УДК 621.039

А.Г.ПРОТОСЕНЯ, Д.А.ПОТЕМКИН
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОДОЗАЩИТНОЙ ПОТОЛОЧИНЫ И ЗАЩИТНОГО ПЕРЕКРЫТИЯ ПРИ ОСВОЕНИИ ЯКОВЛЕВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Выполнено геомеханическое обоснование высоты водозащитной потолочины между верхним горизонтом отработки рудной залежи и карбоновой толщей водонасыщенных пород и оценка толщины и прочности искусственного защитного перекрытия при их совместном взаимодействии с учетом порядка отработки очистных камер.

Geomechanical validation of waterproof layer height between upper ore level and carboxylic level of saturated rocks is done. Also estimation of thickness and strength of artificial protective overlay was predicted while order of excavations development varying.

Разработка месторождений под водоемами и водоносными горизонтами с большими водопритоками является сложной горно-технической проблемой.

Условия разработки Яковлевского месторождения являются сверхсложными, характеризуются наличием семи водоносных пластов в осадочной толще, два из которых являются напорными, и находящихся под ними рыхлых богатых руд незначительной прочности (средняя величина предела прочности рыхлых руд на одноосное сжатие составляет только 1,1 МПа).

В угольных бассейнах страны накоплен определенный опыт отработки угольных пластов под водоемами. На основе опыта разработки пластов установлено, что высота водозащитной толщи, за которую принята зона распространения трещин, при отработке пластов изменяется [1, 5, 7] в широких пределах (12-35 вынимаемой мощности пласта m, для Донбасса – 40-50 m).

В Санкт-Петербургском горном институте выполнено моделирование методом эквивалентных материалов [6] развития трещиноватости подработанного горными работами массива. Фильтрационная способность подработанного массива оценивалась путем пропуска через него воды. Для этого была разработана специальная методика гидроконтроля. Поверх модели заливалась подкрашенная вода, которая проходила через подработанный массив и попала в мерный резервуар.

Результаты моделирования по определению коэффициента фильтрации K, расхода q и скорости движения воды v от кратности разработки H/m приведены на рис.1.

Из анализа данных экспериментов следует, что при величине водозащитной пото-

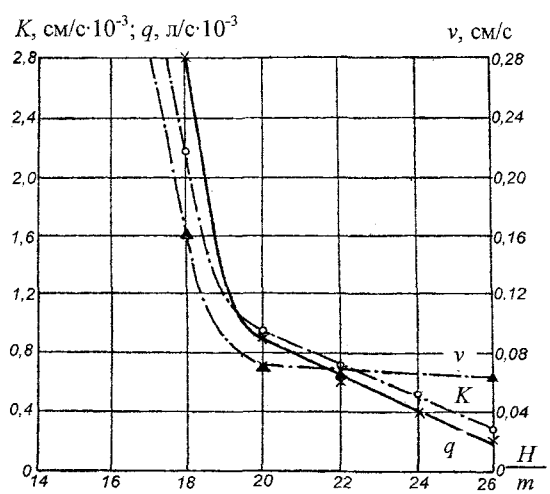


Рис.1. Зависимость расхода воды, коэффициента фильтрации и скорости от кратности разработки в модели

лочины (кратности разработки) $H/m < 20$ наблюдается резкое увеличение притоков воды и коэффициента фильтрации. Поэтому высота водозащитной толщи H должна быть больше $20m$.

Вместе с тем, автор работы [6] утверждает, что при определении величины водозащитной толщи нужно находить не предельную высоту зоны распространения трещин над очистными выработками, а высоту распространения сквозных трещин, через которые следует ожидать значительные притоки воды в выработки; учет этого фактора должен снизить величину водозащитной толщи до $(12\text{-}16)m$.

Опыт разработки рудных месторождений под водоемами является значительно меньшим. Интересен опыт разработки на руднике «Ватана» (Атлантическое побережье Канады) месторождения, представленного гематитовыми пластами мощностью до 10 м, падающими в направлении океана под углом 8°. Глубина океана над наиболее удаленной частью месторождения достигает 500 м. Отработку рудного тела производят камерной системой разработки с шириной камер 6-7 м и шириной междукамерных целиков 4-6 м. Мощность водозащитной потолочины между горизонтом очистных работ и дном океана составляет не менее 60 м.

