

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Кузбасский государственный технический университет
имени Т. Ф. Горбачева»

А. П. Политов
А. В. Дементьев

**СТРОИТЕЛЬСТВО ВЫРАБОТОК В СЛОЖНЫХ
ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

Учебно-методическое пособие

Кемерово 2021

УДК [622.253 + 622.257.1](075.8)

Рецензенты:

Кочетков В. Н. – директор Федерального исследовательского центра угля и углекислоты СО РАН, канд. техн. наук

Назаров Д. И. – директор ООО «Кемеровостройпроект», канд. техн. наук

Политов Александр Петрович

Дементьев Андрей Валерьевич

Строительство выработок в сложных горно-геологических условиях : учебно-методическое пособие для студентов специальности 21.05.04 «Горное дело», специализации 21.05.04.05 «Шахтное и подземное строительство» / А. П. Политов, А. В. Дементьев ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева. – 2-е изд., доп. и перераб. – Кемерово : КузГТУ, 2021. – 72 с. – ISBN 978-5-00137-223-3.

Рассмотрены общие рекомендации к практическим занятиям и выполнению самостоятельной работы, формы их контроля, перечень вопросов для текущего и промежуточного контроля успеваемости и рекомендации к выполнению расчётно-графических работ.

Предназначено в помощь студентам при выполнении самостоятельной работы при изучении теоретического курса, подготовки к практическим занятиям и выполнению расчётно-графических работ по дисциплине «Строительство выработок в сложных горно-геологических условиях».

УДК [622.253 + 622.257.1](075.8)

© Кузбасский государственный
технический университет
имени Т. Ф. Горбачева, 2021

© Политов А. П.,
Дементьев А. В., 2021

ISBN 978-5-00137-223-3

Содержание

1	ЦЕЛИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ И ЕЁ МЕСТО В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА...	4
2	ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ.....	4
3	НАИМЕНОВАНИЕ ТЕМ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ, ИХ СОДЕРЖАНИЕ.....	5
3.1	Домашние задания.....	5
3.2	Самостоятельная работа студента.....	6
4	РАСЧЁТНО-ГРАФИЧЕСКИЕ РАБОТЫ.....	8
4.1	Из 1. Расчёт процесса замораживания обводнённых неустойчивых пород при сооружении устьевой части вертикального ствола шахты.....	8
4.2	Пример расчёта основных параметров замораживания неустойчивых горных пород и тампонирования водо- носных трещиноватых пород цементными растворами...	24
4.3	Из 2. Расчёт процесса предварительной цементации горных пород	35
4.4	Пример расчёта процесса предварительной цемента- ции горных пород.....	47
5	КОНТРОЛЬ УСПЕВАЕМОСТИ.....	62
5.1	Текущий контроль успеваемости.....	62
5.2	Промежуточная аттестация.....	65
6	СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	68

1 ЦЕЛИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ И ЕЁ МЕСТО В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА

Целями освоения дисциплины является приобретение студентами знаний и умений, необходимых для самостоятельного творческого решения задач, связанных с проектированием и практической реализацией технологических процессов строительства выработок шахт и подземных сооружений в сложных горно-геологических условиях.

Дисциплина «Строительство выработок в сложных горно-геологических условиях» согласно основной образовательной программы по специальности 21.05.04 «Горное дело», специализации 21.05.04.05 «Шахтное и подземное строительство», изучается в профессиональном цикле дисциплин и читается на пятом курсе в десятом семестре.

Изучение дисциплины позволяет привить студентам представления, знания и умения в области шахтного и подземного строительства в сложных горно-геологических условиях.

Изучение дисциплины необходимо для освоения курсов профессионального цикла «Строительство вертикальных горных выработок», «Проектирование и строительство городских подземных сооружений», «Проектирование строительства горных предприятий и подземных сооружений», «Реконструкция горных предприятий и подземных сооружений», при дипломном проектировании и дальнейшей практической работы по специализации «Шахтное и подземное строительство».

2 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Учебно-методическое пособие составлено в соответствии с учебным планом по специальности 21.05.04 «Горное дело», специализации 21.05.04.05 «Шахтное и подземное строительство», и рабочей программы дисциплины «Строительство выработок в сложных горно-геологических условиях».

Согласно учебному плану и рабочей программе, на самостоятельную работу студентов отводится 76 часов.

Учебно-методическое пособие предназначено для практических занятий и для самостоятельной работы.

Работа на практическом занятии должна научить студента принимать наиболее целесообразные технические и технологические решения по сооружению горных выработок в сложных горно-геологических условиях.

Самостоятельная работа студента (СРС) – совокупность всей его учебной деятельности во внеаудиторное время, способ активного, целенаправленного приобретения студентом новых для него знаний и умений без непосредственного участия в этом процессе преподавателей.

Формой самостоятельной работы студентов является выполнение домашних заданий.

При выполнении самостоятельной работы студент должен использовать учебники, конспекты прослушанных лекций, труды научно-исследовательских и проектных институтов, специальную литературу и настоящее учебно-методическое пособие, которое вводит в круг вопросов, подлежащих решению, и указывает на последовательность и объём их разработки.

Формы самостоятельной работы студента и методы её контроля соответствуют рабочей программе дисциплины.

Учебно-методическое пособие содержит задание на самостоятельную работу, рекомендации, пояснения, каким образом и в какой последовательности следует выполнять индивидуальное задание, список рекомендуемой литературы, задания на проектирование и вопросы для самоконтроля.

3 НАИМЕНОВАНИЕ ТЕМ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ, ИХ СОДЕРЖАНИЕ

3.1 Домашние задания

Домашние задания предусмотрены трёх видов: изучение учебной и методической литературы при подготовке к практическим занятиям и текущему контролю знаний (**Кр**) на 5, 9, 13 и 17 неделе; изучение основной и дополнительной литературы по дисциплине с конспектированием по разделам (**СИТ**) (см. п. 3.2); выполнение расчётно-графических работ (**Из**).

Расчётно-графические работы направлены на закрепление знаний, полученных на лекционных и практических занятиях, и посвящены выполнению типовых расчётов технологических параметров строительства вертикальных стволов в сложных горно-геологических условиях. Студенты получают от преподавателя индивидуальные задания на выполнение расчётно-графических работ, выполняют и защищают их.

В первом **Из1** студент определяет параметры процесса замораживания неустойчивых обводнённых горных пород вокруг вертикального ствола шахты при сооружении устьевой части, включающие: размеры лёдопородного ограждения; количество и расположение замораживающих, гидронаблюдательных и термонаблюдательных скважин; холодопроизводительность замораживающей станции; выбор оборудования замораживающей станции; режим и время работы замораживающей станции; стоимость работ по замораживанию горных пород.

Во втором **Из2** студент рассчитывает параметры процесса предварительной цементации горных пород из забоя вертикального ствола, включающие: расположение, количество и длину цементационных скважин; концентрацию нагнетаемого цементного раствора; радиус распространения цементного раствора вокруг нагнетательной скважины; давление нагнетания цементного раствора в скважины; выбор оборудования для производства работ; параметры тампонажной подушки; расход тампонажных материалов и стоимость работ по предварительной цементации.

3.2 Самостоятельная работа студента

Таблица 3.1

№ недели	Вид СРС	Трудоёмкость в часах/ЗЕ
1	2	3
1, 2	СИТ:1. Изучение нормативных документов по строительству горных выработок в сложных горно-геологических условиях [1–4, 14, 17, 18].	6/0,166

Продолжение табл. 1

1	2	3
2–4	Выполнение 1–6 разделов Из1 [2, 3, 4, 5, 7].	9/0,25
5	Подготовка к контрольной работе Кр1 .	2/0,055
6, 7	СИТ:2. Строительство горных выработок в удароопасных породах. Сущность способов, область их применения и основные технико-экономические показатели [5, 6].	6/0,166
6–8	Выполнение 7–12 разделов Из1 и его защита [2, 3, 4, 7].	9/0,25
9	Подготовка к контрольной работе Кр2 .	2/0,055
10, 11	СИТ:3. Строительство выработок в аномальных температурных условиях (высоких температур и в многолетней мерзлоте). Сущность способов, область их применения и основные технико-экономические показатели [5, 6, 9].	6/0,166
9–12	Выполнение 1, 2, 3 разделов Из2 [1, 3, 7, 9, 10].	9/0,25
13	Подготовка к контрольной работе Кр3 .	2/0,055
14, 16	СИТ:4. Строительство подземных ёмкостей методом выщелачивания и с использованием камуфлетных взрывов. Сущность способов, область их применения и основные технико-экономические показатели [5, 6, 9, 11].	6/0,166
13–17	Выполнение 4, 5, 6 разделов Из2 и его защита [1, 3, 7, 9, 10].	9/0,25
17	Подготовка к контрольной работе Кр4 .	2/0,055
17	Подготовка к зачёту	4/0,111
	Итого:	76/2

4 РАСЧЁТНО-ГРАФИЧЕСКИЕ РАБОТЫ

4.1 Из1. Расчёт процесса замораживания обводнённых неустойчивых пород при сооружении устьевой части вертикального ствола шахты

4.1.1 Общие сведения

Искусственное замораживание горных пород следует применять в сложных горно-геологических условиях (водонасыщенных песках, супесях, плывунах и т.п.) в целях создания *временного укрепления водонасыщенных пород* в виде прочного и водонепроницаемого лёдопородного ограждения (ЛПО) замкнутого контура при строительстве вертикальных стволов. Лёдопородное ограждение поддерживают в замороженном состоянии до тех пор, пока не будет закончена проходка ствола в обводнённых неустойчивых породах.

Толщина лёдопородного ограждения зависит от диаметра ствола, физико-механических свойств замораживаемых пород, расчётных нагрузок на ЛПО.

Для контроля за процессом замораживания предусматриваются гидронаблюдательные и термонаблюдательные скважины.

Искусственное замораживание горных пород должно *обеспечивать*:

- водонепроницаемость и прочность лёдопородного ограждения, способного воспринять на себя полное горное и гидростатическое давление;
- соблюдение проектного направления и габаритов выработок;
- сохранность прилегающих к выработкам наземных и подземных сооружений;
- максимальную скорость строительства в конкретных горно-геологических условиях.

Замораживание пород может выполняться с применением холодильных машин с использованием в качестве хладагента преимущественно аммиака. При соответствующем технико-экономическом обосновании допускается использовать фреон и жидкий азот.

4.1.2 Расчёт нагрузки на лёдопородное ограждение

Расчётную горизонтальную радиальную нагрузку на лёдопородное ограждение в обводнённых неустойчивых малосвязных породах (грунтах) определяют отдельно для каждой литологической разности пород как сумму горного давления пород и гидростатического давления подземных вод [4, 11].

Величину горного давления P_i^Γ , кПа, в неустойчивых обводнённых породах определяют по формуле [4, 11]:

$$P_i^\Gamma = \sum_{i=1}^{i=n} \gamma_i h_i \operatorname{tg}^2 \left(\frac{90 - \varphi_i}{2} \right), \quad (4.1)$$

где i – номер слоя породы; γ – объёмный вес породы, кН/м³; h – мощность слоя породы, м; φ – угол внутреннего трения породы,

$$\varphi = \operatorname{arctg} f, \quad (4.2)$$

здесь f – коэффициент крепости горной породы по шкале проф. М. М. Протоdjяконова.

Для пород, залегающих ниже статического уровня подземных вод, рассчитывают гидростатическое давление воды P_i^B , кПа, по формуле

$$P_i^B = \gamma_B h_i^B, \quad (4.3)$$

где γ_B – удельный вес подземных вод, кН/м³ (в расчётах следует принимать $\gamma_B = 10$ кН/м³); h_i^B – высота статического уровня воды над отметкой глубины, для которой рассчитывают давление, м.

Полную нагрузку на лёдопородное ограждение P_i , кПа, определяют как сумму горного и гидростатического давлений:

$$P_i = P_i^\Gamma + P_i^B. \quad (4.4)$$

По результатам расчётов приводят эпюр горного давления пород [4, 11].

4.1.3 Расчёт толщины лёдопородной кольцевой стенки

Толщину кольцевого лёдопородного ограждения E_i рассчитывают отдельно для каждого i -го слоя замораживаемых пород. При глубине залегания замораживаемых пород $H_i \leq 40$ м толщину кольцевого лёдопородного ограждения E_i , м, рассчитывают по уравнению Ляме–Гадолина [8, 12]:

$$E_i = \frac{D_{\text{вч}}}{2} \left(\sqrt{\frac{[\sigma_{\text{сж}}]}{[\sigma_{\text{сж}}] - 2P_i}} - 1 \right), \quad (4.5)$$

где $D_{\text{вч}}$ – диаметр ствола вчерне, м; $[\sigma_{\text{сж}}]$ – допустимое напряжение замороженных пород на сжатие, определяют как $[\sigma_{\text{сж}}] = \sigma_{\text{сж}} / k_3$, МПа; $\sigma_{\text{сж}}$ – предел прочности замороженной породы на одноосное сжатие, МПа; k_3 – коэффициент запаса, равный 2–4; P_i – давление горных пород на лёдопородное ограждение, МПа.

В формуле Ляме–Гадолина замороженные породы рассматриваются как упругий материал и не учитываются их свойства ползучести, т.е. способность их снижать свою прочность под действием постоянной, но длительно действующей внешней нагрузки. Одновременно с течением времени нарастают деформации в лёдопородном ограждении.

Значения пределов прочности на сжатие основных замороженных пород на одноосное сжатие приведены в табл. 4.1 или принимаются согласно [2].

Таблица 4.1

Предел прочности замороженных пород на одноосное сжатие $\sigma_{\text{сж}}$, МПа			
Глина	Плывун истинный	Суглинок плывучий	Речники
5–6	8–10	9–12	8–12

При глубинах залегания замораживаемых пород $H_i > 40$ м замороженные породы рассматриваются как вязко- или упруго-пластичный

материал и толщину лёдопородного ограждения E_i , м, рассчитывают по уравнению О. Домке [2, 9, 11, 12]:

$$E_i = \frac{D_{\text{вч}}}{2} \left[0,29 \frac{P_i}{\sigma_s} + 2,3 \left(\frac{P_i}{\sigma_s} \right)^2 \right], \quad (4.6)$$

где σ_s – предел длительной прочности замороженных пород, при расчётах следует принимать $\sigma_s \approx 0,6 \sigma_{\text{сж}}$.

При буровзрывном способе проходки минимальная толщина лёдопородного ограждения должна составлять не менее 3 м.

4.1.4 Определение размеров лёдопородного ограждения

При толщине лёдопородного ограждения $E \leq 5$ м принимают однорядное расположение замораживающих скважин. Диаметр окружности центров замораживающих скважин $D_{\text{ск}}$, м, определяют из выражения [9, 11, 12]:

$$D_{\text{ск}} = D_{\text{вч}} + 1,2 E + 2 a, \quad (4.7)$$

где a – допустимая максимальная величина отклонения скважины от проектного положения, м,

$$a = 0,5 + 0,002 H, \quad (4.8)$$

здесь H – глубина скважины с учётом заглубления в подстилающие породы. Величина заглубления замораживающих колонок в подстилающие породы, должна быть достаточной для восприятия полного гидростатического давления при их вскрытии стволом. В расчётах принимается не менее 3–4 м.

Диаметр лёдопородного цилиндра вокруг скважины D , м, с учётом отклонения скважин от проектного положения определяют по формуле

$$D = \sqrt{(l_{\text{ф}}^2 + E^2)}, \quad (4.9)$$

где $l_{\text{ф}}$ – фактическое расстояние между скважинами (рис. 4.1), м,

$$l_{\phi} = 2 a + l, \quad (4.10)$$

здесь l – проектное расстояние между устьями скважин, обычно принимают равным 1,2–1,5 м [5, 7].

