

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

КАФЕДРА «СТРОИТЕЛЬСТВО ЗДАНИЙ, ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ И ГЕОМЕХАНИКА»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

**для проведения практических занятий по дисциплине
базовой части профессионального цикла учебного плана
«Специальные способы строительства выработок»**

для студентов уровня профессионального образования
«специалист» по специальности 21.05.04 «Горное дело»
специализации «Шахтное и подземное строительство»
всех форм обучения

РАССМОТРЕНО

на заседании кафедры строительства
зданий, подземных сооружений и
геомеханики

Протокол № 1 от 30.08.2017

УТВЕРЖДЕНО

на заседании Учебно-издательского
совета ДОННТУ

протокол №6 от 19.10.2017

Донецк
2017

УДК 622.27(076)
ББК 33.15я7
М54

Рецензенты:

Петренко Юрий Анатольевич – доктор технических наук, профессор кафедры разработки месторождений полезных ископаемых;
Калякин Станислав Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры строительства зданий, подземных сооружений и геомеханики.

Составители:

Борщевский Сергей Васильевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительства зданий, подземных сооружений и геомеханики;
Пшеничный Юрий Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры строительства зданий, подземных сооружений и геомеханики.

М54 **Методические указания для проведения практических занятий по дисциплине базовой части профессионального цикла учебного плана «Специальные способы строительства выработок» [Электронный ресурс] : для студентов уровня профессионального образования «специалист» специальности 21.05.04 «Горное дело» специализации «Шахтное и подземное строительство» всех форм обучения / ГОУВПО «ДОННТУ», Каф. строительства зданий, подземных сооружений и геомеханики; сост. С. В. Борщевский, Ю. А. Пшеничный. – Электрон. дан. (1 файл: 1564 Кб). – Донецк: ДОННТУ, 2017. – Систем. требования: Acrobat Reader.**

Методические указания для проведения практических занятий разработаны с целью оказания помощи студентам в усвоении теоретического материала и получении практических навыков по дисциплине «Специальные способы строительства выработок». Дано содержание каждого занятия, приведен алгоритм и примеры выполнения расчетов по отдельным специальным способам строительства вертикальных стволов, представлены исходные данные для выполнения студентами конкретных расчетов и общие указания к изучению дисциплины в части практического освоения материала при работе с учебной литературой.

УДК 622.27(076)
ББК 33.15я7

Практические занятия №№1-5 проводятся в форме изучения студентами алгоритма расчета того или иного специального способа строительства и закрепления этих знаний разбором конкретного примера расчета с подстановкой численных значений необходимых параметров. В конце занятия студентам выдается домашнее задание на закрепление пройденного материала с выполнением аналогичных расчетов по варианту (исходные данные домашнего задания определяются исходя из порядкового номера фамилии студента в алфавитном списке учебной группы).

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №1.

Расчет конструктивных элементов опускной крепи.

Варианты заданий студентам (для работ №1 и №2)

Вариант	Диаметр ствола в свету, м	Пересекаемые породы		
		$\frac{h_1}{\gamma_1}$	$\frac{h_2}{\gamma_2}$	$\frac{h_3}{\gamma_3}$
1	5,5	6/2,2	10/2,5	8/1,6
2	6,0	10/2,1	5/2,5	10/1,6
3	6,5	5/2,3	12/2,6	12/1,6
4	7,0	8/2,1	15/2,5	20/1,8
5	7,5	10/2,3	10/2,6	15/1,6
6	8,0	5/2,2	15/2,6	10/1,6
7	8,5	6/2,3	20/2,6	5/1,8
8	5,0	10/2,2	5/2,6	10/1,6
9	5,5	5/2,4	10/2,5	15/1,7
10	6,0	8/2,3	12/2,6	10/1,6
11	6,5	20/2,3	15/2,6	12/1,7
12	7,0	5/2,3	20/2,5	10/1,6
13	7,5	10/2,3	15/2,6	12/1,8
14	8,0	6/2,2	10/2,6	15/1,6
15	8,5	12/2,1	20/2,6	10/1,6
16	5,0	4/2,2	15/2,6	15/1,6
17	5,5	6/2,1	15/2,6	12/1,7
18	6,0	10/2,0	20/2,6	15/1,6
19	6,5	5/1,8	20/2,4	10/1,8
20	7,0	10/2,2	15/2,5	10/1,6
21	7,5	4/2,0	10/2,6	20/1,6

Вариант	Диаметр ствола в свету, м	Пересекаемые породы		
		$\frac{h_1}{\gamma_1}$	$\frac{h_2}{\gamma_2}$	$\frac{h_3}{\gamma_3}$
22	8,0	5/2,0	12/2,6	18/1,6
23	8,5	10/2,2	10/2,6	15/1,6
24	5,0	5/2,1	15/2,6	10/1,6
25	5,5	6/2,0	10/2,6	14/1,6

Общее условие: Способом опускной крепи необходимо пройти участок вертикального ствола диаметром в свету $D_{св} = 7,0$ м с пересечением следующих пород:

- супесь мощностью $h_1 = 5$ м (объемный вес $\gamma_1 = 2,2$ т/м³);
- глина мощностью $h_2 = 7$ м (объемный вес $\gamma_2 = 2,5$ т/м³);
- плавун мощностью $h_3 = 20$ м (объемный вес $\gamma_3 = 1,6$ т/м³);

Произвести расчет конструктивных элементов опускной крепи и сделать проверку условия ее погружения.

РЕШЕНИЕ.

В устойчивых породах (первые две категории по условию) сооружается устье вертикального ствола, забой которого останавливается за 1 м до кровли плавуну. На забое монтируется опускная крепь со следующими расчетными параметрами.

1.1. Высота опускного цилиндра определяется мощностью водоносных пород:

$$H = h_b + 3, \text{ м}$$

где

h_b - мощность водоносного горизонта, а 3 м - это 1,5 м выше и 1,5 м ниже водоносного горизонта (нерабочие участки крепи).

Тогда:

$$H = 20 + 3 = 23 \text{ м}.$$

1.2. Внутренний диаметр опускной крепи (диаметр в свету) определяется по формуле:

$$D_B = D_{св} + 0,5, \text{ м}$$

где

$D_{св}$ - диаметр ствола в свету, м;

0,5 м - запас по диаметру на возможные отклонения опускной крепи от вертикали.

Имеем:

$$D_B = 7 + 0,5 = 7,5 \text{ м}.$$

1.3. Определяется максимальное значение внешнего давления на крепь. Для нашего случая максимальное давление будет в почве пlyingуна и будет определяться следующим образом:

$$P_{\max} = P_2 + P_{\text{гcm}}, \text{ Па (т/м}^2\text{)},$$

где

P_2 – горное давление (т.е. давление на стены опускной крепи со стороны горных пород). Определяется по формуле Цимбаревича:

$$P_2 = A_n \cdot \sum_{i=1}^n \gamma_i \cdot h_i, \text{ Па (т/м}^2\text{)},$$

где

γ_i – плотность (объемный вес) пород i -го слоя геологического разреза, т/м³;

h_i – мощность пласта пород i -го слоя, м;

A_n – коэффициент бокового распора породы пласта, в котором определяется давление (для пlyingуна $A_3 = 0,559$).

В почве пlyingуна горное давление будет равно:

$$P_2 = 0,559 \cdot (2,2 \cdot 5 + 2,5 \cdot 7 + 1,6 \cdot 20) = 33,8 \text{ т/м}^2.$$

$P_{\text{гcm}}$ – гидростатический напор подземных вод. Определяется по формуле:

$$P_{\text{гcm}} = \gamma_в \cdot H_{\text{гcm}}, \text{ Па (т/м}^2\text{)}$$

где

$\gamma_в$ – плотность подземных вод, т/м³; $\gamma_в = 1 \text{ т/м}^3$;

$H_{\text{гcm}}$ – высота превышения статического уровня воды над отметкой глубины, для которой определяется давление, м. Обычно, когда нет гидравлической связи между отдельными водоносными горизонтами, $H_{\text{гcm}}$ определяется для уровня почвы водоносного горизонта. В этом случае $H_{\text{гcm}} = h_в$, то есть равно мощности водоносного горизонта. $H_{\text{гcm}} = 20 \text{ м}$.

Тогда:

$$P_{\text{гcm}} = 1 \cdot 20 = 20 \text{ т/м}^2.$$

$$P_{\max} = 33,8 + 20 = 53,8 \text{ т/м}^2.$$

1.4. Толщина стен опускной крепи определяется по формуле Ляме с добавочным коэффициентом института ВНИМИ для расчёта опускных крепей:

$$d = (1,2 - 1,3) \cdot m_k \cdot r_{\text{вн}} \left(\sqrt{\frac{m_б \cdot R_б}{m_б \cdot R_б - 2P_{\max}}} - 1 \right), \text{ м}$$

где

$(1,2 - 1,3)$ - коэффициент ВНИМИ. Принимается в зависимости от материала крепи и воспринимаемой нагрузки. Примем 1,2;

$m_k = 1,25 - 1,5$ - коэффициент условий работы крепи. Примем 1,3;

$r_{\text{вн}}$ - внутренний радиус опускной крепи; $r = D_B / 2 = 7,5 / 2 = 3,75 \text{ м}$;

$m_б = 0,7 - 0,9$ - коэффициент условий работы бетона. Примем 0,85;

$R_б$ - расчётное сопротивление бетона осевому сжатию при изгибе. В зависимости от марки бетона $R_б$ равняется: М 200 - $R_б = 900 \text{ т/м}^2$;

$$\text{М 250 - } R_б = 1100 \text{ т/м}^2;$$

$$\text{М 300 - } R_б = 1400 \text{ т/м}^2.$$

Примем марку бетона М 200.