На основании данных практики ряд исследователей считает, что на уменьшение безопасной высоты потолочины большое влияние оказывает наличие в ней глинистых пород, а также способность их к набуханию от действия воды.

Разработку руд Яковлевского месторождения предлагается производить при мощности водозащитной потолочины не менее 65 м.

В работе производится оценка водопроницаемости водозащитной потолочины и параметров искусственного железобетонного перекрытия при их совместном взаимодействии в условиях разработки рыхлых руд низкой прочности.

Строительство искусственного защитного перекрытия является ответственным этапом разработки месторождения. Назначение защитного перекрытия – обеспечить безопасные условия разработки рудного тела под перекрытием, исключить крепление выработок и камер первого слоя под перекрытием, исключить возможность неуправляемого обрушения рудного массива над выработанным пространством, снизить осадки вышележащего рудного массива и пород карбона до безопасного уровня по условию образования в них водопроводящих трещин.

Создание защитного перекрытия сопряжено с применением трудоемких процессов по проведению, креплению и закладке выработок армированным бетоном. К прочности и деформационной способности материала перекрытия и, особенно, к качеству закладки выработок предъявляются высокие требования. Недозакладка выработок непосредственно ведет к росту осадок покровной толщи пород карбона.

В связи с высокой материалоемкостью и трудоемкостью работ по созданию защитного перекрытия, его ответственной ролью в обеспечении безопасных условий ведения очистных работ, обоснование параметров защитного перекрытия – толщины, длины вкрест простирания, конструкции перекрытия (с заделкой в породы лежачего бока, без заделки, с армированием, без арматуры, арматура жесткая или канатная) – является важной научной и практической задачей.

Необходимым условием решения задачи является исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) массива на различных этапах разработки руды. С учетом сложного геологического строения месторождения в рассматриваемых условиях не могут быть применены известные аналитические решения и физическое моделирование. Для исследования НДС массива использован метод конечных элементов (МКЭ). Метод позволяет получить параметры поля напряжений и смещений в любой точке массива при различных этапах разработки месторождения.

Поставленная задача исследования НДС вмещающего выработки массива горных пород решалась в плоской (двумерной) постановке, расчет велся на собственный вес, массив пород представлен линейно-

Таблица 1

Физико-механические свойства пород

Наименование пород	Физико-механические характеристики		
	E, МПа	ν	γ, кН/м^3
Третичные песчано-глинистые отложения	200	0,27	19,2
Мел (маастрихтский) Мергель Мел (туронский)	6300	0,24	27,3
Пески (сеноман-альбские) Песчаники (волжские) – глины (оксфорд-кембриджские) – мел (ближе к маастрихтскому) Глины (оксфорд-кембриджские) Пески (келловейские)	480	0,32	22,6
Глины (бат-байосские)	460	0,34	28,2
Известняки (карбоновые, глинистые)	3640	0,29	29,0
Руды переотложенные (слабые)	400	0,26	34,0
Боксит – каолинит – сланец	30000	0,28	27,5
Алевролиты – филлиты (средней крепости)	75000	0,24	28,0
Руды рыхлые	500	0,26	34,4
Вмещающие известняки (сланцы гидрослюдизированные – сланцы серицитовые)	55000	0,26	29,0

деформируемой средой. Конечно-элементная модель представляет собой участок массива шириной 500 и глубиной 900 м. Схема геологического разреза модели соответствует профилю III-1800. Принятые величины физико-механических характеристик пород приведены в табл.1.

Массив пород, бетонная плита-перекрытие, межкамерные целики моделировались четырехугольными элементами первого порядка. Максимальный геометрический размер элемента составил от 1 м вблизи выработок до 30 м у дневной поверхности (сетка сгущается при приближении к выработкам). В каждом случае при оценке НДС массива пород расчет выполнялся дважды – для нетронутого массива ($НДС_1$) и массива, нарушенного горными работами ($НДС_2$). В первом случае получены смещения породной толщи под действием собственного веса, во втором – от собственного веса и ведения горных работ вместе. Разница этих величин давала величину осадок, вызванных горными работами.

Выбранный вариант отработки месторождения с перекрытием, призванным исключить существенное оседание и разрыв водоупорного слоя глин, обусловил два этапа решения задачи по подбору рациональных параметров перекрытия.

Первый этап предусматривал выяснение закономерностей формирования НДС массива пород при наличии плиты в зависимости от порядка отработки и геометрических размеров камер и междукамерных целиков.