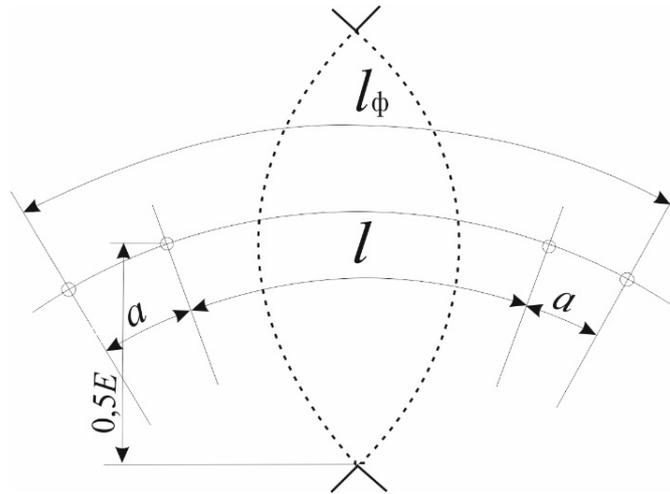


Рис. 4.1. Схема расположения скважин для расчёта l_{ϕ}

Определяют наружный $D_{\text{н}}$ и внутренний $D_{\text{в}}$ диаметры лёдопородного ограждения с учётом отклонения скважин от вертикали [11, 12]:

$$D_{\text{н}} = D_{\text{СК}} + 0,4 D \cdot 2; \quad (4.11)$$

$$D_{\text{в}} = D_{\text{СК}} - 0,6 D \cdot 2. \quad (4.12)$$

4.1.5 Определение количества скважин

Количество замораживающих скважин определяют по формуле [2, 8, 11]:

$$N_3 = \frac{\pi D_{\text{СК}}}{l}. \quad (4.13)$$

Количество термонаблюдательных скважин принимают не менее 10 % от числа замораживающих скважин. Термонаблюдательные скважины располагают на одной прямой, причём одну из них между замораживающими скважинами, две другие на внутренней и внешней границах лёдопородного ограждения, остальные за его пределами.

Количество гидронаблюдательных скважин принимают по числу изолированных водоносных горизонтов (водоносных неустойчивых пород, находящихся между водоупорами), с добавлением по одной контрольной скважины на каждый водоносный горизонт, располагаемые вне замораживаемого контура.

Гидронаблюдательные скважины располагают внутри замораживаемого контура пород на расстоянии 1,5–2,0 м от него, из расчёта одна скважина на каждый водоносный горизонт [2, 11, 12].

Приводят схему расположения замораживающих, гидронаблюдательных и термонаблюдательных скважин [2, 9, 11, 12].

4.1.6 Расчёт холодопроизводительности замораживающей станции

Холодопередающую способность замораживающих колонок Q_k , Вт, определяют из выражения [2, 11, 12]:

$$Q_k = q_f F, \quad (4.14)$$

где q_f – удельный тепловой поток (коэффициент теплопередачи замораживающей колонки), Вт/м²; F – поверхность замораживающих колонок, м².

Ориентировочное среднее значение величины удельного теплового потока q_f , Вт/м², за весь период замораживания определяют по формуле МГГУ [8]:

$$q_f = \bar{q}_f \lambda_1, \quad (4.15)$$

где \bar{q}_f – условный удельный тепловой поток, Вт/м²; λ_1 – коэффициент теплопроводности замороженной породы, Вт/(м·град).

Условный удельный тепловой поток определяют по рекомендациям [8, табл. 4.6; 11, табл. 4.17], а коэффициент теплопроводности замороженной породы принимают согласно рекомендациям [9, с. 265].

Значения условного удельного теплового потока \bar{q}_f для температуры хладоносителя $t_p \approx -(25–30)^\circ\text{C}$ и заданного расстояния между замораживающими скважинами $l = 1,2–1,3$ м приведены в табл. 4.2 [11].

Таблица 4.2

Условный удельный тепловой поток \bar{q}_f , Вт/м ² , при толщине лёдопородного ограждения E			
2 м	3 м	4 м	5 м
128–167	117–153	100–133	89–117

Значения коэффициента теплопроводности замороженной породы λ_1 приведены в табл. 4.3 [9] или могут приняты согласно [2].

Таблица 4.3

Коэффициент теплопроводности замороженной породы λ_1 , Вт/(м · град)			
Глина	Плывун истинный	Суглинок пывучий	Речники
1,5	1,7	2,0	3,1

Замораживающая колонка должна состоять из замораживающей трубы, оголовника, питающей трубы и башмака. Устье замораживающей колонки должно быть снабжено головкой. В головке должна быть вмонтирована гильза для термометра и трубки для присоединения питающей и отводящей труб. Питающие и отводящие трубы замораживающих колонок должны присоединяться к штуцерам коллектора и распределителя, посредством прорезиненных шлангов и газовых труб на муфтах.

Поверхность замораживающих колонок F , м², определяют по формуле [11]:

$$F = \pi d_1 l_0 N_3, \quad (4.16)$$

где d_1 – диаметр замораживающих труб следует принимать $d_1 = 0,146$ м с толщиной стенки 6 мм [13]; l_0 – высота зоны замораживания, м,

$$l_0 = H + l_{нз}, \quad (4.17)$$

здесь H – глубина замораживаемых пород, м; $l_{\text{нз}}$ – мощность устойчивых горных пород, не подлежащих замораживанию, они могут залегать сразу от поверхности земли и отделяются диафрагмами, устанавливаемыми в замораживающих колонках.

Холодопередающую способность замораживающей станции определяют из выражения

$$Q_{\text{ст}} = 1,2 Q_{\text{к}}. \quad (4.18)$$

4.1.7 Выбор оборудования замораживающей станции

4.1.7.1 Выбор компрессора

Тип компрессора выбирают по величине холодопередающей способности замораживающей станции $Q_{\text{ст}}$ [11].

Количество рабочих компрессоров определяют из выражения:

$$n_{\text{к}} = \frac{Q_{\text{ст}}}{Q_{\text{к}}^{\text{р}}}, \quad (4.19)$$

где $Q_{\text{к}}^{\text{р}}$ – рабочая производительность компрессора, определяют по величине стандартной (паспортной) производительности компрессора $Q_{\text{к}}^{\text{с}}$ из условия, что на каждый градус понижения температуры испарения хладагента холодопроизводительность компрессора уменьшается на 4 % [11], т. е.

$$Q_{\text{к}}^{\text{р}} = Q_{\text{к}}^{\text{с}} \frac{100 - 4(|t_{\text{и}}^{\text{р}}| - |t_{\text{и}}^{\text{с}}|)}{100}, \quad (4.20)$$

где $t_{\text{и}}^{\text{р}}$ и $t_{\text{и}}^{\text{с}}$ – соответственно рабочая и стандартная температуры испарения хладагента.

Фактическое количество компрессоров замораживающей станции принимается с учётом 30–50 % резерва. Количество компрессоров в замораживающей станции определяет количество контуров циркуляции хладагента в станции.

В табл. 4.4 представлены характеристики наиболее распространённых компрессоров одноступенчатого сжатия [2].

Таблица 4.4

Показатели	Тип компрессора			
	A110-2	ААУ 400/3	АО-600	АО-1200
$t_{и}^c, \text{ }^\circ\text{C}$	-15	-15	-15	-15
$Q_K^c, \text{ кВт}$	139,2	348	677	1334
$Q_{\text{ком}}, \text{ м}^3/\text{ч}$	1,5	3	6	10

Примечание. $Q_{\text{ком}}$ – расход воды для охлаждения компрессора.

4.1.7.2 Выбор конденсатора

На каждый компрессор устанавливают один или несколько конденсаторов с рабочей поверхностью $F_K, \text{ м}^2$ [8, 11]:

$$F_K = 1,2 \frac{Q_K^P}{q_K}, \quad (4.21)$$

где q_K – удельная тепловая нагрузка на конденсатор, в среднем $q_K = 4,2\text{--}5,4 \text{ кВт/м}^2$ [8].

Согласно [2, 8] выпускают элементные конденсаторы: 8КЭ, 16КЭ, 20КЭ, 32КЭ, 60КЭ, 80КЭ, 100КЭ и 120КЭ, где цифра обозначает рабочую поверхность конденсатора в квадратных метрах. Для суммирования рабочих поверхностей нескольких конденсаторов в контуре их соединяют последовательно.

4.1.7.3 Выбор испарителя

На каждый компрессор устанавливают один или несколько испарителей с поверхностью охлаждения $F_{и}, \text{ м}^2$ [8, 11]:

$$F_{и} = 1,2 \frac{Q_K^P}{q_{и}}, \quad (4.22)$$

где $q_{и}$ – удельная тепловая нагрузка на испаритель, в среднем $q_{и} = 2,30\text{--}2,85 \text{ кВт/м}^2$ [8].

Согласно [2, 8] выпускают вертикальнотрубные аммиачные испарители: 320-И, 240-И, 200-И, 160-И, 120-И, 90-И, 60-И, 40-И, 30-И, где цифра обозначает поверхность охлаждения испарителя в квадратных метрах.

Для суммирования поверхностей испарения нескольких испарителей в контуре их соединяют последовательно. Все испарители, как правило, помещают в один рассольный бак.

Приводят схемы замораживающей станции, рассольной сети и замораживающей колонки [9, 11, 12].

4.1.8 Определение времени замораживания

Время образования лёдопородной стенки по скорости нарастания лёдопородного цилиндра (время активного замораживания) T_A , сут, определяют из выражения [15]:

$$T_A = R / V, \quad (4.23)$$

где R – радиус лёдопородного цилиндра вокруг скважины, м; V – скорость нарастания лёдопородного ограждения в неустойчивых обводнённых породах, $V \approx 0,025$ м/сут [15].

Время образования лёдопородной стенки T_A , сут, по теплосодержанию пород и холодопередающей способности замораживающих колонок определяют по формуле

$$T_A = 1,16 \cdot 10^{-5} Q_0 / (Q_k - Q_{\text{п}}), \quad (4.24)$$

где Q_0 – полное теплосодержание пород в объёме кольцевой лёдопородной стенки, кДж; Q_k – холодопередающая способность замораживающих колонок, кВт; $Q_{\text{п}}$ – теплоприток из окружающих пород, кВт.

В дальнейших расчётах принимают значение времени активного замораживания T_A , наибольшее из полученных.

Теплоприток из окружающих пород $Q_{\text{п}}$, кВт, определяют из выражения

$$Q_{\text{п}} = \pi (D_{\text{н}} + D_{\text{в}}) l_0 g_3, \quad (4.25)$$

где g_3 – удельный земной теплоприток, $g_3 = 5,6 \cdot 10^{-3}$ кВт/м² [11].

Полное теплосодержание пород в объёме кольцевой лёдопородной стенки Q_0 , кДж, определяют из выражения [11]:

$$Q_0 = \frac{\pi}{4} q_{\Pi} (D_{\text{H}}^2 - D_{\text{B}}^2) l_0, \quad (4.26)$$

где q_{Π} – удельное теплосодержание породы, кДж,

$$q_{\Pi} = q_1 + q_2 + q_3 + q_4, \quad (4.27)$$

здесь q_1 – количество холода, необходимое для охлаждения воды от естественной температуры породы t_{Π} до температуры замерзания воды t_0 , кДж; q_2 – количество холода для замораживания воды, кДж; q_3 – количество холода для охлаждения льда от температуры замерзания воды t_0 до средней температуры замораживания пород $t_c = -10$ °С, кДж; q_4 – количество холода для охлаждения породного скелета от естественной температуры породы t_{Π} до средней температуры замораживания пород t_c , кДж;

$$q_1 = 1,16 \cdot 10^{-5} V_1 \rho_{\text{В}} C_{\text{В}} (t_{\Pi} - t_0); \quad (4.28)$$

$$q_2 = 1,16 \cdot 10^{-5} V_1 \rho_{\text{В}} S; \quad (4.29)$$

$$q_3 = 1,16 \cdot 10^{-5} V_1 \rho_{\text{Л}} C_{\text{Л}} (t_0 - t_c); \quad (4.30)$$

$$q_4 = 1,16 \cdot 10^{-5} V_2 \rho_2 C_2 (t_{\Pi} - t_c), \quad (4.31)$$

где $\rho_{\text{В}}$ – плотность воды, $\rho_{\text{В}} = 1000$ кг/м³; $C_{\text{В}}$ – удельная теплоёмкость воды, $C_{\text{В}} = 4,19$ кДж/(кг·°С); V_1 – объём воды, содержащейся в 1 м³ породы, м³ (табл. 4.5); S – удельная скрытая теплота льдообразования, $S = 335$ кДж/кг; $\rho_{\text{Л}}$ – плотность льда, $\rho_{\text{Л}} = 900$ кг/м³; $C_{\text{Л}}$ – удельная теплоёмкость льда, $C_{\text{Л}} = 2,1$ кДж/(кг·°С); C_2 – удельная теплоёмкость породного скелета, $C_2 = 0,838$ кДж/(кг·°С) [12]; V_2 – объём породного скелета в 1 м³ породы, м³; ρ_2 – плотность породного скелета, кг/м³.

Значения $V_2\rho_2$ для пльвуна, суглинка, глины и речника соответственно равны: 1080, 1200, 1500 и 1250 кг [12].

В табл. 4.5 представлены значения объёма воды, содержащегося в 1 м³ обводнённых неустойчивых пород [2, 8, 11].

Таблица 4.5

Объём воды, содержащейся в 1 м ³ породы, V_1 , м ³			
Глина	Плывун истинный	Суглинок плывучий	Речники
0,3	0,42	0,4	0,35

4.1.9 Расчёт диаметра рассолопровода и выбор рассольных насосов

Внутренний диаметр рассолопровода d_p , м, определяют по формуле [11, 12]:

$$d_p = \sqrt{\frac{4W}{\pi V_p}}, \quad (4.32)$$

где V_p – скорость движения рассола, $V_p = 1,5–2$ м/с [12]; W – количество рассола, циркулирующего в сети в единицу времени, м³/с [11];

$$W = \frac{Q_k^p n_k}{\Delta t \rho_p C_p}, \quad (4.33)$$

здесь Q_k^p – рабочая производительность компрессора, кВт; Δt – средняя разность температур прямого и обратного рассолопроводов, $\Delta t = 3$ °С [11]; ρ_p – плотность рассола, $\rho_p = 1290$ кг/м³ [12]; C_p – теплоёмкость рассола, $C_p = 2,66$ кДж/(кг·°С) [8].

Выбирают трубы для рассолопровода. Согласно ГОСТ 8732–78 «Трубы стальные бесшовные горячедеформированные» выпускают бесшовные трубы с наружными диаметрами: 108, 114, 121, 127, 140, 146, 159, 168, 194, 203, 219, 245, 273 и 299 мм. Толщина стенок труб – 8–10 мм [13].

Выбор рассольного насоса производят по его производительности $Q_{нр} = W$ и напору $P_{нр}$ для преодоления гидравлических сопро-

тивлений в сети (табл. 4.6) [2, 16]. Гидравлические потери принимаются по опытным данным или определяются по общепринятым формулам для расчёта потерь в трубопроводах. При замораживании в стволах обычно достаточный напор насоса составляет $P_{\text{НР}} = 0,3\text{--}0,5$ МПа.

Для суммирования производительности $Q_{\text{НР}}$ рассольные насосы соединяют параллельно.

Таблица 4.6

Показатели	Рассольные насосы		
	НБ-125А	У8-4	БРН-1
Производительность $Q_{\text{НР}}$, м ³ /с	0,3–1,0	0,95–2,1	0,9–1,87
Напор $P_{\text{НР}}$, МПа	3,5–16	9,5–20	9,8–20

4.1.10 Расчёт количества воды, циркулирующей в системе, и выбор водяных насосов

Расход воды, подаваемой в конденсаторы, $Q_{\text{В}}$, м³/ч, определяют по формуле [11]:

$$Q_{\text{В}} = \frac{Q_{\text{К}}^{\text{Р}} n_{\text{К}}}{\Delta t_{\text{ж}}}, \quad (4.34)$$

где $Q_{\text{К}}^{\text{Р}}$ – рабочая производительность компрессора, кВт; $\Delta t_{\text{ж}}$ – разность температур входящей и выходящей воды из конденсатора, для элементных конденсаторов $\Delta t_{\text{ж}} = 3$ °С.