Тогда:

$$d = 1,2 \cdot 1,3 \cdot 3,75 \left(\sqrt{\frac{0,85 \cdot 900}{0,85 \cdot 900 - 253,8}} - 1 \right) = 0,46 \text{ м.}$$

Округляя в большую сторону до толщины крепи, кратной 5 см, принимаем $d = 0,5 \text{ м}$.

1.5. Внешний диаметр опускной крепи определяется по формуле:

$$D_n = D_{вн} + 2d, \text{ м.}$$

В данном примере

$$D_n = 7,5 + 2 \cdot 0,5 = 8,5 \text{ м.}$$

1.6. Диаметр устья ствола определяется так:

$$D_y = D_n + 2a,$$

где

$a = 0,2 \text{ м}$ - технологический зазор между стенкой крепи устья и опускной крепью.

В нашем случае

$$D_y = 8,5 + 2 \cdot 0,2 = 8,9 \text{ м.}$$

1.7. Расчёт необходимого количества анкерных болтов, способных воспринимать растягивающую нагрузку.

1.7.1. Вначале определяется вес зависшей части цилиндра опускной крепи по формуле:

$$Q_1 = (0,7 - 0,75) \cdot G_1 + G_2, \text{ Т}$$

где

G_1 и G_2 - вес цилиндра опускной крепи и режущего башмака соответственно;

$$G_1 = \pi \cdot (r_n^2 - r_e^2) \cdot (H - h_0) \cdot \gamma_m, \text{ Т}$$

где

γ_m - объёмный вес материала цилиндра опускной крепи, $\gamma_{\text{бетона}} = 2,4 \text{ т/м}^3$;

h_0 - высота режущего башмака. h принимается от 0,6 до 1,2 м. Примем 1,0 м;

r_n и r_e - наружный и внутренний радиусы цилиндра опускной крепи, м;

$$G_1 = 3,14 \cdot (4,25^2 - 3,75^2) \cdot (23 - 1) \cdot 2,4 = 663 \text{ т.}$$

Вес режущего башмака для усредненных расчетов можно принимать в пределах 20-40 т. Для ствола диаметром в свету 7 м принимаем $G_2 = 30 \text{ т}$.

Тогда:

$$Q_1 = 0,75 \cdot 663 + 30 = 494 \text{ т.}$$

1.7.2. Определяется разрывное усилие, которое может воспринять материал цилиндра опускной крепи (бетон):

$$P = [\sigma_p] \cdot \pi \cdot (r_n^2 - r_e^2), \text{ Т}$$

где

$[\sigma_p]$ - допустимое сопротивление бетона на разрыв, Па (т/м^2).

Для бетона марки М 200 $[\sigma_p] = 25 \text{ т/м}^2$;

М 250 $[\sigma_p] = 30 \text{ т/м}^2$;

М 300 $[\sigma_p] = 35 \text{ т/м}^2$;

Определяем:

$$P = 25 \cdot 3,14 \cdot (4,25^2 - 3,75^2) = 314 \text{ т.}$$

На этом этапе может получиться, что $P \geq Q$. Тогда считается, что бетон стен опускной крепи в состоянии сам воспринять возможные растягивающие усилия, и нет необходимости в монтаже дополнительных анкерных болтов.

В противном случае (как в данном примере) нужно продолжать расчет.

1.7.3. Определяется неуравновешенная растягивающая нагрузка:

$$R = Q_l - P, \text{ т.}$$

$$R = 494 - 314 = 180 \text{ т.}$$

1.7.4. Определяется площадь поперечного сечения всех анкерных болтов:

$$F = \frac{R}{[\sigma_p^l]}, \text{ м}^2$$

где

$[\sigma_p^l]$ – допустимое сопротивление материала анкерных болтов (металла) на разрыв. Для Ст.3 $[\sigma_p^l] = 40\,000 \text{ т/м}^2$.

Тогда:

$$F = \frac{180}{40000} = 45 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

1.7.5. Необходимое количество анкерных болтов определяется, исходя из известной площади поперечного сечения одного из них (f):

$$N = \frac{F}{f}, \text{ шт.}$$

Для анкеров удобно применять круглую сталь диаметром 12-30 мм. Площадь поперечного сечения одного анкера будет равна (принимаем 20 мм):

$$f = \pi \cdot r_a^2 = 3,14 \cdot 0,01^2 = 3,14 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Общее количество анкеров составит:

$$N = \frac{45}{3,14} = 14,3 \text{ шт.}$$

Принимаем 15 штук анкеров (округлять только в большую сторону) из круглой стали диаметром 20 мм, которые располагаем внутри бетонного цилиндра опускной крепи равномерно по его периметру.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №2.
Проверка условия погружения опускной крепи.

Вначале выполняется расчетная схема опускной крепи (рис.2.1) с обозначением конкретных отметок залегания пород

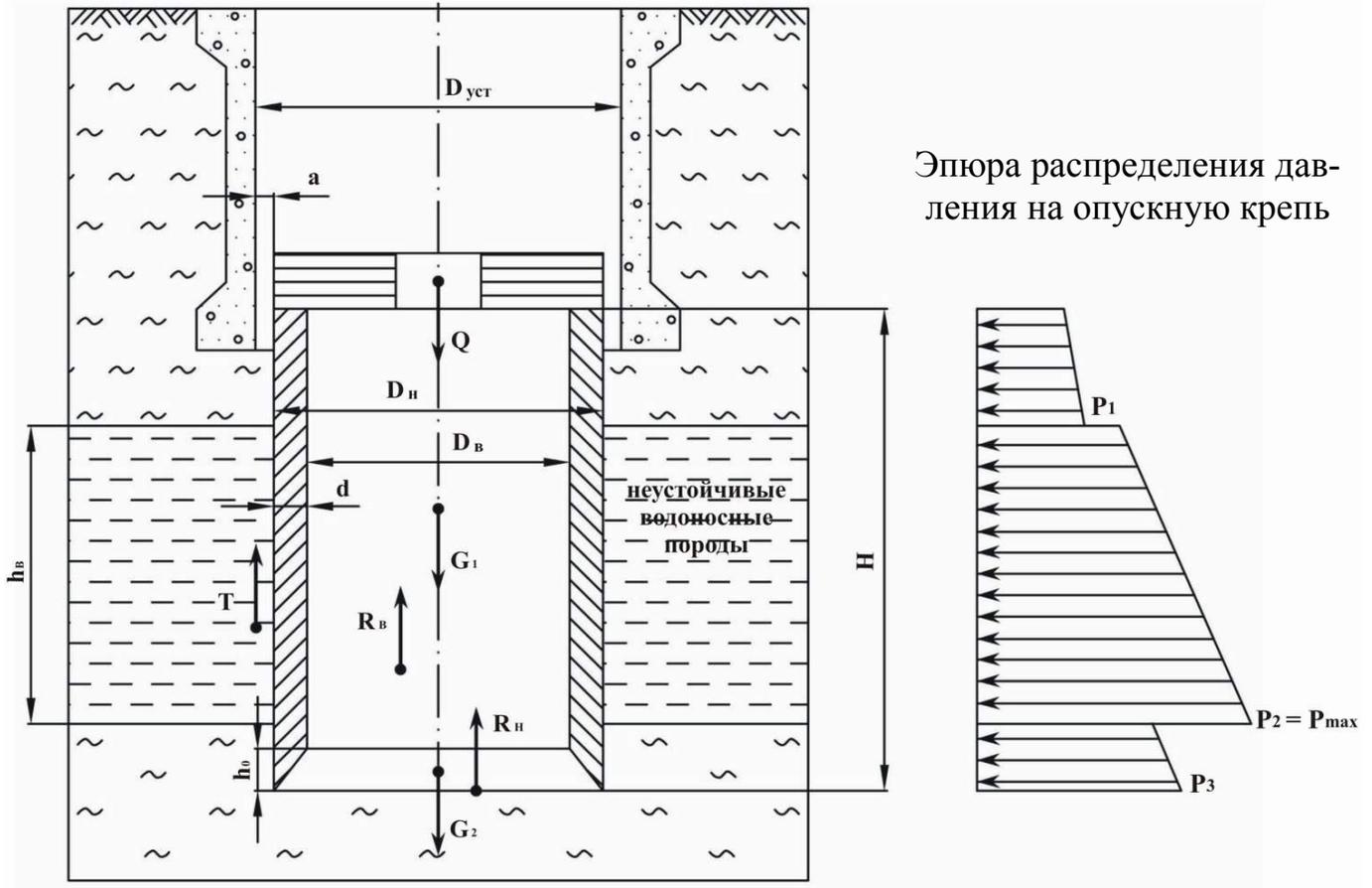


Рис.2.1. Расчётная схема опускной крепи.

