

КОНСТРУКЦИИ И РАСЧЕТ КРЕПЕЙ И ОБДЕЛОК

*Методические указания по курсовому проектированию
для студентов специальности 21.05.04*

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2020**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
Санкт-Петербургский горный университет

Кафедра строительства горных предприятий
и подземных сооружений

КОНСТРУКЦИИ И РАСЧЕТ КРЕПЕЙ И ОБДЕЛОК

*Методические указания по курсовому проектированию
для студентов специальности 21.05.04*

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2020

УДК 622.281(073)

КОНСТРУКЦИИ И РАСЧЕТ КРЕПЕЙ И ОБДЕЛОК: Методические указания к курсовому проекту / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: *Д.Н. Петров, М.А. Карасев, П.Э. Вербило* СПб, 2020, 42 с.

Рассмотрены основные требования к проекту, рекомендована последовательность изложения и порядок расчетов параметров комбинированных упрочняющих и поддерживающих видов крепи выработок в условиях рудных месторождений. Изложены требования к паспорту крепления горной выработки, который является графической частью курсового проекта.

Составлены для студентов специальности 21.05.04 «Горное дело» специализации «Шахтное и подземное строительства».

Научный редактор проф. *А.Г. Протосеня*

Рецензент канд. техн. наук *М.О. Лебедев* (ОАО «НИПИИ «Ленметроги-протранс»)

© Санкт-Петербургский
горный университет, 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1. Общие положения.....	4
2. Порядок выполнения работы.....	8
Библиографический список.....	17
Приложение 1: Методика расчета рамной трапециевидной крепи, усиленной прогоном на стойках.....	20
Приложение 2: Методика расчета арочных двух- и трехшарнирных крепей.....	27
Приложение 3: Принципы расчета анкерных крепей.....	30
Приложение 4: Пример расчета металлической арочной крепи из СВП.....	37

ВВЕДЕНИЕ

Подземные горные выработки, согласно требованиям отраслевых и межотраслевых правил безопасности [5, 6, 9], должны быть, как правило, своевременно закреплены в соответствии с утвержденными проектами и паспортами крепления.

Паспорт крепления представляет собой важнейший документ, определяющий принятые для данной выработки конструкцию крепи, порядок ее возведения с учетом технологии проходки выработки и расход крепежных материалов.

Каждый горный инженер обязан уметь правильно составить и своевременно оформить паспорт крепления, без которого ведение горных работ запрещено. Правилами безопасности запрещается также ведение горных работ с отступлением от утвержденного паспорта крепления или по ранее действовавшему паспорту при изменении условий проходки.

Работу по составлению паспорта крепления следует начинать с тщательного изучения соответствующих разделов правил безопасности, действующих в данной отрасли горного производства или подземного строительства, с учетом назначения выработки, условий и способов ее проведения и эксплуатации. Особое внимание следует обратить на требования инструкции по составлению паспортов крепления, обычно помещаемой в приложениях к правилам безопасности.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Курсовой проект студент выполняет индивидуально по заданию, выданному преподавателем. В задании указывается назначение и срок службы выработки, вид транспортных средств или другого оборудования, горно-геологические и горно-технические условия проходки и эксплуатации выработки (глубина от поверхности, условия залегания и характеристика свойств горных пород, расположение выработки в массиве пород и относительно других выработок). Способ проходки выработки, рекомендуемые типы крепи, величины смещений пород, и их давление на крепь

могут быть по усмотрению преподавателя заданы студенту или определены им самим при выполнении курсового проекта.

1.2. **Паспорт крепления** подземной выработки состоит из графического материала и пояснительной записки к нему. Паспорт (чертеж) выполняется на листе стандартного формата А3 (420 x 297 мм) или А2 (594 x 420 мм). Пояснительную записку к паспорту следует представить на сброшюрованных листах писчей бумаги формата А4 (297 x 210 мм).

1.3. **Чертеж**, являющийся собственно паспортом, должен быть составлен с такой степенью полноты, чтобы, пользуясь им без пояснительной записки, можно было выполнить работы по креплению выработки. Паспорт, исполняемый в карандаше, туши или на компьютере должен содержать следующие элементы:

А. Стандартный штамп [21] в правом нижнем углу; над ним: Утверждаю: главный инженер _____ дата _____

Б. Поперечное сечение выработки в эксплуатационном состоянии (масштаб 1:50, допустимы 1:40; 1:25; 1:20), размещаемое в левой верхней четверти чертежа; На сечении указать все необходимые размеры в свету, вчерне и в проходке (для податливых видов крепи – размеры после и до осадки), габариты транспортных средств, зазоры, путь или дорожное полотно и т.п., а также структуру, характер залегания, наименование и прочность пород вокруг выработки.

В. Поперечные сечения (одно - два) на призабойном участке, продольный разрез на призабойном и на эксплуатационном участках, а при необходимости и план выработки в стадии проходки (на призабойном участке); следует указать конструкции и размеры временной и постоянной крепи, их отставание от забоя, габариты проходческого оборудования и т.п.

Г. Характерные детали и узлы постоянной и временной крепи в масштабе 1:10...1:5.

Д. Основные характеристики выработки (площади поперечного сечения в свету, вчерне и в проходке, типы электровоза, вагонетки, конвейера, общую характеристику постоянной и временной крепи).

Е. Лаконичные указания о порядке выполнения работ по временному и постоянному креплению выработки и применяемых средствах механизации (в увязке с технологией проходки).

Ж. Таблицу расхода крепежных материалов на 1 м выработки (указать по каждому элементу крепи вид материала, основные размеры, расход на 1 элемент, количество элементов и общий расход на 1 комплект и на 1 м выработки, суммарный расход каждого вида материала – дерева, стали, железобетона и т.д.).

Например, для выработки с арочной пятизвенной крепью из специального профиля СВП-19 при шаге 1,1 м и металлической решетчатой затяжке таблица имеет вид (табл. 1):

Таблица 1

Пример спецификации на расход материала на крепь из СВП-19

Элемент крепи	Материал	Характеристика элементов			Расход, кг	
		Размеры (длина), м	Масса единицы, кг	Число на арку	На 1 арку	На 1 м
Верхняк	СВП-19	3,35	64,32	1	64,32	58,47
Стойка	СВП-19	2,43	46,08	2	92,16	83,78
Стойка короткая	СВП-19	0,60	11,40	2	22,80	20,70
Соединительный замок	Хомуты и планки	-	5,03	4	23,72	21,06
Распорка	Уголок 63х63х6	1,10	7,02	3	21,06	10,14
Затяжка	Решетка из стали Ø3 (60х200)	1100 x 1500	3,6	6	21,60	19,62
				Всего	245,66	223,27

На паспорте при необходимости могут быть приведены и другие сведения графического и текстового характера. Например, при креплении выработки набрызгбетоном, указываются марка,

состав и расход бетона, вид и размеры крупного заполнителя, тип набрызгмашины и т.п.

1.4. Пояснительная записка к паспорту крепления должна содержать исходные данные для проектирования, обоснование принятых решений, расчеты крепи, а в необходимых случаях и расчет параметров горного давления, расчет расхода крепежных материалов. Страницы записки нумеруются цифрой в правом верхнем углу. В начале записки приводится оглавление с указанием страниц соответствующих разделов.

В конце записки должен быть приведен список использованных источников с порядковыми номерами, составленный в полном соответствии с современными правилами библиографии. В тексте записки должны быть приведены ссылки на соответствующий источник (цифра в квадратных скобках), из которого заимствован материал.

На титульном листе записки следует указать: институт и его ведомственную принадлежность (см. титульный лист), наименование документа – пояснительная записка к паспорту крепления (наименование выработки) (курсовой проект); фамилию и инициалы студента; индекс группы; фамилию и инициалы руководителя проекта; дату выполнения работы. Текст пояснительной записки должен быть написан разборчиво и содержать необходимые схемы и графики.

Ориентировочная структура пояснительной записки:

1. Исходные данные для проектирования.
2. Оценка устойчивости выработки и предварительный выбор конструкции крепи.
3. Определение размеров и формы поперечного сечения выработки.
4. Обоснование и выбор расчетной схемы крепи.
5. Расчет крепи.
6. Окончательный выбор конструкции и параметров крепи.
7. Расчет расхода крепежных материалов на 1 м выработки.
8. Список использованных источников.

2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

2.1. На основе исходных данных для проектирования подобрать и изучить специальную литературу на заданную тему (правила безопасности, учебные пособия, справочники, монографии, научно-технические статьи).

2.2. Оценить ожидаемое состояние устойчивости породных обнажений в выработке и сделать предварительный выбор конструкции крепи (вид крепи, как правило, задается). Прогноз устойчивости выработок очень важен. Известно много предложений по этому вопросу. Согласно официально утвержденной методике [16], выделяется 4 категории состояния устойчивости породных обнажений по величине смещений контура. Например, для осадочных пород: 1 категория – состояние устойчивое (до 50 мм); 2 категория – состояние среднеустойчивое (50-200 мм); 3 категория – состояние неустойчивое (200-500 мм); 4 категория – состояние весьма неустойчивое (больше 500 мм).

Для скальных горных пород, где смещения пород на контуре незначительны, оценку устойчивости незакрепленной выработки рекомендуется выполнять по предложенному О.В. Тимофеевым критерию P_B напряженности ее элементов (боков и кровли):

$$P_B = \frac{\sigma \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3}{R_{СЖ} \cdot K_C \cdot K_{дл} \cdot K_y}; \quad (1)$$

где: σ - величина напряжений в нетронутом массиве (задается на основе экспериментальных данных или рассчитывается по формулам $\sigma_z = \gamma \cdot H$ и $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z \cdot \lambda$ соответственно для вертикальных и горизонтальных напряжений);

γ – объемный вес толщи пород до поверхности (0,025 МН/м³);
 λ – коэффициент бокового распора ($\lambda = \mu / (1 - \mu)$); μ – коэффициент Пуассона, который условно следует принять равным 0,4);

K_1 – коэффициент концентрации напряжений на контуре выработки от ее проведения (условно 2,5);

K_2 – коэффициент изменения напряжений от влияния других выработок (1,4 – на одностороннем сопряжении выработок);

K_3 – коэффициент дополнительной концентрации напряжений от воздействия горных ударов или массовых взрывов (1,0 – при их отсутствии, в противном случае по спец. расчетам);
 $R_{СЖ}$ – предел прочности на сжатие породы в образце, МПа;
 K_C – коэффициент структурного ослабления ($K_C \leq 1,0$) (рис. 1);
 $K_{дл}$ – коэффициент длительной прочности породы (1,0 - 0,5);
 K_y – коэффициент упрочнения массива пород анкерованием или инъекционными способами (1,0 - 2,0).