Расход воды на охлаждение цилиндров компрессора $Q_{\text{КОМ}}$ принимают по его паспортным данным (табл. 4.4).

Определяют общий расход воды, циркулирующей в системе,

$$Q_{\text{ОБ}} = Q_{\text{В}} + Q_{\text{КОМ}}. \quad (4.35)$$

Выбирают тип и количество водяных насосов по их производительности и напору. Обычно для охлаждения компрессоров и по-

дачи воды в конденсаторы принимают горизонтальные центробежные насосы типа Д, так как они имеют хорошую всасывающую способность, с напором 0,15–0,20 МПа. Для суммирования расхода водяных насосов их соединяют параллельно.

В табл. 4.7 приведены характеристики водяных горизонтальных центробежных насосов типа Д [15].

Таблица 4.7

Показатели	Водяные насосы			
	Д-100-23	Д-200-95	Д-320-50	Д-630-90
Производительность $Q_{\text{нв}}$, м ³ /ч	100	200	320	630
Напор $P_{\text{нв}}$, МПа	0,23	0,95	0,50	0,90

4.1.11 Календарный график работ по замораживанию пород

График определяет продолжительность оснащения для замораживания (в том числе бурение скважин T_0), активного T_A и пассивного $T_{\text{п}}$ режимов замораживания и время демонтажа оборудования и ликвидации скважин $T_{\text{д}}$.

Продолжительность оснащения принимают равной нормативной $T_0 = 6\text{--}8$ месяцев, согласно СНиП 1.04.03-85 [14]. Продолжительность активного замораживания T_A рассмотрена в разд. 4.1.8.

Продолжительность пассивного замораживания $T_{\text{п}}$ определяют как сумму продолжительностей проходки технологического отхода ствола по замороженным породам $t_{\text{то}}$, оснащения ствола после проходки технологического отхода $t_{\text{ос}}$ ($t_{\text{ос}} = 1,5\text{--}2,5$ мес.) и проходки протяжённой части ствола по замороженным породам $t_{\text{пр}}$. При этом нормативные скорости проходки технологического отхода ствола и его протяжённой части по замороженным породам принимают согласно СП 69.13330.2016 [17].

Время демонтажа оборудования и ликвидации скважин обычно составляет $T_{\text{д}} = 1,5$ мес.

4.1.12 Расчёт режима работы замораживающей станции в пассивный период

Определяют продолжительность работы компрессоров замораживающей станции в сутки t_k , ч/сут, для компенсации величины земного теплопритока к лёдопородному ограждению в период проходки ствола по замороженным породам [11]:

$$t_k = 24 \frac{Q_3}{Q_k n_k}, \quad (4.36)$$

где Q_3 – земной теплоприток, $Q_3 = 103$ кВт/ч.

4.1.13 Расчёт стоимости работ по замораживанию горных пород

Сметная стоимость работ по замораживанию горных пород рассчитывают в ценах 2000 года. Перерасчёт сметной стоимости работ по замораживанию горных пород в текущий уровень цен производится путём умножения расчётной величины стоимости на индекс текущего уровня цен в строительстве по отношению к базисному (на 01.01.2000). Индексы изменения сметной стоимости строительно-монтажных работ и сметной стоимости оборудования $K_{инд}$ от сметно-нормативной базы 2000 года к сметно-нормативной базе текущего времени выполнения **Из1** (квартал, год) принимаются согласно письму Министерства регионального развития РФ (<http://minregion.ru>).

Сметную стоимость работ по замораживанию горных пород определяют на основе физических объёмов работ и ТЕР 81-02-35-2001 [18]. Расчёты оформляют в табличной форме (табл. 4.8).

Правила применения территориальных единичных расценок приведены в технической части сборника [18].

Стоимость бурения замораживающих и контрольных скважин S_b рассчитывают в зависимости от категории пород по буримости (пльвун – II категория, расц. E35-07-001-2; суглинок пльвучий – I категория, расц. E35-07-001-1; глина плотная – V категория, расц. E35-07-001-5), речники – IV категория, расц. E35-07-001-4) и глубины бурения [18].

Рассчитывают стоимость установки и опрессовки замораживающих колонок $C_{ЗК}$ (расц. Е35-07-008-1), спуска в колонки питающих труб и их подъёма $C_{ПТ}$ (расц. Е35-07-009-1), установки и снятия головок с колонок $C_{Г}$ (расц. Е35-07-010-1 и Е35-07-010-3), заполнения скважин цементным раствором при их ликвидации $C_{ЗЦР}$ (расц. Е35-07-011-1) [18].

Таблица 4.8

Наименование работ	Ед. изм.	Объём работ	Обоснование расценки	Расценка, тыс. руб.	Сумма, тыс. руб.

Определяют эксплуатационные расходы по содержанию замораживающей станции в активный C_A и пассивный C_P периоды [6]:

$$C_A = Ц_{СТ} T_A; \quad (4.37)$$

$$C_P = [Ц_{СТ} t_k + K_Э Ц_{СТ} (1 - t_k)] T_P, \quad (4.38)$$

где $Ц_{СТ}$ – стоимость содержания замораживающей станции в активный период, в ценах 2000 года $Ц_C = 42400$ руб./сут [9]; T_A и T_P – продолжительность активного и пассивного замораживания, сут (см. разд. 4.1.8 и 4.1.11); t_k – суточная продолжительность работы компрессорной станции в пассивный период, ч/сут (см. разд. 4.1.12); $K_Э$ – коэффициент, учитывающий долю расходов на содержание обслуживающего персонала, амортизационных отчислений и других постоянных затрат, $K_Э = 0,2$.

Определяют полную стоимость замораживания горных пород как сумму перечисленных затрат:

$$C_3 = C_B + C_{ЗК} + C_{ПТ} + C_G + C_A + C_P. \quad (4.39)$$

Полученная сметная стоимость рассчитана в ценах 2000 года. Для определения фактической стоимости она должна быть умножена на индекс изменения сметной стоимости строительно-монтажных работ $K_{инд}$, действующий в данный период времени.

4.2 Пример расчёта основных параметров замораживания неустойчивых горных пород и тампонирувания водоносных трещиноватых пород цементными растворами

4.2.1 Исходные данные

Диаметр ствола в свету $D_{\text{СВ}}$ 5,0 м
 Диаметр ствола вчерне $D_{\text{ВЧ}}$ 5,6 м
 Температура породы $t_{\text{П}}$8 °С
 Температура замерзания воды t_0 –2 °С
 Температура испарения хладагента $t_{\text{Ц}}^{\text{П}}$ –30 °С
 Температура хладоносителя (рассола) $t_{\text{Р}}$ –28 °С
 Статический уровень подземных вод $H_{\text{СТ}}$ 5 м

Таблица 4.9

Наименование пород	Мощность h , м	Удельное водопоглощение q , м ² /(с·Па)	Коэф. трещиноватости m	Коэф. проницаемости K , 10 ⁻¹² м ²	Коэф. крепости f	Угол внутреннего трения, град.	Объёмный вес γ , кН/м ³
Глина	6				0,4	19	16
Истинный плавун	12				0,3	16	15
Глина плотная	5				0,4	23	18
Суглинок плавучий	16				0,3	17	16
Речники	–				0,7	34	16
Глина плотная	4				0,4	24	18
Аргиллит	28	8,6·10 ⁸	0,02	50	3,0	55	25
Алевролит	–				4,5	60	27
Песчаник	36	4,8·10 ⁸	0,03	12	7,0	65	26

Примечание. Глина является водоупором.

4.2.2 Расчёт процесса замораживания обводнённых неустойчивых пород при сооружении устьевой части вертикального ствола шахты

4.2.2.1 Расчёт нагрузки на лёдопородное ограждение

Поскольку глина является водоупором, расчётную горизонтальную радиальную нагрузку определяем для истинного пльвуна и суглинка пльвучего. При этом величину горного давления определяем по формулам (4.1) и (4.2):

$$P_i^{\Gamma} = \sum_{i=1}^{i=n} \gamma_i h_i \operatorname{tg}^2 \left(\frac{90 - \varphi_i}{2} \right).$$

В пльвуне

$$P_{\Pi}^{\Gamma} = 16 \cdot 6 \operatorname{tg}^2 \left(\frac{90 - 19}{2} \right) + 15 \cdot 12 \operatorname{tg}^2 \left(\frac{90 - 16}{2} \right) = 151,05 \text{ кПа.}$$

В суглинке

$$P_C^{\Gamma} = 16 \cdot 6 \operatorname{tg}^2 \left(\frac{90 - 19}{2} \right) + 15 \cdot 12 \operatorname{tg}^2 \left(\frac{90 - 16}{2} \right) + 18 \cdot 5 \operatorname{tg}^2 \left(\frac{90 - 23}{2} \right) + 16 \cdot 6 \operatorname{tg}^2 \left(\frac{90 - 17}{2} \right) = 243,04 \text{ кПа.}$$

Поскольку истинный пльвун и суглинок залегают ниже статического уровня подземных вод, рассчитываем гидростатическое давление воды по формуле (4.3):

$$P_i^B = \gamma_e h_i^B.$$

$$P_{\Pi}^B = 10 \cdot 13 = 130 \text{ кПа;} \quad P_C^B = 10 \cdot 34 = 340 \text{ кПа.}$$

Полную нагрузку на лёдопородное ограждение определяем как сумму горного и гидростатического давлений по формуле (4.4):

$$P_i = P_i^{\Delta} + P_i^B.$$

$$P_{\Pi} = 151,05 + 130 = 281,05 \text{ кПа;} \quad P_C = 243,04 + 340 = 583,04 \text{ кПа.}$$

4.2.2.2 Расчёт толщины лёдопородной кольцевой стенки

Поскольку истинный плавун и суглинок залегают на глубине менее 40 м, рассчитываем гидростатическое давление воды по формуле Ляме–Гадолина (4.5):

$$E_i = \frac{D_{\text{вч}}}{2} \left(\sqrt{\frac{[\sigma_{\text{сж}}]}{[\sigma_{\text{сж}}] - 2P_i}} - 1 \right).$$

В плавуне

$$E_{\text{п}} = \frac{5,6}{2} \left(\sqrt{\frac{8/4}{8/4 - 2 \cdot 0,281}} - 1 \right) = 0,50 \text{ м.}$$

В суглинке

$$E_{\text{с}} = \frac{5,6}{2} \left(\sqrt{\frac{9/4}{9/4 - 2 \cdot 0,583}} - 1 \right) = 1,23 \text{ м.}$$

При буровзрывном способе проходки ствола по замороженным породам минимальная толщина лёдопородного ограждения должна составлять $E \geq 3$ м (для исключения разрушения замороженных пород при ведении взрывных работ). Для дальнейших расчётов принимаем $E = 3$ м.

4.2.2.3 Определение размеров лёдопородного ограждения

Поскольку $E \leq 5$ м, принимаем однорядное расположение замораживающих скважин.

Определяем допустимую максимальную величину отклонения скважины от проектного положения a и диаметр окружности центров замораживающих скважин $D_{\text{ск}}$ по формулам (4.7) и (4.8):

$$a = 0,5 + 0,002 H = 0,5 + 0,002 \cdot 43 = 0,586 \text{ м;}$$

$$D_{\text{ск}} = D_{\text{вч}} + 1,2 E + 2 a = 5,6 + 1,2 \cdot 3,0 + 2 \cdot 0,586 = 10,37 \text{ м.}$$

Определяем фактическое расстояние между скважинами l_{ϕ} и диаметр лёдопородного цилиндра вокруг скважины D с учётом отклонения скважин от проектного положения по формулам (4.9) и (4.10):

$$l_{\phi} = 2 a + l = 2 \cdot 0,586 + 1,3 = 2,47 \text{ м};$$

$$D = \sqrt{(l_{\phi} + E)^2} = \sqrt{(2,47^2 + 3^2)} = 3,89 \text{ м}.$$

Определяем наружный $D_{\text{н}}$ и внутренний $D_{\text{в}}$ диаметры лёдопородного ограждения с учётом отклонения скважин по формулам (4.11) и (4.12):

$$D_{\text{н}} = D_{\text{СК}} + 0,4 D \cdot 2 = 10,37 + 0,4 \cdot 3,89 \cdot 2 = 13,83 \text{ м};$$

$$D_{\text{в}} = D_{\text{СК}} - 0,6 D \cdot 2 = 10,37 - 0,6 \cdot 3,89 \cdot 2 = 5,70 \text{ м}.$$

4.2.2.4 Определение количества скважин

Определяем количество замораживающих скважин вокруг ствола по формуле (4.13):

$$N_3 = \frac{\pi D_{\text{СК}}}{l} = \frac{\pi \cdot 10,37}{1,3} = 25,04 \text{ шт.}$$

Принимаем количество замораживающих скважин $N_3 = 25$ шт. Количество термонаблюдательных скважин принимаем $N_{\text{т}} = 4$ шт. (не менее 10 % от числа замораживающих скважин). Количество гидронаблюдательных скважин принимаем по числу изолированных водоносных горизонтов, $N_{\text{г}} = 4$ шт., в т.ч. две контрольных.

4.2.2.5 Расчёт холодопроизводительности замораживающей станции

По табл. 4.2 и 4.3 для заданных условий замораживания определяем значения условного удельного теплового потока $\bar{q}_f = 153 \text{ Вт/м}^2$ и коэффициента теплопроводности замороженной породы $\lambda_1 = 2,0 \text{ Вт/(м} \cdot \text{град)}$ (для расчётов принимаем большее значение λ_1).

Рассчитываем среднее значение величины удельного теплового потока q_f за весь период замораживания по формуле (4.15):

$$q_f = q_f \lambda_1 = 153 \cdot 2,0 = 306 \text{ Вт/м}^2.$$

Определяем суммарную поверхность замораживающих труб F по формуле (4.16):

$$F = \pi d_1 l_0 N_3 = \pi \cdot 0,146 \cdot 43 \cdot 25 = 492,82 \text{ м}^2.$$

Рассчитываем холодопередающую способность замораживающих колонок из выражения (4.14):

$$Q_k = q_f F = 306 \cdot 492,82 = 156836 \text{ Вт} = 156,8 \text{ кВт}.$$

Определяем холодопередающую способность замораживающей станции из выражения (4.18):

$$Q_{ст} = 1,2 Q_k = 1,2 \cdot 156,8 = 188,16 \text{ кВт}.$$

4.2.2.6 Выбор оборудования замораживающей станции

Согласно табл. 4.4 предварительно принимаем компрессор ААУ 400/3 со стандартной производительностью $Q_k^{c1} = 348 \text{ кВт}$.

Определяем рабочую производительность компрессора Q_k^p по формуле (4.20):

$$Q_k^p = Q_k^{ст} \frac{100 - 4(|t_n^p| - |t_n^c|)}{100} = 348 \frac{100 - 4(30 - 15)}{100} = 139,2 \text{ кВт}.$$

Поскольку рабочая производительность выбранного компрессора Q_k^p оказалась меньше требуемой холодопередающей способности замораживающей станции $Q_{ст}$ ($139,2 < 188,16$), то принимаем более мощный компрессор АО-600 со стандартной производительностью $Q_k^{ст} = 677 \text{ кВт}$.

Тогда рабочая производительность компрессора АО-600 составит

$$Q_K^P = 677 \frac{100 - 4(30 - 15)}{100} = 270,8 \text{ кВт.}$$

Количество рабочих компрессоров определяем из выражения (1.19):

$$n_K = \frac{Q_{СТ}}{Q_K^P} = \frac{188,16}{270,8} = 0,69 \text{ шт.}$$

Окончательно принимаем два компрессора АО-600, один рабочий и один резервный.

Определяем рабочую поверхность конденсатора F_K по формуле (1.21):

$$F_K = 1,2 \frac{Q_K^P}{q_K} = 1,2 \frac{270,8}{4,67} = 69,58 \text{ м}^2.$$

По величине F_K принимаем элементный конденсатор 80КЭ с рабочей поверхностью испарения 80 м².

