ствола. Эти шпуры не имеют забойки. Диаметр окружности расположения шпуров предконтурного ряда

$$D_{\text{пкш}} = D_{\text{кш}} - 2B = 6,1 - 2 \cdot 0,14 = 5,8 \text{ м}$$

Масса заряда в шпурах предконтурного ряда определяется по (4.2) и равна:

$$q_1 = q_0 \cdot K_3 = 0,6 \cdot 0,7 = 0,42 \text{ кг}$$

где K_3 - коэффициент снижения энергоемкости разрушения [22];

q_0 - масса заряда для цилиндрических шпуров;

Давление взрывной волны от заряда $q_1 = 0,42 \text{ кг}$ определяется по формуле:

$$P_0 = \frac{G_{\text{шп}} \cdot E \cdot (\gamma - 1)}{V_{\text{шп}}} = \frac{0,4 \cdot 4,3 \cdot 10^6 (1,24 - 1)}{1,884 \cdot 10^{-3}} = 219,2 \text{ МПа}$$

Амплитуда напряжений P_0 , интенсивно разрушающих породу в зоне «В», превращает ее в зону пластических деформаций с показателем затухания $n_1 = 3$ [].

Тогда напряжения за зоной «В» равно:

$$\sigma_{\text{нап}} = P_0 \left(\frac{r_{\text{зар}}}{R} \right)^{1/n} = 219,2 \cdot \frac{0,016^{\frac{1}{3}}}{0,014} = 106,28 \text{ МПа}$$

Ослабленная волна напряжений перемещается в направлении замораживающей колонки по расстоянию

$$R_1 = R - B = 1,0 - 0,14 = 0,86 \text{ м}$$

Принимаем условие, что показатель затухания «n», рассчитанный ранее в зоне R_1 , также равен $n = 1,865$

Следовательно, напряжение σ_2 , действующее на замораживающую колонку, равно:

$$\sigma_2 = P_0 \left(\frac{r_{\text{зар}}}{R} \right)^{1/n} = 106,28 \cdot \frac{0,016^{\frac{1}{1,865}}}{0,86} = 12,56 \text{ МПа}$$

Расчетная величина нагрузки с учетом коэффициента надежности будет равна:

$$N_{\text{взр}} = \sigma_{\text{нап}} \cdot 1,2 \cdot 1,2 \cdot 1,0 \cdot 1,5 = 2,16 \cdot 12,56 = 27,13 \text{ МПа}$$

Таким образом, если замораживающие колонки изготовлены из трубы 127x7,5 стали группы «М», давление смятия в которых $P_{\text{см}}=47,1$ МПа, то условие неразрушаемости колонки выполняется.

Выполненные расчеты показали, что сохранность замораживающих колонок обеспечивается при массе одновременно взрывааемых зарядов аммонита 6ЖВ 0,4 кг, забойка в шпурах должна отсутствовать, а инициирование каждого шпура в соответствии с рекомендациями [38] следует производить электродетонаторами замедленного действия.

Выше приведенная методика выполнения БВР, позволяющая не разрушать целостность замораживающей колонки, была положена в основу патента на изобретение [29].

4.3. Экспериментальные исследования эффективности использования компенсационных шпуров на безопасность и герметичность замораживающих колонок

Снижение сейсмического воздействия взрыва на защитное ледопородное ограждение возможно путем применения экранирующих щелей, создаваемых компенсационными шпурами. Известно, что критериями оценки интенсивности сейсмических колебаний являются колебательная скорость u и энергия W_s .

Экспериментальные исследования были проведены в условиях строительства наклонного ствола шахты Садкинская ОАО Ростовуголь, проходимого с применением способа искусственного замораживания. По трассе проведения наклонного конвейерного ствола проведены изыскательские работы. Залегание уровня грунтовых вод составило 45,2 м.

Мощность водоносного горизонта в среднем составляет 8м. Удельный дебит 0,068 л/сек. Коэффициент фильтрации $K = 1,4$ м/сут.

Инженерно-геологические условия строительства наклонного ствола шахты Садкинская в четвертичных отложениях характеризовались как осложнённые, а в интервале пересечения водоносных песчаников и сланцев – неблагоприятными из-за высокой вероятности наличия пливунов.

Эксперимент по определению ослабления колебательной скорости и энергии сейсмического воздействия проводится на двух однотипных участках массива. В первом случае проводится запись упругих колебаний в защитной зоне, создаваемыми двумя рядами компенсационных шпуров, располагаемых в шахматном порядке (рис.3.26), во втором - при их отсутствии. Запись колебаний осуществляется сейсмостанцией «Диоген» (технические характеристики приведены в Приложении 2) 3-х компонентными датчиками (3 сейсмоприемника СВ-20, ориентированных в 3-х взаимно перпендикулярных направлениях).

Исследования проводились в песках, глинах и глинистых песках со следующими характеристиками (Табл.3.9):

Физико-механические свойства грунтов Таблица 4.9.

Наименование пород	Объемный вес г/см ³	Удельный вес г/см ³	Весовая влажность%	Пористость%
Песок	1.8	2,66	24.52	14
Песчаные глины	2,08	2.66	16,8	35
Глины	1.8	2,74	30-32	47-50
Супесь	1,2-2.1	2,66-2,77	19-25	40-56,8