При проектировании выработок коэффициент структурного ослабления K_C вмещающих пород определяется по данным количественного анализа трещиноватости горного массива отдельно для кровли и боков выработки с учетом ее поперечных размеров (B , H – ширина и высота выработки) и среднего расстояния между трещинами l_T (рис. 1).

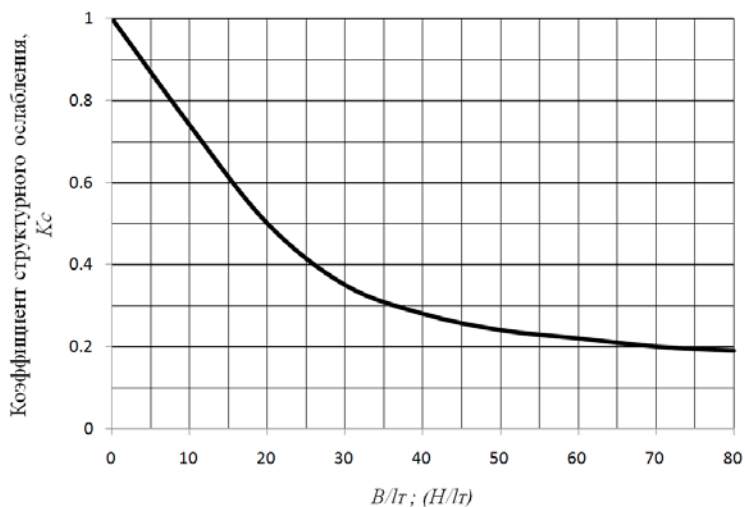


Рис. 1 Зависимость K_C от степени трещиноватости пород:
 B/l_T – для кровли выработки; H/l_T – для боков выработки

В критерии P_B числитель представляет собой расчетные напряжения в рассматриваемом элементе, а знаменатель – расчетное сопротивление породного массива в нем.

По величине критерия P_B выделяется 4 категории устойчивости незакрепленной выработки (табл. 2).

Таблица 2

Классификация устойчивости незакрепленной выработки

Величина P_B	Категория	Состояние устойчивости
меньше 1,0	I	устойчивое
1,0 – 1,29	II	предельное
1,3 – 3,0	III	неустойчивое
больше 3,0	IV	очень неустойчивое

Для прочих условий критерий устойчивости может быть вычислен в соответствии с [7].

На основе задания и прогноза состояния устойчивости выработки назначаются, предварительно, основные конструктивные и технологические параметры крепи (ее толщина, плотность расстановки рам или анкеров, необходимая податливость и конструктивно-технологические пути ее обеспечения и т.п.)

2.3. Размеры поперечного сечения выработки в свету определить по габаритам транспортных средств или оборудования с учетом регламентированных правилами безопасности зазоров и ожидаемой величины смещения пород или деформирования крепи при ее эксплуатации под нагрузкой. Форму поперечного сечения выработки выбирают с учетом необходимых ее размеров, назначения, условий эксплуатации (ожидаемых проявлений горного давления), принятого типа и конструкции крепи.

При определении и выборе формы и размеров поперечного сечения выработки рекомендуется графический способ (вычерчивание схем в масштабе) как наиболее наглядный и удобный. При оформлении чертежа поперечного сечения следует в качестве примера использовать подходящее типовое сечение [19, 20].

2.4. В расчетной схеме крепи или системы массив – крепь должна быть отображена конструктивная схема крепи (с обозначенными на ней размерами) и схема ее нагружения. Сборные крепи из дерева, металла и железобетона наиболее часто

представляют в виде замкнутых или незамкнутых шарнирных рам различной формы.

Прямоугольные и трапециевидные рамы обычно рассматривают как четырехшарнирные стержневые конструкции (рис. 2, а, б), которые при необходимости усиливают стойками с прогоном или стропильной крепью (рис. 2, в, г). Арочные и кольцевые крепи (рис. 3) часто выполняют в виде двух – шести шарнирных конструкций. Кольцевая крепь, кроме того, может быть и бесшарнирной (рис. 3, а).

Схему нагружения чаще всего принимают в виде равномерно распределенной нагрузки сверху и с боков.

Определение величины и характера распределения пассивных нагрузок сопряжено во многих случаях со значительными трудностями из-за значительной их зависимости от условий на контакте крепи с массивом пород; эти условия в свою очередь зависят от ряда случайных факторов (неравномерности толщины и качества забутовки закрепного пространства, качества сборки крепи и т.п.). Поэтому при расчете сборных рамных крепей часто схему нагружения представляют в виде активных нагрузок (распределенных или сосредоточенных), величины которых определяют по одной из теорий горного давления или по результатам экспериментальных исследований.

На рис. 2 и 3 представлены расчетные схемы наиболее распространенных типов крепи, нагруженных равномерно распределенной вертикальной нагрузкой p [$\kappa\Pi a$], и боковой np [$\kappa\Pi a$], где n – коэффициент боковой нагрузки, принимающий значения от 0 до 1, а в отдельных случаях и больше. В литературных источниках приведены расчетные схемы некоторых других типов крепи [2, 3, 4]. Следует иметь в виду, что величина нагрузки на податливые конструкции крепи, как правило меньше, чем на жесткой.