Определяем поверхность охлаждения испарителя $F_{И}$ по формуле (1.22):

$$F_{И} = 1,2 \frac{Q_K^P}{q_{И}} = 1,2 \frac{270,8}{2,3} = 141,29 \text{ м}^2.$$

По величине $F_{И}$ принимаем вертикальнотрубный аммиачный испаритель 160-И с поверхностью охлаждения 160 м².

4.2.2.7 Определение времени замораживания

Определяем удельное теплосодержание горных пород по формулам (4.27) – (4.31):

В плавуне:

$$q_1 = V_1 \rho_B C_B (t_{П} - t_0) = 0,42 \cdot 1000 \cdot 4,19 [8 - (-2)] = 17598 \text{ кДж};$$

$$q_2 = V_1 \rho_B S = 0,42 \cdot 1000 \cdot 335 = 140700 \text{ кДж};$$

$$q_3 = V_1 \rho_L C_L (t_0 - t_c) = 0,42 \cdot 900 \cdot 2,1 [(-2) - (-10)] = 6350 \text{ кДж};$$

$$q_4 = V_2 \rho_2 C_2 (t_{\text{п}} - t_c) = 1080 \cdot 0,838 [8 - (-10)] = 16290 \text{ кДж};$$

$$q_{\text{п}} = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 = 17598 + 140700 + 6350 + 16290 = 180938 \text{ кДж}.$$

В суглинке:

$$q_1 = 0,4 \cdot 1000 \cdot 4,19 [8 - (-2)] = 16760 \text{ кДж};$$

$$q_2 = 0,4 \cdot 1000 \cdot 335 = 134000 \text{ кДж};$$

$$q_3 = 0,4 \cdot 900 \cdot 2,1 [(-2) - (-10)] = 6048 \text{ кДж};$$

$$q_4 = 1200 \cdot 0,838 [8 - (-10)] = 18101 \text{ кДж};$$

$$q_{\text{п}} = 16760 + 134000 + 6048 + 18101 = 174909 \text{ кДж}.$$

В глине:

$$q_1 = 0,3 \cdot 1000 \cdot 4,19 [8 - (-2)] = 12570 \text{ кДж};$$

$$q_2 = 0,3 \cdot 1000 \cdot 335 = 100500 \text{ кДж};$$

$$q_3 = 0,3 \cdot 900 \cdot 2,1 [(-2) - (-10)] = 4536 \text{ кДж};$$

$$q_4 = 1500 \cdot 0,838 [8 - (-10)] = 22626 \text{ кДж};$$

$$q_{\text{п}} = 12570 + 100500 + 4536 + 22626 = 140232 \text{ кДж}.$$

Для дальнейших расчётов принимаем большее значение удельного теплосодержания пород $q_{\text{п}} = 180938 \text{ кДж}$.

Определяем полное теплосодержание пород в объёме кольцевой лёдопородной стенки Q_0 из выражения (4.26):

$$Q_0 = \frac{\pi}{4} q_{\text{п}} (D_{\text{н}}^2 - D_{\text{в}}^2) l_0 = \frac{\pi}{4} 180938 (13,83^2 - 5,70^2) 43 = 970 \cdot 10^6 \text{ кДж}.$$

Определяем теплоприток из окружающих пород $Q_{\text{п}}$ по формуле (4.25):

$$Q_{\text{п}} = \pi (D_{\text{н}} + D_{\text{в}}) l_0 g_3 = \pi (13,83 + 5,70) 43 \cdot 5,6 \cdot 10^{-3} = 15,99 \text{ кВт}.$$

Определяем время активного замораживания T_A (образования лёдопородного цилиндра по теплосодержанию пород и холодопередающей способности замораживающих колонок) по формуле (4.24):

$$T_A = 1,16 \cdot 10^{-5} Q_0 / (Q_k - Q_{\text{п}}) = 1,16 \cdot 10^{-5} \cdot 970 \times \\ \times 10^6 / (150,8 - 15,99) = 83,46 \text{ сут.}$$

Определяем время активного замораживания T_A по скорости нарастания лёдопородного цилиндра из выражения (4.23):

$$T_A = R / V = 0,5 \cdot 3,89 / 0,025 = 77,8 \text{ сут.}$$

Окончательно принимаем время активного замораживания кратным 0,5 месяца, т.е. $T_A = 90$ сут.

4.2.2.8 Расчёт диаметра рассолопровода и выбор рассольных насосов

Определяем количество рассола, циркулирующего в сети в единицу времени W , по формуле (4.33):

$$W = \frac{Q_k^p n_k}{\Delta t \rho_p C_p} = \frac{270,8 \cdot 1}{3 \cdot 1290 \cdot 2,66} = 0,026 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Рассчитываем внутренний диаметр рассолопровода d_p по формуле (4.32):

$$d_p = \sqrt{\frac{4W}{\pi V_p}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,026}{\pi \cdot 1,7}} = 0,14 \text{ м.}$$

Согласно ГОСТ 8732–78 «Трубы стальные бесшовные» принимаем для рассолопровода стальную трубу с наружным диаметром 146 мм и толщиной стенки 6 мм [13].

По данным табл. 4.6 принимаем рассольный поршневой горизонтальный насос НБ-125А с максимальной производительностью $Q_{\text{нр}} = 0,3 \text{ м}^3/\text{с.}$

4.2.2.9 Расчёт количества воды, циркулирующей в системе, и выбор водяных насосов

Рассчитываем расход воды, подаваемой в конденсаторы, Q_B по формуле (4.34):

$$Q_B = \frac{Q_K^p n_K}{\Delta t_{ж}} = \frac{270,8 \cdot 1}{3} = 90,27 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Расход воды на охлаждение цилиндров компрессора принимаем по его паспортным данным, $Q_{ком} = 6 \text{ м}^3/\text{ч}$ (см. табл. 4.4).

Определяем общий расход воды, циркулирующей в системе, из выражения (4.35):

$$Q_{об} = Q_B + Q_{ком} = 90,27 + 6 = 96,27 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

По данным табл. 4.7 принимаем водяной насос Д-100-23 с производительностью $100 \text{ м}^3/\text{ч}$.

4.2.2.10 Календарный график работ по замораживанию пород

Продолжительность оснащения для замораживания, в том числе бурение скважин, принимаем равной нормативной $T_0 = 6 \text{ мес.}$, согласно СНиП 1.04.03-85 [14].

Продолжительность активного замораживания определена в разделе 4.2.2.7 и составляет $T_A = 3 \text{ мес.}$

Продолжительность проходки ствола по замороженным породам определяем как сумму продолжительностей проходки технологического отхода ствола по замороженным породам $t_{то}$, оснащения ствола после проходки технологического отхода $t_{ос}$ и проходки протяжённой части ствола по замороженным породам $t_{пр}$.

Глубина технологического отхода ствола для размещения в нём постоянного проходческого оборудования должна составлять не менее 30–40 м. Поскольку глубина замораживания составляет 43 м, принимаем глубину технологического отхода равной 43 м.

Продолжительность проходки технологического отхода вертикального ствола при нормативной скорости проходки 15 м/мес. (согласно СП 69.13330.2016 [17]) составит $t_{то} = 43/15 = 2,87 \text{ мес.} \approx 3 \text{ мес.}$

Поскольку при проходке протяжённой части данного ствола породы не замораживают, продолжительность пассивного замораживания составит $T_{\Pi} = t_{\text{ТО}} = 3$ мес.

Продолжительность демонтажа оборудования и ликвидации скважин обычно составляет $T_{\text{д}} = 1,5$ мес.

Тогда общая продолжительность работ по замораживанию составит:

$$T_{\text{Об}} = T_{\text{О}} + T_{\text{А}} + T_{\Pi} + T_{\text{д}} = 6 + 3 + 3 + 1,5 = 13,5 \text{ мес.}$$

4.2.2.11 Расчёт режима работы замораживающей станции в пассивный период

Определяем суточную продолжительность работы компрессоров замораживающей станции $t_{\text{к}}$ для компенсации величины земного теплопритока к лёдопородному ограждению в период проходки ствола по замороженным породам из выражения (4.36):

$$t_{\text{к}} = 24 \frac{Q_{\text{к}}}{Q_{\text{к}}^{\text{п}} n_{\text{к}}} = 24 \frac{103}{270,8 \cdot 1} = 9,13 \text{ ч/сут.}$$

4.2.2.12 Расчёт стоимости работ по замораживанию горных пород

Определяем объём работ по бурению замораживающих, термонаблюдательных и гидронаблюдательных скважин:

– по суглинку плавучему (I категория буримости)

$$16 \cdot 25 + 16 \cdot 3 + 1 \cdot 2 = 450 \text{ м;}$$

– по пловуну (II категория буримости)

$$12 \cdot 25 + 12 \cdot 3 + 1 \cdot 12 + 12 \cdot 2 = 372 \text{ м;}$$

– по глине (V категория буримости)

$$15 \cdot 25 + 15 \cdot 3 + 11 \cdot 2 + 6 \cdot 2 = 454 \text{ м.}$$

Рассчитываем стоимость бурения скважин $C_{\text{б}}$ (см. табл. 4.10).

Таблица 4.10

Наименование работ	Ед. изм.	Объём работ	Обоснование расценки [18]	Расценка, руб.	Сумма, тыс. руб.
Бурение скважин глубиной до 100 м:					
– по суглинку плавучему (I категория буримости)	100 м	4,50	E35-07-001-1	2014,31	9,06
– по плавуну (II категория буримости)	100 м	3,72	E35-07-001-2	3146,16	11,70
– по глине (V категория буримости)	100 м	4,54	E35-07-001-5	12336,00	56,00
Итого:					76,77

Рассчитываем в табл. 4.11 стоимость установки и опрессовки замораживающих колонок $C_{зк}$, спуска в колонки питающих труб и их подъём $C_{пт}$, установки и снятия головок с колонок $C_{г}$, заполнения скважин цементным раствором $C_{зцр}$.

Таблица 4.11

Наименование работ	Ед. изм.	Объём работ	Обоснование расценки [18]	Расценка, руб.	Сумма, тыс. руб.
Установка и опрессовка замораживающих колонок	100 м	28×0,43	E35-07-008-1	43399,80	522,50
Спуск в колонки питающих труб и их подъём	100 м	25×0,427	E35-07-009-1	186,36	1,99
Установка и снятие головок с колонок	шт. шт.	25 25	E35-07-010-1 E35-07-010-3	292,83 38,48	7,32 0,96
Заполнения скважин цементным раствором при их ликвидации	шт.	30	E35-07-011-1	8970,67	269,12

Определяем эксплуатационные расходы по содержанию замораживающей станции в активный период замораживания C_A по формуле (4.37):

$$C_A = C_{CT} T_A = 42400 \cdot 90 = 3816,00 \text{ тыс. руб.}$$

Определяем эксплуатационные расходы по содержанию замораживающей станции в пассивный период замораживания C_{Π} по формуле (4.38):

$$C_{\Pi} = [C_{\text{ст}} t_{\text{к}} + K_{\text{э}} C_{\text{ст}} (1 - t_{\text{к}})] T_{\Pi} = [42400 \cdot 0,38 + 0,2 \times \\ \times 42400 (1 - 0,38)] 90 = 1923,26 \text{ тыс. руб.}$$

Определяем полную стоимость замораживания горных пород как сумму перечисленных затрат по формуле (4.39):

$$C_3 = C_{\text{б}} + C_{\text{зк}} + C_{\text{пт}} + C_{\text{г}} + C_{\text{зщр}} + C_{\text{а}} + C_{\Pi} = 76,77 + 522,50 + 1,99 + \\ + 7,32 + 0,96 + 269,12 + 3816,00 + 1923,26 = 6617,92 \text{ тыс. руб.}$$

Полученная сметная стоимость рассчитана в ценах 2000 года. Для определения фактической стоимости она должна быть умножена на индекс изменения сметной стоимости строительно-монтажных работ $K_{\text{инд}}$, действующий в данный период времени.

Индексы изменения сметной стоимости строительно-монтажных работ и сметной стоимости оборудования $K_{\text{инд}}$ от сметно-нормативной базы 2000 года к сметно-нормативной базе текущего времени выполнения **Из2** (квартал, год) принимаются согласно письму Министерства регионального развития РФ (<http://minregion.ru>).

4.3 Из2. Расчёт процесса предварительной цементации горных пород

Предварительную цементацию обводнённых трещиноватых горных пород следует производить из забоя ствола по технологии КузНИИшахтостроя [1].

4.3.1 Определение основных параметров цементации

4.3.1.1 Расположение, количество и длина цементационных скважин

Диаметр окружности расположения цементационных скважин в сечении ствола $D_{\text{с}}$ принимают на 1,0–1,5 м меньше диаметра ствола в свету $D_{\text{св}}$.

Количество цементационных скважин N при цементации из забоя ствола зависит от диаметра ствола в свету $D_{\text{св}}$.

Для $D_{\text{св}} = 5,0\text{--}5,5$ м; $6,0\text{--}7,0$ м и $7,5\text{--}8,0$ м количество скважин соответственно равно $N = 5, 6$ и 7 шт. Цементационные скважины располагают вертикально. Длину скважины l принимают равной суммарной мощности водоносных горизонтов. Скважины бурят и цементируют обводнённые породы по методу постепенного сближения.

4.3.1.2 Определение концентрации цементного раствора

Вначале определяют значения удельного водопоглощения подлежащих цементации горных пород. При этом величины удельного водопоглощения водоносных горизонтов для первой скважины q_1 представлены в задании на проектирование. Ориентировочные значения удельного водопоглощения на последующих скважинах, после цементации пород через предшествующие скважины q_i , определяют из выражения

$$q_i = \frac{q_1}{N} (N + 1 - i), \quad (4.40)$$

где i – номер скважины согласно очередности их цементации.

Результаты расчёта удельного водопоглощения пород по скважинам представляют в табличной форме (табл. 4.12).

Таблица 4.12

Интервалы глубины по водоносным горизонтам, м	Удельное водопоглощение пород по скважинам q_i , м ² /(с·Па)					
	1 скв.	2 скв.	3 скв.	4 скв.	5 скв.	6 скв.

Концентрацию цементного раствора $\text{Ц} : \text{В}$ определяют по величине удельного водопоглощения горных пород q_i из табл. 4.13 [1, 9].

Таблица 4.13

Удельное водопоглощение $q_i, 10^8 \text{ м}^2/(\text{с}\cdot\text{Па})$	Концентрация раствора Ц : В
< 4	1 : 4
4–10	1 : 2
10–20	1 : 1
> 20	1 : 0,5

Результаты определения значений концентрации цементного раствора по скважинам представляют в табличной форме (табл. 4.14).

Таблица 4.14

Интервалы глубины по водоносным горизонтам, м	Концентрация цементного раствора Ц : В					
	1 скв.	2 скв.	3 скв.	4 скв.	5 скв.	6 скв.

В табл. 4.15 приведены основные свойства цементных растворов, приготовленных на портландцементе М400, с добавкой хлористого кальция CaCl_2 [1].

Таблица 4.15

Состав раствора			$\gamma_p,$ 10^4 Н/м^3	$\eta,$ %	Сроки схватывания, часы–минуты		$\sigma_{\text{сж}},$ МПа
цемент	вода	$\text{CaCl}_2, \%$			начало	конец	
1	4	3	1,14	21	6–20	10–55	2,3
1	2	3	1,27	38	5–30	9–00	2,8
1	1	3	1,51	65	4–00	8–20	4,5
1	0,5	3	1,82	95	3–40	6–20	9,5

4.3.1.3 Определение радиуса распространения цементного раствора вокруг скважины

Величину радиуса распространения цементного раствора R вокруг скважины определяют графически из условия наложения зон цементации от соседних скважин друг на друга и создания за контуром ствола кольцевой зоны из затампонируемых пород толщиной не менее 3 м (для исключения разрушения зацементированных пород при ведении взрывных работ) [1, 15]. Обычно радиус цементации вокруг скважины составляет $R = 4\text{--}5$ м.