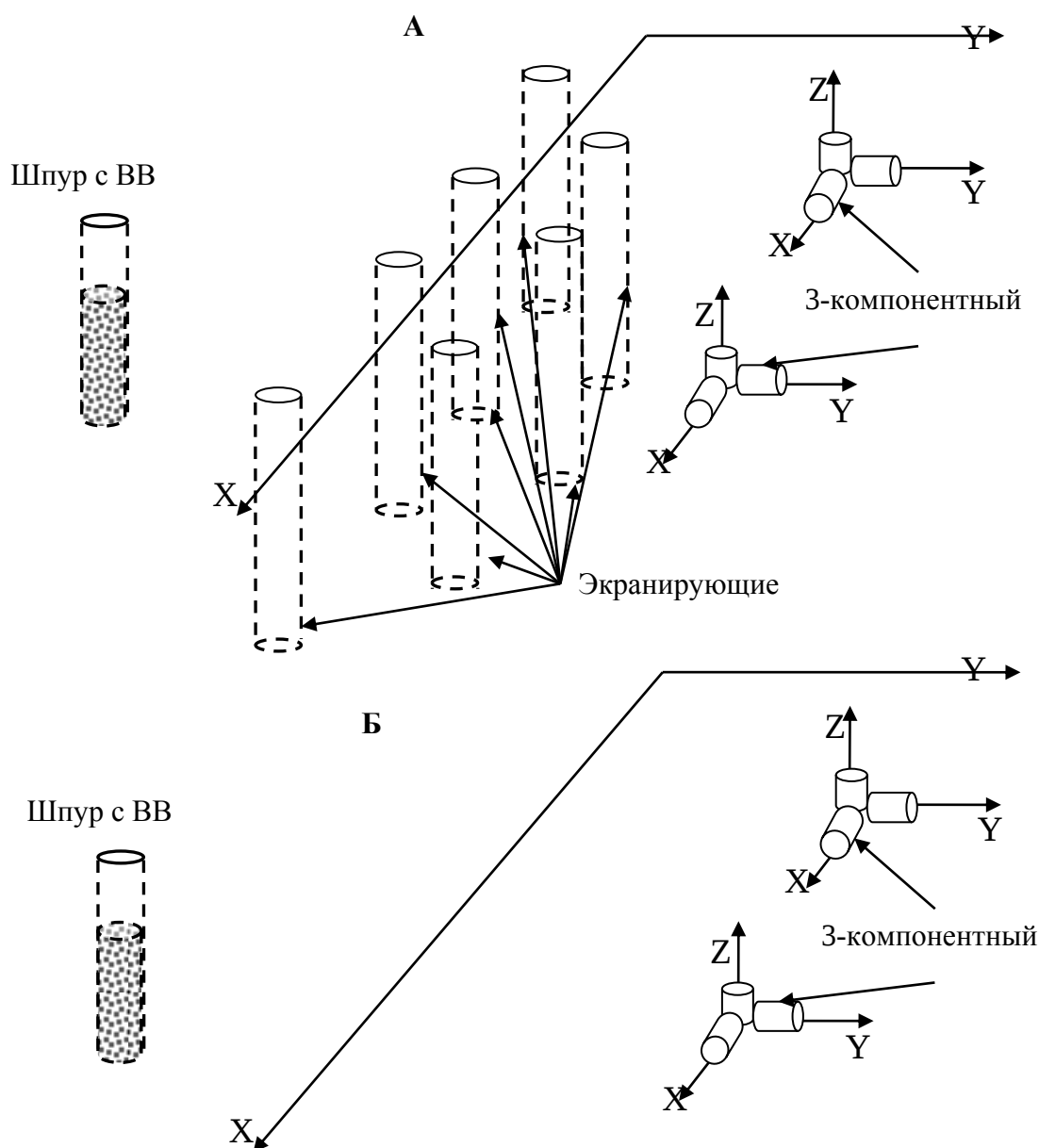


Рис.4.7. Схема эксперимента. А – запись сейсмических колебаний при наличии экранирующих шпуров; Б – запись сейсмических колебаний без экранирующих шпуров

Результаты измерений представлены в таблице 4.10

Результаты измерений скорости смещения частиц массива

Таблица 4.10

Наименование пород	Вес заряда	Длина заряда	Расстояние до точки	Скорость смещения	Скорость смещения
--------------------	------------	--------------	---------------------	-------------------	-------------------

	q, кг	l, м	наблюдения г, м	Vm, см/с	Vlm, см/с при наличии компенс. шпуров
1	2	3	4	5	
Песок	1,557	0,84	0,3	373	119,36
	0,706	0,66	0,17	178	40,94
	1,557	0,84	0,8	186	53,94
	1,557	0,84	0,8	134	40,2
	0,778	0,42	0,8	102	24,48
	1,242	1,1	0,8	175	40,25
	1,242	1,1	0,9	173	38,06
	1,557	0,84	1,2	87	25,23
	1,557	0,84	1,2	75	26,25
Глина	1,557	0,84	0,3	624	137,28
	1,557	0,84	0,8	269	64,56
	1,557	0,84	0,8	278	72,28
	1,557	0,84	1,2	183	47,58
	0,778	0,42	1,2	84	26,04
	0,496	0,44	1,2	131	28,82
	1,242	1,1	1,2	188	54,52
Песчаные глины	1,411	1,32	0,7	518	139,86
	1,176	1,1	1,2	373	93,25
	1,411	1,32	1,2	260	70,2
	1,176	1,1	1,8	144	47,52
	1,411	1,32	1,8	160	35,2
	1,176	1,1	2,3	117	31,59

Супесь		1,176	1,1	0,6	627		150,48
		1,176	1,1	0,6	402		140,7
		1,946	1,05	0,8	885		194,7
		1,946	1,05	1,2	652		149,96
		1,176	1,1	1,2	293		79,11
		1,176	1,1	1,2	253		75,9
		1,946	1,05	1,6	429		107,25
		1,176	1,1	1,8	210		60,9
		1,176	1,1	1,8	186		65,1
		1,176	1,1	2,4	153		48,96
масса	V1	V2		масса	V1	V2	
песок				глина			
0,2	46	11,27		0,2	41,86	10,2557	
0,4	76	18,62		0,4	52	12,74	
0,6	113	27,685		0,6	111	27,195	
0,8	149	36,505		0,8	149	36,505	
1	174	42,63		1	158,34	38,7933	
1,2	211	51,695		1,2	192,01	47,0424	
1,4	280	68,6		1,4	254,8	62,426	
1,6	293	71,785		1,6	259	63,455	
масса	V1	V2		масса	V1	V2	
Песчаные глины				Супесь			
0,2	43,7	10,7065		0,2	41,078	10,0641	
0,4	55	13,475		0,4	51,7	12,6665	
0,6	139	34,055		0,6	130,66	32,0117	
0,8	141,55	34,67975		0,8	133,05	32,5989	
1	145	35,525		1	136,3	33,3935	
1,2	200,45	49,11025		1,2	188,42	46,1636	

1,4	266	65,17		1,4	250,04	61,2598
1,6	260	63,7		1,6	271	66,395

Как видно из таблиц 4.10, скорость смещения частиц массива при наличии разгрузочной щели из двух рядов компенсационных шпуров (54 см/с при массе заряда 1,4 кг в песке) на 76% ниже скорости смещения частиц массива без разгрузочной щели (280 см/с).

Результатами испытаний доказано, что энергия колебаний в защитной зоне экранирующих шпуров уменьшается в 50-80 раз по сравнению с энергией в зоне без экранирующих шпуров.

4.4. Обоснование и разработка параметров технологии буровзрывных работ при проходке стволов в замороженных породах

Результаты проанализированных исследований показывают, что эффективность буровзрывных работ при проходке стволов складывается из эффективности разрушения породы зарядами ВВ всех шпуров, то есть врубовых, отбойных и оконтуривающих. Но, если задача врубовых шпуров состоит в создании дополнительной свободной поверхности, а отбойных – эффективно разрушить породу, то заряды контурных шпуров должны обеспечить выполнение проектного контура, при этом сохранить герметичность замораживающих колонок. Данное противоречие и формирует особые требования к выбору типа и массы заряда контурных шпуров, к конструкции заряда и зарядной полости и к методам инициирования зарядов.

Буровзрывные работы рекомендуется проводить со следующими мерами предосторожности: длина шпуров при бурении в искусственно замороженных породах принимается не более 1,5 м; расстояние от оконтуривающих шпуров до стенки ствола должна быть не менее 300 мм в крепких породах и 400 мм в породах средней крепости и некрепких.

Периферийную часть ствола надлежит дорабатывать отбойными молотками; направление оконтуривающих шпуров принимают вертикальное; для взрывания используют только аммиачно-селитровые ВВ в патронах диаметром не более 36 мм; в качестве средств взрывания применяют электродетонаторы мгновенного действия в сочетании с электродетонаторами замедленного действия; безопасное расстояние от заряда до замораживающих колонок составляет: 1-1,1 м или 60 радиусов заряда в нескальных (глинах, суглинках, слабых аргиллитах, алевролитах) и 1.4-1.5 м или 80 радиусов заряда в скальных породах (песчанистых, песчано-глинистых сланцах, известняках, доломитах и т.д.).

Однако, до сих пор нет единого мнения о возможности применения взрывных работ в замороженных породах. В Правилах безопасности [80] 1965 года запрещалось ведение взрывных работ в неустойчивых замороженных породах с коэффициентом крепости $f < 2$.