Погружение опускной крепи через водоносные породы будет обеспечено, если сумма сил, способствующих погружению, будет больше или равна сумме сил, препятствующих этому, то есть должно выполняться условие:

$$G_1 + G_2 + Q \geq T + R_в + R_н$$

где

Q - дополнительная нагрузка, т. Может быть создана за счёт пригруза либо гидравлическими или механическими домкратами.

T - силы трения между наружной поверхностью опускной крепи и породой.

$$T = F_ц \cdot t, \text{ т}$$

где

$F_ц$ - площадь поверхности цилиндра опускной крепи, соприкасающаяся с породой.

$$F_ц = \pi \cdot D_н \cdot (H - 0,5), \text{ м}^2,$$

где

0,5 м - высота непогружаемой части опускной крепи;

Подставляя численные значения в формулу, получаем:

$$F_{\text{ц}} = 3,14 \cdot 8,5 \cdot (23 - 0,5) = 600,5 \text{ м}^2.$$

t - удельная сила трения материала опускной крепи о породу, т/м². В зависимости от типа пород t изменяется от 0,5 до 3 т/м². Для плавунных пород t в среднем можно принимать 1,5 т/м².

Тогда:

$$T = 600 \cdot 1,5 = 900 \text{ т.}$$

$R_{\text{в}}$ - выталкивающая сила в случае погружения опускной крепи без откачки воды в обводнённых породах:

$$R_{\text{в}} = \pi \cdot (r_{\text{н}}^2 - r_{\text{в}}^2) \cdot H_{\text{в}} \cdot \gamma_{\text{в}}, \text{ т}$$

где

$H_{\text{в}}$ - глубина затопленной части опускной крепи, м. В конце погружения будет:

$$H_{\text{в}} = h_{\text{в}} + 1,5 = 20 + 1,5 = 21,5 \text{ м;}$$

$\gamma_{\text{в}}$ - объёмный вес подземных вод, $\gamma_{\text{в}} = 1 \text{ т/м}^3$.

Тогда:

$$R_{\text{в}} = 3,14 \cdot (4,25^2 - 3,75^2) \cdot 21,5 \cdot 1 = 270 \text{ т.}$$

$R_{\text{н}}$ - усилие отпора грунта внедрению режущего башмака:

$$R_{\text{н}} = F_{\text{н}} \cdot r, \text{ т}$$

где

$F_{\text{н}}$ - площадь подошвы режущего башмака. При ширине горизонтальной плоскости режущего башмака равной или меньшей 0,1 м (острый башмак) $F_{\text{н}}$ принимается равной нулю. Наш вариант.

r - удельное давление на основание под подошвой режущего башмака, величина которого в зависимости от типа пород изменяется от 20 до 30 т на м².

$$R_{\text{н}} = 0 \cdot 25 = 0 \text{ т.}$$

Подставляя значения всех сил в первоначальное неравенство, делаем вывод о возможности погружения крепи без дополнительной нагрузки или определяем ее численное значение.

$$663 + 30 + Q \geq 900 + 270 + 0$$

$$693 + Q \geq 1170$$

$$Q \geq 477$$

В качестве дополнительной нагрузки принимаем 4 гидродомкрата с усилием подачи каждого по 120 т, расположенные равномерно по периметру опускной крепи.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №3.

Определение геометрических параметров лёдопородного ограждения.

Варианты заданий студентам (для работ №3 и №4)

Вариант	Диаметр ствола в свету, м	Толщина крепи, м	Пересекаемые породы				
			h_1/H_2O	h_2/H_2O	h_3/H_2O	h_4/H_2O	ПЛЫВУН h_5/H_2O
1	8,0	0,3	10/5	12/10	15/15	10/5	40/50
2	6,0	0,25	5/5	15/15	10/10	8/5	30/45
3	5,0	0,4	15/5	10/18	15/10	5/5	35/50
4	5,5	0,5	10/8	15/10	5/15	10/5	25/45
5	7,0	0,3	5/10	15/15	10/10	15/5	35/50
6	7,5	0,25	10/10	8/10	15/10	10/5	36/45
7	8,0	0,5	5/10	15/10	20/25	20/5	40/45
8	6,5	0,4	10/5	3/15	15/10	8/15	45/50
9	7,0	0,5	5/5	15/20	15/10	25/15	30/45
10	8,0	0,3	5/5	10/15	5/10	7/25	40/45
11	7,0	0,25	8/5	10/10	15/15	20/10	30/40
12	6,5	0,25	10/8	5/12	15/20	10/10	40/45
13	7,5	0,5	5/8	12/15	20/20	10/18	35/40
14	6,0	0,3	10/5	3/12	15/20	10/14	30/45
15	5,5	0,4	15/5	15/15	20/25	12/10	50/45
16	6,0	0,5	5/5	8/12	15/20	5/10	40/45
17	5,0	0,3	10/5	15/15	20/20	15/25	40/35
18	7,0	0,5	6/5	10/15	5/20	15/25	35/35
19	6,5	0,5	5/4	10/14	15/20	10/25	40/50
20	7,5	0,3	10/6	12/15	8/18	12/20	25/45
21	6,0	0,3	10/5	15/12	19/19	20/25	40/35
22	5,0	0,5	8/5	10/15	7/18	15/20	30/45
23	8,0	0,3	10/5	15/10	20/15	10/20	40/45
24	5,5	0,5	10/4	15/12	18/15	7/20	20/40
25	8,5	0,5	5/5	10/10	15/15	20/20	30/45

Условие: Клетевой ствол диаметром в свету $D_{\text{св}} = 7,0$ м и толщиной крепи $d_{\text{кр}} = 0,5$ м необходимо пройти по следующим породам:

- наносы ($\gamma_1 = 1,6 \text{ т/м}^3$) мощностью $h_1 = 5$ м и содержанием воды $m_1 = 0 \%$;
- суглинки ($\gamma_2 = 2,1 \text{ т/м}^3$) мощностью $h_2 = 12$ м и с содержанием воды $m_2 = 10\%$;
- песчаник ($\gamma_3 = 2,2 \text{ т/м}^3$) мощностью $h_3 = 15$ м и с содержанием воды $m_3 = 15\%$;
- глина ($\gamma_4 = 2,0 \text{ т/м}^3$) мощностью $h_4 = 20$ м и с содержанием воды $m_4 = 5 \%$;
- плывун ($\gamma_5 = 1,6 \text{ т/м}^3$) мощностью $h_5 = 20$ м и с содержанием воды $m_5 = 45 \%$;
- водоупор ($\gamma_6 = 2,4 \text{ т/м}^3$) мощностью $h_6 = 20$ м и с содержанием воды $m_6 = 0 \%$;

Данный участок ствола в водонасыщенных породах предполагается пройти с применением способа искусственного замораживания горных пород.

- Необходимо определить:
- толщину ледопородного ограждения;
 - производительность замораживающей станции;
 - продолжительность замораживания.

РЕШЕНИЕ.

Вначале выполняется поясняющий последующие расчеты рисунок (рис.3.1), на котором в масштабе изображаются контур будущего ствола и замораживающие колонки в геологическом разрезе заданных, горизонтально залегающих, пород. Затем выполняются необходимые расчеты с соответствующими пояснениями и, если необходимо, с дополнительными рисунками.

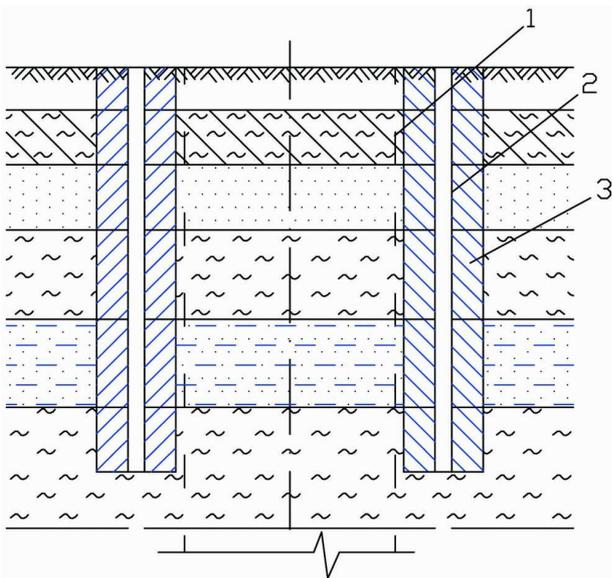
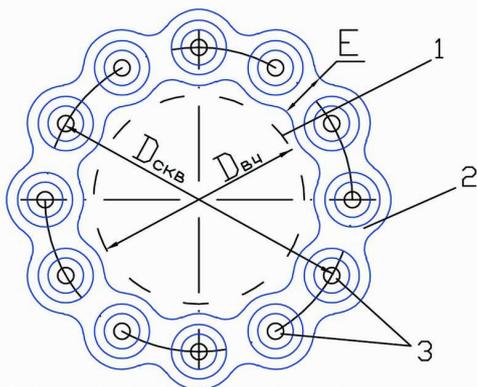


Рис. 3.1. Схема образования ледопородного ограждения.