4.3.1.4 Определение давления нагнетания цементного раствора

Начальное давление нагнетания P_0 , Па, обеспечивающее проникновение цементного раствора в устья вскрытых скважиной трещин, рассчитывают по формуле [14, 19]:

$$P_0 = \Delta P_0 - P_d, \quad (4.41)$$

где ΔP_0 – начальный перепад давления по длине потока раствора в трещинах, необходимый для преодоления гидравлических сопротивлений трещин вблизи скважин и принимаемый равным $\Delta P_0 = (1\text{--}3) \cdot 10^5$ Па; P_d – дополнительное давление, обусловленное весом раствора в скважине и противодействием пластовых вод, Па,

$$P_d = \gamma_p h_c - (\gamma_p - \gamma_v) h_{пв}, \quad (4.42)$$

здесь γ_v – удельный вес воды, Н/м³ ($\gamma_v = 10$ кН/м³); γ_p – удельный вес цементного раствора, Н/м³; h_c – расстояние от устья скважины до верхней отметки цементируемых пород, м; $h_{пв}$ – расстояние от устья скважины до статического уровня подземных вод, м.

При получении значений $P_0 < 0,5 \cdot 10^5$ Па с целью обеспечения непрерывности потока раствора в скважине следует принимать $P_0 = 0,5 \cdot 10^5$ Па.

Максимально допустимые конечные давления нагнетания по фактору исключения гидравлического разрыва пород P_{\max} определяют для каждого водоносного горизонта из выражения [9]:

$$P_{\max} = 4L \gamma - \gamma_p h_c, \quad (4.43)$$

где L – глубина залегания кровли цементируемой зоны от земной поверхности, м; γ – средневзвешенный объёмный вес пород, залегающих над кровлей цементируемой зоны, Н/м³.

Конечное давление нагнетания P_k , Па, рассчитывают по формуле

$$P_k = \Delta P_k - P_d, \quad (4.44)$$

где ΔP_k – конечный перепад давления по длине потока цементного раствора в трещинах, Па.

Конечный перепад давления ΔP_k на первой скважине по водоносным горизонтам для нестабильных цементных растворов (Ц : В = 1 : 4, 1 : 2 и 1 : 1) рассчитывают по формуле [19]:

$$\Delta P_k = \frac{1}{\beta} \left[\left(\frac{2,5 R m \mu a \delta^{0,5} \beta}{K} + 1 \right)^{0,4} - 1 \right], \quad (4.45)$$

где R – радиус распространения раствора от скважины, м; m – коэффициент трещиноватости; δ – среднее раскрытие трещин, м; K – коэффициент трещинной проницаемости, м²; β – коэффициент увеличения раскрытия трещин за счёт повышения в них давления, Па⁻¹ (для осадочных пород $\beta = 0,08 \cdot 10^{-6} - 0,1 \cdot 10^{-6}$ Па⁻¹; μ – динамическая вязкость цементного раствора, Па·с; a – коэффициент, зависящий от концентрации цементного раствора.

В табл. 4.16 представлены значения μ и a в зависимости от концентрации нестабильного цементного раствора.

Среднее раскрытие трещин в водоносном горизонте по известным значениям коэффициентов проницаемости K и трещиноватости m горных пород определяют по уравнениям [19]:

$$\delta = 4,83 \sqrt{\frac{K}{m^{2,1}}}, \quad \text{при } K \leq 7,5 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2; \quad (4.46)$$

$$\delta = \frac{K^2}{16,8 \cdot 10^{-14} m}, \quad \text{при } K > 7,5 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2. \quad (4.47)$$

Таблица 4.16

Состав раствора Ц : В	$\mu, 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$	a
1 : 4	1,35	4,5
1 : 2	1,51	6,0
1 : 1	1,77	8,5

Конечный перепад давления нагнетания ΔP_k , Па, на первой скважине по водоносным горизонтам для стабильного цементного раствора с Ц : В = 1 : 0,5 рассчитывают по формуле [19]:

$$\Delta P_k = \frac{1}{\beta} \left[\left(\frac{\tau R m \mu \delta \beta}{K} + 1 \right)^{0,5} - 1 \right], \quad (4.48)$$

где τ – предельное напряжение сдвига стабильного цементного раствора, Па (для раствора с Ц : В = 1 : 0,5, $\tau = 7,5$ Па).

Результаты расчёта ΔP_k представляют в табличной форме (табл. 4.17).

Таблица 4.17

Интервалы глубины по водоносным горизонтам, м	Конечный перепад давления нагнетания ΔP_k на первой скважине по концентрациям цементного раствора Ц : В, МПа			
	1 : 4	1 : 2	1 : 1	1 : 0,5

Конечное давление нагнетания по скважинам P_k , Па, для заданных концентраций цементного раствора, рассчитывают по изменению величины удельного водопоглощения цементируемых пород из выражения [1, 19]:

$$P_k = \Delta P_k \left(\frac{q_1}{q_i} \right)^n - P_d, \quad (4.49)$$

где n – коэффициент, принимаемый равным 0,275 для растворов с Ц : В $\leq 1 : 1$ и 0,55 с Ц : В = 1 : 0,5.

При этом концентрацию цементного раствора $C : B$ и величины удельного водопоглощения q_1 и q_i по скважинам принимают по данным разд. 4.3.1.2.

При получении значений $P_k > P_{max}$ с целью исключения гидравлического разрыва пород следует принимать $P_k = P_{max}$. Результаты расчёта конечного давления нагнетания по скважинам представляют в табличной форме (табл. 4.18).

Таблица 4.18

Интервалы глубины по водоносным горизонтам, м	Конечное давление нагнетания P_k по скважинам, МПа					
	1 скв.	2 скв.	3 скв.	4 скв.	5 скв.	5 скв.

4.3.2 Выбор оборудования

Цементационный насос выбирают по максимальной величине конечного давления нагнетания P_k . В табл. 4.19 приведены характеристики насосов, применяемых для цементации пород [10, 20].

Растворосмеситель для приготовления цементного раствора принимают объёмом не менее 0,5–1,0 м³. Побудитель для накопления готового цементного раствора принимают объёмом в 3–4 раза больше объёма растворосмесителя. Буровой станок для бурения цементационных скважин диаметром 93 мм выбирают по глубине бурения (длине цементационной скважины).

Таблица 4.19

Характеристика	Тип насоса				
	9Т	9МГр	НБ-50	НБ-32	НБ3-120/40
Максимальное давление нагнетания, МПа	40	20	6,3	4,0	4,0
Максимальная подача насоса, м ³ /мин	1,37	0,87	0,59	0,59	0,12

В табл. 4.20 приведены характеристики турбулентных растворо-
росмесителей [10, 20].

Таблица 4.20

Характеристика	Тип растворо-смесителя			
	С Б-43Б	СБ-81	СБ-108	СБ-120
Объём по загрузке, л	80	1000	1000	1200
Объём готового замеса, л	65	800	500	1000

В табл. 4.21 приведены типы буровых станков, позволяющие бурить скважины из забоя ствола [10, 20].

Таблица 4.21

Характеристика	Тип бурового станка			
	КС-50	НКР-100м	ЗИФ-300м	ЗИФ-650А
Глубина бурения, м	18	40	300	650

Приводят схемы комплекса для приготовления и нагнетания це-
ментационных растворов и расположения оборудования в стволе
[6, 14, 16].

4.3.3 Определение длины цементационной заходки

Предварительную цементацию следует производить заходками переменной длины [1, 9, 20]. Максимально допустимое значение длины цементационной заходки $l_{ц}$, м, рассчитывают по водоносным горизонтам для каждой скважины в зависимости от удельного водопоглощения вскрытых скважиной горных пород q_i из уравнения [1, 9, 20]:

$$\frac{\gamma_p - \gamma_B}{10} l_{ц}^2 + 2 \cdot 10^{-4} P_0 l_{ц} - 12 \cdot 10^{11} k \frac{Q_H}{q_i} = 0, \quad (4.50)$$

где P_0 – начальное давление нагнетания цементного раствора, Па;
 Q_H – производительность цементационного насоса, принимают равной

или меньше максимальной подачи наноса, $\text{м}^3/\text{мин}$; q_i – удельное водопоглощение горных пород, $\text{м}^2/(\text{с}\cdot\text{Па})$ (значения q_i по водоносным горизонтам для каждой скважины определяют в разделе 4.3.1.2); k – коэффициент, учитывающий увеличение сопротивлений скважины и трещин горных пород при переходе от течения в них воды к течению цементного раствора, принимают равным 1,3; 1,4; 1,5 и 1,6 соответственно для растворов с Ц : В = 1 : 4; 1 : 2; 1 : 1 и 1 : 0,5.

Полученные расчётным путём длины цементационных заходок оценивают с точки зрения соответствия конкретным горно-геологическим условиям, после чего принимают решение о проектной величине заходок по скважинам. Приводят схему разделения скважин на цементационные заходки [1, 20].

4.3.4 Расчёт тампонажной подушки и расхода бетона на её сооружение

Для предварительной цементации из технологического отхода ствола следует принимать сферическую тампонажную подушку, передающую давление как на крепь ствола, так и на горные породы.

На рис. 4.2 представлена расчётная схема сферической тампонажной подушки.

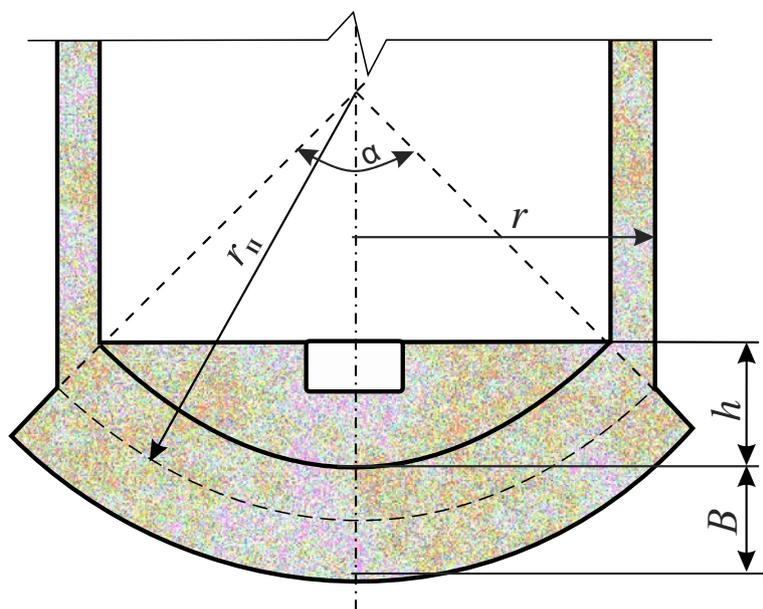


Рис. 4.2. Расчётная схема сферической тампонажной подушки

Расчёт основных параметров сферической тампонажной подушки производят по формулам [1, 9]:

– толщина бетонной подушки B , м,

$$B = \frac{\lambda P_{\max} (r^2 + h^2)^2}{4 r^2 h m_y n_b R_H}; \quad (4.51)$$

– угол наклона боковых граней подушки к вертикальной плоскости α , град,

$$\alpha = \arcsin \frac{2hr}{r^2 + h^2}; \quad (4.52)$$

– радиус сферической поверхности подушки r_{Π} , м,

$$r_{\Pi} = \frac{r^2 + h^2}{2h}; \quad (4.53)$$

– объём бетона для изготовления сферической подушки с врубом V_{Π} , м³,

$$V_{\Pi} = \pi B (r^2 + 0,5 r B + 0,1 B^2) - V_3, \quad (4.54)$$

где λ – коэффициент перегрузки, принимаемый равным 1,1–1,2; P_{\max} – наибольшее расчётное давление нагнетания раствора, МПа; r – радиус ствола в черне, м; h – стрела сферы, м (обычно принимают $h = 0,3r$); R_H – нормативное сопротивление сжатию бетона подушки, МПа (принимают равным 8,5; 11,5; 14,5 и 17 МПа, соответственно для бетона классов В15, В20, В25 и В30); m_y – коэффициент условий работы, принимают равным 0,8–0,9; n_b – коэффициент относительной прочности бетона, зависящий от возраста бетона при начале инъекционных работ (табл. 4.22); r_{Π} – радиус сферической поверхности подушки, м; V_3 – объём зумпфа в верхней части подушки, создаваемого для сбора промывочной воды и бурового шлама, $V_3 = 1–2$ м³.

Таблица 4.22

Возраст бетона, сут	Коэффициент относительной прочности бетона n_b			
	без добавок	с добавкой хлористого кальция, %		
		1	2	3
3	0,37	0,5	0,55	0,6
5	0,52	0,63	0,73	0,80
7	0,62	0,77	0,84	0,88
14	0,82	0,93	1,00	1,05
28	1,00	1,10	1,20	1,25

4.3.5 Определение расхода тампонажных материалов

Количество цемента, необходимое для создания вокруг ствола цементационной завесы требуемых размеров G_i , т, определяют для каждого водоносного горизонта по формуле [19]:

$$G_i = \frac{1}{3} \pi R_3^2 L_i m_i (3 + \beta P_k^{cp}) \gamma_{ц}, \quad (4.55)$$

где R_3 – радиус цементационной завесы, м (см. разд. 4.3.1.3); L_i – мощность водоносного горизонта, м; m_i – коэффициент трещиноватости пород водоносного горизонта; β – коэффициент увеличения раскрытия трещин, МПа⁻¹ (см. разд. 4.3.1.4); P_k^{cp} – среднее конечное давление нагнетания раствора при цементации водоносного горизонта, МПа (см. разд. 4.3.1.4); $\gamma_{ц}$ – количество цемента, необходимое для образования 1 м³ тампонажного камня, т/м³ (принимают $\gamma_{ц} = 1,5$ т/м³).

Расход хлористого кальция, добавляемого в цементный раствор, составляет 3 % от массы цемента.

4.3.6 Определение стоимости работ по предварительной цементации

Сметную стоимость работ по предварительной цементации горных пород из забоя вертикального ствола рассчитывают в ценах 2000 года. Перерасчёт сметной стоимости работ по предварительной

цементации горных пород в текущий уровень цен производится путём умножения расчётной величины стоимости на индекс текущего уровня цен в строительстве по отношению к базисному (на 01.01.2000). Индексы изменения сметной стоимости строительно-монтажных работ и сметной стоимости оборудования $K_{инд}$ от сметно-нормативной базы 2000 года к сметно-нормативной базе текущего времени выполнения **Из2** (квартал, год) принимаются согласно письму Министерства регионального развития РФ (<http://minregion.ru>).

Сметную стоимость работ по предварительной цементации горных пород из забоя вертикального ствола определяют на основе физических объёмов работ и ТЕР 81-02-35-2001 [18]. Расчёты оформляют в табличной форме (табл. 4.23.).

Правила применения территориальных единичных расценок приведены в технической части сборника [18].

Стоимость предварительной цементации вмещающих обводнённых горных пород из забоя вертикального ствола определяют расходами на: бурение цементационных скважин и разбуривание скважин по неполностью схватившемуся цементному раствору (расц. Е35-06-047-1–Е35-06-047-5), устройство тампонажной подушки (расц. Е35-06-045-1, Е35-06-045-2), разборка тампонажной подушки (расц. Е35-06-048-1, Е35-06-048-2), приготовление и нагнетание цементных растворов (расц. Е35-06-049-1–Е35-06-049-14) [18].

Объёмы работ по приготовлению и нагнетанию цементных растворов на стадии проектирования определяют ориентировочно, исходя из предположения, что цементация трещин растворами принятых концентраций производится в равных долях. При этом объём цементного раствора одной концентрации Q_p , м³, определяют по формуле

$$Q_p = \omega \frac{G}{100 g}, \quad (4.56)$$

где G – общий расход цемента на цементацию горных пород, кг; ω – доля концентрации цементного раствора, %; g – расход цемента для приготовления 1 м³ цементного раствора заданной концентра-

ции, кг/м^3 (для растворов с Ц : В = 1 : 4; 1 : 2; 1 : 1 и 1 : 0,5 соответственно составляет $g = 232, 428, 750$ и 1200 кг/м^3).