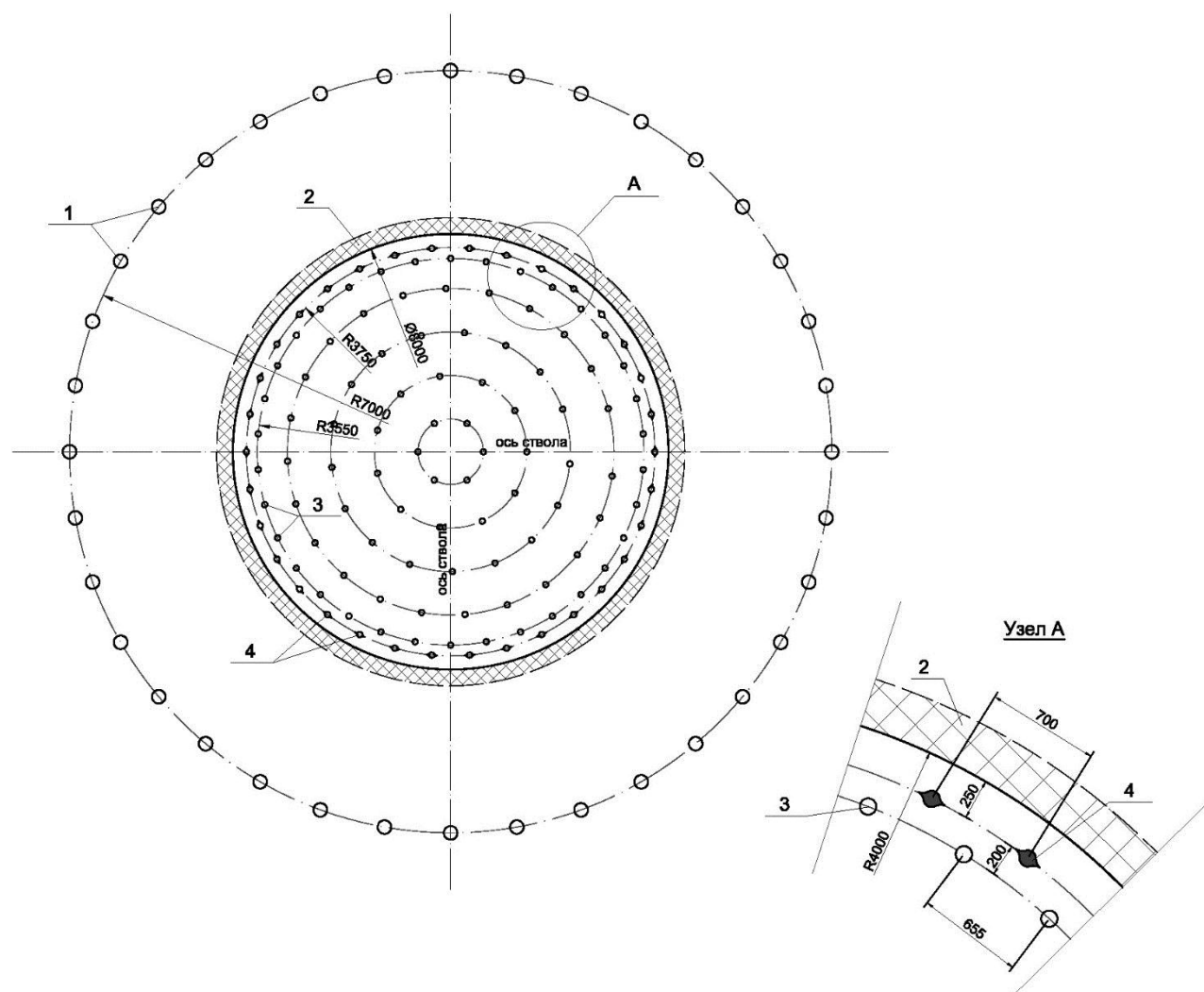
В настоящей диссертационной работе исследовалось напряженно-деформированное состояние ледопородного ограждения и замораживающих колонок при взрывании на промышленном стенде и в натурных условиях. По результатам исследования разработаны рекомендации по расчетам безопасных параметров взрывания на основе оценки прочности замораживающих колонок в поле динамических напряжений взрывной волны.

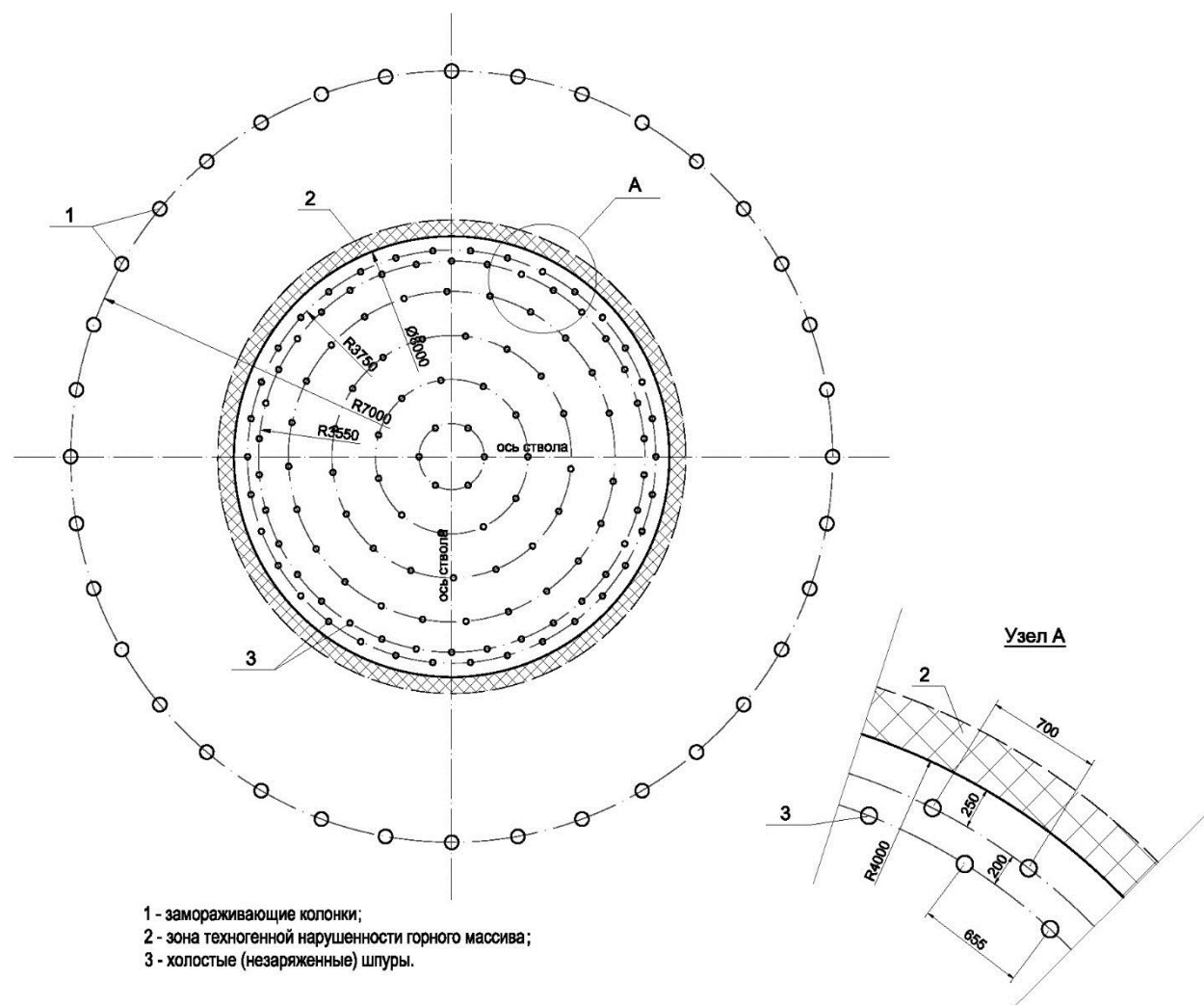
Несущая способность замораживающих колонок в объемно-напряженном состоянии, возникающем при совместном воздействии статических и динамических нагрузок, определяется по энергетической теории Генки-Мизеса и условию хрупкого разрушения трубы колонки. Запас прочности относительно силового воздействия при динамических нагрузках принимается больше 2,42. При этом статическое напряжение колонок определяется по известным зависимостям [57]. При обычных схемах проведения взрывных работ в забое ствола суммарные деформации

в замораживающих колонках могут достигать предельных значений и вызывать их разрыв, что приводит к аварийной утечке хладоносителя (хлористого кальция), нарушению циркуляции рассола по всей замораживающей галерее, остановке проходки и, в некоторых случаях, затоплению ствола.