- 1 – контур будущего ствола;
- 2 – замораживающие скважины;
- 3 – замороженные породы;
- Е – толщина ЛПО в замковой плоскости



3.1. Определяется глубина замораживающих скважин ($L_{скв}$) по формуле:

$$L_{скв} = \sum_{i=1}^n h_i + (6...10), \text{ м}$$

где

h_i – мощность i -го водоносного горизонта, м;

n – количество водоносных горизонтов;

(6...10) м – величина заглубления в водоупор.

Тогда:

$$L_{скв} = 5 + 12 + 15 + 20 + 20 + 6 = 78 \text{ м}.$$

3.2. Допускаемое отклонение скважин от вертикали (a) находится по формуле:

$$a = 0,5 + 0,002 \cdot L_{скв}, \text{ м}$$

$$a = 0,5 + 0,002 \cdot 78 = 0,656 \text{ м}.$$

3.3. Определяется величина максимальной нагрузки на ледопородное ограждение (P_{max}) по формуле:

$$P_{max} = P_z + P_{гст}, \text{ МПа},$$

где

P_z – величина горного давления, МПа;

$P_{гст}$ – величина гидростатического давления, МПа.

Горное давление определяется по формуле Цимбаревича:

$$P_z = A_n \cdot \sum_{i=1}^n \gamma_i \cdot h_i, \text{ МПа},$$

где

γ_i – плотность (объемный вес) пород i -го слоя геологического разреза, кг/м³;

h_i – мощность i -го водоносного горизонта, м;

n – количество водоносных горизонтов;

A_n – коэффициент бокового распора слоя n .

P_z определяется для каждого водоносного пласта, и из всех значений выбирается максимальное. Из условия примера очевидно, что максимальное значение P_z будет наблюдаться в почве пльвуна, для которого $A_5 = 0,559$.

Тогда:

$$P_z = 0,559 \cdot (1,6 \cdot 5 + 2,1 \cdot 12 + 2,2 \cdot 15 + 2,0 \cdot 20 + 1,6 \cdot 20) = 77,25 \text{ т/м}^2 = 0,77 \text{ МПа}.$$

$$P_{гст} = \gamma_в \cdot h_в, \text{ МПа}$$

где $\gamma_в = 1 \text{ т/м}^3$ – объемный вес воды;

$h_в$ – высота водяного столба, м.

Если между горизонтами нет гидравлической связи, то есть подземные воды не напорные (а это в условии специально не оговорено), то $h_в = h_5$ (пльвуна), как наиболее мощного горизонта.

$$P_{гст} = 1 \cdot 20 = 20 \text{ т/м}^2 = 0,2 \text{ МПа}.$$

$$P_{max} = P_z + P_{гст} = 0,77 + 0,2 = 0,97 \text{ МПа}.$$

3.4. Толщина ледопородного ограждения (E) определяется следующим образом:

а) при суммарной мощности водоносных горизонтов до или = 80 м (наш случай) применяется формула Ляме-Гадолина:

$$E = R_{вч} \cdot \left(\sqrt{\frac{[\sigma_{сж}]}{[\sigma_{сж}] - 2 \cdot P_{\max}} - 1} \right), \text{ м}$$

где

$R_{вч}$ - радиус ствола в черне, м;

$$R_{вч} = R_{св} + d_{кр} = \frac{D_{св}}{2} + d_{кр}, \text{ м где}$$

$R_{св}, D_{св}$ - соответственно радиус и диаметр ствола в свету, м;

$d_{кр}$ - толщина крепи, м.

$$R_{вч} = \frac{7}{2} + 0,5 = 4 \text{ м.}$$

$[\sigma_{сж}] = \frac{\sigma_{сж}}{n}$, МПа - допускаемое напряжение на сжатие замороженных пород;

$n = 2 \dots 3$ - коэффициент запаса прочности;

$\sigma_{сж} = 12,5$ МПа - средний предел прочности на сжатие замороженных пород;

Тогда:

$$[\sigma_{сж}] = \frac{12,5}{2,5} = 5 \text{ МПа.}$$

$$E = 4 \cdot \left(\sqrt{\frac{5}{5 - 2 \cdot 0,97}} - 1 \right) = 1,11 \text{ м.}$$

б) при суммарной мощности водоносных горизонтов свыше 80 м (не наш случай, но в качестве примера для некоторых студентов) применяется формула Домке:

$$E = R_{вч} \cdot \left[0,29 \frac{P_{\max}}{\sigma_{д}} + 2,3 \cdot \left(\frac{P_{\max}}{\sigma_{д}} \right)^2 \right], \text{ м}$$

где

$\sigma_{д}$ - предел длительной прочности замороженных пород на сжатие.

Эта величина определяется из таблиц в зависимости от породы. Для приближенных вычислений можно принимать усредненную величину $\sigma_{д} = 3,5$ МПа.

Для наших значений

$$E = 4 \cdot \left[0,29 \frac{0,97}{3,5} + 2,3 \cdot \left(\frac{0,97}{3,5} \right)^2 \right] = 1,05 \text{ м}$$

3.5. Диаметр расположения замораживающих скважин ($D_{скв}$) определяется по формуле:

$$D_{скв} = D_{вч} + 1,2E + 2a, \text{ м}$$

где

$$D_{вч} = D_{скв} + 2 \cdot d_{кр}, \text{ м} - \text{диаметр ствола вчерне.}$$

Для нашего примера

$$D_{вч} = 7 + 2 \cdot 0,5 = 8 \text{ м и}$$

$$D_{скв} = 8 + 1,2 \cdot 1,11 + 2 \cdot 0,66 = 10,65 \text{ м.}$$

3.6. Определяется необходимое количество скважин ($N_{общ}$) по формуле:

$$N_{общ} = N_{раб} + N_{рез} + N_{контр},$$

где

$N_{раб}$ - количество рабочих скважин;

$N_{рез}$ - количество резервных скважин;

$N_{контр}$ - количество контрольных скважин.

$$N_{раб} = \frac{\pi \cdot D_{скв}}{l}, \text{ шт.}$$

где

$l = 1, 2 \dots 1,3 \text{ м}$ - расстояние между двумя соседними скважинами. Зависит от многих факторов, принимается по опыту замораживания.

$$N_{рез} = 0,15 N_{раб}, \text{ шт.}$$

$$N_{контр} = 4 \text{ шт. (минимальное количество).}$$

Тогда:

$$N_{раб} = \frac{3,14 \cdot 10,65}{1,2} = 27,87 = 28 \text{ скважин;}$$

$$N_{рез} = 0,15 \cdot 28 = 4,2 = 5 \text{ скважин (округлять в большую сторону);}$$

$$N_{общ} = 28 + 5 + 4 = 37 \text{ скважин.}$$

3.7. Фактическая толщина ледопородного ограждения будет больше E за

счет намерзания породы не только в замковых, но и в главных плоскостях ограждения (рис.3.2).

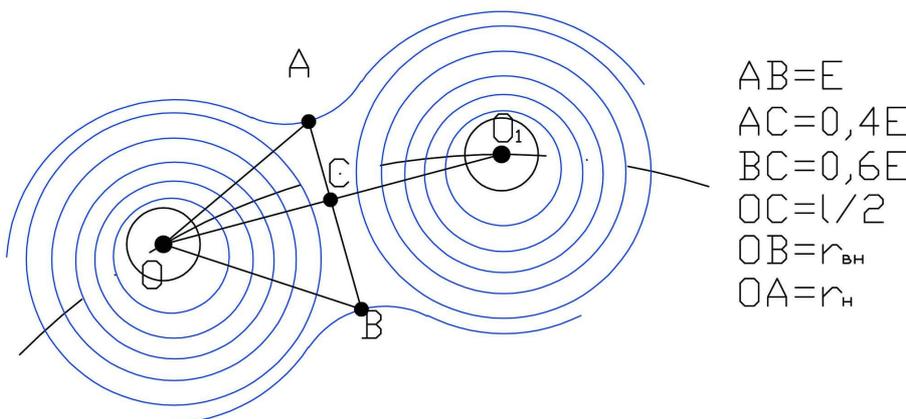


Рис. 3.2. К определению фактической толщины ЛПО

AB=E – толщина ЛПО в замковой плоскости

Она определяется внутренним ($r_{вн}$) и наружным ($r_{н}$) радиусами промерзания пород вокруг каждой замораживающей колонки. Эти радиусы легко находятся при решении простейшей геометрической задачи (рис.3.2):

$$r_{вн} = \sqrt{\left(\frac{l}{2} + a\right)^2 + (0,6 \cdot E)^2}, \text{ м}$$

$$r_{н} = \sqrt{\left(\frac{l}{2} + a\right)^2 + (0,4 \cdot E)^2}, \text{ м}$$

Подставляя численные значения, получаем:

$$r_{вн} = \sqrt{\left(\frac{1,2}{2} + 0,66\right)^2 + (0,6 \cdot 1,11)^2} = 1,425 \text{ м}$$

$$r_{н} = \sqrt{\left(\frac{1,2}{2} + 0,66\right)^2 + (0,4 \cdot 1,11)^2} = 1,34 \text{ м}$$

3.8. Определяются фактические внутренний и наружный диаметры ледопородного ограждения вокруг ствола по формулам:

$$D_{вн} = D_{скв} - 2 \cdot r_{вн}, \text{ м}$$

$$D_{вн} = 10,65 - 2 \cdot 1,425 = 7,8 \text{ м}$$

$$D_{н} = D_{скв} + 2 \cdot r_{н}, \text{ м}$$

$$D_{н} = 10,65 + 2 \cdot 1,34 = 13,33 \text{ м}$$

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №4.
Теплотехнический расчет производительности
замораживающей станции и времени замораживания.