Объём разбуривания скважин по неполностью схватившемуся цементному раствору (разбуривания зацементированных заходов для бурения нижеследующих) определяют по данным разд. 4.3.3.

Таблица 4.23

Наименование работ и затрат	Объём работ		Расценка, тыс. руб.	Номер расценки	Общая стоимость, тыс. руб.
	ед. изм.	кол-во			

Полученная сметная стоимость рассчитана в ценах 2000 года. Для определения фактической стоимости она должна быть умножена на индекс изменения сметной стоимости строительно-монтажных работ $K_{\text{инд}}$, действующий в данный период времени.

4.4 Пример расчёта процесса предварительной цементации горных пород

Предварительную цементацию обводнённых трещиноватых пород производим из забоя ствола по технологии КузНИИшахтостроя [20]. Исходные данные см. п. 4.2.1.

4.4.1 Определение основных параметров цементации

4.4.1.1 Расположение, количество и длина цементационных скважин

Принимаем диаметр окружности расположения цементационных скважин в сечении ствола, равным $D_c = 4$ м, а количество цементационных скважин, равным $N = 5$ шт. (по величине диаметра ствола в свету $D_{\text{св}} = 5,0$ м). Цементационные скважины располагаем вертикально. Длину каждой скважины принимаем равной суммарной мощности водоносных горизонтов $L = 28 + 36 = 64$ м. Скважины бурим и цементируем горные породы по методу постепенного сближения.

4.4.1.2 Определение концентрации цементного раствора

Определяем ориентировочные значения удельного водопоглощения горных пород, подлежащих цементации по скважинам, из выражения (4.40):

$$q_i = \frac{q_1}{N} (N + 1 - i).$$

Результаты расчёта значений удельного водопоглощения горных пород представляем в табл. 4.24.

Таблица 4.24

Интервалы глубины по водоносным горизонтам, м	Удельное водопоглощение пород по скважинам q_i , $10^8 \text{ м}^2/(\text{с} \cdot \text{Па})$				
	1 скв.	2 скв.	3 скв.	4 скв.	5 скв.
В аргиллите (43–71 м)	8,6	6,88	5,16	3,44	1,72
В песчанике (72–108 м)	4,8	3,84	2,88	1,92	0,96

По величинам удельного водопоглощения, согласно табл. 4.13, определяем концентрацию цементного раствора Ц : В по скважинам. Результаты определения значений концентрации цементного раствора представляем в табл. 4.25.

Таблица 4.25

Интервалы глубины по водоносным горизонтам, м	Концентрация цементного раствора Ц : В				
	1 скв.	2 скв.	3 скв.	4 скв.	5 скв.
В аргиллите (43–71 м)	1 : 2	1 : 2	1 : 2	1 : 4	1 : 4
В песчанике (72–108 м)	1 : 2	1 : 4	1 : 4	1 : 4	1 : 4

4.4.1.3 Определение радиуса распространения цементного раствора вокруг скважины

Величину радиуса распространения цементного раствора вокруг скважины определяем графически (рис. 4.3), равной $R = 4,5 \text{ м}$,

из условия наложения зон цементации от соседних скважин друг на друга. При этом за контуром ствола создаётся кольцевая зона из затампонируемых пород толщиной 3,2 м.

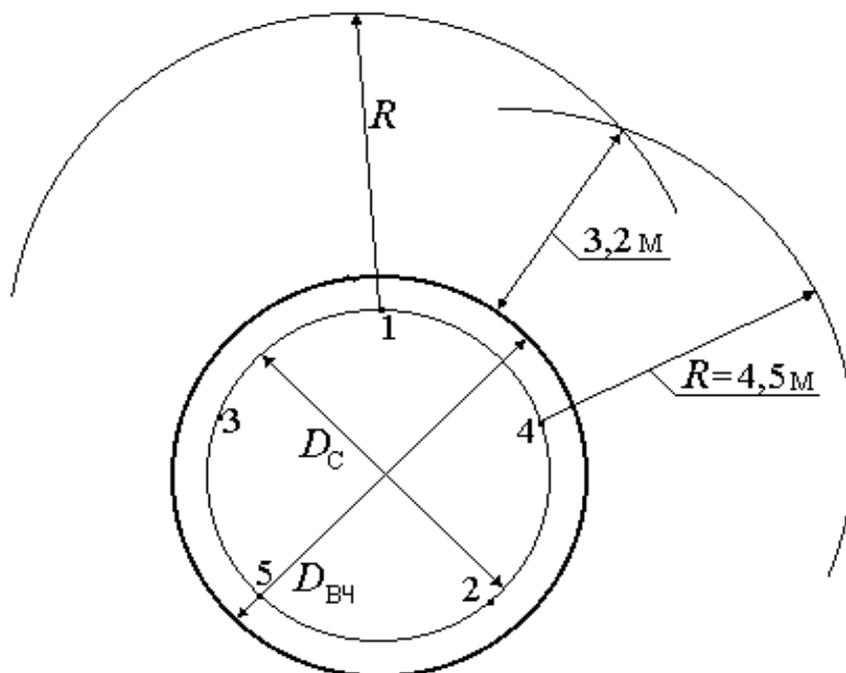


Рис. 4.3. Определение величины радиуса распространения цементного раствора вокруг скважины

4.4.1.4 Определение давления нагнетания цементного раствора

Определяем дополнительное давление нагнетания цементного раствора P_d , обусловленное его весом в скважине и противодействием пластовых вод, по формуле (4.42):

$$P_d = \gamma_p h_c - (\gamma_p - \gamma_v) h_{п.}$$

Поскольку тампонируемые породы отделены от верхних обводнённых пород плотной глиной (водоупором), то при нагнетании раствора в скважину противодействие пластовых вод будет отсутствовать, т.е. $(\gamma_p - \gamma_v) h_{п.} = 0$.

Расчёт дополнительного давления нагнетания P_d производим для наименьшей концентрации цементного раствора Ц : В = 1 : 4, т.к. с увеличением концентрации будет возрастать давление раствора в скважине $\gamma_p h_c$ и, следовательно, уменьшаться начальное давление

нагнетания P_0 , обеспечивающее проникновение цементного раствора в устья вскрытых скважиной трещин.

В аргиллите $P_d = 0$, т.к. $h_c = 0$.

В песчанике $P_d = 1,14 \cdot 10^4 \cdot 28 = 3,2 \cdot 10^5$ Па.

Определяем начальные давления нагнетания P_0 , обеспечивающее проникновение цементного раствора в устья вскрытых скважиной трещин, по формуле (4.41):

$$P_0 = \Delta P_0 - P_d.$$

В аргиллите $P_0 = 1 \cdot 10^5 - 0 = 1 \cdot 10^5$ Па.

В песчанике $P_0 = 1 \cdot 10^5 - 3,2 \cdot 10^5 = -2,2 \cdot 10^5$ Па.

Для обеспечения непрерывности потока раствора в скважине принимаем начальное давление нагнетания цементных растворов $P_0 = 1 \cdot 10^5$ Па.

Определяем средневзвешенный объёмный вес пород γ , залегающих над кровлей цементируемой зоны, и допустимые конечные давления нагнетания по фактору исключения гидравлического разрыва пород P_{\max} для каждого водоносного горизонта по формуле (4.43):

$$P_{\max} = 4L \gamma - \gamma_p h_c.$$

Для аргиллита:

$$\gamma = \frac{(16 \cdot 6 + 15 \cdot 12 + 18 \cdot 5 + 16 \cdot 16 + 18 \cdot 4) 10^3}{43} = 16,14 \cdot 10^3 \text{ н/м}^3;$$

$$P_{\max} = 4 \cdot 43 \cdot 16,14 \cdot 10^3 - 11,4 \cdot 10^3 \cdot 0 = 27,65 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

Для песчаника:

$$\gamma = \frac{(16 \cdot 6 + 15 \cdot 12 + 18 \cdot 5 + 16 \cdot 16 + 18 \cdot 4 + 25 \cdot 28) 10^3}{71} = 19,63 \cdot 10^3 \text{ н/м}^3;$$

$$P_{\max} = 4 \cdot 71 \cdot 19,63 \cdot 10^3 - 11,4 \cdot 10^3 \cdot 28 = 55,63 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

Рассчитываем среднее раскрытие трещин в водоносном горизонте по известным значениям коэффициентов проницаемости K и

трещиноватости m горных пород по уравнению (4.46):

$$\delta = 4,83 \sqrt{\frac{K}{m^{2,1}}} \quad (\text{при } K \leq 7,5 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2).$$

В аргиллите $\delta = 4,83 \sqrt{\frac{50 \cdot 10^{-12}}{0,02^{2,1}}} = 2,08 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$

В песчанике $\delta = 4,83 \sqrt{\frac{12 \cdot 10^{-12}}{0,03^{2,1}}} = 0,66 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$

Рассчитываем конечный перепад давления ΔP_K на первой скважине по водоносным горизонтам для нестабильных цементных растворов по формуле (4.48):

$$\Delta P_K = \frac{1}{\beta} \left[\left(\frac{2,5 R m \mu a \delta^{0,5} \beta}{K} + 1 \right)^{0,4} - 1 \right].$$

В аргиллите:

Ц : В = 1 : 2

$$\Delta P_K = \frac{1}{0,1 \cdot 10^{-6}} \left[\left(\frac{2,5 \cdot 4,5 \cdot 0,02 \cdot 1,51 \cdot 10^{-3} \cdot 6,0 \sqrt{2,08 \cdot 10^{-3}} \cdot 0,1 \cdot 10^{-6}}{50 \cdot 10^{-12}} + 1 \right)^{0,4} - 1 \right] = 7,06 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

Ц : В = 1 : 4

$$\Delta P_K = \frac{1}{0,1 \cdot 10^{-6}} \left[\left(\frac{2,5 \cdot 4,5 \cdot 0,02 \cdot 1,35 \cdot 10^{-3} \cdot 4,5 \sqrt{2,08 \cdot 10^{-3}} \cdot 0,1 \cdot 10^{-6}}{50 \cdot 10^{-12}} + 1 \right)^{0,4} - 1 \right] = 4,81 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

В песчанике:

$$\text{Ц : В} = 1 : 2$$

$$\Delta P_{\text{к}} = \frac{1}{0,1 \cdot 10^{-6}} \left[\left(\frac{2,5 \cdot 4,5 \cdot 0,03 \cdot 1,51 \cdot 10^{-3} \cdot 6,0 \sqrt{0,66 \cdot 10^{-3}} \cdot 0,1 \cdot 10^{-6}}{50 \cdot 10^{-12}} + \right)^{0,4} - 1 \right] = 22,30 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$\text{Ц : В} = 1 : 4$$

$$\Delta P_{\text{к}} = \frac{1}{0,1 \cdot 10^{-6}} \left[\left(\frac{2,5 \cdot 4,5 \cdot 0,03 \cdot 1,35 \cdot 10^{-3} \cdot 4,5 \sqrt{0,66 \cdot 10^{-3}} \cdot 0,1 \cdot 10^{-6}}{12 \cdot 10^{-12}} + \right)^{0,4} - 1 \right] = 15,66 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Результаты расчёта значений конечного перепада давления $\Delta P_{\text{к}}$ представляем в табл. 4.26.

Таблица 4.26

Интервалы глубины по водоносным горизонтам, м	Конечный перепад давления нагнетания $\Delta P_{\text{к}}$ на первой скважине для концентрации раствора Ц : В, МПа	
	1 : 2	1 : 4
В аргиллите (43–71 м)	0,48	0,71
В песчанике (72–108 м)	1,57	2,23

Значения конечного давления нагнетания по скважинам $P_{\text{к}}$ для заданных концентраций цементного раствора рассчитываем по изменению величины удельного водопоглощения цементируемых пород (см. табл. 4.26) из выражения (4.49):

$$P_{\text{к}} = \Delta P_{\text{к}} \left(\frac{q_1}{q_i} \right)^n - P_{\text{д}}.$$

1-я скважина

В аргиллите (Ц : В = 1 : 2)

$$P_{\text{к}} = 0,71 \left(\frac{8,60 \cdot 10^8}{8,60 \cdot 10^8} \right)^{0,275} - 0 = 0,71 \text{ МПа.}$$

В песчанике (Ц : В = 1 : 2)

$$P_{\text{к}} = 2,32 \left(\frac{4,80 \cdot 10^8}{4,80 \cdot 10^8} \right)^{0,275} - 0,36 = 1,87 \text{ МПа.}$$

2-я скважина

В аргиллите (Ц : В = 1 : 2)

$$P_{\text{к}} = 0,71 \left(\frac{8,60 \cdot 10^8}{6,88 \cdot 10^8} \right)^{0,275} - 0 = 0,76 \text{ МПа.}$$

В песчанике (Ц : В = 1 : 4)

$$P_{\text{к}} = 1,57 \left(\frac{4,80 \cdot 10^8}{3,84 \cdot 10^8} \right)^{0,275} - 0,32 = 1,35 \text{ МПа.}$$

3-я скважина

В аргиллите (Ц : В = 1 : 2)

$$P_{\text{к}} = 0,71 \left(\frac{8,60 \cdot 10^8}{5,16 \cdot 10^8} \right)^{0,275} - 0 = 0,82 \text{ МПа.}$$

В песчанике (Ц : В = 1 : 2)

$$P_{\text{к}} = 1,57 \left(\frac{4,80 \cdot 10^8}{2,88 \cdot 10^8} \right)^{0,275} - 0,32 = 1,49 \text{ МПа.}$$

4-я скважина

В аргиллите (Ц : В = 1 : 4)

$$P_{\text{к}} = 0,48 \left(\frac{8,60 \cdot 10^8}{3,44 \cdot 10^8} \right)^{0,275} - 0 = 0,62 \text{ МПа.}$$

В песчанике (Ц : В = 1 : 4)

$$P_{\text{к}} = 1,57 \left(\frac{4,80 \cdot 10^8}{1,92 \cdot 10^8} \right)^{0,275} - 0,32 = 1,70 \text{ МПа.}$$

5-я скважина

В аргиллите (Ц : В = 1 : 4)

$$P_{\text{к}} = 0,48 \left(\frac{8,60 \cdot 10^8}{1,72 \cdot 10^8} \right)^{0,275} - 0 = 0,75 \text{ МПа.}$$

В песчанике (Ц : В = 1 : 4)

$$P_{\text{к}} = 1,57 \left(\frac{4,80 \cdot 10^8}{0,96 \cdot 10^8} \right)^{0,275} - 0,32 = 2,12 \text{ МПа.}$$

Результаты расчёта значений конечного давления нагнетания $P_{\text{к}}$ по скважинам представляем в табл. 4.27.

Таблица 4.27

Интервалы глубины по водоносным горизонтам, м	Конечное давление нагнетания $P_{\text{к}}$ по скважинам, МПа				
	1 скв.	2 скв.	3 скв.	4 скв.	5 скв.
В аргиллите (43–71 м)	0,71 Ц : В = 1 : 2	0,76 Ц : В = 1 : 2	0,82 Ц : В = 1 : 2	0,62 Ц : В = 1 : 4	0,75 Ц : В = 1 : 4
В песчанике (72–108 м)	1,87 Ц : В = 1 : 2	1,35 Ц : В = 1 : 4	1,49 Ц : В = 1 : 4	1,70 Ц : В = 1 : 4	2,12 Ц : В = 1 : 4

Из табл. 4.27 видно, что рассчитанные значения конечного давления нагнетания по скважинам $P_{\text{к}}$ не превышают допустимые

давления P_{\max} по фактору исключения гидравлического разрыва цементируемых пород.

4.4.2 Выбор оборудования

По максимальной величине конечного давления нагнетания $P_{\text{к}} = 2,12$ МПа, согласно табл. 4.19, принимаем цементационный насос НБЗ-120/40.