Согласно горно-геологическому строению массива пород глубина заложения защитного перекрытия составляет ~ 585 м. Рассматривался первый отрабатываемый слой, расположенный непосредственно под перекрытием. Мощность слоя и, соответственно, высота камер и междукамерных целиков принята равной 5 м. Ширина камеры 5 м, ширина целика принята равной 10 м (ширине двух камер). Количество одновременно отрабатываемых камер – 4. Общая длина отрабатываемого участка вкрест простирания 90 м. Защитное перекрытие моделировалось как консольная плита, жестко заделанная в прочные породы лежачего бока. Длина перекрытия при принятом расположении камер составила 116 м, включая длину заделки 6 м и длину свободного конца 10 м (расстояние от конца плиты до первой камеры отрабатываемого слоя).

Всего было рассмотрено три варианта расположения камер. Мощность плиты во всех вариантах оставалась постоянной – 3 м. Целью расчетов являлось выяснение степени влияния порядка отработки первого слоя на НДС вмещающего массива пород. Первый вариант предусматривал расположение камер у заделанного и свободного концов плиты, во втором варианте камеры располагались в центре перекрытия, в третьем – все четыре камеры расположены ближе к концу перекрытия от висячего бока.

Критерием оптимальности варианта служили значения максимальных смещений внутри общего свода смещений, а также возможность достижения сводом нижней границы пород карбона. Варьируя такими основными параметрами, как пролет и высота камеры и целика, количество одновременно отрабатываемых камер, длина перекрытия-плиты, отсутствие – наличие заделки перекрытия в прочные известняки, можно добиться такого их сочетания, при котором геометрические размеры свода и величина максимальных вертикальных смещений окажутся минимальными.

Результаты исследований показали, что взаимное расположение камер значительно влияет на картину распределения вертикальных смещений. Наиболее рациональным, с точки зрения смещений породной толщи, является вариант расположения камер ближе к свободному концу плиты. При этом максимальные смещения и размеры общего свода оказались минимальны. Количественная характеристика максимальных величин смещений приведена ниже:

Вариант 1. У заделанного и свободного концов плиты ..... 8,5 см
Вариант 2. В центре перекрытия ..... 9,3 см
Вариант 3. У конца перекрытия у висячего бока .... 4,74 см

Второй этап моделирования заключался в установлении закономерностей формирования НДС массива пород при разной толщине перекрытия и наличии-отсутствии заделки. Взаимное расположение камер было принято согласно первому этапу (вариант 3) и оставалось постоянным. Всего рассмотрено семь вариантов расчетных схем, моделирующих формирование НДС массива пород без перекрытия, с перекрытием, имеющим мощность 1; 2; 3; 4; 6 м с жесткой заделкой в прочные породы и вариант трехметрового перекрытия без заделки.

Критерием выбора рациональных геометрических параметров перекрытия служили величины вертикальных и горизонтальных смещений. Следует отметить, что рассмотренные закономерности смещений в массиве пород отражают только их зависимость от сочетания геометрических параметров камер, рудных и искусственных целиков в разные моменты времени. Очевидно, что конечную результирующую величину осадок породной толщи надо искать как сумму осадок, полученных в результате выполнения каждого этапа по проведению, отработке и закладке камер.

На модели № 0 изучались вертикальные и горизонтальные смещения рудного массива при отработке камер по простиранию рудного тела без защитного перекрытия. Моделировалась отработка четырех камер пролетом по 5 м, разделенных целиками по 10 м шириной. Общая ширина рабочей зоны составляла 50 м. На других моделях (№ 1-6) аналогичные камеры отрабатывались под защитным перекрытием толщиной 1; 2; 3; 4; 6 м, причем модель с толщиной перекрытия 3 м рассмотрена в двух вариантах: с заделкой перекрытия в породы лежачего бока и без заделки, со свободным опиранием на рудный массив.

Модель № 0. Без защитного перекрытия в кровле каждой камеры образуется зона пониженных напряжений с максимальными вертикальными смещениями контура в кровле по 12 см. Высота зоны с существенными (до 5-6 см) вертикальными смещениями соизмерима с высотой камеры. За счет деформаций целиков, выдавливания почвы и смещений кровли в камерах над рабочим пространством образуется обширная, общая для всех камер область вертикальных смещений порядка 1,5-2 см шириной, превышающей пролет рабочего пространства более чем вдвое. В почве камер образуется небольшая зона разгрузки с выдавливанием руды в камеру.