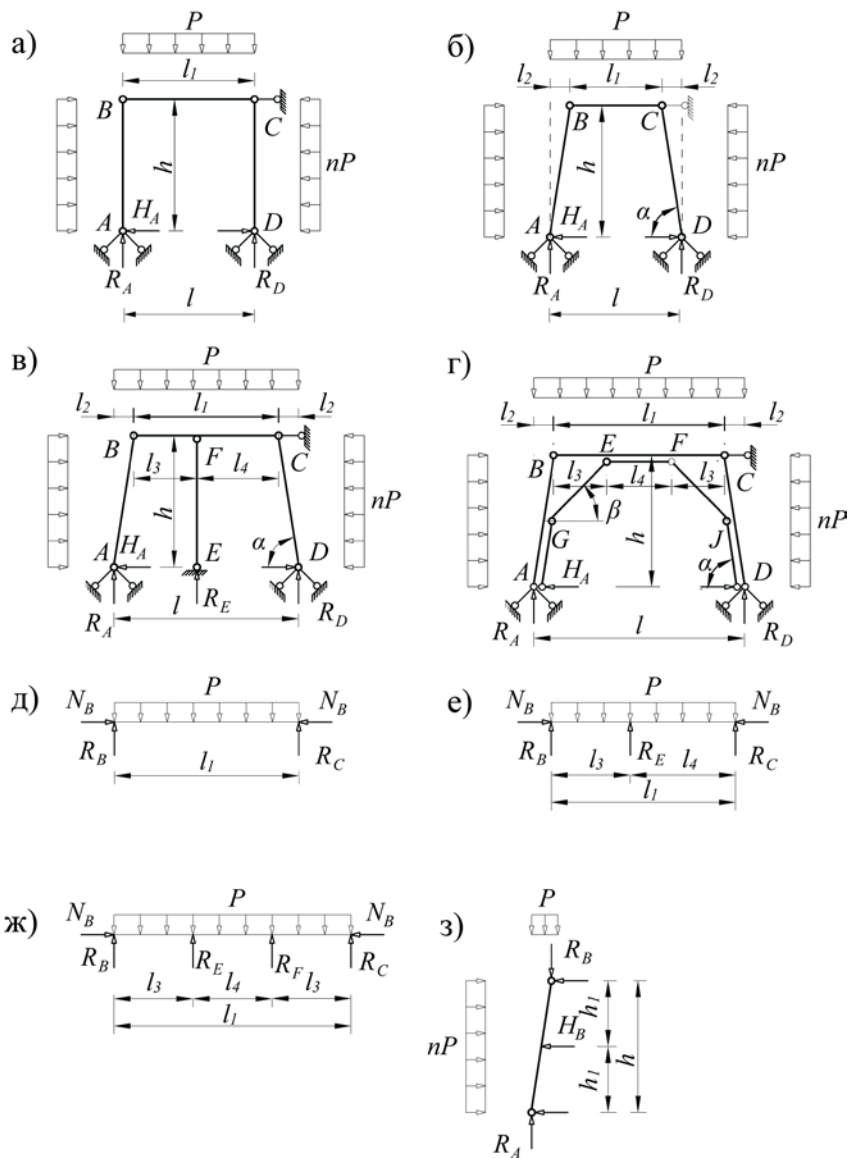


Рис. 2. Расчетные схемы прямоугольных и трапециевидных конструкций крепи

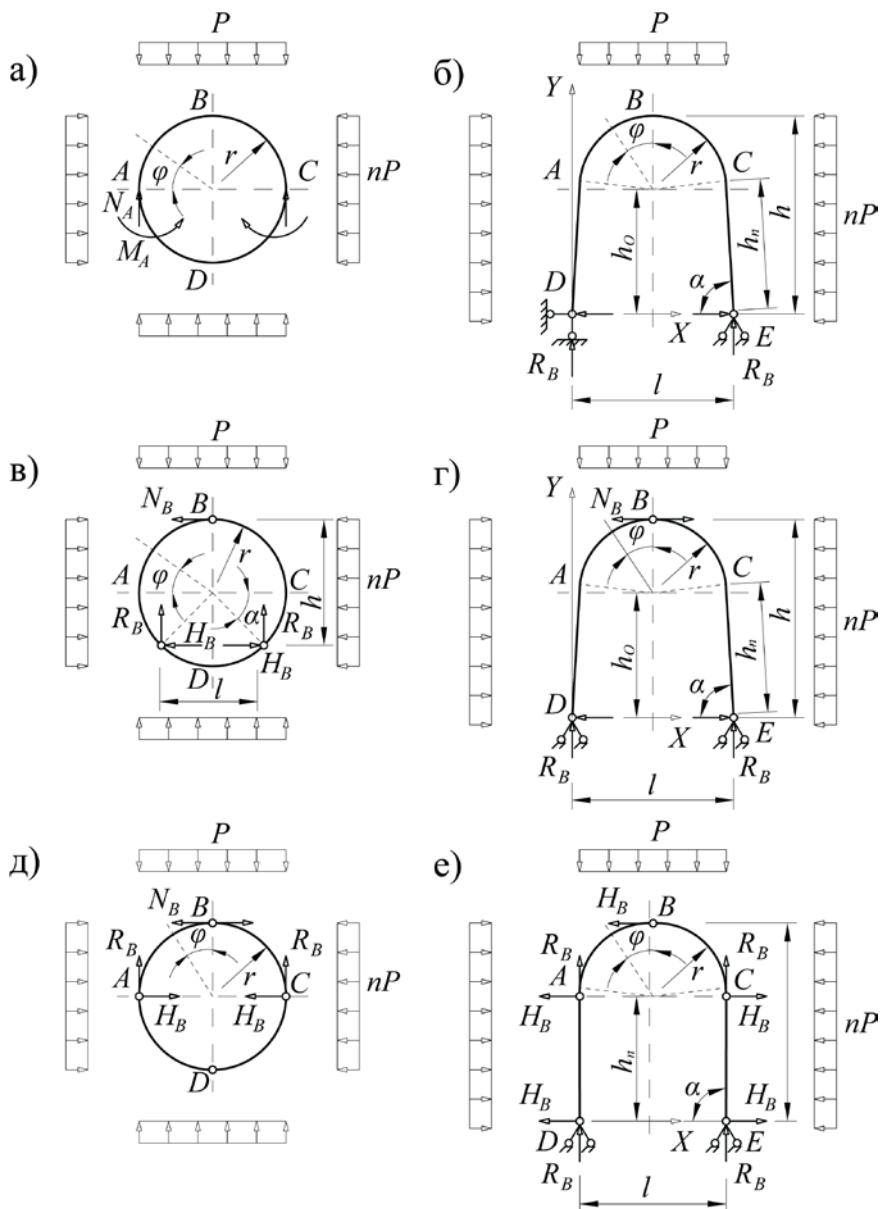


Рис. 3 Расчетные схемы кольцевых и арочных конструкций крепи

2.5. Расчет крепи включает в себя определение на первом этапе усилий в элементах и узлах крепи, а на втором – выбор размеров сечения элементов крепи и их проверку на прочность и устойчивость. Иногда, при заданных размерах сечения элементов, определяют необходимое число рам на 1 м выработки и расстояние между рамами крепи. По результатам расчета усилий в элементах крепи следует построить эпюры изгибающих моментов M [$кН\cdot м$], продольных N [$кН$] и поперечных Q [$кН$] сил. Эпюры позволяют четко выявить характер работы элементов крепи, а также грубые ошибки, если они допущены при расчете.

2.5.1. Методика расчета усилий в элементах прямоугольных или трапециевидных четырехшарнирных (рис. 4) конструкций (рис. 2, а, б) изложена в справочниках по креплению горных выработок [8, 10]. Следует заметить, что в трапециевидных крепях обычных горных выработок принимают угол наклона стоек к горизонту $\alpha=80-85^\circ$, поэтому влияние такого наклона на усилия в стойке и верхняке незначительно и им можно пренебречь, считая крепь как прямоугольную с пролетом l [$м$] (рис. 2). Расчетные формулы при этом упрощаются. В **усиленных конструкциях** трапециевидной крепи (рис. 1, в, г) верхняк рассматривают как двух- или трехпролетную неразрезную балку (рис. 2, д-ж) и определяют усилия в нем с учетом реакции промежуточных опор. Расчетная схема **стойки крепи** по схеме на рис. 2, б представлена на рис. 2, з. Методика расчета усилий в элементах таких крепей приведена в приложении 1.

2.5.2. Методика расчета усилий в элементах кольцевых бесшарнирных, трех- и четырехшарнирных крепей (рис. 5) (соответственно рис. 3, а, в, д) представлена в справочнике [8]. Там же приведена методика расчета пяти- и шестишарнирных кольцевых крепей, а также двух-, трех- и пятишарнирных арочных крепей для частного случая арок с вертикальными прямыми стойками (рис. 3, г). Нами рекомендуется использовать для расчета двух- и трехшарнирных арок (рис. 3, в, г) методику, приведенную в приложениях 2, в которой рассмотрен общий случай арок с наклонными стойками (рис. 3, б, г).

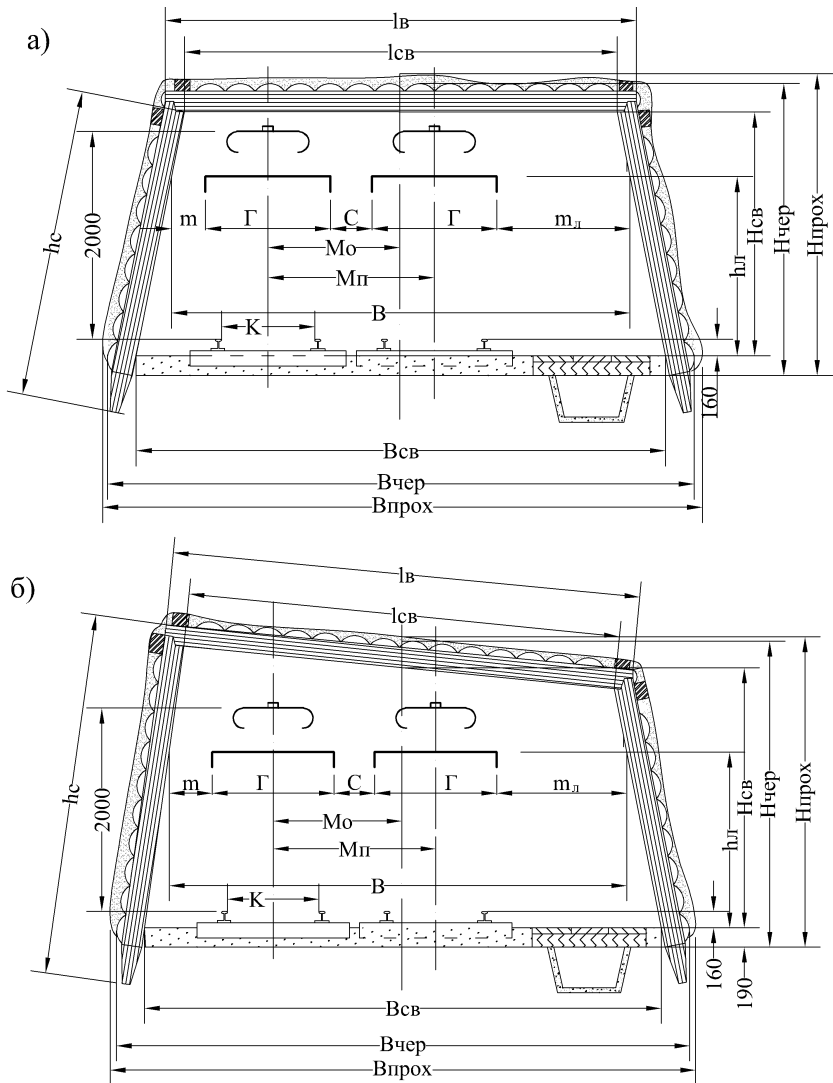


Рис. 4. Конструкция и габаритные размеры трапециевидных деревянных крепей:
 а – симметричная; б – несимметричная.

Следует заметить, что в обычных конструкциях податливой крепи из шахтного специального профиля СВП при соединении элементов внахлестку с помощью двух хомутов узлы податливости не являются шарнирными. Поэтому кольцевую крепь из СВП рассчитывают как бесшарнирное кольцо (рис. 3, а), а арочную – как двухшарнирную арку (рис. 3, б). В узлах податливости некоторых конструкций крепи предусмотрены шарниры. Они должны быть учтены при составлении расчетной схемы.

2.5.3. Расчет параметров анкерной крепи: длины анкеров, расстояния между ними (или плотности расстановки) и несущей способности – начинают с определения размеров зоны возможного обрушения пород вокруг выработки и выбора на этой основе длины и типа анкеров. Рекомендуемая методика расчета параметров металлической, железобетонной и деревянной анкерной крепи изложена в работах [3, 10, 18]. В тех случаях, когда напряжения в массиве пород вокруг выработки недостаточно велики и не вызывают закономерного разрушения пород у контура выработки, но не исключено вывалообразование вследствие трещиноватости массива, размеры зоны возможного обрушения пород могут быть определены по методике, изложенной В.М.Мостковым [7].

2.5.4. Расчет параметров набрызг-бетонной крепи, при ее самостоятельном и совместном применении с анкерной или рамной крепями, может быть выполнен по методике В.М.Мосткова и И.Л.Воллера [7]. Возможно применение других методик расчета набрызг-бетонной и комбинированной крепей.

2.5.5. Расчет монолитных и сборных сплошных бетонных и железобетонных крепей рекомендуется выполнять по методике, изложенной в работах [2, 4].

2.5.6. Расчет элементов крепи, проверку на прочность и устойчивость выполняют в соответствии с указаниями соответствующих глав строительных норм и правил [14-17]. Следует при этом учитывать, что элементы рамной крепи горных выработок, как правило, работают на изгиб и продольное сжатие.

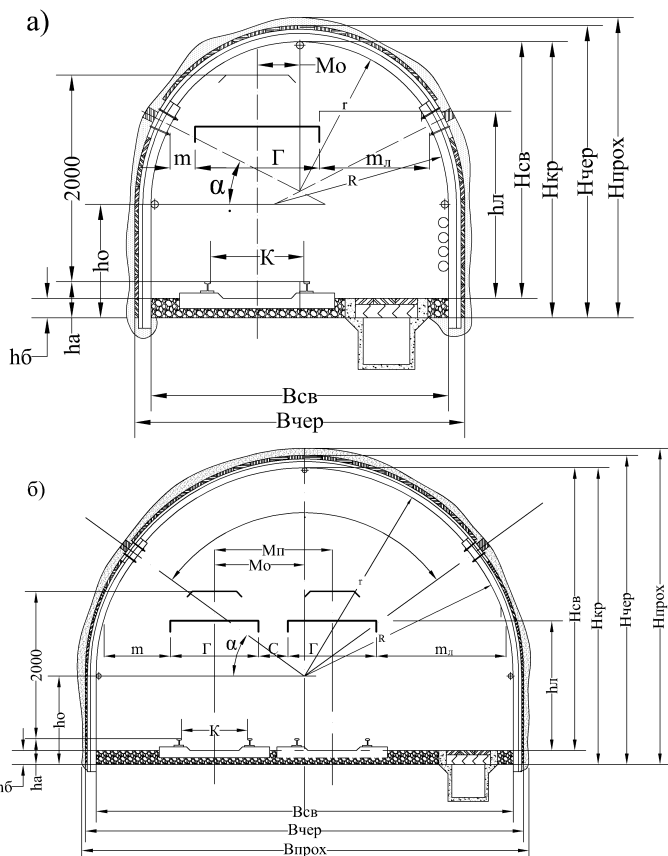


Рис. 5. Конструкции и габаритные размеры арочных крепей из СВП в выработках:
 а – однопутевой, б – двухпутевой.