Растворонасос НБЗ-120/40

Максимальное давление нагнетания 4,0 МПа

Максимальная подача насоса 0,12 м³/мин

Для приготовления цементного раствора, согласно табл. 4.20, принимаем турбулентный растворосмеситель СБ-81.

Растворосмеситель СБ-81

Объём по загрузке 1000 л

Объём готового замеса 800 л

Для накопления готового цементного раствора принимаем побудитель объёмом 2,5 м³.

По максимальной глубине бурения цементационных скважин, равной 64 м, согласно табл. 4.21, принимаем буровой станок ЗИФ-300м с глубиной бурения до 300 м.

4.4.3 Определение длины цементационной заходки

Рассчитываем максимально допустимую длину цементационной заходки $l_{\text{ц}}$ по водоносным горизонтам для каждой скважины из уравнения (4.50):

$$\frac{(\gamma_{\text{р}} - \gamma_{\text{в}})}{10} l_{\text{ц}}^2 + 2 \cdot 10^{-4} P_0 l_{\text{ц}} - 12 \cdot 10^{11} k \frac{Q_{\text{н}}}{q_i} = 0.$$

1-я скважина

В аргиллите:

$$\frac{12,7 - 10}{10} l_{\text{ц}}^2 + 2 \cdot 10^{-4} \cdot 1,0 \cdot 10^5 l_{\text{ц}} - 12 \cdot 10^{11} \cdot 1,4 \frac{0,12}{8,6 \cdot 10^8} = 0 ;$$

$$0,27 l_{\text{ц}}^2 + 20 l_{\text{ц}} - 234,4 = 0 ;$$

$$l_{\text{ц}} = \frac{-20 \pm \sqrt{20^2 - 4 \cdot 0,27(-234,4)}}{2 \cdot 0,27} = 10,29 \text{ м.}$$

В песчанике:

$$\frac{12,7 - 10}{10} l_{\text{ц}}^2 + 2 \cdot 10^{-4} \cdot 1,0 \cdot 10^5 l_{\text{ц}} - 12 \cdot 10^{11} \cdot 1,4 \frac{0,12}{4,8 \cdot 10^8} = 0 ;$$

$$l_{\text{ц}} = 17,06 \text{ м.}$$

Принимаем для первой скважины цементационные заходки длиной:

$$l_{\text{ц}1} = 8 \text{ м, } l_{\text{ц}2} = 10 \text{ м, } l_{\text{ц}3} = 10 \text{ м, } l_{\text{ц}4} = 12 \text{ м, } l_{\text{ц}5} = 12 \text{ м, } l_{\text{ц}6} = 12 \text{ м.}$$

2-я скважина

В аргиллите:

$$\frac{12,7 - 10}{10} l_{\text{ц}}^2 + 2 \cdot 10^{-4} \cdot 1,0 \cdot 10^5 l_{\text{ц}} - 12 \cdot 10^{11} \cdot 1,4 \frac{0,12}{6,88 \cdot 10^8} = 0 ;$$

$$l_{\text{ц}} = 12,53 \text{ м.}$$

В песчанике:

$$\frac{11,4 - 10}{10} l_{\text{ц}}^2 + 2 \cdot 10^{-4} \cdot 1,0 \cdot 10^5 l_{\text{ц}} - 12 \cdot 10^{11} \cdot 1,4 \frac{0,12}{3,84 \cdot 10^8} = 0 ;$$

$$l_{\text{ц}} = 22,66 \text{ м.}$$

Принимаем для второй скважины цементационные заходки длиной:

$$l_{\text{ц}1} = 8 \text{ м, } l_{\text{ц}2} = 10 \text{ м, } l_{\text{ц}3} = 10 \text{ м, } l_{\text{ц}4} = 18 \text{ м, } l_{\text{ц}5} = 18 \text{ м.}$$

3-я скважина

В аргиллите:

$$\frac{12,7 - 10}{10} l_{ц}^2 + 2 \cdot 10^{-4} \cdot 1,0 \cdot 10^5 l_{ц} - 12 \cdot 10^{11} \cdot 1,4 \frac{0,12}{5,16 \cdot 10^8} = 0;$$

$$l_{ц} = 16,1 \text{ м.}$$

В песчанике:

$$\frac{11,4 - 10}{10} l_{ц}^2 + 2 \cdot 10^{-4} \cdot 1,0 \cdot 10^5 l_{ц} - 12 \cdot 10^{11} \cdot 1,4 \frac{0,12}{2,88 \cdot 10^8} = 0;$$

$$l_{ц} = 29,08 \text{ м.}$$

Принимаем для третьей скважины цементационные заходки длиной:

$$l_{ц1} = 14 \text{ м, } l_{ц2} = 14 \text{ м, } l_{ц3} = 18 \text{ м, } l_{ц4} = 18 \text{ м.}$$

4-я скважина

В аргиллите:

$$\frac{11,4 - 10}{10} l_{ц}^2 + 2 \cdot 10^{-4} \cdot 1,0 \cdot 10^5 l_{ц} - 12 \cdot 10^{11} \cdot 1,4 \frac{0,12}{3,44 \cdot 10^8} = 0;$$

$$l_{ц} = 24,92 \text{ м.}$$

В песчанике:

$$\frac{11,4 - 10}{10} l_{ц}^2 + 2 \cdot 10^{-4} \cdot 1,0 \cdot 10^5 l_{ц} - 12 \cdot 10^{11} \cdot 1,4 \frac{0,12}{1,92 \cdot 10^8} = 0;$$

$$l_{ц} = 40,83 \text{ м.}$$

Принимаем для третьей скважины цементационные заходки длиной:

$$l_{ц1} = 14 \text{ м, } l_{ц2} = 14 \text{ м, } l_{ц3} = 36 \text{ м.}$$

5-я скважина

В аргиллите:

$$\frac{11,4 - 10}{10} l_{ц}^2 + 2 \cdot 10^{-4} \cdot 1,0 \cdot 10^5 l_{ц} - 12 \cdot 10^{11} \cdot 1,4 \frac{0,12}{1,72 \cdot 10^8} = 0;$$

$$l_{ц} = 44,63 \text{ м.}$$

В песчанике:

$$\frac{11,4 - 10}{10} l_{ц}^2 + 2 \cdot 10^{-4} \cdot 1,0 \cdot 10^5 l_{ц} - 12 \cdot 10^{11} \cdot 1,4 \frac{0,12}{0,96 \cdot 10^8} = 0;$$

$$l_{ц} = 70,35 \text{ м.}$$

Принимаем для пятой скважины цементационные заходки длиной:

$$l_{ц1} = 28 \text{ м, } l_{ц2} = 36 \text{ м.}$$

На рис. 4.4 представлена схема разделения цементируемых пород на заходки.

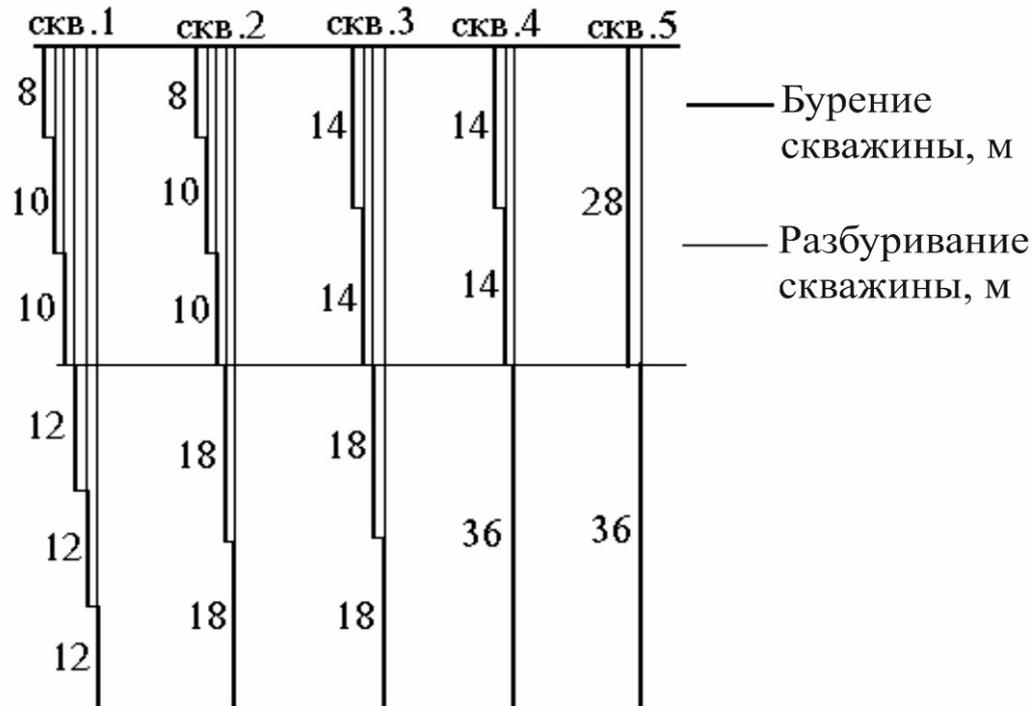


Рис. 4.4. Схема разделения цементируемых пород на заходки

4.4.4 Расчёт тампонажной подушки

Определяем толщину тампонажной бетонной подушки B по формуле (4.51):

$$B = \frac{\lambda P_{\max} (r^2 + h^2)^2}{4 r^2 h m_y n_b R_H} = \frac{1,2 \cdot 2,12 (2,80^2 + 0,84^2)^2}{4 \cdot 2,8^2 \cdot 0,84 \cdot 0,9 \cdot 0,88 \cdot 11,5} = 0,77 \text{ м.}$$

Определяем угол наклона боковых граней тампонажной подушки к вертикальной плоскости α по формуле (4.52):

$$\alpha = \arcsin \frac{2hr}{r^2 + h^2} = \arcsin \frac{2 \cdot 0,84 \cdot 2,8}{2,8^2 + 0,84^2} = 33,4^\circ.$$

Определяем радиус сферической поверхности тампонажной подушки r_{Π} по формуле (4.53):

$$r_{\Pi} = \frac{r^2 + h^2}{2h} = \frac{2,8^2 + 0,84^2}{2 \cdot 0,84} = 5,09 \text{ м.}$$

Определяем объём бетона для изготовления тампонажной подушки V_{Π} по формуле (4.54):

$$\begin{aligned} V_{\Pi} &= \pi B (r^2 + 0,5 rB + 0,1 B^2) - V_3 = \\ &= \pi \cdot 0,77 (2,8^2 + 0,5 \cdot 0,84 \cdot 0,77 + 0,1 \cdot 0,77^2) - 1,5 = 17,1 \text{ м}^3. \end{aligned}$$

4.4.5 Определение расхода тампонажных материалов

Определяем количество цемента, необходимое для создания вокруг ствола цементационной завесы требуемых размеров G_i , по формуле (4.55):

в аргиллите

$$\begin{aligned} G_i &= \frac{1}{3} \pi R^2 L_i m_i (3 + \beta P_K^{\text{CP}}) \gamma_{\text{Ц}} = \frac{1}{3} \pi (2,8 + 3,2)^2 28 \times \\ &\quad \times 0,02 (3 + 0,1 \cdot 0,68) 1,5 = 95,2 \text{ т;} \end{aligned}$$

в песчанике

$$G_i = \frac{1}{3} \pi R^2 L_i m_i (3 + \beta P_K^{CP}) \gamma_{Ц} = \frac{1}{3} \pi (2,8 + 3,2)^2 36 \times \\ \times 0,03 (3 + 0,1 \cdot 1,71) 1,5 = 193,6 \text{ т.}$$

Общий расход цемента на цементацию пород составит

$$G_{\text{общ}} = 95,2 + 193,6 = 288,8 \text{ т.}$$

Расход хлористого кальция, добавляемого в цементный раствор, составляет 3 % от массы цемента, т.е.

$$288,8 \cdot 0,03 = 8,66 \text{ т.}$$

4.4.6 Определение стоимости работ по предварительной цементации

Принимаем объёмы трещин, цементируемых растворами концентраций Ц : В = 1 : 2 и Ц : В = 1 : 4, в равных долях ($\omega = 50 \%$).

Определяем объём цементного раствора для принятой концентрации из выражения (4.56):

$$Q_{1:2} = 50 \frac{288800}{100 \cdot 428} = 337,4 \text{ м}^3;$$

$$Q_{1:4} = 50 \frac{288800}{100 \cdot 232} = 622,4 \text{ м}^3.$$

Определяем объём разбуривания скважин по неполностью схватившемуся цементному раствору по данным разд. 4.3.3:

в 1-й скважине $L_P = 8 + 18 + 28 + 40 + 52 = 146 \text{ м};$

во 2-й скважине $L_P = 8 + 18 + 28 + 46 = 100 \text{ м};$

в 3-й скважине $L_P = 14 + 28 + 46 = 88 \text{ м};$

в 4-й скважине $L_P = 14 + 28 = 42 \text{ м};$

в 5-й скважине $L_P = 28 = 28 \text{ м.}$

$$L_{\text{общ}} = 146 + 100 + 88 + 42 + 28 = 404 \text{ м.}$$

Расчёт стоимости работ производим в табл. 4.28.

Таблица 4.28

Наименование работ и затрат	Объём работ		Расценка, тыс. руб.	Обоснование расценки [18]	Общая стоимость, тыс. руб.
	ед. изм.	кол-во			
1	2	3	4	5	6
Устройство бетонной тампонажной подушки	100 м ³	0,171	74,01	E35-06-047-1	12,65
Бурение тампонажных скважин:					
– по аргиллиту ($f = 3$)	10 м	14,0	0,65	E35-06-047-1	9,10
– по песчанику ($f = 7$)	10 м	18,0	0,96	E35-06-047-3	17,28
Разбуривание скважин по неполностью схватившемуся цементному раствору	10 м	40,4	0,65	E35-06-047-1	26,26
Приготовление и нагнетание цементного раствора:					
– Ц : В = 1 : 4	100 м ³	6,22	30,14	E35-06-049-12	187,47
– Ц : В = 1 : 2	100 м ³	3,37	36,58	E35-06-047-10	123,27
Разборка тампонажной подушки ($\pi \cdot 2,5^2 \cdot 0,77$)	100 м ³	0,15	50,11	E35-06-048-1	7,52
Итого:					383,55

Полученная сметная стоимость рассчитана в ценах 2000 года. Для определения фактической стоимости она должна быть умножена на индекс изменения сметной стоимости строительно-монтажных работ $K_{инд}$, действующий в данный период времени.

Индексы изменения сметной стоимости строительно-монтажных работ и сметной стоимости оборудования $K_{инд}$ от сметно-нормативной базы 2000 года к сметно-нормативной базе текущего времени выполнения **Из2** (квартал, год) принимаются согласно письму Министерства регионального развития РФ (<http://minregion.ru>).

5 КОНТРОЛЬ УСПЕВАЕМОСТИ

5.1 Текущий контроль успеваемости

Для текущего контроля в 10 семестре разработаны контрольные вопросы при оценке выполнения этапов расчётно-графических работ (**Из**), написании контрольных работ (**Кр**) и самостоятельно изученных тем (**СИТ**), защите **Из**.

Текущий письменный опрос Кр1

1. Классификация специальных способов.
2. Классификация сложных горно-геологических условий.
3. Гидродинамический метод определения параметров трещиноватости.
4. Геофизические методы определения параметров трещиноватости.
5. Основные прочностные свойства замороженных пород.
6. Принцип получения холода и работа замораживающей станции одноступенчатого сжатия.
7. Принцип получения холода и работа замораживающей станции двуступенчатого сжатия.
8. Оборудование для замораживания горных пород.
9. Комплексные передвижные агрегаты для замораживания пород.
10. Бурение вертикальных замораживающих скважин.
11. Оборудование скважин замораживающими колонками.
12. Рассольная сеть при замораживании горных пород.
13. Методы контроля при замораживании горных пород.
14. Гидронаблюдательные скважины, их назначение и устройство.
15. Термонаблюдательные скважины, их назначение и устройство.
16. Замораживание грунтов жидкими хладоагентами.