Горизонтальные смещения с максимумом до 4 см направлены в кровле камер от висячего бока к лежачему, в почве – в обратную сторону. Камеры как бы «скручиваются» деформациями массива против часовой стрелки.

Различия по направленности горизонтальных смещений в кровле и почве, преобладание деформаций в кровле со стороны висячего бока являются характерным моментом для всех моделей. Сказывается близость прочных пород лежачего бока и разная мощность слоя более прочных переотложенных руд, которая увеличивается к лежачему боку. И наоборот, активность деформационных процессов вокруг камеры, первой от лежачего бока, выше.

Модель № 1. Толщина защитного перекрытия 1 м. Характер деформаций вмещающего массива в целом по отношению к предыдущему случаю не изменяется. Уменьшились с 12 до 7 см максимальные смещения кровли камер, ширина зон разгрузки в кровле камер увеличилась. Защитное перекрытие заметно распределило нагрузку на целики и несколько выровняло деформации массива под перекрытием.

Модель № 2. Толщина защитного перекрытия 2 м. На картине вертикальных смещений влияния единичных камер на деформации покрывающей толщи не прослеживается. Перекрытие выровняло вертикальные деформации, причем максимальные смещения уменьшились до 5,2 см. Рабочее пространство из четырех камер и трех целиков сформировало над перекрытием общую зону разгрузки с вертикальными смещениями, убывающими от максимума (5,2 см) до 1,4 см на уровне кровли пород карбона. Целики под защитным перекрытием деформированы также на 5,2 см, причем край целика со стороны лежачего бока сжат больше. На распределении горизонтальных смещений влияние отдельных камер при перекрытии толщиной 2 м еще сказывается, но их максимум не превышает 2 см (в модели № 0 соответственно 4 см).

Модель № 3. Толщина перекрытия 3 м. На картине изохром вертикальных смещений видно, что в руде над перекрытием формируется обширная, шириной 60 и высотой 26 м зона приблизительно одинаковых вертикальных смещений с максимумом 4,7 см. За пределами зоны вертикальные смещения быстро затухают и на контакте БЖР с переотложенными рудами не превышают 2,2 см. Горизонтальные перемещения в массиве по-прежнему ориентированы в кровле от висячего бока к лежачему с максимумом до 2 см и в почве в обратную сторону. Под защитным перекрытием деформации аналогичны модели № 2. Целик уплотняется на 4,7 см, размеры зон разгрузки в почве камер уменьшаются. Бока камер со стороны висячего бока выдавливаются в камеры. Под защитным перекрытием разгрузочный эффект открытого пространства прослеживается до 15 м ниже перекрытия.

Модель № 4. Толщина перекрытия 3 м. Перекрытие со стороны лежачего бока опирается на рудный массив, без заделки в подстилающие породы.

Схема деформирования вмещающего массива в основном совпадает с моделью № 3. Однако защитное перекрытие заметно больше оседает со стороны висячего бока, где перекрытие подработано камерами. Соответственно, зоны максимальных горизонтальных и вертикальных смещений в кровле переместились в сторону висячего бока. При этом картина деформаций рудного массива ниже перекрытия изменилась несущественно.

Модель № 5. Толщина перекрытия 4 м. Схема деформаций вмещающего массива практически идентична с моделью № 3 как по размерам зон разгрузки в кровле и ниже перекрытия, так и по абсолютной величине вертикальных и горизонтальных деформаций.

Модель № 6. Толщина перекрытия 6 м. Максимальные вертикальные деформации кровли защитного перекрытия остались на уровне деформаций моделей № 3 и № 4. Ширина и высота зон максимальных смещений несколько уменьшилась: 55 и 19 м, соответственно. Горизонтальных деформаций в массиве под перекрытием почти не отмечается, зона максимальных горизонтальных деформаций сместилась в торец перекрытия, причем руда «затекает» как в кровлю, так и в почву перекрытия. В целом