Предварительный выбор поперечного сечения элемента крепи выполняют обычно по условию его прочности на изгиб, а затем принятое сечение проверяют с учетом продольной силы, а также на устойчивость (продольный изгиб). Коэффициент условий работы крепи в горных выработках принимают согласно указаниям СНиП.

2.7. Расчет расхода крепежных материалов выполняется в пояснительной записке отдельно по элементам крепи и приводится на чертеже в виде таблицы (см. табл. 1).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Баклашов И.В.* Геомеханика. Учебник для вузов. В 2-х т. т.2. Геомеханические процессы. МНТУ, М.: 2004. 249 с
2. *Баклашов И.В., Картозия Б.А.* Механика подземных сооружений и конструкции крепей: Учебник для вузов. 2-е изд. М.: Недра, 1992. 543 с.
3. *Баклашов И.В., Тимофеев О.В.* Конструкция и расчет крепей и обделок. М.: Недра, 1979. 263 с.
4. *Булычев Н.С.* Механика подземных сооружений: Учебник для вузов. 2-е изд. М.: Недра, 1994. 382 с.
5. Единые правила безопасности при разработке рудных, нерудных и россыпных месторождений полезных ископаемых подземным способом (ПБ 03-553-03). М.: «Деан», 2004. 205 с.
6. Инструкция по выбору рамных податливых крепей горных выработок. 2-е изд. ВНИМИ. СПб. 1991. 125 с.
7. *Мостков В.М., Воллер И.Л.* Применение набрызг-бетона при проведении горных выработок. М.: Недра, 1968. 127 с.
8. *Каретников В.Н., Клейменов В.Б., Нуждихин А.Г.* Крепление капитальных и подготовительных выработок. Справочник. М.: Недра, 1989. 571 с.
9. *Протосеня А.Г.* Геомеханика. Учеб. Пособие/ А.Г. Протосеня, О.В. Тимофеев. СПбГГИ(ТУ), СПб, 2008, 117 с.
10. Правила безопасности в угольных шахтах (ПБ 05-618-03). М.: НТЦ «Промышленная безопасность», 2004.
11. *Протосеня А.Г.* Геомеханика. Учебное пособие/ А.Г. Протосеня, О.В. Тимофеев. СПбГГИ(ТУ), СПб, 2008, 117с.
12. Руководство по проектированию подземных горных выработок и расчету крепи. / ВНИМИ, ВНИИОМШС. М.: Стройиздат, 1983. 272 с.
13. *Смирняков В.В.* Рациональная форма металлической крепи подготовительных выработок // Зап. ЛГИ, 1973. Т.64, вып. 1. С. 79-88.
14. СНиП П-23-81. Стальные конструкции: Нормы проектирования. М.: Стройиздат, 1982. 96 с.

15. СНиП 52-01-2003. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения / Госстрой России. М., 2004. 29 с.
16. СНиП II-25-80. Деревянные конструкции: Нормы проектирования. М.: Стройиздат, 1983, 31 с.
17. СНиП II-94-80. Подземные горные выработки: Нормы проектирования. М.: Стройиздат, 1983, 31 с.
18. *Тимофеев О.В.* Методика расчета параметров штанговой крепи при упруго-пластическом деформировании массива пород // Устойчивость и крепление горных выработок / Ленингр. горный ин-т. Л.: 1976 (Межвуз. сб.; Вып.3). С. 30-34.
19. Типовые сечения горных выработок: Т. 1-3, 5. М.: Госгортехиздат, 1960.
20. Унифицированные типовые сечения горных выработок: Т. 1-3. Киев: Будивельник, 1971.
21. ГОСТ 21.101-97. СПДС. Основные требования к проектной и рабочей документации

Методика расчета трапецевидной крепежной рамы, усиленной прогоном на стойках

1. Выбор расчетной схемы

Конструкция деревянной или металлической трапецевидной неполной крепежной рамы при соединении боковых стоек с верхняком “влапу” может быть представлена четырехшарнирной конструктивной схемой (рис. П1.1). При усилении ее верхняков прогоном на стойках в конструктивную схему включают среднюю стойку. Благодаря прогону шаг расстановки этих стоек может быть больше шага расстановки рам.

Нагрузку на крепь обычно принимают равномерно-распределенной: сверху p (кПа), сбоку $p \cdot n$ (кПа), где n – коэффициент бокового давления ($n \leq 1$).

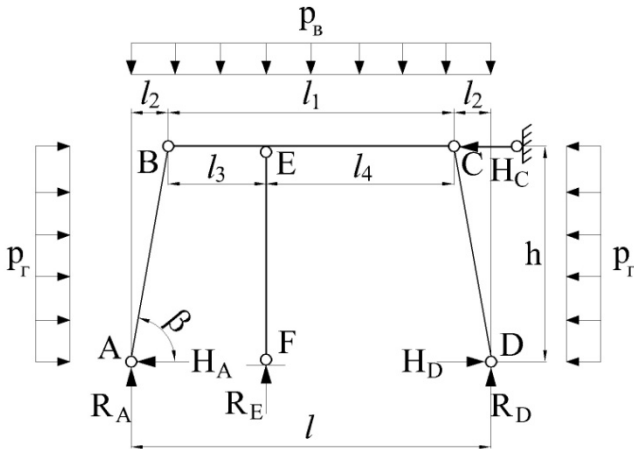


Рис.П1.1 Расчетная схема трапецевидной усиленной крепи.

Верхняк рассматривается как неразрезная двухпролетная балка, имеющая в общем случае неравные пролеты l_3 и l_4 . Представим их соотношением коэффициентом $m=l_4 / l_3$.

Боковые стойки рассматриваются как однопролетные свободно опертые балки с пролетом h .

Верхняки и стойки подвергаются поперечному изгибу и продольному сжатию.

2. Определение усилий в элементах крепи. (в расчете на 1 м длины выработки)

Опорные реакции:

- в точке В

$$R_B = \frac{pl_3}{2} \left[1 - \frac{1+m^3}{4(1+m)} \right]; \quad (\text{П1.1})$$

- в точке С

$$R_C = \frac{pl_4}{2} \left[1 - \frac{1+m^3}{4m^2(1+m)} \right]; \quad (\text{П1.2})$$

- в точке Е (F)

$$R_E = \frac{pl_3}{2} \left[1 + m + \frac{1+m^3}{4m} \right]. \quad (\text{П1.3})$$

Проверка:

$$pl_1 \simeq R_B + R_C + R_E, \quad (\text{П1.4})$$

если условие выполняется, то расчет продолжается.

Изгибающие моменты в верхняках и боковых стойках:

- на крайних опорах $M_B = M_C = 0$;

- на средней опоре верхняков

$$M_E = -\frac{pl_3^2}{8} \times \frac{1+m^3}{1+m}; \quad (\text{П1.5})$$

- в левом полупролете верхняков

$$M_{\max}^{\text{л}} = \frac{pl_3^2}{8} \left[1 - \frac{1+m^3}{4m^2(1+m)} \right]^2, \quad (\text{П1.6})$$

координата максимального момента в пролете

$$x_{\max}^{\text{л}} = \frac{R_B}{p}; \quad (\text{П1.7})$$

- максимальный момент в правом полупролете верхняков

$$M_{\max}^{\text{пр}} = \frac{pl_4^2}{8} \left[1 - \frac{1+m^3}{4m^2(1+m)} \right]^2, \quad (\text{П1.8})$$

- координата максимального момента в пролете

$$x_{\max}^{\text{пр}} = \frac{R_C}{p}; \quad (\text{П1.9})$$

- изгибающий момент в стойках под действием боковых сил

$$M_{\text{ст}} = \frac{np h^2}{8}, \quad (\text{П1.10})$$

где n – коэффициент бокового давления.

Продольные силы:

- в верхняках

$$N_{\text{верх}} = \frac{nph \sin \alpha}{2} \approx \frac{nph}{2}, \quad (\text{П1.11})$$

т.к. $\alpha=80 \div 85$, то с достаточной для инженерных расчетов точностью можно считать $\sin \alpha = 1$.

- в стойках

$$N_{\text{ст}}^B = R_B; N_{\text{ст}}^C = R_C; N_{\text{ст}}^E = R_E. \quad (\text{П1.12})$$

Эпюры изгибающих моментов и продольных сил представляются в удобных геометрических и силовых масштабах (рис. П1.2).

3. Определение конструктивных параметров крепи

Прочностной расчет крепи выполняют по условию, чтобы напряжения в элементах крепи не превышали расчетного сопротивления материала.

$$\sigma = \frac{N}{F_{\text{np}}} \pm \frac{M}{W_{\text{np}}} \leq R_p. \quad (\text{П2.13})$$

где: F_{np} – площадь поперечного сечения рассчитываемого элемента;

W_{np} – момент сопротивления рассчитываемого элемента в рассматриваемом сечении;

R_p – расчетное сопротивление материала.

При расчете крепи удобно вначале принять $R_{\text{изг}}$ и размеры сечения элемента (для дерева $F = 0,785d^2$ и $W = 0,1d^3$, для металла – номер профиля, F и W из справочных таблиц, а затем найти плотность расстановки рам.