Экспериментальными взрываниями на базе Управления Ростовшахтострой ЗАО «ОШК «Союзспецстрой» установлено, что при применении контурного взрывания с рядом незаряжаемых контурных шпуров диаметром 50мм и предконтурного ряда шпуров с профильными надрезами, при размещении центров шпуров контурного ряда на общем радиусе со шпурами с профильными надрезами предконтурного ряда (Рис.4.8.) [86], что позволяет значительно снизить эффект воздействия волн напряжения на замораживающие колонки. К.и.ш. отбойных и врубовых шпуров при этом остаются 0.88, а к.и.ш. шпуров с профильными надрезами повышается на 20%.

Предлагается схема создания демпфирующего экрана из двух рядов незаряжаемых компенсационных шпуров диаметром 65 мм (Рис. 4.9.), располагаемых в шахматном порядке по концентрическим окружностям [87], диаметр большей из которых равен ($D_{вч}-700$), мм, позволяют снизить амплитуду волн напряжений при взрыве на 65-70%, а их сейсмическое воздействие снижается на 35%. по сравнению с первоначальной.





- 1 - замораживающие колонки;
 2 - зона техногенной нарушенности горного массива;
 3 - холостые (незаряженные) шпуры.

Выводы по главе 4

На базе выполненных исследований для сохранения целостности замораживающих колонок и снижения риска аварийных ситуаций рекомендуется проектировать параметры взрывных работ с учетом следующего:

1. Разрушаемый объем пород разделяется условно на три зоны, из которых:

- первая зона разрабатывается врубовыми и отбойными шпурами в соответствии с действующими правилами [10,11];
- вторая зона разрабатывается зарядами приконтурных шпуров;
- третья зона разрабатывается отбойными молотками (вручную) и заключается между проектным контуром ствола и рядом оконтуривающих шпуров. Данная зона разрабатывается после разрушения и погрузки пород первой и второй зоны.

2. Рекомендуется центры контурных шпуров размещать на расстоянии более $(2,5 \cdot d_{\text{шп}})$ для исключения их влияния на напряженно-деформированное состояние замороженного массива пород.

При $d_{\text{шп}} = 0,042$ м данное расстояние равно 0,105 м. Однако с учетом габаритов бурового оборудования и по рекомендациям [11], принимаем расстояние $r_1 = 0,3$ м.

Контурные шпуры не заряжаются.

3. Предконтурные шпуры имеют профильные надрезы, глубиной 3 мм, заряжаются зарядами ВВ, но не имеют забойки и взрываются последними.

Указанные методы снижения волн напряжений обеспечивают сохранность ледопородного ограждения, но целостность замораживающих колонок при этом обеспечивается не всегда. При проходке стволов в

глинистых породах на больших глубинах в зоне контактов с песчаными породами часто возникают осложнения, выражающиеся разрывом замораживающих колонок. В подобных условиях разрывы колонок могут стать причиной нарушения целостности всего ледопородного ограждения. Для повышения безопасности проходки в условиях деформаций ледопородного ограждения разработан [85], предусматривающий укрепление затрубного пространства замораживающей колонки путем введения водного раствора полипропиленовой фибры. Проведенные лабораторные исследования показали, что введение 12% полипропиленовой фибры позволяет повысить прочность бурового раствора до 4,8 МПа, что исключает возможность появления толщинного резонанса около замораживающей скважины и деформирование замораживающей колонки.

Заключение

Представленная диссертация является научно-квалификационной работой, в которой решена задача установления закономерностей и зависимостей влияния взрывных нагрузок на напряженно-деформированное состояние замораживающих колонок и разработаны на основе выявленных закономерностей параметры безаварийной буровзрывной технологии строительства стволов способом искусственного замораживания, обеспечивающие устойчивость ледопородного ограждения, повышение темпов проходческих работ и сокращение сроков строительства.

Основные научные и практические результаты работы, полученные лично автором, заключаются в следующем:

На основании обобщения отечественного и зарубежного опыта проходки стволов в искусственно замороженных породах разработана систематизация возможных аварийных ситуаций. Установлено, что аварийная разгерметизация замораживающих колонок происходит при сочетании следующих геологических и технологических факторов: проходки стволов по последовательной или параллельной технологическим схемам, глубине замораживания, превышающей 300 м, буровзрывной технологии разработки пород и наличии в геологическом разрезе литологического контакта пород с различной акустической жесткостью.

При буровзрывном способе проходки стволов разрушение замораживающих колонок вне зависимости от технологической схемы строительства происходит при наличии в геологическом разрезе по глубине ствола переслаивающихся пород с различными свойствами, при этом разрушающее воздействие на колонку может создать лишь действие ударных волн вследствие формирования динамического поля напряжений вокруг колонки.

В обводненных неустойчивых породах наружная поверхность ледопородного ограждения с температурой, близкой к нулю, является поверхностью отражения продольных волн сжатия при ведении взрывных работ в забое ствола, при этом отраженные волны растяжения действуют на незакрепленные стенки ствола вверх от забоя на расстояние, равное радиусу ствола в проходке. Выше этой зоны в незакрепленной части ствола ледопородное ограждение не испытывает воздействия от продольных, поперечных или отраженных взрывных волн, следовательно, буровзрывные работы можно вести без дополнительных защитных мероприятий.

Установлены закономерности формирования области сдвиговых напряжений на контуре замораживающей скважины, смещения которой под действием ударной волны формирует ударный импульс, скорость движения которого равна удвоенной массовой скорости взрывной волны и под действием которого замораживающая колонка теряет устойчивость.

Установлено, что при бурении замораживающих скважин дополнительное технологическое мероприятие в виде нагнетания в пространство между замораживающей колонкой и стенками замораживающей скважины раствора разработанного состава снижает интенсивность взрывных нагрузок на замораживающую колонку в 1,5-2 раза. Этот эффект обусловлен повышением прочности бурового раствора до 4,9 МПа, вследствие чего образуется мягкая акустическая граница между породным контуром скважины и слоем замороженного раствора, что обеспечивает снижение коэффициента отраженных взрывных волн и защиту замораживающей колонки от разрушения.

Установлено, что при воздействии на замораживающую колонку ударной волны напряженно-деформированное состояние замораживающей колонки изменяется качественно и количественно. В начале процесса динамического воздействия, пока контур скважины устойчив, колонка, в

силу инерции, перемещается относительно контура скважины против хода ударной волны, что приводит к обжатию прослойки глинистого раствора во фронтальной части и отслоению замороженного глинистого раствора от замораживающей колонки в тыльной части. При этом колонка деформируется с уменьшением диаметра вдоль направления распространения волны, и с увеличением диаметра - при распространении волны в поперечном направлении, что неизбежно сопровождается повышением напряжений в колонке. При возрастании напряжений выше допустимых происходит деформирование и разрушение замораживающей колонки.

Для обеспечения безаварийной технологии строительства стволов в искусственно замороженных породах целесообразно применять щадящие способы взрывных работ, такие как двухрядное расположение компенсационных шпуров и шпуры с концентраторами энергии в предконтурном ряду.

8. В целом применение результатов выполненных автором исследований содействует дальнейшему совершенствованию технологии проходки стволов в замороженных породах, внедрение которых в шахтостроительную практику содействует снижению рисков аварийных ситуаций и, как следствие, уменьшает временные и стоимостные затраты при строительстве.