Текущий письменный опрос Кр2

1. Общие принципы расчёта процесса замораживания.
2. Расчёт замораживания кольцевых ледопородных ограждений.

3. Расчёт количества замораживающих скважин при сооружении вертикальных стволов.

4. Расчёт количества термонаблюдательных скважин при сооружении вертикальных стволов.

5. Расчёт количества гидронаблюдательных скважин при сооружении вертикальных стволов.

6. Типы крепей применяемых для крепления стволов в замороженной зоне.

7. Зональное замораживания при сооружение вертикальных стволов.

8. Особенности работ при выемке породы и возведению постоянной крепи.

9. Оттаивание замороженных пород и ликвидация замораживающих скважин.

10. Замораживание пород при строительстве горизонтальных и наклонных выработок.

11. Производство горно-строительных работ при проведении выработок способом замораживания.

12. Цель и назначение тампонажа горных пород.

13. Тампонажные материалы, их растворы и требования к ним.

14. Глиноцементные растворы и их особенности.

15. Тампонажные растворы из органических мономеров, полифенольных полимеров и смолистых веществ.

16. Характеристика трещиноватости и пористости горных пород. Удельное водопоглощение.

17. Процесс заполнения трещин цементным материалом.

18. Оборудование для приготовления и нагнетания цементных растворов.

Текущий письменный опрос КрЗ

1. Создание сплошного изолирующего покрытия на поверхности выработки при тампонаже.

2. Создание дискретного изолирующего покрытия на поверхности выработки при тампонаже.

3. Определение длины скважин при последующей цементации горных пород.

4. Определение расстояния между скважинами при последующей цементации горных пород.

5. Определение концентрации цементного раствора при цементации горных пород.

6. Нагнетание цементных растворов способом с постоянным расходом.

7. Нагнетание цементных растворов способом с постоянным давлением.

8. Определение конечного давления нагнетания при цементации трещиноватых горных пород.

9. Тампонирующее цементное покрытие горных пород с поверхности при проходке вертикальных стволов.

10. Тампонирующее цементное покрытие горных пород из забоя при проходке вертикальных стволов.

11. Тампонажные подушки их формы и размеры. Расчёт тампонажных подушек и предохранительных перемычек.

12. Предварительное упрочнение пород цементацией в горизонтальных и наклонных выработках.

13. Предварительное водоподавление цементными растворами вокруг горизонтальных и наклонных горных выработок.

14. Последующее водоподавление цементными растворами.

15. Тампонаж обводнённых пород глино-цементными растворами (комплексный метод тампонажа).

16. Контроль качества цементации трещиноватых горных пород.

17. Строительство подземных сооружений с применением водопонижения скважинами.

18. Водопонижение эжекторными иглофильтровыми установками.

19. Водопонижение из горизонтальных выработок.

20. Водопонижение лёгкими иглофильтровыми установками.

Текущий письменный опрос Кр4

1. Сооружение выработок с применением шпунтовых ограждений.

2. Конструкция шпунтовых ограждений. Выбор типа шпунтового ограждения.

3. Технология и механизация погружения шпунтов, выемки породы и возведения крепи.

4. Сооружение выработок способом «стена в грунте».

5. Свайная и траншейная схемы производства работ при сооружении выработок способом «стена в грунте».
6. Строительство подземных сооружений опускным способом.
7. Конструкции опускной крепи.
8. Осушение и упрочнение грунтов электроосмосом.
9. Электроплавление пльвунов. Термические способы укрепления суглинков и лёсса.
10. Проведение горных выработок в условиях высокой газонасыщенности массива.
11. Строительство горных выработок в удароопасных горных породах.
12. Вскрытие пластов, опасных по внезапным выбросам пород, угля и газа.
13. Электрохимический способ упрочнения горных пород.
14. Строительство выработок в условиях высоких температур.
15. Строительство выработок в многолетней мерзлоте.
16. Строительство выработок в пучащих породах с применением пассивных способов борьбы с пучением.
17. Строительство выработок в пучащих породах с применением активных способов борьбы с пучением.
18. Строительство подземных ёмкостей способом выщелачивания.
19. Строительство подземных ёмкостей с использованием камуфлетных взрывов.

5.2 Промежуточная аттестация

Промежуточный контроль в 10 семестре – зачёт. Для промежуточного контроля разработаны контрольные вопросы.

1. Классификация специальных способов.
2. Классификация сложных горно-геологических условий.
3. Принцип получения холода и работа замораживающей станции одноступенчатого сжатия.
4. Принцип получения холода и работа замораживающей станции двуступенчатого сжатия.
5. Бурение вертикальных замораживающих скважин.
6. Оборудование скважин замораживающими колонками.

7. Рассольная сеть при замораживании горных пород.
8. Методы контроля при замораживании горных пород.
9. Схемы замораживания при сооружении вертикальных стволов.
10. Оттаивание замороженных пород и ликвидация замораживающих скважин.
11. Замораживание пород при строительстве горизонтальных и наклонных выработок.
12. Порядок расчёта и проектирования процесса замораживания при сооружении вертикальных стволов.
13. Замораживание грунтов жидкими хладагентами.
14. Создание сплошного изолирующего покрытия на поверхности выработки при тампонаже.
15. Создание дискретного изолирующего покрытия на поверхности выработки при тампонаже.
16. Гидродинамический метод определения параметров трещиноватости.
17. Геофизические методы определения параметров трещиноватости.
18. Определение длины скважины при последующей цементации горных пород.
19. Определение расстояния между скважинами при последующей цементации горных пород.
20. Определение концентрации цементного раствора при цементации горных пород.
21. Нагнетание цементных растворов способом с постоянным расходом.
21. Нагнетание цементных растворов способом с постоянным давлением.
22. Определение конечного давления нагнетания при цементации трещиноватых горных пород.
23. Оборудование для приготовления и нагнетания цементных растворов.
24. Контроль качества цементации трещиноватых горных пород.
25. Предварительное упрочнение пород цементацией в горизонтальных и наклонных выработках.

26. Технология нагнетания синтетических смол при инъекционном упрочнении горных пород.

27. Карбамидные скрепляющие составы для инъекционного упрочнения горных пород.

28. Фенолформальдегидные скрепляющие составы для инъекционного упрочнения горных пород.

29. Пенополиуретановые скрепляющие составы для инъекционного упрочнения горных пород.

30. Предварительное водоподавление цементными растворами вокруг вертикальных горных выработок.

31. Предварительное водоподавление цементными растворами вокруг горизонтальных и наклонных горных выработок.

32. Последующее водоподавление цементными растворами.

33. Тампонаж обводнённых пород глино-цементными растворами (комплексный метод тампонажа).

34. Битумизация обводнённых пород.

35. Двухрастворная силикатизация обводнённых горных пород.

36. Одноразовая силикатизация обводнённых горных пород.

37. Газовая силикатизация горных пород.

38. Сооружение выработок с применением шпунтовых ограждений.

39. Строительство подземных сооружений опускным способом.

40. Строительство подземных сооружений с применением водопонижения скважинами.

41. Водопонижение из горизонтальных выработок.

42. Водопонижение лёгкими иглофильтровыми установками.

43. Осушение и упрочнение грунтов электроосмосом.

44. Строительство выработок под сжатым воздухом.

45. Сооружение выработок способом «стена в грунте».

46. Основные виды гладоагентов и хладоносителей.

47. Оборудование для замораживания.

48. Производство горно-строительных работ при проведении выработок способом замораживания.

49. Строительство горных выработок в удароопасных горных породах.

50. Вскрытие пластов, опасных по внезапным выбросам пород, угля и газа.

51. Проведение горных выработок в условиях высокой газонасыщенности массива.
52. Обработка скважин для увеличения водоотдачи.
53. Водопонижение эжекторными иглофильтровыми установками.
54. Электрохимический способ упрочнения горных пород.
55. Строительство выработок в условиях высоких температур.
56. Строительство выработок в многолетней мерзлоте.
57. Строительство выработок в пучащих породах с применением пассивных способов борьбы с пучением.
58. Строительство выработок в пучащих породах с применением активных способов борьбы с пучением.
59. Строительство подземных ёмкостей способом выщелачивания.
60. Строительство подземных ёмкостей с использованием камуфлетных взрывов.

6 СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альбом технологических схем предварительного тампонирувания водоносных горных пород при сооружении вертикальных стволов шахт / утверждён Министерством угольной промышленности СССР 22 декабря 1978 г. / разработан Научно-исследовательским институтом строительства угольных и горнорудных предприятий. – Кемерово, 1979. – 79 с. – Текст : непосредственный.
2. ВСН 189-78. Инструкция по проектированию и производству работ по искусственному замораживанию грунтов при строительстве метрополитенов и тоннелей : утверждена приказом Главного технического управления Министерства транспортного строительства СССР 10 мая 1978 г. № 21 : дата введения 1978-10-01 / подготовлена Всесоюзным научно-исследовательским институтом транспортного строительства (ЦНИИС). – Москва, 1978. – 126 с. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200030930> (дата обращения: 11.01.2021). – Текст : электронный.

3. СП 103.13330.2012. Защита горных выработок от подземных и поверхностных вод. Актуализированная редакция СНиП 2.06.14-85 : издание официальное : утверждён приказом Министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) 30 июня 2012 г. № 269 : дата введения 2013-01-01 / разработан Открытым акционерным обществом «Фундаментпроект» (ОАО «Фундаментпроект») [и др.]. – Москва : ФАУ «ФЦС», 2012. – 72 с. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200095537> (дата обращения 11.01.2021). – Текст : электронный.

4. СП 91.13330.2012. Подземные горные выработки. Актуализированная редакция СНиП II-94-80 : издание официальное : утверждён приказом Министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) от 30 июня 2012 г. № 283 : дата введения 2013-01-01 / разработан Научно-исследовательским институтом горной геомеханики и маркшейдерского дела ; межотраслевым научным центром ВНИМИ ОАО «ВНИМИ». – Москва : ФАУ «ФЦС», 2012. – 58 с. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200095532> (дата обращения: 11.01.2021). – Текст : электронный.

5. Политов, А. П. Строительство выработок в сложных горно-геологических условиях. Конспект лекций : для студентов очной формы обучения специальности 21.05.04 «Горное дело», специализации 21.05.04.05 «Шахтное и подземное строительство» / А. П. Политов, А. В. Дементьев ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева. – Кемерово : ГУ КузГТУ, 2021. – 286 с. – Текст : непосредственный.

6. Трупак, Н. Г. Специальные способы проведения горных выработок. – 3-е изд., перераб. – Москва : Недра, 1976. – 376 с. – Текст : непосредственный.

7. Политов, А. П. Строительство выработок в сложных горно-геологических условиях: проектирование замораживания и цементации горных пород при строительстве вертикальных горных выработок : учеб. пособие для студентов специальности 130406 «Шахтное и подземное строительство» / А. П. Политов, А. В. Дерюшев ; «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева», Кафедра строительства подземных сооружений и шахт. – Кемерово : КузГТУ, 2012. – 62 с. – URL: <http://library.kuzstu.ru/meto.php?n=90784&type=utchposob:common> (дата обращения: 11.01.2021). – Текст : электронный.

8. Дорман, Я. А. Специальные способы работ при строительстве метрополитенов. – Москва : Транспорт, 1981. – 302 с. – Текст : непосредственный.

9. Справочник по сооружению шахтных стволов специальными способами / В. В. Давыдов, Е. Г. Дуда, А. И. Кавешников [и др.] ; под общ. ред. Н. Г. Трупака. – Москва : Недра, 1980. – 391 с. – Текст : непосредственный.

10. Кипко, Э. Я. Тампонаж обводнённых горных пород : справ. пособие / Э. Я. Кипко, Ю. А. Полозов, О. Ю. Лушникова [и др.]. – Москва : Недра, 1989. – 318 с. – ISBN: 5-247-00520-1. – Текст : непосредственный.

11. Технология строительства подземных сооружений. Специальные способы строительства : учеб. для студентов вузов, обучающихся по спец. «Шахт. и подзем. стр-во» / И. Д. Насонов, В. И. Ресин, М. Н. Шуплик, В. А. Федюкин. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Изд-во Акад. горн. наук, 1998. – 374 с. – ISBN 5-7892-0030-3. – Текст : непосредственный.

12. Трупак, Н. Г. Замораживание грунтов при строительстве подземных сооружений. – Москва : Недра, 1979. – 344 с. – Текст : непосредственный.

13. ГОСТ 8732–78. Трубы стальные бесшовные горячедеформированные. Сортамент (с Изменениями № 1, 2, утверждёнными в феврале 1982 г., сентябре 1988 г.) : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утверждён Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 22.03.78 № 757 : дата введения 1979-01-01 / разработан и внесён Министерством чёрной металлургии СССР. – Москва : ИНК Издательство стандартов, 2002. – 16 с. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200001512> (дата обращения: 11.01.2021). – Текст : электронный.

14. СНиП 1.04.03-85. Нормы продолжительности строительства и задела в строительстве предприятий, зданий и сооружений : издание официальное : утверждён постановлением Госстроя СССР и Госплана СССР от 17 апреля 1985 г. № 51/90 : дата введения 1991-01-01 / разработан ЦНИИОМТП Госстроя СССР [и др.]. – Москва : Стройиздат, 1987. – 522 с. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294854/4294854897.pdf> (дата обращения: 11.01.2021). – Текст : электронный.

15. Федюкин, В. А. Проходка стволов шахт способом замораживания. – Москва : Недра, 1968. – 276 с. – Текст : непосредственный.

16. Справочник механика-шахтостроителя / Д. И. Мелиованов, В. Т. Сапронов, Г. М. Большанский [и др.] ; под ред. Д. И. Мелиованова. – Москва : Недра, 1986. – 622 с. – Текст : непосредственный.

17. СП 69.13330.2016. Подземные горные выработки. Актуализированная редакция СНиП 3.02.03-84 : издание официальное : утверждён приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 20 октября 2016 г. № 728/пр : дата введения 2017-04-21 / разработан Открытым акционерным обществом «ЦНИИПромзданий». – Москва : Стандартинформ. – 12 с. – URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293747/4293747647.pdf> (дата обращения: 11.01.2021). – Текст : электронный.

18. ТЕР 81-02-35-2001. Территориальные элементные нормы для определения стоимости строительства по Кемеровской области. Сборник 35. Горнопроходческие работы ; Книга 1 : приняты и введены в действие приказом по Главному управлению архитектуры и градостроительства Кемеровской области от 3 декабря 2014 г. № 9 / разработаны проектным институтом «Гипроуголь» и Государственным учреждением «Региональный центр по ценообразованию в строительстве Кемеровской области». – Кемерово, ГУ РЦЦС, 2024. – 209 с. – Текст : непосредственный.

19. Рекомендации по определению давлений нагнетания и расхода тампонажных материалов при предварительной цементации трещиноватых пород вокруг капитальных горных выработок : утверждены комбинатом «Кузбассшахтострой» 27 июня 1984 г. / разработаны Научно-исследовательским институтом строительства угольных и горнорудных предприятий (КузННИШахтострой). – Кемерово, 1979. – 79 с. – Текст : непосредственный.

20. Хямяляйнен, В. А. Формирование цементационных завес вокруг капитальных горных выработок / В. А. Хямяляйнен, Ю. В. Бурков, П. С. Сыркин. – Москва : Недра, 1994. – 400 с. – ISBN 5-247-03489-9. – Текст : непосредственный.

А. П. Политов
А. В. Дементьев

**СТРОИТЕЛЬСТВО ВЫРАБОТОК В СЛОЖНЫХ
ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

Учебно-методическое пособие

Печатается в авторской редакции

Подписано в печать 26.04.2021. Формат 60×84/16
Бумага офсетная. Гарнитура «Times New Roman»
Уч.-изд. л. 4,5. Тираж 100 экз. Заказ _____
Кузбасский государственный технический университет
имени Т. Ф. Горбачева, 650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28
Издательский центр Кузбасского государственного технического
университета имени Т. Ф. Горбачева, 650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4а