Плотность расстановки рам (шт/м):

$$n_p = \left(\frac{N}{F} \pm \frac{M}{W} \right) \frac{1}{R_{\text{сж}}}. \quad (\text{П2.14})$$

При этом расчетный **шаг расстановки** рам составит, м

$$s = \frac{1}{n_p}. \quad (\text{П2.15})$$

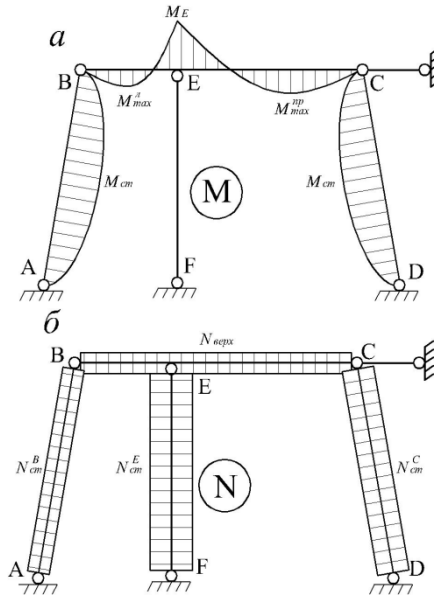


Рис П1.2. Эпюры изгибающих моментов (а), продольных сил (б).

Следует затем определить n_p^b по прочности **боковых стоек** и если она будет отличаться от n_p , больше, чем на 10%, рационально изменить диаметр стоек в меньшую или большую сторону и проверить результат по формулам (П1.14) или (П1.15). Шаг рам округляют в меньшую сторону с кратностью 5 или 10 см.

Средние стойки работают только на продольное сжатие. Плотность и шаг их расстановки составляет соответственно

$$n_p^c = \frac{N_E}{FR_{сж}} \text{ [шт/м]};$$

$$S_c = \frac{1}{n_p^c} \text{ [м]}.$$
(П1.16)

Шаг средних стоек принимают кратным шагу рам.

Прогон под верхняками, как правило, устанавливают по технологическим соображениям с отставанием от забоя и принимают его длину 3-5 м, кратно шагу нескольких рам. Расчетная схема прогона (рис. П1.3) обычно, представляет собой

многопролетную балку, нагруженную сверху сосредоточенными силами от верхняков рам.

$$P_B = \frac{N_E}{n_p} \quad (\text{П1.18})$$

Для прочностного расчета прогона определяют величину максимального изгибающего момента $M_{пр}$ (табл. П1.1) и потребный момент сопротивления

$$W_{\Pi} = \frac{M_{пр}}{R_{изг}}, \quad (\text{П1.19})$$

а по его величине находят необходимый номер прокатного профиля или диаметр прогона из дерева

$$d = \sqrt[3]{10W_{\Pi}}. \quad (\text{П1.20})$$

Затем следует проверить прочность прогона на **смятие** в точке контакта со средней стойкой:

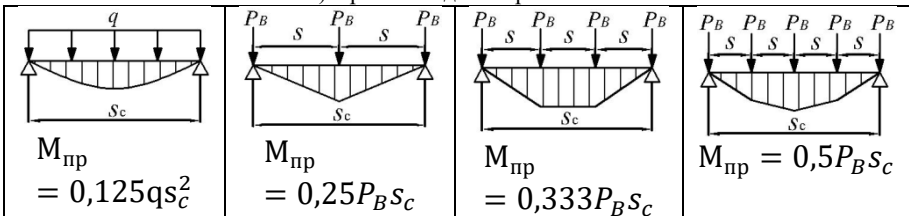
$$\sigma_{см} = \frac{P_B}{F_c} \times \frac{S_c}{S_p} \leq R_{см}, \quad (\text{П1.21})$$

где: P_B – нагрузка на прогон от одного верхняка; F_c – площадь поперечного сечения стойки; S_c и S_p – шаг средних стоек и рам, соответственно; $R_{см}$ – сопротивление смятию поперек волокон [7, 13].

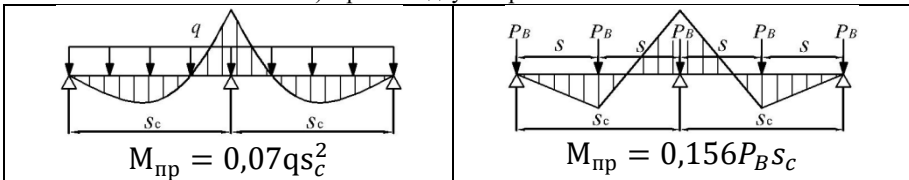
Таблица П1.1

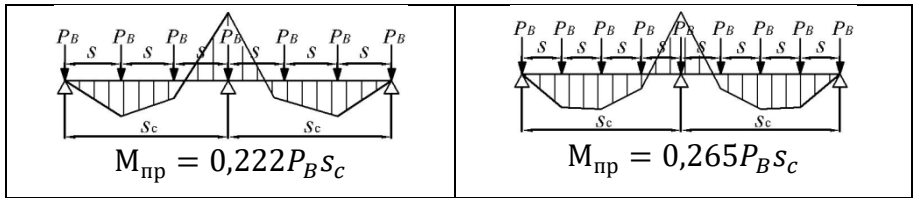
Величины максимальных изгибающих моментов в прогоне и эпюры их изменения.

а) Прогон с одним пролетом.



б) Прогон с двумя пролетами.





в) Прогон с тремя пролетами.

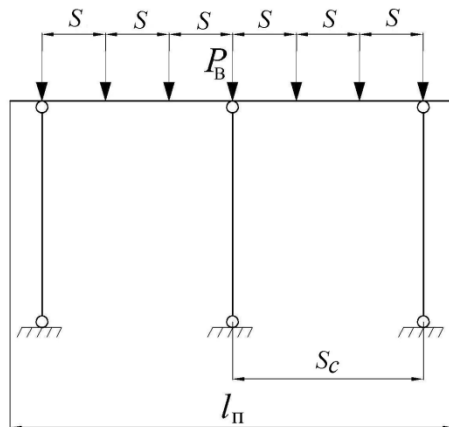
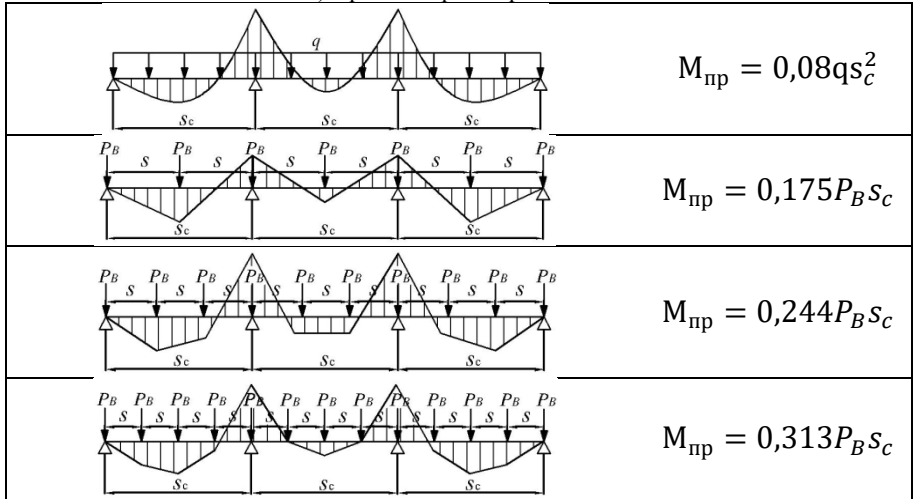


Рис. III.3 Расчетная схема прогона на стойках под верхняками.

По результатам расчета нужно начертить в наглядном масштабе поперечное сечение, фрагмент продольного разреза выработки, узел соединения верхняка и стойки рамы, нижнюю часть стойки.

Методика расчета усилий в элементах арочной двух- и трехшарнирной крепи (рис. 2, б, г).

Арочная жесткая и податливая крепи обычно рассматриваются как двухшарнирная арка (рис. 2, б), являющаяся один раз статически неопределимой системой. В общем случае прямолинейные участки стоек имеют наклон α к горизонтальной плоскости.

Реакции в опорных шарнирах:

вертикальная

$$R_B = 0,5pl; \quad (\text{П2.1})$$

горизонтальная (неизвестная)

$$H_X = p \cdot X_1, \quad (\text{П2.2})$$

где: p – величина распределенной нагрузки;

X_1 – перемещение нижнего шарнира от единичной нагрузки, м.

Для определения неизвестной величины распора H_X воспользуемся методикой В.В.Смирнякова [13] (допустимо использование и других методик расчета двухшарнирных арок).

$$X_1 = \frac{A+nB}{2C}, \quad (\text{П2.3})$$

где:

$$A = \frac{\sin 2\alpha}{2} \left(\frac{h_{\Pi}^4}{4} \cos \alpha - \frac{lh_{\Pi}^3}{3} - \frac{kr^3}{2} \right) - \alpha \frac{kr}{2} \left(\frac{l^2}{2} - r^2 \right) - r^2 \sin \alpha \left(\frac{l^2}{4} - \frac{r^2}{3} \sin^2 \alpha \right), \quad (\text{П2.4})$$

$$B = \sin^2 \alpha \left(\frac{h_{\Pi}^4}{4} \cdot \cos \alpha - \frac{r^4}{3} \right) + r^2 \sin \alpha \left(3k^2 + \frac{3}{2} krcos \alpha + r^2 \right) + \alpha kr \left(k^2 + \frac{3}{2} r^2 \right), \quad (\text{П2.5})$$

$$C = \alpha k^2 r + 2kr^2 \sin \alpha + \frac{r^3}{2} \left(\alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) + \frac{h_{\Pi}^3}{3} \sin^2 \alpha, \quad (\text{П2.6})$$

$$k = h_{\Pi} \sin \alpha - r \cos \alpha; \quad (\text{П2.7})$$

$$l = 2(rs\sin\alpha + h_{\Pi}\cos\alpha). \quad (\text{П2.8})$$

Изгибающий момент M и продольная сила N в разных сечениях:

прямолинейного участка DA

$$M_{DA} = [-y^2 0,5(n + \text{ctg}^2\alpha) + y(0,5l\text{ctg}\alpha + X_1)]p; \quad (\text{П2.9})$$

$$N_{DA} = [-y\cos\alpha(1 - n) + 0,5l\sin\alpha - X_1\cos\alpha]p; \quad (\text{П2.10})$$

криволинейного участка AB

$$M_{AB} = (0,5lx - 0,5x^2 - 0,5ny^2 + X_1y)p; \quad (\text{П2.11})$$

$$N_{AB} = [(x - 0,5l)\sin\phi - (ny - X_1)\cos\phi]p, \quad (\text{П2.12})$$

где: для криволинейного участка $x = 0,5l - r\sin\phi$; $y = k + r\cos\phi$, а для прямолинейного $x = y\text{ctg}\alpha$.