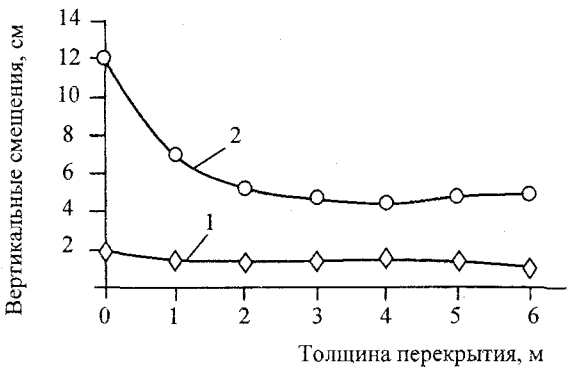


Рис.2. Зависимость максимальных вертикальных смещений от толщины защитного перекрытия

1 – плоскость контакта пород карбона с рудным массивом; 2 – *защитное перекрытие*

деформации руд вокруг камер под перекрытием в модели № 6 выражены слабее, чем в моделях № 3 и № 4.

Зависимость вертикальных смещений от толщины защитного перекрытия можно проследить по графику (рис.2).

По табл.2 и графику вертикальных смещений (рис.2) видно, что начиная с толщины перекрытия, равной 3 м, этот параметр не оказывает существенного влияния на вертикальные смещения в толще руд и покрывающих породах. Защитное перекрытие толщиной 3, 4 и 6 м практически одинаково прогибается над рабочей зоной. Целики деформируются и перекрытие, неспособное удержать вес покровной толщи, деформируется вместе с целиками. Таким образом, повлиять на смещения водозащитной толщи путем увеличения толщины перекрытия не удается. Деформации можно минимизировать только за счет оптимальных способов управления горным давлением – с помощью выбора рационального порядка отработки камер и их качественной закладки.

Материал защитного перекрытия – бетон или железобетон – по жесткости значительно превышает рыхлую и полурыхлую руду. Прогиб перекрытия над рабочей зоной при отработке камер неминуемо предопределяет высокий уровень изгибающих напряжений. Максимальные напряжения зафиксированы вблизи заделки: при толщине перекрытия 3 м – 99,4 МПа; 4 м – 88 МПа; 5 м – 86,3 МПа; 6 м – 83,4 МПа.

С целью определения влияния заделки перекрытия в породы лежачего бока на НДС защитного перекрытия отработана модель № 4, полностью идентичная модели № 3. Изменена только конструкция опоры со стороны лежачего бока: вместо заделки перекрытие опирается на рудный массив. Изменение схемы опирания плиты снизило напряжения в растянутой зоне до 52 МПа, т.е. примерно вдвое, при этом зона максимальных напряжений переместилась от заделки в центр прогиба над выработанным пространством. Моделирование однозначно указывает, что заделка защитного перекрытия в породу лежачего бока ведет к резкому увеличению напряжений.

Напряжения и в свободно опирающейся на рудный массив плите остаются чрезмерно большими как для бетона, так и для железобетона. Поэтому актуальна задача разработки конструктивных мер, направленных на разгрузку плиты от напряжений изгиба.

Таблица 2

Максимальные вертикальные смещения при различной толщине перекрытия, м

Толщина защитного перекрытия, м	Вертикальные смещения на уровне, см			
	защитного перекрытия	контакта БЖР с переотложенными рудами	контакта карбона с рудным массивом	контакта карбона с глинами
0	12,0	2,50	2,0	1,50
1	7,10	2,30	1,55	1,40
2	5,20	2,20	1,50	1,30
3	4,74	2,20	1,50	1,30
3 (без заделки)	4,57	2,16	1,46	1,28
4	4,75	2,20	1,50	1,30
6	4,99	1,87	1,17	1,0

Эффективной мерой в этом отношении представляется введение в перекрытие шарнирных элементов или элементов пластичности. В противном случае система будет разгружаться от напряжений неуправляемого, с образованием трещин в перенапряженных зонах.

При оценке результатов моделирования по абсолютным значениям смещений и по схемам распределения смещений выше и ниже перекрытия необходимо иметь ввиду, что в моделях представлен рудный массив однородной структуры. На практике рудное тело будет иметь сложную структуру изменяющююся от сечения к сечению. Кроме рыхлых руд будут и более прочные руды, а также железистые кварциты и безрудные сланцы. Прочные прослойки будут служить для защитного перекрытия промежуточными опорами, которые способны улучшить НДС вмещающего его рудного массива и перекрытия: снизить горизонтальные и вертикальные смещения в массиве, уменьшить зоны влияния камер, снизить нагрузку на целики, разгрузить защитное перекрытие от растягивающих напряжений.