4.1. Определяется объем ледопородного ограждения, то есть объем всей породы, подлежащей замораживанию, ($V_{цпл}$) по не совсем рациональной методике, но необходимой для выполнения п.2 данного этапа:

$$V_{цпл} = \sum_{i=1}^n V_i, \text{ м}^3$$

где

V_i – объём породы по каждому водоносному горизонту отдельно, м^3 .

V_i определяется следующим образом:

$$V_i = F \cdot h_i, \text{ м}^3$$

где

F – площадь кольца сечения ледопородного ограждения, м^2

$$F = \frac{\pi}{4} \cdot (D_n^2 - D_{вн}^2), \text{ м}^2$$

$$F = \frac{3,14}{4} \cdot (13,33^2 - 7,8^2) = 92 \text{ м}^2.$$

Тогда отдельно по горизонтам объемы замораживаемых пород будут равны:

$$V_1 = F \cdot h_1 = 92 \cdot 5 = 460 \text{ м}^3$$

$$V_2 = F \cdot h_2 = 92 \cdot 12 = 1104 \text{ м}^3$$

$$V_3 = F \cdot h_3 = 92 \cdot 15 = 1380 \text{ м}^3$$

$$V_4 = F \cdot h_4 = 92 \cdot 20 = 1840 \text{ м}^3$$

$$V_5 = F \cdot h_5 = 92 \cdot 20 = 1840 \text{ м}^3$$

$$V_6 = F \cdot h_6 = 92 \cdot 6 = 552 \text{ м}^3$$

$$\text{Итого: } V_{цпл} = 7\,176 \text{ м}^3.$$

4.2. Определяется объем замораживаемой воды ($V_{воды}$) по формуле:

$$V_{общ}^e = \sum_{i=1}^n V_i^e, \text{ м}^3$$

где

V_i^e – объем воды в i -ом водоносном горизонте, м^3 .

$$V_i^e = V_i \cdot m_i, \text{ м}^3$$

где m_i – доля содержания воды в породе i -го водоносного горизонта (в условии дана в %, подставлять нужно в долях единицы).

Определим объем замороженной воды в каждом из горизонтов, а затем просуммируем эти значения:

$$\begin{aligned}
V_1^e &= V_1 \cdot m_1 = 460 \cdot 0 = 0, \text{ м}^3 \\
V_2^e &= V_2 \cdot m_2 = 1104 \cdot 0,10 = 110, \text{ м}^3 \\
V_3^e &= V_3 \cdot m_3 = 1380 \cdot 0,15 = 207, \text{ м}^3 \\
V_4^e &= V_4 \cdot m_4 = 1840 \cdot 0,05 = 92, \text{ м}^3 \\
V_5^e &= V_5 \cdot m_5 = 1840 \cdot 0,45 = 828, \text{ м}^3 \\
V_6^e &= V_6 \cdot m_6 = 552 \cdot 0 = 0, \text{ м}^3 \\
\hline
\text{Итого: } V_{\text{общ}}^e &= 1\,237 \text{ м}^3.
\end{aligned}$$

4.3. Объем твердых частиц породы ($V_{\text{пор}}$) определяется по формуле:

$$\begin{aligned}
V_{\text{пор}} &= V_{\text{цвл}} - V_{\text{общ}}^e, \text{ м}^3, \\
V_{\text{пор}} &= 7176 - 1237 = 5939 \text{ м}^3.
\end{aligned}$$

4.4. Замораживание будет происходить только при выполнении следующего неравенства:

$$Q_k \cdot T \geq Q_3 + Q_{\text{ох}} \cdot T,$$

где

Q_3 – количество тепла, которое нужно отвести от замораживаемого массива для перевода его от естественной температуры до средней температуры замораживания;

Q_k – теплопоглощающая способность замораживающих колонок;

$Q_{\text{ох}}$ – внешний теплоприток;

T – время активного замораживания

Для дальнейших расчетов необходимо вычислить все члены этого неравенства.

4.5. Q_3 определяется, исходя из выражения:

$$Q_3 = q_3 \cdot V_{\text{цвл}}, \text{ ккал}$$

где

q_3 – удельное количество тепла (то есть то, которое нужно отвести от 1 м³ породы), ккал. q_3 и Q_3 нужно определять для каждого породного слоя, а итоги затем суммировать. Это очень громоздкий процесс.

Для облегчения расчетов и приближенных вычислений с небольшой погрешностью можно принять следующий порядок определения Q_3 :

$$Q_3 = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4, \text{ ккал}$$

где

Q_1 – количество тепла, которое нужно отвести от содержащейся в породе воды для её охлаждения от естественной температуры до температуры замерзания;

Q_2 – количество тепла, которое нужно отвести для перевода воды в лед при одной и той же температуре (замерзания);

Q_3 – количество тепла, которое нужно отвести ото льда для его охлаждения от температуры замерзания до средней температуры замораживания;

Q_4 – количество тепла, которое нужно отвести от «скелета» породы при его охлаждении от естественной температуры до средней температуры замораживания.

Все вышеназванные величины Q определяются по следующим формулам:

$$Q_1 = V_B \cdot \gamma_B \cdot C_B \cdot (t_{ec} - t_o), \text{ ккал}$$

$$Q_2 = V_B \cdot \gamma_B \cdot r, \text{ ккал}$$

$$Q_3 = V_L \cdot \gamma_L \cdot C_L \cdot (t_o - t_{cp}), \text{ ккал}$$

$$Q_4 = V_{II} \cdot \gamma_{II} \cdot C_{II} \cdot (t_{ec} - t_{cp}), \text{ ккал}$$

где

$$V_L = 1,09 \cdot V_{\text{в}}, \text{ м}^3 - \text{объём льда}; \quad V_{II} = 1,09 \cdot 1237 = 1348 \text{ м}^3;$$

$\gamma_{\text{в}}, \gamma_{\text{л}}, \gamma_{\text{n}}$ - удельный вес соответственно воды, льда и породы (средневзвешенный), кг/м^3 ;

$$\gamma_{\text{в}} = 1000 \text{ кг/м}^3 \text{ (для химически чистой воды); } \gamma_{\text{л}} = 916 \text{ кг/м}^3;$$

$$\gamma_{\text{n}} = \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_i \cdot h_i}{\sum_{i=1}^n h_i}, \text{ кг/м}^3;$$

$$\gamma_{\text{n}} = \frac{1,6 \cdot 5 + 2,1 \cdot 12 + 2,2 \cdot 15 + 2,0 \cdot 20 + 1,6 \cdot 20 + 2,4 \cdot 6}{5 + 12 + 15 + 20 + 20 + 6} = 1,956 \text{ т/м}^3 = 1956 \text{ кг/м}^3$$

$C_{\text{в}}, C_{\text{л}}, C_{\text{n}}$ - удельная теплоёмкость соответственно воды, льда и породы. В среднем они равны $C_{\text{в}} = 1, C_{\text{л}} = 0,5, C_{\text{n}} = 0,2$ ккал/кг·град.;

$r = 80$ ккал/кг - скрытая теплота льдообразования;

t_{ec}, t_o, t_{cp} - соответственно температура породы и воды в естественном состоянии, температура замерзания воды и средняя температура замораживания. Принимаем $t_{ec} = +10^{\circ}\text{C}, t_o = 0^{\circ}\text{C}, t_{cp} = -10^{\circ}\text{C}$.