Список использованной литературы

1. Айхмайер Х. Коллоквиум по строительству шахтных стволов и туннелей // Глюкауф (русс.изд.). – 1981. – 28 мая (№10). – С.6-8.
2. Андреичев А.Н. Тюбинговое крепление вертикальных шахт. –М.: Углетехиздат 1950.
3. Андреев Л.В., Ободан Н.И., Лебедев А.Г. Устойчивость оболочек при неосесимметричной деформации. – М.: Наука, 1988. – 208 с.
4. Баклашов И.В., Картозия Б.А. Механика подземных сооружений и конструкции крепей. – М.: Недра, 1965.
5. Баум Ф.А. Физика взрыва – М.: Недра, 1975. – 704 с.
6. Башелашвили Г.Б., Парунакян Р.Г. , Воробьев Н.А. Трест Шахтспецстрой: Проходка шахтного ствола в сложных гидрогеологических условиях. Минмонтажспецстрой СССР Реферативная информация о передовом опыте. Серия V.
7. Бильд Х. Выбор места замораживания шахтного ствола Рейнберг // Глюкауф. –1989. – №13/14. – с.10-14.
8. Биттнер Ф. Крепление ствола «Ферде», пройденного способом замораживания // Глюкауф (русс.изд.). – 1985. – 10 окт (№19). – с.3-8.
9. Биттнер Ф. Проходка ствола Рейнберг способом замораживания // Глюкауф, 1991г. – №11/12. – с.11-16.
10. Бреховских Л.М. Распространение звуковых и инфразвуковых волн в природных волноводах на большие расстояния // УФН, 1960 – т.20. –вып. 2.
11. Бреховских Л.М., Иванов И.Д. Об одном особенном виде затухания при распространении волн в слоисто-неоднородных средах// Труды АН. – 1955. – т.1. – вып.1.
12. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений. - М.: Недра, 1994
13. Взрывное дело. Сборник №63/20. Детонация взрывчатых веществ и безопасность взрывных работ. – М.:Недра, 1967.
14. Воллерс К. Причины повреждений замораживающих труб в стволе Хюнксе и их санация // Глюкауф(русск.изд.). – 1985. – 10 окт. (№19). – с. 9-13.
15. Волошенко-Климовицкий Ю.А. Динамический предел текучести. – М.: Наука, 1965. -180 с.
16. Вольмир А. С. Нелинейная динамика пластинок и оболочек. – М.: Наука, 1972. – 432 с.
17. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем. – 2-ое изд, перераб. и доп. – М.: Наука: Главная редакция физико-математической литературы,1967

18. Вялов С.С., Зарецкий Ю.К., Городецкий С.Э. Расчеты на прочность и ползучесть при искусственном замораживании грунтов. – Л.: Стройиздат, 1981.
19. Вартанов В.Г. Обоснование параметров буровзрывных работ при проведении параллельных выработок неглубокого заложения: дис. канд. тех. наук. – М., 2007.
20. Гайворонский А.А., Владимиров К.А., Цыбин А.А. Методика расчета обсадных колонн. - М.:ВНИИБТ, 1970. – 87 с.
21. Гладышев С. В. Устойчивость конструктивных элементов нефтяных скважин в интервалах глинистых и соляных пород: Автореф. дисс. ... канд. тех. наук. – Пермь, 2003.
22. ГОСТ 632-80. Трубы обсадные и муфты к ним. - М.: Изд-во Стандарты, 1989. – 69 с.
23. ГОСТ 27752-88. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения по расчету. М.: Стандартиформ, 2007
24. ГОСТ 14249-89. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. М.: Изд-во стандартов, 2003
25. Гайдуков В.П. Технические расчеты при эксплуатации нефтяных скважин. – М.: Гостоптехиздат, 1961, 270 с.
26. Грилюк Э.И. Итоги науки: Механика твердых деформируемых тел. Теоретическое и экспериментальное исследование устойчивости тонких оболочек. – М.: ВИНТИ, 1969. – 348 с.
27. Густафсон Г. Шведская техника взрывных работ / под ред. Демидюка Г.П. – М.: Недра, 1977 – 264 с.
28. Дорман Я.А. Специальные способы работ при строительстве метрополитенов. – М.: Транспорт, 1981.
29. Дроговейко И.З. и др. Буровзрывные работы при проходке шахтных стволов методом замораживания в трещиноватом мелу: Реферативная информация о передовом опыте // Минмонтажспецстрой СССР. Серия V: Специальные строительные работы. – 1976. – вып.1 (115). – с. 4-6.
30. Дроговейко И.З., Курманов М.М., Голубятников А.Е. Особенности буровзрывных работ при проходке шахтных стволов способом замораживания // Шахтное строительство. – 1976 . – №6. – с. 28-29.
31. Иенминь Ма, Шурен Ван. Проходка стволов в неустойчивых обводненных породах на шахтах КНР //Глякауф(русс.изд). – 1985. – 10 окт. (№19), – с.14-18.
32. Ивановский В.Н., Каштанов В.С. Нефтегазопромысловое оборудование: Учебник для вузов, –М.:РГУ Нефти и газа им. Губкина, 2006. –720 с.

33. Исмаилов Т.Т., Комащенко В.И., Боровков Ю.А. и др. Повышение эффективности направленного раскола блоков невзрывчатыми разрушающими смесями // Горный журнал. – 2007. №1, – 2007.
34. Иогансен К.В. Спутник буровика. Справочник. – М.: Недра, 1990. – 303 с.
35. Исследование влияния динамических нагрузок на ледопородное ограждение в период проходки стволов Яковлевского рудника КМА: отчет о НИР (заключ.) – Белгород: Институт ВИОГЕМ, 1977.
36. Исследование экранирующей способности контурной щели / Деев Е.А., Макарьев В.П., Егоров М.Г. и др. // Совершенствование проектирования и производства горных работ с применением контурного взрывания: сб. науч. тр. – Апатиты: Горный институт КФ АН СССР, 1984.
37. Иудин М.М. Обеспечение безопасности устойчивости ствола при оттаивании ледопородного ограждения // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К.Аммосова. – 2009, – №1, – т.6.
38. Карасик И.Б. Буровзрывная выемка замороженных пород при проходке стволов // Проектирование и строительство угольных предприятий: реферативный сборник, –М.: ЦНИЭНуголь. – 1969. – №11-12. –с. 12-14.
39. Карасик И.Б. Буровзрывные работы в стволах шахт, проходимых способом замораживания // Вопросы организации и механизации горнопроходческих работ: труды ВНИИОМШС. – Харьков. – 1970, – Вып. 19. с. 40-53.
40. Картозия Б.А. Исследование механических процессов в породных массивах с искусственной неоднородностью и разработка методов их прогнозирования в подземном строительстве: дис. ... д-ра техн. наук. – М., 1979. –372 с.
41. Картозия Б. А. О методе расчета толщины ледопородного ограждения. //Шахтное строительство. – 1969, – №6.
42. *Картозия Б.А.* Пути совершенствования способа искусственного замораживания горных пород при сооружении шахтных стволов: Дис. кан. техн. наук. – М., 1969, – 230 с.
43. *Картозия Б.А., Долгов О.А., Роменский А.А.* Определение параметров для проектирования ледопородного ограждения // Шахтное строительство. – 1962. – №5. – с.12-15.
44. Кляйн И. Рейман Ф. Крепь для шахтных стволов из чугуна с шаровидным графитом // Глюкауф(русск.изд.). – 1988. – 21 ноября (№22), – с.3-7.
45. Кникмайер О. Состояние техники проходки стволов в КНР // Глюкауф(русск.изд.). – 1981. – 2 апреля (№7), – с. 18-21.