Таким образом, изложенные результаты можно рассматривать как предельный случай неблагоприятного сочетания горно-геологических условий. Вместе с тем, из полученных данных следует вывод о жесткой зависимости параметров НДС системы от качества закладки очистных выработок. Недозакладка камер непосредственно поведет к росту вертикальных осадок, которые невозможно заранее прогнозировать.

Выполним оценку сохранения водозащитной толщи между выработками гор.–365 м и водонасыщенными породами карбонового горизонта.

В работах [2, 4, 8] в качестве критерия сохранения водозащитной потолочины принимается отсутствие сквозной трещины в массиве выше зоны обрушения над очистными выработками.

Для сохранения водозащитной толщи рудного тела на участке первоочередной отработки Яковлевского месторождения в качестве критерия может быть принято отсутствие вертикальных трещин отрыва на границе рудного и карбонового горизонтов,

$$\varepsilon_{\text{р}} \le \varepsilon_{\text{пр}}, \qquad (1)$$

где $\varepsilon_{\text{пр}}$ – предельная величина относительной деформации растяжения в слое, при которой происходит образование трещины отрыва; $\varepsilon_{\text{р}}$ – расчетная относительная деформация растяжения нижней части пласта карбонового горизонта.

Величину предельной деформации растяжения пород карбонового горизонта в первом приближении найдем на основании закона Гука из условия, что величина растягивающего напряжения в слое равна пределу прочности на растяжение $\sigma_{\text{р}}$ пород карбона в массиве:

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{\sigma_{\text{р}} k_{\text{с}}}{k_{\text{з}} E_{\text{д}}}, \qquad (2)$$

где $E_{\text{д}}$ – модуль деформации пород, равный $E/3$; $\sigma_{\text{р}}$ – предел прочности породы на растяжение; $k_{\text{с}}$ – коэффициент структурного ослабления; $k_{\text{з}}$ – коэффициент запаса.

Выполним оценку $\varepsilon_{\text{пр}}$ для известняков с характеристиками $\sigma_{\text{р}} = 3$ МПа; $E = 2{,}1 \cdot 10^4$ МПа; $k_{\text{с}} = 0{,}5$; $k_{\text{з}} = 2$.

По формуле (2) предельная деформация известняков

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{\sigma_{\text{р}} k_{\text{с}}}{k_{\text{з}} E_{\text{д}}} = \frac{3{,}3 \cdot 0{,}5}{2{,}1 \cdot 10^4} = 1{,}05 \cdot 10^{-4}.$$

Для практических целей наряду с горизонтальными перемещениями используются вертикальные V. Запишем условие (1) через вертикальные перемещения.

В расчетах напряженно-деформированного состояния массива горных пород обычно используется условие их несжимаемости

$$\frac{\Delta u}{\Delta x} + \frac{\Delta V}{\Delta y} = 0, \qquad (3)$$

откуда

$$\frac{\Delta u}{\Delta x} = -\frac{\Delta V}{\Delta y}. \qquad (4)$$

Учитывая связь (4), условие (1) можно записать так:

$$\left| -\frac{\Delta V}{\Delta y} \right| \le \varepsilon_{\text{пр}}. \qquad (5)$$

Проверим возможность образования водопроводящих трещин в толще пород карбона мощностью 30 м по вертикальным перемещениям. Из табл.2 следует, что приращение вертикальных перемещений от кровли до почвы карбонового горизонта после отработки четырех камер составляет 0,17 см (перекрытие 6 м); 0,2 см (перекрытие 3 м); 0,5 см (без перекрытия). Соответственно, при $\Delta y = 30$ м, $\Delta V = 0{,}17$; 0,20; 0,5 см имеем:

$$\varepsilon_{p(6)} = \frac{0{,}17}{3000} = 0{,}56 \cdot 10^{-4};$$

$$\varepsilon_{p(3)} = \frac{0{,}20}{3000} = 0{,}66 \cdot 10^{-4};$$

$$\varepsilon_{p(0)} = \frac{0{,}5}{3000} = 1{,}7 \cdot 10^{-4}.$$

Таким образом, условие (1) с коэффициентом запаса $k_з = 2$ выполняется при толщине защитного перекрытия 3 м и более. При отработке камер без перекрытия возможно образование трещин.

Таким образом, мощность водозащитной потолочины нужно принимать не менее 65 м, а толщину искусственного перекрытия более 3 м.