Тогда:

$$Q_1 = 1237 \cdot 1000 \cdot 1 \cdot (10 - 0) = 1237 \cdot 10^4 \text{ ккал};$$

$$Q_2 = 1237 \cdot 1000 \cdot 80 = 9896 \cdot 10^4 \text{ ккал};$$

$$Q_3 = 1348 \cdot 916 \cdot 0,5 \cdot (0 - (-10)) = 617 \cdot 10^4 \text{ ккал};$$

$$Q_4 = 5939 \cdot 1956 \cdot 0,2 \cdot (10 - (-10)) = 4647 \cdot 10^4 \text{ ккал}.$$

Просуммировав все значения Q , получим:

$$Q_{\Sigma} = (1237 + 9896 + 617 + 4647) \cdot 10^4 = 16397 \cdot 10^4 \text{ ккал}.$$

4.6. Теплопоглощающая способность замораживающих колонок определяется по формуле:

$$Q_k = q_f \cdot F_k, \text{ ккал/час}$$

где

$q_f = 200 \dots 250$ ккал/ $\text{м}^2 \cdot \text{час}$ - удельное теплопоглощение на 1 м^2 поверхности замораживающих колонок;

F_k - общая площадь наружной поверхности замораживающих колонок, м^2 .

$$F_k = \pi \cdot d_k \cdot L_k \cdot N_{\text{раб}}, \text{ м}^2$$

где

$d_k = 0,146$ м - стандартный диаметр труб ТЗК (трубы замораживающих колонок);

$L_k = L_{\text{скв}}$ - длина замораживающих колонок.

$$F_k = 3,14 \cdot 0,146 \cdot 78 \cdot 28 = 1001 \text{ м}^2$$

Тогда

$$Q_k = 220 \cdot 1001 = 22 \cdot 10^4 \text{ ккал/час.}$$

4.7. Производительность замораживающей станции определяется на основании Q_k с учетом 20% потерь в рассольной сети, то есть:

$$Q_{cm} = 1,2 \cdot Q_k, \text{ ккал/час.}$$

$$Q_{cm} = 1,2 \cdot 22 \cdot 10^4 = 26,4 \cdot 10^4 \text{ ккал/час.}$$

4.8. Определяется внешний теплоприток, который постоянно нужно отводить при замораживании:

$$Q_{ox} = q_{ox} \cdot S_{ox}, \text{ ккал/час}$$

где

$q_{ox} = 4 \dots 11 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час}$ – удельное количество тепла, притекающее к 1 м^2 поверхности ледопородного ограждения как снаружи, так и изнутри со стороны не замороженного породного массива; q_{ox} зависит от естественной температуры пород и глубины. Примем $q_{ox} = 6 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час}$.

S_{ox} – поверхность ледопородного ограждения, соприкасающаяся с незамоороженным массивом. Определяется из выражения:

$$S_{ox} = \pi \cdot (D_n + D_{вн}) \cdot L_{скв} + 2 \cdot F, \text{ м}^2$$

$$S_{ox} = 3,14 \cdot (13,33 + 7,8) \cdot 78 + 2 \cdot 92 = 5359 \text{ м}^2$$

Тогда:

$$Q_{ox} = 6 \cdot 5359 = 3,2 \cdot 10^4 \text{ ккал/час.}$$

4.9. Используя неравенство (Б-4), определяем время активного замораживания по формуле:

$$T = \frac{Q_3}{(Q_k - Q_{ox}) \cdot 24}, \text{ сутки}$$

$$T = \frac{16397 \cdot 10^4}{(22 - 3,2) \cdot 10^4 \cdot 24} = 36 \text{ суток.}$$

4.10. Время пассивного замораживания определяется, исходя из нормативной скорости проходки ствола по замороженным породам ($V_H = 25 \text{ м/мес}$):

$$T_{nacc} = \frac{H}{V_H}, \text{ мес.}$$

где H - длина участка ствола, проходимого по замороженным породам.

Так как в нашем случае $H = L_{скв} = 78 \text{ м}$, то:

$$T_{nacc} = \frac{78}{25} = 3,1 \text{ месяца}$$

Полученные в результате вычислений значения толщины ледопородного ограждения (E), производительность замораживающей станции (Q_{cm}), продолжительности активного и пассивного периодов замораживания (T и T_{nacc}) записываются в конце практической работы в виде ответа.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №5.
Расчёт предварительной цементации
с поверхности земли при сооружении вертикального ствола.

Варианты заданий студентам (работа №5)

Вариант	Диаметр ствола в свету, м	Толщина крепи, м	Глубина цементации, м	Мощность водоносных пород, м	Трещинная пустотность, $m_T \cdot 10^{-3}$	Среднее раскрытие трещин δ_{cp} , мм	Статический уровень подземных вод, м
1	5,0	0,3	200	30	5	1	30
2	6,0	0,4	500	20	15	6	40
3	5,5	0,5	250	25	25	8	50
4	7,5	0,4	300	35	18	10	60
5	8,0	0,5	350	25	30	12	50
6	8,5	0,4	500	20	10	15	40
7	8,0	0,5	300	40	17	20	60
8	6,5	0,4	250	30	30	25	30
9	7,0	0,5	500	35	5	30	30
10	6,0	0,5	300	20	12	3	70
11	5,0	0,25	300	25	18	8	60
12	8,0	0,5	500	20	35	13	25
13	8,5	0,4	300	30	30	18	30
14	6,5	0,3	800	25	20	23	90
15	7,5	0,5	700	40	15	28	80
16	5,5	0,3	900	50	16	33	100
17	8,0	0,3	300	28	13	0,5	50
18	7,0	0,5	400	30	10	4	40
19	7,5	0,25	400	40	8	9	30
20	6,0	0,3	200	30	5	14	70
21	5,0	0,5	300	35	15	19	60
22	8,0	0,3	400	30	28	24	60
23	6,0	0,5	300	50	32	29	70
24	6,5	0,3	400	40	25	33	50
25	5,5	0,4	300	30	20	12	40

Условие: Клетевой ствол диаметром в свету $D_{св} = 7,0$ м и толщиной крепи $d_{кр} = 0,5$ м необходимо пройти, предварительно затампонировав водоносный горизонт со следующими характеристиками:

- глубина залегания от поверхности земли $h = 350$ м;
- мощность $H_T = 25$ м;
- трещинная пустотность (скважность) $m_T = 10 \cdot 10^{-3}$;
- среднее раскрытие трещин $\delta_{ср} = 10$ мм;
- статический уровень подземных вод $h_{ст} = 50$ м.

Необходимо определить количество и диаметр расположения цементационных скважин, а также давление нагнетания цементного раствора и ожидаемый его расход.

РЕШЕНИЕ.

Вначале выполняется поясняющий последующие расчеты рисунок (рис.5.1), на котором в масштабе изображаются контур будущего ствола и изоляционной завесы, ориентировочные места заложения тампонажных скважин. Затем выполняются необходимые расчеты с соответствующими пояснениями.

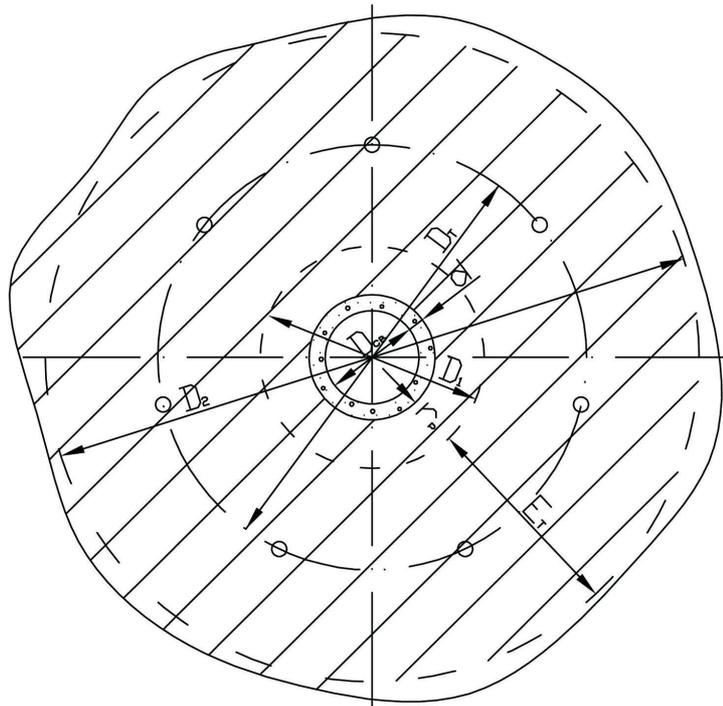


Рис. 5.1. Схема к определению геометрических размеров завесы.