46. Корчак А.В. Методология проектирования строительства подземных сооружений. – М.: «Недра коммюникейшинс ЛТД», 2001.
47. Кононов В.М. Технология контурного взрывания на основе шпуров с надрезами при строительстве тоннелей // Шахтное строительство. – 1989. – №9.
48. Крюков Г.М. Физика разрушения горных пород при бурении и взрывании. Ч. 1. Основы теорий деформирования и разрушения горных пород при бурении и взрывании: Учебное пособие. – М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 2002.
49. Крюков Г.М., Глазков Ю.В. Феноменологическая квазистатическо-волновая теория деформирования и разрушения материалов взрывом зарядов промышленных ВВ. – М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 2003.
50. Кузина А.В. Механизм взаимодействия ударной волны с замораживающими колонками, вызывающего потерю устойчивости колонки // ГИАБ. – 2007 - №7. - с. 71-78.
51. Кутузов Б.Н. Взрывные работы. – М.: Недра, 1974.
52. Кутузов Б.Н. Разрушение горных пород взрывом. – М.: Изд-во Московского горного института, 1992.
53. Лепендин Л.Ф. Акустика. – М.: «Высшая школа», 1978.
54. Либерман Ю.М. Методика расчета толщины стенки ледопородного цилиндра. Замораживание горных пород при проходке стволов шахт. – М. Изд-во АН СССР, 1962, – 24 с.
55. Литвин А.З., Поляков Н.М. Проходка стволов шахт специальными способами. – М.: Недра, 1974.
56. Логвинов А.М. Промышленная безопасность аммиачных холодильных установок. // Безопасность труда в промышленности – 2003. – №7. – 19–21 с.
57. Лютгендорф. Тридцатилетний опыт применения крепи шахтных стволов со скользящим внутренним цилиндром // Глюкауф. –1986. – №17. – с. 3-16.
58. Ляхов Г.М., Полякова Н.И. Волны в плотных средах и нагрузки на сооружения. – М.: Недра, 1967.
59. Малевич Н.А.. Машины и комплексы оборудования для проходки вертикальных стволов. – М.: Недра, 1975, с. 73 - 74.
60. Мангуш С.К., Крюков Г.М., Фисун А.П. Взрывные работы при подземной разработке подземных ископаемых. – М. Изд-во Академии горных наук, 2000.

61. Мангуш С.К. Взрывные работы при проведении подземных горных выработок: Учебное пособие для вузов. – М.: Изд-во МГГУ-Горная книга, 2009. – 120 с.
62. Медведев С.В. Инженерная сейсмология. – М.: Государственное изд-во литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1962.
63. Мелош Г. Образование ударных кратеров: геологический процесс. – М.: Мир, 1994.
64. Мирзаев Г.Г., Протосеня А.Г., Огородников Ю.Н. и др. Крепь горных выработок глубоких рудников /– М.: Недра, 1984.
65. Мишедченко А.А. Строительство скипового ствола Гремячинского рудника ОАО «Еврохим» [электронный ресурс] //Научный вестник МГГУ, 2010. URL: <http://msmu.ru> (дата обращения 05.06.2014)
66. Мотгендорф Г. ,Марль О. Водонепроницаемая крепь шахтного ствола Августа Виктория 8 // Глюкауф(русс.изд.). – 1967. – 8 июля (№12). – с.1-12.
67. Моделирование разрушающего действия взрыва в горных породах / под общей ред. Мельникова Н.В., – М.: Изд-во «Наука», 1973.
68. Насонов И.Д., Шуплик М.Н. Закономерности формирования ледопородного ограждения при сооружении стволов шахт, – М.: Недра, 1976
69. Насонов И.Д., Федюкин В.А., Шуплик М.Н., Ресин В.И. Технология строительства подземных сооружений. Специальные способы строительства: учебник для вузов. – 2-ое изд., перераб. и доп. – М.; Недра, 1992.,– 351 с.
70. Нигматулин. В.С. Производственные исследования в стволах центральной группы Запорожского ЖРК // Шахтное строительство. – 1984. – октябрь (№10). – с. 8-10.
71. Оксанич И.Ф. , Чмыхалов В.С. Взрывные работы при проходке ствола в искусственно замороженных породах // Шахтное и подземное строительство. – 1981. – №1.
72. Оксанич И.Ф., Чмыхалов В.С., Миронов П.С. Исследование напряженно-деформированного состояния замораживающих колонок при взрыве шпуровых зарядов //Труды ВИОГЕМ: Осушение месторождений, рудничная геология, специальные горные работы.- Белгород:ВИОГЕМ,1978. -вып.25.- с.117-123.
73. Павлинов П.А., Саакян Р.О. Техничко-экономическое обоснование технологической схемы проходки ствола пройденного замораживанием с креплением монолитной бетонной крепью // ГИАБ. – 2005, – №12, – с.175-179.

74. Паланкочев И.М. Инновационные подходы к проектированию глубоких вертикальных стволов //ГИАБ. – 2011. – №10. – с. 222-227.
75. Паланкочев И.М. Инновационные технологии проходки вертикальных стволов в замороженных породах// Сборник материалов конференции : тезисы докладов, IV Уральский горнопромышленный форум « Горное дело.Технологии.Оборудование.Спецтехника.Межрегиональная специализированная выставка-конференция», 12-14 октября 2011., с.134-138.
76. Паланкочев И.М. Исследование действия ударной кумулятивной струи при проходке глубоких вертикальных стволов с применением способа искусственного замораживания // Научный вестник МГГУ. – 2011. – № 2 (11). – с. 44-49.
77. Паланкочев И.М. Разработка конструкции замораживающей колонки зонального замораживания и методика определения эффективности ее работы // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – №7. –с. 217-222.
78. Паланкочев И.М. Оценка степени риска возникновения аварийной ситуации при строительстве вертикальных шахтных стволов способом искусственного замораживания // Горный информационно-аналитический бюллетень. –2013. –№ 6. –с. 44-51.
79. Паланкочев И.М. Анализ причин возникновения аварийных ситуаций при проходке вертикальных стволов способом искусственного замораживания грунтов //Безопасность труда в промышленности. – 2014. – №2. – с. 12-19.
80. Паланкочев И.М. Некоторые особенности буровзрывных работ в стволах шахт, проходимых способом искусственного замораживания //Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 6. – с. 281-286.
81. Паланкочев И.М. Particular qualities of blasting in shafts, constructed by method of ground freezing. International Workshop on Building Sustainability and Building Security. – Прага, 2014, с. 112-118.
82. Паланкочев И.М. Корчак А.В., Кузина А.В. Improving the efficiency of ground-freezing shaft sinking method.Годишник Минно-геологжки университет «Св Ивана Рильски». София. – с. 85-89
83. Palankoev I.M. Fundamental Research of Wave Phenomenon in Frozen Rock Massif during Shaft Sinking //Journal of Applied Mathematics and Physics. – 2015. – т. 3, –июль (№. 7). – с. 846-852.
84. Паланкочев И.М. Обоснование волнового механизма разрушения замораживающих колонок при проходке вертикальных шахтных стволов //Академический журнал Западной Сибири. – 2015. – №1 (56), – том 11. –с. 129-132

85. Паланкочев И.М. Способ проходки вертикальных шахтных стволов в неустойчивых обводненных породах. Патент РФ на изобретение №2534274 27.11.2014.
86. Паланкочев И.М. Способ разрушения замороженных грунтов при буровзрывной проходке горных выработок, Патент РФ на изобретение № 2554359 от 28 .05. 2015
87. Паланкочев И.М. Способ проходки вертикальных шахтных стволов в обводненных неустойчивых горных породах. Патент РФ на изобретение №2558085 от 30.07. 2015
88. Панькин В.А. Повреждение замораживающих колонок при проходке стволов способом замораживания // Труды ВНИИОМШ. – Вып. 17., –1966. –с. 46-62.
89. Петцольд Я. Опыт применения эмульсионных ВВ при проходке стволов (Ферде-Рейнберг) // Глюкауф. –1991. – 13 июня (№11/12). – с. 17-21.
90. Покровский Г.И. Взрыв. –М.: Недра, 1973.
91. Правила безопасности при проходке стволов шахт специальными способами. –М.: Недра, 1965.
92. Правила безопасности при строительстве подземных сооружений ПБ 03-428-02.-М.:ТАР при ГОСГОРТЕХНАДЗОР
93. Проектирование взрывных работ / под общ. ред. Кутузова Б.Н.. –М.: Недра, 1974.
94. Прочность и ползучесть мерзлых грунтов и расчеты ледогрунтовых ограждений / Вялов С.С. , Глюшинский В.Г. , Городецкий С.Э. и др. –М.: АН СССР, 1962г.
95. Пучков П.Е. Проходка Соликамской калийной шахты №2 способом глубокого замораживания.
96. Риз А. Историческое и техническое развитие способа проходки стволов замораживанием // Глюкауф(русс.изд.). –1982. – 21 января (№2). – с.3-13.
97. Ржевский В.В., Коренберг Е.Б., Орловская З.Л. Радиоволновые методы в горном деле. –М.: Изд. МГИ, 1967.
98. Ржевский В.В., Ямщиков В.С. О существовании подземного звукопровода вдоль горной выработки // Физико-технические проблемы разработки месторождений. –1968. – № 24.
99. Роменский А.А. Обоснование параметров проходческого цикла и ледопородного ограждения при строительстве вертикальных стволов: Дис.канд. техн. наук. – М., 1984. – 225 с.
- 100.Савельев Б.А. Физика, химия и строение природных льдов и мерзлых пород. М.: Изд-во МГУ, 1971.