Сечения с экстремальными напряжениями на криволинейном участке имеют место при $\phi_1 = 0$ (ключевое сечение) и при

$$\phi_2 = \arccos \frac{nk - X_1}{r(1-n)}. \quad (\text{П2.13})$$

Опасное сечение на прямой части стойки находится из условия

$$\frac{dM_{DA}}{dy} = 0, \text{ откуда} \\ y_0 = (0,5l\text{ctg}\alpha + X_1): (n + \text{ctg}^2\alpha). \quad (\text{П2.14})$$

Поперечная сила на участках DA и AB в произвольных сечениях:

$$Q_{DA} = [-y(\text{ctg}\alpha\cos\alpha + n\sin\alpha) + 0,5l\cos\alpha + X_1\sin\alpha]p; \quad (\text{П2.15})$$

$$Q_{AB} = [(0,5l - x)\cos\phi - (ny - X_1)\sin\phi]p. \quad (\text{П2.16})$$

Для построения эпюр изгибающих моментов и продольных сил следует задать не меньше 6-8 точек на длине полуарки и вычислить для них M , N и Q , сведя вычисления в таблицу.

При арочной крепи с вертикальными стойками ($\alpha = 90^\circ$) формулы существенно упрощаются.

Арочная трехшарнирная крепь (рис. 2, г) – система статически определимая. Реакции в опорных шарнирах: вертикальная R_B – см. формулу (П2.1); горизонтальная

$$H = \frac{np\hbar}{2} - \frac{pl^2}{8h}. \quad (\text{П2.17})$$

Усилие в ключевом шарнире B

$$N_B = \frac{np\hbar}{2} + \frac{pl^2}{8h}. \quad (\text{П2.18})$$

Изгибающий момент, продольная и поперечная силы в любой точке полуарки определяются, как и в двухшарнирной арке, для прямолинейного участка DA по формулам (П2.9), (П2.10) и (П2.15), а для криволинейного участка по формулам (П2.11), (П2.12) и (П2.16), в которую вместо X_1 следует подставлять значение H/p из формулы (П2.17). Результаты расчета следует представить в виде эпюр M , N и Q .

По полученным усилиям и моментам в элементах конструкции, проводится проверка их по несущей способности.

$$\sigma = \frac{N}{F_{np}} \pm \frac{M}{W_{np}} \leq R_p. \quad (\text{П2.19})$$

где: F_{np} – площадь поперечного сечения рассчитываемого элемента;

W_{np} – момент сопротивления рассчитываемого элемента в рассматриваемом сечении;

R_p – расчетное сопротивление стали.

Принципы расчета анкерных крепей

1. Выбор расчетной схемы

Анкерную крепь следует рассматривать как средство упрочнения и повышения устойчивости массива пород вокруг выработки. Основными параметрами такой крепи принято считать: **длину анкеров, расстояние между ними, расчетную несущую способность анкера** (стержня и замка), а также величину начального натяжения (для натяжных замковых анкеров). Для расчета параметров анкерной крепи особенно важно знать размеры и конфигурацию зон неупругих деформаций или возможного обрушения пород, так как это определяет выбор расчетной схемы. Характер работы такой крепи обычно представляют двумя схемами.

Схема I - анкеры прикрепляют породу, расположенную в пределах зоны возможного обрушения, к устойчивой зоне массива и рассчитывают на восприятие давления, вызванного весом пород этой зоны в кровле и боках (рис. ПЗ.1). Замковые части анкеров заглубляют в устойчивую зону массива на 0,3-0,5 м.

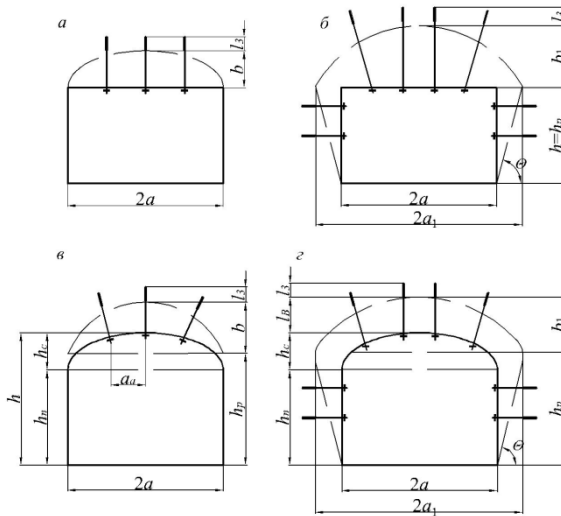


Рис. ПЗ.1. Схема I к расчету анкерной крепи: а и в - при устойчивых боках, б и г - при неустойчивых боках.

Схема II - анкеры скрепляют различно деформируемые зоны, слои или структурные элементы массива пород вокруг выработки, формируя укрепленную зону в виде плиты, свода, арки или кольца, способную воспринять горное давление (рис. ПЗ.2).

Первая схема работы анкерной крепи наиболее проста и достаточно надежна, но она упрощает действительный характер работы такой крепи. Схема применяется при сравнительно небольших размерах зоны возможного обрушения пород (обычно до 2-2,5 м). Вторая схема работы анкерной крепи более полно отражает действительный характер ее работы, но требует большего количества данных о свойствах массива пород и сложнее в расчетном отношении. Эта схема используется при невозможности применения первой, т.е. когда размеры зоны возможного обрушения пород превышают приемлемую для практики длину анкеров.

Для оценки возможности возникновения, а также размеров зоны возможного обрушения вначале определяют степень устойчивости горной выработки.

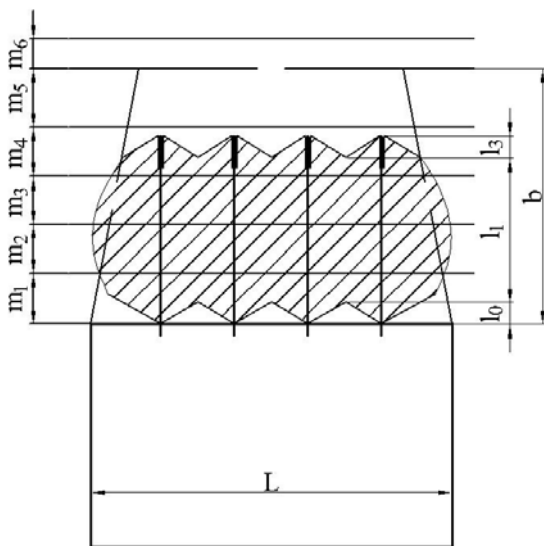


Рис. ПЗ.2. Схема II к расчету анкерной крепи.

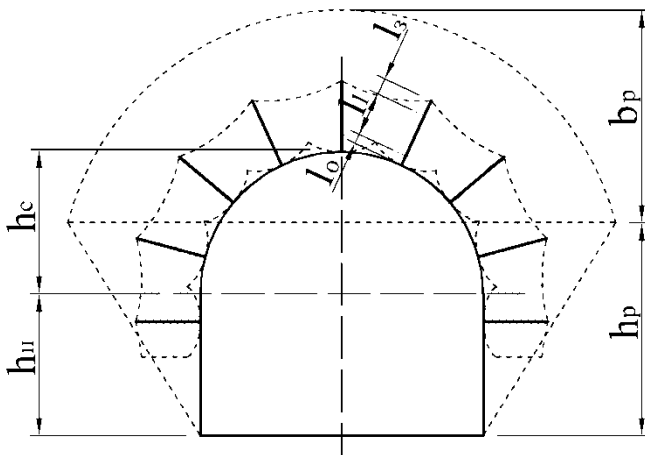


Рис. ПЗ.2. Схема II к расчету анкерной крепи (продолжение)

2. Оценка устойчивости и зоны возможного обрушения пород

Состояние устойчивости в скальных и полускальных породах можно оценить **критерием напряженности** элементов выработки (кровли и боков), выражающим соотношение в них величин расчетных напряжений (числитель) и расчетной прочности (знаменатель) (см. раздел 2.2).

Массив горных пород вокруг выработки вследствие его трещиноватости и слоистости согласно теории М.М. Протодяконова может рассматриваться как среда **условно сыпучая**, поэтому для II...IV категорий устойчивости (см. табл.2.1), предполагается формирование зоны возможного обрушения в виде свода параболического очертания только в кровле при устойчивых боках (см. рис. ПЗ.1, а и в) или в кровле и боках (см. рис.ПЗ.1, б и г).

Высота зоны возможного обрушения (ЗВО) при **устойчивых боках** в выработке прямоугольного сечения:

$$b = \frac{a}{fk_c}, \quad (\text{ПЗ.1})$$

где: b – высота свода обрушения, м; a – полупролет выработки, м; f – коэффициент крепости пород по Протодяконову ($f=R_{сж}/10$,

если $R_{см}$ выражено в МПа); K_c – коэффициент структурного ослабления массива за счет трещиноватости и слоистости.

При сводчатой выработке высота ЗВО:

$$l_b = b - 0,5h_c, \quad (ПЗ.2)$$

где: h_c – высота подъема свода выработки, м.

При **неустойчивых боках** (см. рис. ПЗ.1, b и c) высота ЗВО в выработке прямоугольного сечения:

$$b_1 = \frac{a_1}{fk_c}, \quad (ПЗ.3)$$

где: a_1 – полупролет ЗВО, равный

$$a_1 = a + c = a + h_p \operatorname{ctg} \frac{90+\phi}{2}, \quad (ПЗ.4)$$

h_p – расчетная высота стены выработки

$$h_p = h_n + 0,5 h_c, \quad (ПЗ.5)$$

h_n – высота стены до пяты свода; h_c – высота подъема свода; ϕ – условный угол внутреннего трения пород в боку выработки, определяемой по зависимости

$$\phi = \operatorname{arctg}(fk_c). \quad (ПЗ.6)$$

При сводчатой выработке высота ЗВО:

$$l_b = b_1 - 0,5h_c \quad (ПЗ.7)$$

По найденной величине ЗВО определяют, с учетом схем на рис. ЗП.1, параметры анкерной крепи.

3. Расчет параметров анкерной крепи.