5.1. Толщина кольцевой тампонажной завесы определяется по формуле Ляме:

$$E_T = \frac{D_1}{2} \cdot \left(\sqrt{\frac{m \cdot R_n}{m \cdot R_n - 2 \cdot \lambda \cdot P_2}} - 1 \right), \text{ м}$$

где

D_1 - диаметр зоны растрескивания пород, м.

$$D_1 = (D_{св} + 2 \cdot d) \cdot \psi + 2 \cdot r_p, \text{ м}$$

r_p - глубина зоны растрескивания пород от действия взрывных работ, м.

$$r_p = 4 \cdot k \cdot r \cdot \sqrt[3]{q_{BB}}, \text{ м}$$

k - коэффициент работоспособности ВВ относительно тротила. Для аммонита №6 ЖВ $k = 0,9$;

$r = 0,1-0,4$ м - радиус камуфлетной полости для 1 кг тротила. Пусть для сланцев $r = 0,4$ м;

q_{BB} - масса заряда ВВ в одном оконтуривающем шпуре, кг. По паспорту БВР $q_{BB} = 4,5$ кг;

$D_{св}$ - диаметр ствола в свету, м. $D_{св} = 7,0$ м;

d - толщина крепи ствола, м. $d = 0,5$ м;

$\psi = 1,07-1,1$ - коэффициент перебора породы по сечению ствола;

$m = 0,6-0,7$ коэффициент условий работы для этого случая;

R_n - предел прочности на одноосное сжатие зацементированных пород, МПа. В зависимости от исходной крепости пород R_n в среднем изменяется от 20 до 50 МПа. В нашем случае лабораторные испытания зерна показали, что $R_n = 22$ МПа;

$\lambda = 1,25-1,35$ - коэффициент перегрузки;

P_2 - гидростатическое давление подземных вод, МПа. Определяется как вес столба воды в скважине относительно почвы водоносного горизонта,

$$P_2 = h + H_T - h_{см}, \text{ м вод.ст.}$$

$$P_2 = 350 + 25 - 50 = 325 \text{ м вод.ст} = 3,25 \text{ МПа.}$$

Тогда

$$r_p = 4 \cdot 0,9 \cdot 0,4 \cdot \sqrt[3]{4,5} = 2,4 \text{ м.}$$

$$D_1 = (7 + 2 \cdot 0,5) \cdot 1,1 + 2 \cdot 2,4 = 13,6 \text{ м.}$$

$$E_T = \frac{13,6}{2} \cdot \left(\sqrt{\frac{0,6 \cdot 22}{0,6 \cdot 22 - 2 \cdot 1,3 \cdot 3,25}} - 1 \right) = 4,6 \text{ м.}$$

5.2. Расчет числа тампонажных скважин.

В начале определяем радиус распространения цементного раствора из одной скважины:

$$r_T = \sqrt{\frac{Q_{ск} \cdot t}{\pi \cdot H_T \cdot m_T \cdot K_H}}, \text{ м}$$

где

$Q_{ск}$ – расход цементного раствора, нагнетаемого в скважину, м³/час. Средняя производительность насоса НГР-250/50 – 16м³/час;

t – продолжительность нагнетания, час. Берем не более 1-2 часов;

H_T – мощность тампонируемого водоносного горизонта, м;

m_T – трещинная пустотность (скважность) горных пород;

$K_H = 1,25-1,35$ – коэффициент неравномерности распространения пустот и трещин в горных породах.

Подставив в формулу численные значения, получаем:

$$r_T = \sqrt{16 \cdot 2 / (3,14 \cdot 25 \cdot 0,01 \cdot 1,35)} = 5,5 \text{ м}$$

На основании практики строительства стволов с применением цементации с земной поверхности расстояние между тампонажными скважинами ($l_{ск}$) следует принимать:

- 5-7 м при преобладании в породах мелких ($\delta=1-5$ мм) и тонких ($\delta=0,1-1$ мм) трещин;
- 7-9 м при преобладании пород со средней ($\delta = 5-20$ мм) трещиноватостью;
- 9-12 м и более при преобладании пород с крупной трещиноватостью ($\delta=20-100$ мм).

Наибольшее допустимое расстояние между тампонажными скважинами [$l_{ск}$] определяется по формуле:

$$[l_{ск}] = \sqrt{4 \cdot r_T^2 - E_T^2}, \text{ м}$$

$$[l_{ск}] = \sqrt{4 \cdot 5,5^2 - 4,6^2} = 10 \text{ м}$$

Окончательно принимаем расстояние между скважинами $l_{ск} = 9$ м.

Тогда, число тампонажных скважин (N_T) без учета контрольных и резервных будет:

$$N_T = \frac{\pi \cdot D_T}{l_{ск}}, \text{ шт.}$$

где D_T – диаметр расположения тампонажных скважин, м.

$$D_T = \sqrt{D_1^2 + 2 \cdot E_T \cdot (D_1 + E_T)}, \text{ м.}$$

$$D_T = \sqrt{13,6^2 + 2 \cdot 4,6 \cdot (13,6 + 4,6)} = 18,8 \text{ м.}$$

И тогда

$$N_T = \frac{3,14 \cdot 18,8}{9} = 6,56 \approx 7 \text{ скважин.}$$

Уточним фактическое расстояние между скважинами:

$$l_{ск}^{\phi} = \frac{\pi \cdot D_T}{N_T} = \frac{3,14 \cdot 18,8}{7} = 8,4 \text{ м.}$$

5.3. Давление нагнетания цементного раствора.

Определяется, исходя из избыточного давления (превышение давления подаваемого в водоносный горизонт раствора над гидростатическим напором подземных вод) (табл. 1).

Таблица 1. Определение избыточного давления ΔP .

Высота заходки H_T , м	50	100	200	300	400	500	600	700
Изб. Давление ΔP , Мпа	1-2	3-4	5-6	7-9	10-12	13-14	15-17	18-20

Так как мощность водоносного горизонта всего лишь 25 м, то принимаем $\Delta P = 1$ Мпа.

На насосе, расположенном на поверхности земли, следует создавать следующее давление нагнетания:

$$P_n = \Delta P + P_z - P_p, \text{ Мпа,}$$

где
$$P_p = \frac{\gamma_p \cdot h_{cm} + (\gamma_p - \gamma_в) \cdot (h + H_T - h_{cm})}{100}, \text{ МПа} - \text{давление}$$

столба цементного раствора в скважине;

$\gamma_p = 1,83 \text{ т/м}^3$ – расчетная плотность портландцементного тампонажного раствора концентрации 1:0,6;

$\gamma_в = 1 \text{ т/м}^3$ – плотность воды, заполняющей тампонажную скважину;

h_{cm} – статический уровень подземных вод, $h_{cm} = 50 \text{ м}$;

h – глубина от поверхности до водоносного горизонта, $h = 350 \text{ м}$.

Подставляем в формулы численные значения и получаем:

$$P_p = \frac{1,83 \cdot 50 + (1,83 - 1) \cdot (350 + 25 - 50)}{100} = 3,6 \text{ МПа.}$$

Тогда

$$P_n = 1 + 3,25 - 3,6 = 0,65 \text{ МПа.}$$

5.4. Расчет необходимого объема цементного раствора.

В практике производства цементационных работ при сооружении шахтных стволов в обводненных трещиноватых породах расход тампонажных материалов определяют, исходя из условия формирования изоляционной завесы вокруг ствола в виде сплошного цилиндра, высота которого равна общей мощности цементуемых горных пород.

Объем пустот в горных породах, подлежащих заполнению тампонажным материалом, составляет:

$$Q_n = 0,25 \cdot \pi \cdot D_2^2 \cdot H_T \cdot m_T \cdot K_n, \text{ м}^3$$

где

D_2 - внешний диаметр кольцевой цементационной завесы,

$$D_2 = D_1 + 2 \cdot E_T, \text{ м.}$$

Для нашего случая:

$$D_2 = 13,6 + 2 \cdot 4,6 = 22,8 \text{ м.}$$

$$Q_n = 0,25 \cdot 3,14 \cdot 22,8^2 \cdot 25 \cdot 0,01 \cdot 1,35 = 138 \text{ м}^3.$$

Ответы:

$$E_T = 4,6 \text{ м}; D_T = 18,8 \text{ м}; N_T = 7 \text{ скважин}; P_n = 0,85 \text{ МПа}; Q_n = 138 \text{ м}^3.$$

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №6.

Порядок проектирования работ по комплексному методу тампонажа при сооружении вертикального ствола.

Проектирование процесса формирования изоляционных завес производят отдельно по каждому водоносному горизонту. Допускается объединение в одну тампонажную заходку соседних водоносных горизонтов при близких значениях гидростатических напоров и различии коэффициентов проницаемости не более чем в 2,5 раза.

6.1. Расчёт размеров изоляционной завесы вокруг шахтного ствола.

Форма и размеры изоляционной завесы, создаваемой вокруг шахтного ствола, определяются параметрами трещиноватости водоносных горных пород, перепадом давлений в системе "ствол - водоносный горизонт" и структурно-механическими свойствами тампонажного раствора.

Размеры тампонажной завесы определяются по формулам:

- в направлении основной системы трещин

$$R_2 = \frac{\alpha \cdot \delta_{\max} \cdot P_{\varepsilon}}{2 \cdot [P_T]} + R_{np}, \text{ м}$$

- в направлении подчинённой системы трещин

$$R_1 = \varepsilon \cdot (R_2 - R_{np}) + R_{np}, \text{ м}$$

где δ_{\max} - максимально наблюдаемое раскрытие трещин на участке, м;
 $[P_T] = P_T/n$ - допустимая пластическая прочность тампонажного раствора, МПа;

P_T - пластическая прочность тампонажного раствора, МПа;

$n = 5-10$ - коэффициент запаса прочности для тампонажного раствора;

$\alpha = 2-5$ - коэффициент запаса прочности завесы.