101. Садовский М.А. Простейшие приемы определения сейсмической опасности массовых взрывов. – М.: Изд-во ИГД АН СССР, 1946. – 204 с.
102. СНиП 2.04.12-86. Строительные нормы и правила. Расчет на прочность стальных трубопроводов. – М.: Госстандарт, 1986.
103. СП 91.133 30.2012 Подземные горные выработки, М., 2012
104. Справочник по буровзрывным работам / Под общ. ред. Друкованого М.Ф. – М.: Недра, 1976.
105. Справочник по буровзрывным работам / Друновский М.Ф. , Дубков Л.В. , Миндели Э.О. и др. – М.: Недра, 1976.
106. Терехов П.М. Исследования взрывного разрушения замороженных рыхлых пород при сооружении стволов шахт: дис. ... канд. а тех. наук. – М, 1972.
107. Трест «Шахтспецстрой» 60 лет деятельности и развития специальных способов проходки шахтных стволов. – М., 2003
108. Труды международного симпозиума по проходке шахтных стволов и туннелей, июль 1959, – Лондон.
109. Проходка шахтных стволов и туннелей и горизонтальных горных выработок. – М.: Государственное научно-техническое изд-во литературы по горному делу, 1961.
110. Трупак Н.Г. Замораживание горных пород при проходке стволов. – М.: Углетехиздат, 1954.
111. Трупак Н.Г. Замораживание грунтов при строительстве подземных сооружений, – М.: Недра, 1979.
112. Трупак Н.Г. Замораживание пород при сооружении вертикальных стволов шахт, – М.: Недра, 1983.
113. Тютюник П.М., Солодов А.М. Методические указания по лабора- торно-практическим занятиям по разделу «Контроль процессов замораживания пород в подземном строительстве» Ч. II. – М.: МГИ, 1991.
114. Тютюник П.М. , Роменский А.А. Комплексный контроль ледопородного ограждения при сооружении ствола шахты // Шахтное строительство. – 1984. – №11. – с.14-19.
115. Тютюник П.М. Геоакустический контроль процессов замораживания и тампонирувания пород. – М.: Недра, 1994.
116. Усиление тюбинговой крепи в старых стволах с БТИСМ. Отчет о НИР: Разработка и внедрение методов оперативного контроля за деформациями крепи в период сооружения стволов специальными способами – Исполн.: Бруне Х. Шаувекер Э. - Белград., 1987г., с.1-48.
117. Федюкин В.А. Проходка стволов шахт способом замораживания. – М.: Недра, 1988.

118. Физика ядерного взрыва. Том 1, Том 2. – М.: Министерство обороны РФ. ЦФТН, 2000.
119. Фисенко Г.Л. Предельные состояния горных пород вокруг выработок. – М.: Недра, 1976.
120. Флоров И.Н. Лежнев А.В. Лось И.Ф. Логачев Н.Т. Ликвидация прорыва воды в шахтный ствол, сооруженный в сложных гидрогеологических условиях // Шахтное строительство. – 1985. – август (№38).
121. Фраш Г.Б. Взрывные работы в сезонномерзлых грунтах. Справочное пособие. – М.: Недра, 1990.
122. Ху Сяндон. Прогнозирование безопасного состояния ледопородного ограждения при проходке стволов / Материалы круглого стола «Научно-технические проблемы разработки экологически безопасных технологий строительства и эксплуатации подземных сооружений в сложных горно-геологических условиях» науч.- практ. конфер. «Неделя горняка-97». – М.: МГГУ, 1997, – с. 85-88.
123. Ху Сяндон. Обоснование и разработка метода расчета ледопородных ограждений некруговой формы при проходке стволов способом замораживания: Дис. ... канд. Тех. наук, – М., 1999.
124. Хайден Т.В., Вегнер Б. Современная технология замораживания пород на примере двух объектов, находящихся на стадии строительства, состоящих из пяти вертикальных стволов // Горный журнал. – 2014. – № 9. – с. 65-68.
125. Хегельман И. Проект и состояние работ по проходке ствола «Фёрде» способом замораживания // Глюкауф (русс.изд.). – 1982. – №2. – с.14-20.
126. Хегельман Й. Проходка шахтного ствола «Фёрде» способом замораживания // Глюкауф (русс.изд.). – 1983. – 20 октября (№20). – с. 10-16.
127. Хельмс В. Алмазная промышленность на севере Капской провинции ЮАР // Глюкауф (русс.изд.). – 1990., – 25 января (№1/2), – с. 32-37.
128. Хофман Д. Клаусталь-Цельрфелд. 175 лет применения чугунной тубинговой крепи в шахтных стволах // Глюкауф (русс.изд.). – 1967. – 11 мая. – с.31-40.
129. Цейтлин Я.И., Смолий Н.И. Сейсмические и ударные воздушные волны промышленных взрывов – М.: Недра, 1981.
130. Цейтлин Я.И. О сейсмической опасности взрывов при проходке стволов шахт методом замораживания // Реферативная информация о передовом опыте. Серия V. Специальные работы в промышленном строительстве. Министерство монтажных и специальных строительных работ СССР. – 1970. – Вып.3 (49), – с. 8-11.

- 131.Шуплик М.Н, Насонов М.Н., Плохих В.А., Никифоров К.П., Киселев В.Н.// Перспективы замораживания грунтов в подземном строительстве / Подземное пространство мира. – 2001. – № 4. – с. 28 –38.
- 131.Шуплик М.Н., Месхидзе Я.М., Королев И.О. Строительство подземных сооружений. – М.: Недра, 1990.
- 132.Шпарбер П.А. Техническое развитие способа искусственного замораживания пород при проходке стволов // Шахтное строительство. – 1983. – сентябрь (№9). – с. 20-23.
- 133.Штендер В. Улучшение техники замораживания при проходке стволов. /Перевод № 59574/6 ВИНТИ Из журнала Zeitschrift №4. – М., 1966.
- 134.Штинцинг Д. Коллоквиум 1970г. по шахтному строительству. – // Глюкауф(русс.изд.). – 1970. – 25 июня (№ 13). –с. 51-56.
- 135.Штосс К., Эллерс Т. Влияние замораживания на поведение породного массива. // Глюкауф(русс.изд.). – 1985. – 10 октября (№19). – с. 18-24.
- 136.Ямамото Й., Мацубара Н. Устойчивость ограниченной снаружи жесткой стенкой цилиндрической оболочки при действии внешнего давления // Потеря устойчивости и выпучивание конструкций: теория и практика / под ред. Дж. Томпсона и Дж. Ханта: Пер. с англ. / под ред. З.И. Григолюка. –М.: Наука, 1991. – 424 с.
- 137.. Calladine CR. Analysis of large plastic deformations in shell structures. In: Bevilacqua L, Feijoo R, Valid R, editors. elastic behavior of plates and shells. –Berlin:Springer, 1986. – с. 69-101
- 138.K.Werner. Temperatur- und Dehnungsmessungen in einem gefrierschacht.// Bergbauarchiv. –1959. – N. 1/2. – s.1-32
- 139.H.Link Zur Spannungsermittlung in Schachtauskleidungen. // Reihe Bergbau, Heft 29, 1959
- 140.Kyriakides S., Lee L.-H. Buckle propagation in conformed steel tubes// Interactional Journal of Mechanical Sciences – 2005. – Vol.47. – No.4-5. – pp. 603-620.
- 141.Madenci E., Guven I. The finite element method and applications in engineering using ANSYS. – Berlin: Springer, 2006. - 686p.
142. ZHANG X., SUN S.F., ХиеУ.К. Development and Testing of a Frozen Soil Parameterization for Cold Region Studies // Journal of hydrometeorology-special section. - 2007. - Vol. 8. - NO.8. - pp. 690-701.