Для металлических анкеров с замками клино-щелевого и распорных типов **предельная несущая способность замков клинощелевого и распорного типов** (при незастопоренных сегментах) могут быть выражена единой формулой

$$T = m \cdot S' \cdot R_s \cdot (\sin \alpha + f_{тр}), \quad (ПЗ.8)$$

где: m – число распорных сегментов; S' – площадь контакта сегмента с породой или головкой анкера; R_s – удельное сопротивление породы на вдавливание или стали на смятие; $\alpha = 2 \div 5^\circ$ – угол наклона граней клиновой головки к продольной оси; $f_{тр}$ – коэффициент трения (при клино-щелевом замке – металл по породе, при распорном – металл по металлу).

Площадь контакта с породой

$$S'_n = l_w l_p k_s, \quad (ПЗ.9)$$

где: $l_{\omega} = 0,5d_r \frac{\pi\omega}{180^\circ}$ - наибольшая ширина поверхности контакта; l_p - его высота: при клино-щелевом замке $l_p = e / \operatorname{tg} \alpha$ и $l_p - l_r$ при распорном замке; k_s — коэффициент формы поверхности контакта (при параболической $k_s = 0,66$, а при прямоугольной $k_s = 1$). Здесь d_r - диаметр гильзы замка; ω - угол контакта гильзы с породой; e - глубина внедрения элемента замка в породу. При клино-щелевом замке $e = 0,5 (t_1 + d_r - n - d_c)$, а при распорном $e = 0,5 (t_1 + 2c - d_c)$, (t_1 - расчетная толщина клина; n - ширина щели в анкере; d_c - диаметр скважины; c - расчетная толщина гильзы замка).

Сопротивление породы вдавливанию определяют экспериментально, но можно принять через предел прочности породы на одноосное сжатие

$$R_{\text{вд}} = k_{\text{вд}} R_{\text{сж}}, \quad (\text{П3.10})$$

где: $k_{\text{вд}}$ - коэффициент пропорциональности. Для хрупких пород $k_{\text{вд}} = 5 \div 7$, для упруго-пластичных пород $k_{\text{вд}} = 3 \div 4$; для трещиноватых и нарушенных пород $k_{\text{вд}} = 1,5 \div 3$.

При прочных породах (больше 60 МПа) несущая способность замка может зависеть и от сопротивления стали на смятие. В таком случае следует определить по конструктивным размерам замка S'_m и, приняв сопротивление смятию стали 180 и 250 МПа соответственно для стали марок Ст. 3 и Ст. 5, проверить по формуле несущую способность замка по смятию его элементов.

Расчетная нагрузка на замок

$$P_3 = T \zeta_1 m_y, \quad (\text{П3.11})$$

где: T - предельная несущая способность, определяемая по формуле (3.8), m_y - коэффициент условий работы (в сухих скважинах равен 0,8-0,9, во влажных - 0,7-0,8); ζ_1 - коэффициент длительной прочности породы (ориентировочно равен 1 для хрупких пород, 0,7-0,9 - для слабопластичных, 0,5-0,7 - для пластичных).

Расчетная несущая способность стержня анкера

$$P_c = F_{\text{нт}} R_p m_y, \quad (\text{П3.12})$$

где: $F_{\text{нт}}$ - площадь ослабленного сечения стержня; R_p - расчетное сопротивление материала растяжению (для арматурной стали класса А-I, А-II и А-III соответственно равно 210, 270 и 340 МПа).

Для *железобетонных и сталеполимерных анкеров* расчетная прочность закрепления замковой части анкера в скважине будет зависеть от прочности заделки стержня в бетоне и от сопротивления его сдвигу относительно стен скважины:

$$P'_3 = \pi d_c \tau_1 l_3 k_l m'_y, \quad (\text{ПЗ.13})$$

$$P''_3 = \pi d_{\text{СКВ}} \tau_2 l_3 m''_y, \quad (\text{ПЗ.14})$$

где: d - диаметр арматурного стержня или скважины; $\tau_{1,2}$ - удельная прочность на сдвиг стержня в бетоне или бетонной пробки в скважине; l_3 - расчетная длина заделки; k_l - поправочный коэффициент на длину заделки; m'_y - коэффициент условий работы замка (0,9 при сухой скважине, 0,7-0,8 при влажной).

Экспериментально установлено, что при длине заделки 10 см арматурного стержня периодического профиля в цементном бетоне класса В30 расчетного возраста (обычно 28 сут) $\tau_1 = 10$ МПа, а в эпоксидном полимербетоне суточного возраста - 20 МПа. С увеличением длины заделки до 20, 30 и 40 см прочность закрепления снижается, что учитывается поправочным коэффициентом $k_l = 0,65; 0,58$ и $0,55$ соответственно для цементного бетона и $0,75, 0,68$ и $0,65$ для полимербетона. Удельная прочность на сдвиг по стенке скважины τ_2 по имеющимся опытным данным составляет 1,5-2 и 1-1,2 МПа для известняка и сланца при цементном бетоне и соответственно 3-4 и 2-2,5 МПа при полимербетоне. Расчетная несущая способность стержня анкера определяется по формуле, приведенной выше.

В качестве расчетной нагрузки на анкер P_a принимается меньшее из значений, полученных по формулам (ПЗ.12-ПЗ.14).

Длину анкеров и их число определяют по одной из двух указанных выше расчетных схем. Рассмотрим только первую из них из-за ограниченности объема данной работы. Если глубина зоны возможного обрушения пород l_g определена, то полную длину анкера находят по формуле

$$l_{\text{ст}} = l_{\text{в}} + l_3 + l_{\text{п}}, \quad (\text{ПЗ.15})$$

где: $l_3 = 30-50$ см - величина заглубления штанги в устойчивую зону массива пород; $l_{\text{п}} = 5-20$ см - длина выступающей из скважины части анкера, зависящая от ее конструкции и толщины опорно-поддерживающего элемента.

Число анкеров на 1 м² кровли (плотность расстановки n_s)

$$n_s = \frac{l_b \gamma n_n}{P_a}, \quad (\text{ПЗ.16})$$

где: γ - средневзвешенный объемный вес пород в пределах зоны возможного обрушения; P_a - расчетная несущая способность анкера; $n_n \geq 1,2$ коэффициент перегрузки. При квадратной сетке расстановки анкеров **расстояние между ними**

$$a_a = \frac{P_a}{\sqrt{l_b \cdot \gamma \cdot n_n}}. \quad (\text{ПЗ.17})$$

Расстояние между анкерами в ряду не рекомендуется принимать больше их длины. Обычно принимают $a_a \approx 0,7 \cdot l_a$.

При неустойчивых боках выработки предполагается образование в них призм сползания, ширину которых определяют по одной из гипотез горного давления (например, П. М. Цимбаревича) с учетом структурного ослабления массива. Замковые части анкеров и в этом случае располагают за пределами призмы сползания на величину не меньше 30 см. Суммарная их несущая способность должна обеспечить равновесие призмы сползания с учетом ее пригрузки на верхней грани.

Пример расчета металлической арочной крепи из специального профиля для двухпутевой выработки

Расчетная схема крепи в виде двухшарнирной арки с наклонными стойками $\alpha = 80^\circ$, нагруженной сверху равномерно распределенной нагрузкой $p = 80 \text{ кПа}$ и с боков $np = 40 \text{ кПа}$ ($n=0,5$), представлена на рис. 6, а. Вначале определим усилия в арке от внешней нагрузки. Для определения горизонтальной реакции H_X определим X_1 по формуле (П2.1) и значения величин, входящих в выражения A , B и C – формулы (П2.4) – (П2.6). При $\alpha = 80^\circ$ (в радианах $\alpha = 80:57,3 \approx 1,4$) получим: $\sin \alpha = 0,985$; $\sin^2 \alpha = 0,97$; $\sin^3 \alpha = 0,955$; $\sin 2 \alpha = 0,342$; $\cos \alpha = 0,174$; $k = 0,61$ – формула (П2.7); $k^2 = 0,372$; $l = 4,682 \text{ м}$ – формула (П2.8); $r^2 = 4,84 \text{ м}^2$; $r^3 = 10,65 \text{ м}^3$; $r^4 = 23,40 \text{ м}^4$; $l^2 = 21,9 \text{ м}^2$. Подставляя эти значения в формулы (П2.4) – (П2.6) получим: $A = -25,22$; $B = 37,16$; $C = 15,77$. Следовательно $X_1 = -0,21 \text{ м}$.

Исследуя зависимость X_1 от n , получим при n равном 0; 0,5; 0,7 и 1,0 значение X_1 , соответственно равное -0,80; -0,21; -0,025 и 0,378. Это свидетельствует о существенном влиянии величины боковой нагрузки на характер работы арки. Перед вычислением величины изгибающего момента M , продольной силы N и поперечных Q сил по длине полуарки определим сечения с максимальными значениями M_{\max} . На криволинейном участке таких сечений два: $\varphi = 0$ (ключевое сечение) и $\varphi = \arccos 0,468 = 62,1^\circ$ – формула (П2.13). На прямолинейном участке – одно: при $y = 0,38 \text{ м}$ – формула (П2.14). Для построения эпюр M , N и Q выделим на длине полуарки 7 характерных точек: пять на криволинейном участке при $\varphi = 0$; $22,5$; 45 ; $62,1$ и 80° и две на прямолинейном при $y = 0$ и $y = 0,38 \text{ м}$. Точка с $y = 1 \text{ м}$ соответствует точке с $\varphi = 80^\circ$. Координата точек на криволинейном участке $x = 0,5l - r \sin \varphi$; $y = k + r \cos \varphi$, а на прямолинейном участке $x = y \operatorname{ctg} \alpha$.

Все расчеты для удобства и контроля правильности вычислений представим в табличной форме.