Форма изоляционной завесы, создаваемой вокруг ствола в анизотропных трещиноватых горных породах - эллипс с полуосями R_1 и R_2 (см. Лекцию 8.3).

6.2. Расчёт оптимального числа скважин и выбор рациональных мест их заложения.

Максимально возможные контуры распространения тампонажного раствора из одиночной скважины определяются по следующим формулам:

$$r_1 = \frac{\delta_{11} \cdot \Delta P_{mp}}{2 \cdot \tau_0}, \text{ м} \quad \text{и} \quad r_2 = \frac{\delta_{22} \cdot \Delta P_{mp}}{2 \cdot \tau_0}, \text{ м}$$

где r_1 и r_2 - полуоси эллиптического контура распространения раствора, м;

δ_{11} и δ_{22} - средние раскрытия трещин по основному и подчинённому направлениям, м;

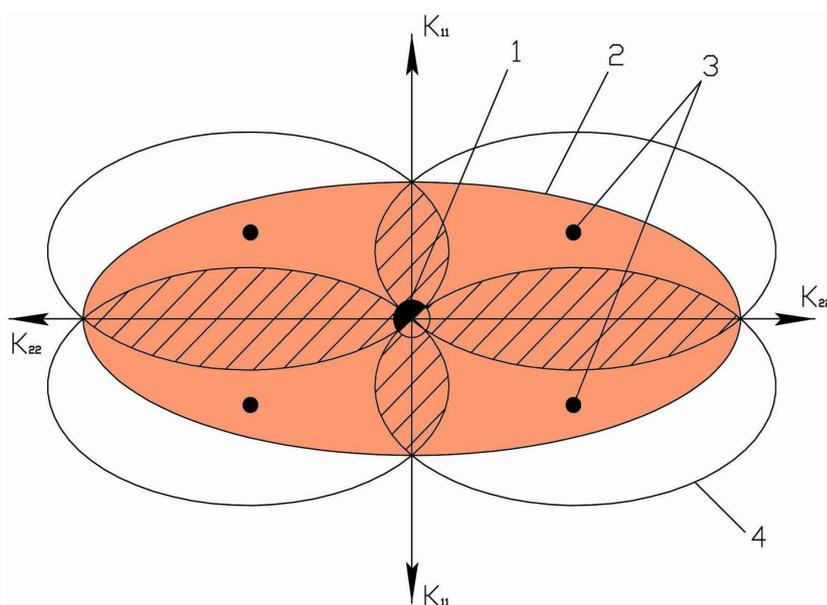
ΔP_{mp} - перепад давления при течении тампонажного раствора в трещинах водоносного горизонта, соответствующий максимально возможному радиусу распространения раствора из одиночной скважины, МПа;

τ_0 - динамическое напряжение сдвига тампонажного раствора, МПа.

Перепад давления ΔP_{mp} определяется следующим образом:

$$\Delta P_{mp} = P_n - \Delta P_m - P_z + P_p, \text{ МПа}$$

где P_n - давление, развиваемое насосом в принятом оптимальном режиме, МПа (Например: цементировочный агрегат ЦА-320, работая на 3-й скорости,



Обозначения:

- 1 - ствол;
- 2 - расчётные размеры завесы вокруг ствола;
- 3 - тампонажные скважины;
- 4 - расчётные контуры распространения раствора из отдельных скважин.

Рис.6.1. Графическое определение числа тампонажных скважин.

обеспечивает подачу 4,4 л/с с давлением нагнетания 18,2 МПа);

ΔP_m - потери давления в нагнетательном трубопроводе, МПа (из табл.);

P_p - гидростатическое давление столба тампонажного раствора.

$$P_p = \rho \cdot g \cdot H / 10^6, \text{ МПа,}$$

где ρ - плотность тампонажного раствора (1180-1230 кг/м³);

$g = 9,8 \text{ м/с}^2$ - ускорение свободного падения;

H - расстояние от устья скважины до кровли тампонажной заходки, м.

Необходимое число точек нагнетания и их рациональное расположение для каждой тампонажной заходки определяют графическим методом, начиная с нижнего водоносного горизонта. Для этого накладывают контуры изоляционных завес из одиночных скважин на общую завесу вокруг ствола (рис.6.1).

Допускается некоторое наложение одиночных контуров друг на друга, ко-

торое должно соответствовать по площади или быть немного больше просветов между ними в пределах общей изоляционной завесы. Полученные таким образом рациональные точки нагнетания для каждой заходки проецируют на поверхность по принятому профилю тампонажных скважин, и группируют их с учётом наиболее эффективного тампонирувания водоносных горизонтов.

С использованием полученных результатов рассчитывают проектный профиль тампонажной скважины на всю глубину тампонажа. Обычно скважины располагают несколькими рядами по простиранию пород. Одновременно определяют рациональные глубины бурения скважин каждого ряда и выбирают скважины, через которые будет осуществляться формирование изоляционной завесы в каждой конкретной тампонажной заходке.

6.3. Расчёт объёмов тампонажного раствора и выбор режимов нагнетания.

Объём тампонажного раствора, необходимый для формирования завесы вокруг ствола, определяют как сумму объёмов раствора из отдельных скважин, так как контуры распространения раствора из них не везде совпадают с общим эллиптическим цилиндром изоляционной завесы вокруг ствола (сл.101). Объём тампонажного раствора, нагнетаемого в отдельную скважину, составляет:

$$V_k = \pi \cdot r_1 \cdot r_2 \cdot M \cdot m_T, \text{ м}^3$$

где M - мощность водоносного горизонта, м;
 m_T - скважность (трещинная пустотность).

Общий объём раствора для формирования изоляционной завесы в отдельной заходке:

$$V_i = \sum_{k=1}^n V_k, \text{ м}^3$$

где n - число точек нагнетания.

Общий объём раствора для выполнения комплекса тампонажных работ вокруг ствола определяется как сумма объёмов, необходимых для изоляции отдельных горизонтов:

$$V_{\text{общ}} = \sum_{i=1}^m V_i, \text{ м}^3$$

где m - число тампонажных заходов.

Давление насоса выбирается по его технической характеристике, чем фактически сразу обуславливается режим нагнетания. В процессе нагнетания давление поднимается постепенно по мере увеличения размеров контура распространения.

Конечное давление нагнетания, обеспечивающее достижение проектных контуров распространения раствора из отдельной скважины, определяют по следующей формуле:

$$P_n = \Delta P_m + \Delta P_{mp} + P_z - P_p, \text{ МПа}$$

Приведенная выше методика расчёта тампонажных работ по КМТ существует также в виде компьютерной программы.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №7.

Просмотр и обсуждение видеоматериалов по бурению стволов с поверхности земли и новых технологий специальных способов строительства горных выработок.

При помощи видеопроектора и компьютера продемонстрировать студентам следующие видеофильмы:

1. Сооружение стволов и скважин большого диаметра специализированным объединением «Спецшахтобурение» - 15 мин.
2. Сооружение выработок в неустойчивых грунтах методом струйной цементации в СП «Регион» (Россия) – 10 мин.
3. Сооружение горизонтальных тоннелей различного сечения при помощи щитовой технологии оборудованием Herrenknecht (Германия) – 3 фильма по 10 мин.

По окончании просмотра каждого видеофильма провести со студентами обсуждение просмотренного материала, выслушать их мнения, ответить на вопросы.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Насонов, И. Д. Технология строительства горных предприятий : специальные способы строительства / И. Д. Насонов, М. Н. Шуплик, В. И. Ресин. - Москва : Недра, 1990. – 350 с.
2. Справочник по сооружению шахтных стволов специальными способами / В. В. Давыдов [и др.] ; под общ. ред. Н. Г. Трупака. – Москва : Недра, 1980 – 392 с.
3. Комплексный метод тампонажа при строительстве шахт : учеб. пособие / Э. Я. Кипко ; под общ. ред. Э. Я. Кипко. – Днепропетровск : НГУ, 2004 – 368с.
4. Справочник инженера-шахтостроителя : в 2-х т. / под общ. ред. В. В. Белого. - Москва : Недра, 1983.
Т. 1. – 439 с.
Т. 2. - 423 с.
5. Правила безопасности в угольных шахтах. - Донецк : Минуглеэнерго, 2016. - 217 с.
6. Пшеничный, Ю. А. Конспект лекций по дисциплине “Технология сооружения горных выработок в сложных горно-геологических условиях (Специальные способы строительства)” / Ю. А. Пшеничный, В. В. Левит. - Донецк : Лебедь, 1997. – 220 с.
7. Левит, В. В. Сооружение стволов бурением : учеб. пособие / В. В. Левит, В. И. Пилипец. – Донецк : Норд-пресс, 2008. – 286 с.