Приложение 1

Месторождение., геологические условия	Технология проходки	Проявление аварийной ситуации	Метод ликвидации аварийной ситуации	Время ликви- дации аварии
Ново-стебниковский калийный комбинат Восточный ствол. <i>Геол. условия:</i> С поверхности до глубины 4-10 м залегают четвертичные отложения суглинков, супесей и глин, под ними породы "гипсовой шляпы", пористых и обводненных за счет грунтовых вод., состоят из глинисто-илистых	Проходка ствола по параллельной схеме заходками по 25-30 м. Глубина замораживания 50 м, кол-во замор. скважин 23 шт. м. Замораживание однорядное, трубы диаметром 146 мм, толщиной 9 мм. Применение БВР по стандартному паспорту	Приток рассола в ствол ниже постоянной крепи на 3 м, который нарастал с 20 м/сут до 38 м/сут.	Сооружение бетонной подушки, крепление ствола тубингами, закачка цементного раствора через центральную трубу в подушке.	25 дней по проекту - 6 месяцев фактич.

отложений с прослойками песка и включением гипса. Диаметр ствола 4,5 м, глубина 186 м <i>Крепление:</i> Постоянная крепь из чугунных тубингов конструкции Метростроя.	"Союзвзрывпрома".		Строит-во кольцевой рассолоулавливающей выработки.	
Березниковский калийный комбинат. Ствол №2 3БКК скипо-клетевой, диаметр 7 м, глубина 525м Глубина замораживания 374м. <i>Гидро-геол. условия:</i> Водоносные горизонты водообильны, располагаются в непосредственной близости	Низкотемпературное замораживание $t=55$.осуществлялось 2 зонами проектная толщина ЛПО $E=3.1$ м. кол-во замораживающих скважин- 42шт. .Бурение скважин установками	Разрушение ЛПО и прорыв рассола в ствол. Капез в стенках ствола, трещины на забое, пучение пород забоя	Возведение бетонной подушки, цементация, дополнительно е замораживание,	500 суток по проекту/ 665 суток фактически

от водорастворимых сильвинито-карнолитовых пород и каменной соли. Чередование пластов глины, песчаника, мергеля и известняка. <i>Конструкция крепи:</i> в зоне замораживания из чугунных тубингов шахтного типа с заполнением затубингового пространства бетоном,. В интервале глубин 65,4-371,4 крепь многослойная тубинги- пластбетон 200 мм-бетон 500мм. На участке 360,2-371,4 двойная тубинговая крепь	УРБ4ПМШ. Замораживающие колонки из труб диаметром 146 мм с муфтовыми соединениями Предварительный тампонаж пород. Разработка пород производилась буровзрывным способом.	на 12 см, усиление водопритока после оттаивания.	откачка рассола из ствола бадьями, засыпка ствола щебнем. Восстановлени е колонок, нагнетание цементного раствора через тубинги, подтопление ствола до статического уровня и продолжение срока	
---	---	---	---	--

			активного замораживания	
Березниковский калийный комбинат. 1БКК, Вент.ствол.Диаметр ствола 6 м, глубина 435 м, глубина замораживания 425 м <i>Гидро-геол. условия:</i> До глубины 280 м залегают чередующиеся пласты глин и песков, ниже пласты известняка с включением кремния, далее плотные сланцы.Шесть водоносных горизонтов с дебитом от 23 до 180 м/час. Напор воды бучаковского яруса	Бурение замораживающих скважин УРБ-4ПНШ,средняя скорость 1365 /мес.,отклонение 38%.Замораживание : диаметр расположения замораживающих скважин 13 м, число колонок 30+6 дополнительных +5 контрольных, расстояние между замор. Скважинами1,3м.	Образование "окна" в ЛПО, для его ликвидации было пробурено из забоя 5 скважин для замораживания. Снижение циркуляци рассола, что привело к возрастанию тепловой нагрузки на колонки . Повреждение колец временной крепи с	Увеличение сроков активного замораживания в 4 раза, переход на малые заходки, временную крепь не демонтировали. Создание бетонной подушки в забое и бурение	543 суток/959 суток

достигает 260м и температуры +26. <i>Крепление:</i> устье ствола до глубины 34,6 м железобетон толщиной 1000мм. Далее до глубины 429 м чугунные тубинги с бетонной рубашкой до 750 мм. Нижняя часть ствола до проектной глубины - бетонное с толщиной стенки 500 мм. Бетон марки 300.	Замораживание велось двумя зонами 20-140 и 247-25м. Замораживающие колонки из обсадных труб 146x10 мм из стали марки Е ГОСТ 632-57. Питающие и отводящие трубы полиэтиленовые. Проектный срок замораживания 120 суток, фактический 540 суток. Глины исключены из промораживания	вывалом породы в забой. Нарушение тубинговой крепи	уравнительной колонны для предотвращения прорыва воды в ствол в случае неполного смыкания ЛПО	
---	--	---	--	--

Приложение 2

Краткие технические характеристики сейсмостанции « ДИОГЕН »:

Параметр	Значение
диапазон регистрируемых частот	5..8000 Гц
число каналов	24 (32)
уровень шумов приведенных ко входу	0.25 мкВ
наличие аналоговых переключаемых фильтров на запись	да
режекторный фильтр на запись, подавление	не менее 40...50 дБ
диапазон регулировки усиления поканально	дБ - 0...84, шаг - 6 дБ
наличие встроенного синус-тест-генератора	да
разрядность АЦП, двоичных разрядов	14
время дискретизации	от 0,0025 до 2 мс (устанавливается оператором)
время задержки регистрации, мс	0..16383 с шагом 1 мс
число отсчетов на канал	от 100 до 65535 на канал
запись блоками по	65535 отсчётов в формате выходного файла данных – SEG-Y
наличие цифровой фильтрации	да
число накоплений (по всем каналам)	≤100
режимы накопления	суммирование, суммирование с нормированием, вычитание, «откат»
питание	12В/1А (собственно, сейсмостанция)
габариты основного блока станции-приставки	40х28х20 см
вес основного блока станции	около 6-7 кг
Универсальный запуск	да
Управление	от клавиатуры или манипуляторов «мышка», «трек-болл»
Число физических каналов, используемых для регистрации	1-24 (в режиме СОНАРа) 1-24 (в т.ч. и в режиме «СОНАР»), число задействованных физических каналов выбирается оператором
Исполнение корпуса	в качестве основного принят вариант в виде герметичного чемоданчика (производство: Германия) с защитой IP-67 и клапаном поддува
Сейсмостанция комплектуется	DC-DC конвертером для питания ноутбука от 12-ти вольтового аккумулятора

Приложение 3

Акустическая жесткость некоторых пород и параметры для ее вычисления

Категория пород	Наименование породы	Скорость распространения продольных волн, км/сек	Плотность породы, кг/м ³	Сейсмическая жесткость, Па/с
1	Граниты, диориты	5-6	2680-2900	162
II	Известняки, песчаник, конгломераты	4,5-2,5	2800-2000	126-50
III	Гипсы, мергели, аргиллиты	3 -1,7	2400-1700	72-29
IV	Галечники, щебень, гравий	2,1-0,9	2000-1600	42-14
У	Пески, супеси, лессы	1,6-0,6	1400-1600	31-10
УI	Глины, суглинки	1,5-0,6	2000-1600	30-10
УII	Насыпные рыхлые грунты	0,6-0,2	1500-1300	9-2,6