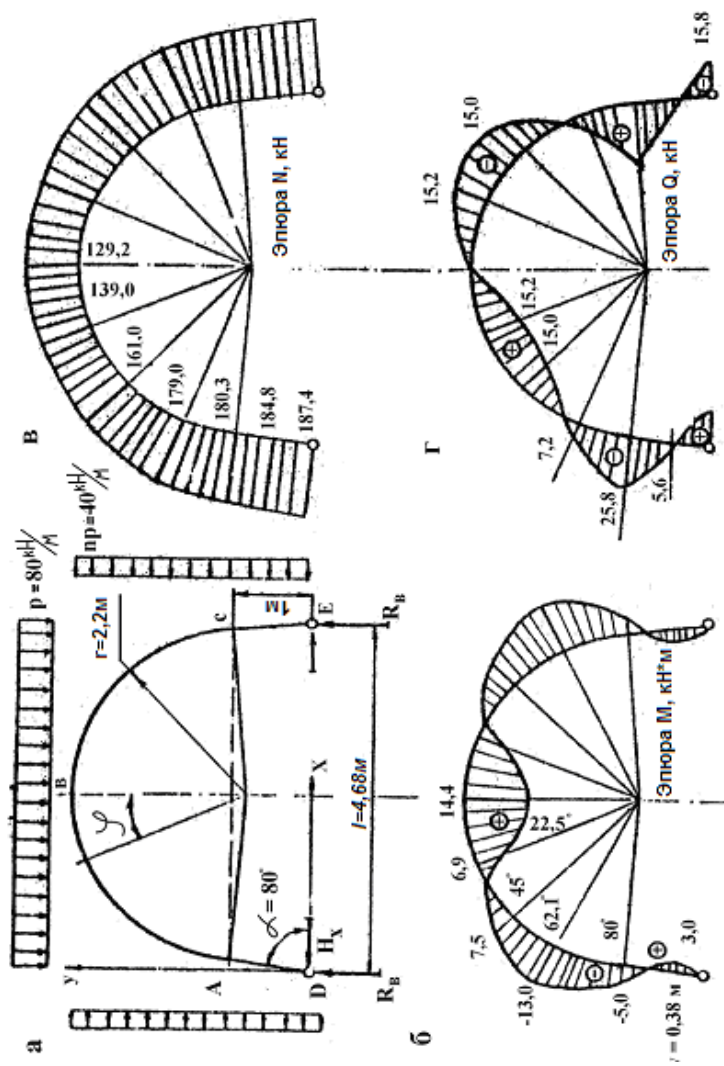


Рис. П. 4. 1 Расчетная схема и эпюры к примеру расчета.

Таблица П4.1

**Величины изгибающего момента на криволинейном участке полуарки –
формула (П2.11)**

φ , град	$\sin \varphi$	$\cos \varphi$	$r \sin \varphi$	$r \cos \varphi$	x	x^2	y	y^2
0	0	1,0	0	2,200	2,341	5,480	2,810	7,900
22,5	0,383	0,924	0,843	2,039	1,500	2,250	2,643	6,992
45,0	0,707	0,707	1,555	1,555	0,786	0,618	2,165	4,691
62,1	0,883	0,468	1,943	1,030	0,398	0,158	1,640	2,690
80,0	0,985	0,174	2,167	0,383	0,174	0,030	0,993	0,986

Продолжение табл. П4.1

φ , град	$0,5lx$	$0,5x^2$	$0,5ny^2$	X_1y	M_1	$M=M_1p$, кН·м
0	5,480	2,740	1,970	-0,590	0,180	14,4
22,5	3,511	1,210	1,750	-0,555	0,086	6,9
45,0	1,840	0,309	1,171	-0,455	-0,094	-7,5
62,1	0,932	0,079	0,672	-0,344	-0,163	-13,0
80,0	0,407	0,015	0,247	-0,208	-0,063	-5,0

Таблица П4.2

**Величины изгибающего момента на прямолинейном участке полуарки –
формула (П2.9)¹**

y, м	y^2	$-y^2D_1$	yD_2	M_1	$M=M_1p$, кН·м
0	0	-0	0	0	0
0,38	0,144	-0,038	0,076	0,038	3,0
1,00	1,000	-0,205	0,200	-0,065	-5,0

¹ В формуле (П2.9) обозначено

$$0,5(n + \operatorname{ctg}^2 \alpha) = D_1 = 0,256; (0,5l \operatorname{ctg} \alpha + X_1) = D_2 = 0,200.$$

Таблица П4.3

Величины продольной силы N на криволинейном участке полуарки – формула (П2.12)

ϕ , град	$\frac{l}{2} - x = -r \sin \phi$	$\left(\frac{l}{2} - x\right) \times \sin \phi$	y	ny	$ny - X_1$	$(ny - X_1) \times \sin \phi$	N_1	$N=N_1 P$ кН/м
0	0	0	2,810	1,405	1,615	1,615	-1,615	-129,2
22,5	0,843	0,322	2,643	1,321	1,531	1,415	-1,737	-139,0
45,0	1,555	1,100	2,165	1,082	1,292	0,913	-2,013	-161,0
62,1	1,943	1,716	1,640	0,820	1,030	0,482	-2,198	-175,8
80,0	2,167	2,130	0,993	0,498	0,706	0,123	-2,253	-180,2

Таблица П4.4

Величины продольной N и поперечной Q сил на прямолинейном участке полуарки – формулы (П2.10) и (П2.15)¹

y , м	Продольная сила			Поперечная сила		
	yE	$N_1=yE+F$	$N=N_1 P$, кН/м	yG	$Q_1=-yG+H$	$Q=Q_1 P$, кН/м
0	0	-2,343	-187,4	0	0,200	16,8
0,38	0,093	-2,310	-184,8	0,200	0,00	0,0
1,00	0,087	-2,656	-180,3	0,524	0,324	-25,8

¹ Для удобства формулы представлены в следующем виде:

$$N_1 = yE + F,$$

где

$$E = \cos \alpha (1 - n) = 0,087; F = -0,5l \sin \alpha + X_1 \cos \alpha = -2,343;$$

$$Q_1 = -yG + H,$$

где

$$G = \operatorname{ctg} \alpha \cos \alpha + n \sin \alpha = 0,524; H = 0,5l \cos \alpha + X_1 \sin \alpha = 0,20.$$

Таблица П4.5

Величины поперечной силы Q на криволинейном участке полуарки – формула (П2.16)

φ , град	x	$-x$	$x) \times \cos\phi$	ну- $X_1) \times \sin\phi$	Q_1	$Q=Q_1$ р, кН/М
0	2,34	0	0	1,6	0	0,00
22,	1,50	0,84	0,776	1,5	0,586	0,19
45,	0,78	1,55	1,099	1,2	0,913	0,18
62,	0,39	1,94	0,909	1,0	0,909	0,00
80,	0,17	2,16	0,377	0,7	0,699	-22

По найденным в 7 точках полуарки значениям M , N и Q построены эпюры, представленные на рис. П4.1, б, в, г.

Теперь необходимо подобрать тип специального профиля СВП и расстояние между арками (шаг крепи a_k). Зададимся в начале $a_k = 1$ м. По наибольшему изгибающему моменту $M = 14,4$ кН·м в ключевом сечении ($\varphi = 0^\circ$) определим ориентировочную величину момента сопротивления

$$W_0 = \frac{M}{mR} = \frac{14,4}{0,8 \cdot 24 \cdot 10^4} = 0,75 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 = 75 \text{ см}^3.$$

Согласно справочнику по креплению горных выработок [7] принимаем СВП-22 с $W_x = 74,8 \text{ см}^3$. Проверкой на прочность принятого сечения на изгиб с учетом продольного сжатия $N = 129,2$ кН при $F_{HT} = 27,91 \text{ см}^2$, значениях $m = 0,8$ и $n_p = 1$ (число рам на 1м), получим согласно нормам проектирования [11]

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{mW_x n_p} + \frac{N}{mF_{HT} n_p} = 240,6 + 57,9 = 298,5 > 240 \text{ МПа}.$$

Следовательно, необходимо либо уменьшить шаг крепи, сохраняя тип специального профиля, либо принять СВП-27 с $W_x = 100,2 \text{ см}^3$ и $F_{HT} = 34,4 \text{ см}^2$.

Выражая приведенное выше уравнение прочности элементов арки через потребное число арок на 1 м выработки и, приняв $\sigma_{\max} = R_{СЖ} = 240 \text{ МПа}$, получим при СВП-22:

$$n_p = \frac{M}{m \cdot \sigma \cdot W_x} + \frac{N}{m \cdot \sigma \cdot F_{HT}} = \frac{1440}{19,2 \cdot 75} + \frac{129,2}{19,2 \cdot 27,9} \\ = 1,24 \left(\frac{p}{m} \right).$$

Шаг рам при этом составит $a_p = 1:1,24 = 0,8\text{м}$.

При СВП-27 с $W_x=100,2 \text{ см}^3$ и $F_{HT}=34,4 \text{ см}^2$, получим соответственно $n_p = 0,75 + 0,19 = 0,94 \text{ p/м}$ и $a_p = 1,06\text{м}$.

Оба варианта приемлемы. Остановимся на первом, предполагая наличие на складе СВП-22.

Для проверки стоек арки на продольную устойчивость примем условно их расчетную длину $l_0 = 2\text{м}$. Радиус инерции сечения элемента

$$r = \sqrt{\frac{I_{6p}}{F_{6p}}} = \sqrt{\frac{428,6}{27,91}} = 3,95 \text{ см}.$$

Условная гибкость стоек из стали марки Ст.5

$$\bar{\lambda} = \lambda \sqrt{R/E} = 50,63 \sqrt{\frac{24 \cdot 10^4}{21 \cdot 10^7}} = 1,72.$$

Приведенный эксцентриситет сечения ($\varphi = 80^\circ$) стоек

$$m_1 = \eta \frac{M F}{N W} = 1 \cdot \frac{5}{180,3} \cdot \frac{27,91}{74,8} \cdot 10^2 = 1,04.$$

По СНиП II-23-81 [11] при $\lambda = 1,72$ и $m_1 = 1,04$ находим коэффициент продольного изгиба $\varphi_{вн} = 0,55$ и проверяем прочность сечения стоек по формуле.

$$\frac{N}{\varphi_{вн} F} = \frac{180,3 \cdot 10^4}{0,55 \cdot 27,91} = 11,8 \cdot 10^4 < 24 \cdot 10^4 \text{ кПа}.$$

Несущая способность стоек обеспечивается. Окончательно принимаем арочную крепь из СВП-22 с шагом арок 0,8 м.

КОНСТРУКЦИИ И РАСЧЕТ КРЕПЕЙ И ОБДЕЛОК

*Методические указания по курсовому проектированию
для студентов специальности 21.05.04*

Сост.: *Д.Н. Петров, М.А. Карасев, П.Э. Вербило*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой
строительства горных предприятий и подземных сооружений

Ответственный за выпуск *Д.Н. Петров*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати 29.06.2020. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 2,4. Усл.кр.-отт. 2,4. Уч.-изд.л. 2,2. Тираж 50 экз. Заказ 420.

Санкт-Петербургский горный университет
РИЦ Санкт-Петербургского горного университета
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2