Выполним теперь оценку перекрытия как несущей конструкции при различной ширине очистной камеры и выберем ее оптимальный параметр.

Предельная ширина очистной камеры определяется на основе расчета несущей способности защитного перекрытия.

Прочностные свойства и деформирование слабых богатых руд описываются моделью жесткопластического тела. Согласно этой модели при проведении выработки в кровле происходит разрушение слабой руды и ее осыпание. В кровле камеры образуется свод естественного равновесия.

Для расчета перекрытия над очистной камерой можно использовать теорию расчета плит, например по методу Б.Г.Галеркина [3].

Перекрытие будем рассматривать как тонкую прямоугольную плиту со сторонами *а* и *б*. Начало координат *хоу* расположено в центре плиты. Плита свободно оперта по сторонам камеры и нагружена равномерной нагрузкой *р*. Длина плиты *б* может быть намного больше ее ширины *а* ($б \geq a$).

Значения изгибающих моментов в плите M_y, M_x относительно осей координат равны

$$M_y = \frac{pa^2}{8}\left[\frac{a^2 - 4x^2}{a^2} - \frac{32(1-\sigma)}{\pi}\sum\frac{(-1)^{k+1}}{(2k-1)^2}\times\right.$$

$$\times\left(\frac{1}{(2k-1)\pi} + \frac{б}{4a}\operatorname{tg}h\frac{(2k-1)\pi б}{2a}\right)\times$$

$$\times\frac{\cos h\dfrac{(2k-1)\pi y}{a}\cos\dfrac{(2k-1)\pi x}{a}}{\cos h\dfrac{(2k-1)\pi б}{2a}} + \frac{16(1-\nu)y}{a\pi^2}\times$$

$$\times\sum\frac{(-1)^{k+1}\sin h\dfrac{(2k-1)\pi y}{a}\cos\dfrac{(2k-1)\pi x}{a}}{\cos h\dfrac{(2k-1)\pi б}{2a}} -$$

$$\left.-\frac{32\sigma}{\pi^2}\sum\frac{(-1)^{k+1}\cos h\dfrac{(2k-1)\pi y}{a}\cos\dfrac{(2k-1)\pi x}{a}}{\cos h\dfrac{(2k-1)\pi б}{2a}}\right];$$

(6)

$$M_x = \frac{pa^2}{8}\left[\frac{a^2 - 4x^2}{a^2} + \frac{32(1-\nu)}{\pi^2}\sum\frac{(-1)^{k+1}}{(2k-1)^2}\times\right.$$

$$\times\left(\frac{1}{(2k-1)\pi} + \frac{б}{4a}\operatorname{tg}h\frac{(2k-1)\pi б}{2a}\right)\times$$

$$\times\frac{\cos h\dfrac{(2k-1)\pi y}{a}\cos\dfrac{(2k-1)\pi x}{a}}{\cos h\dfrac{(2k-1)\pi б}{2a}} - \frac{16(1-\nu)y}{a\pi^2}\times$$

$$\times\sum\frac{(-1)^{k+1}\sin h\dfrac{(2k-1)\pi y}{a}\cos\dfrac{(2k-1)\pi x}{a}}{\cos h\dfrac{(2k-1)\pi б}{2a}} -$$

$$\left.-\frac{32}{\pi^3}\sum\frac{(-1)^{k+1}\cos h\dfrac{(2k-1)\pi y}{a}\cos\dfrac{(2k-1)\pi x}{a}}{(2k-1)^3\cos h\dfrac{(2k-1)\pi б}{2a}}\right],$$

где h – высота плиты; x, y – координаты; ν – коэффициент Пуассона бетона плиты; $k = 1; 2; 3$.

Расчет по формулам (6) показывает, что если длинная сторона плиты $б$ будет больше короткой $а$ в два и более раз, то в центре плиты максимальные значения моментов и прогибов с ростом $б$ отличаются незначительно. В этом случае расчет плиты можно производить как балки, лежащей на двух опорах.

Вертикальная равномерная нагрузка на перекрытие формируется от действия веса обрушенной руды в своде естественного равновесия

$$P = \frac{2}{3}\gamma h, \qquad (7)$$

где γ – удельный вес руды; h – высота свода обрушения.

Перекрытие рассматриваем как бетонную балку, свободно лежащую на опорах и подверженную равномерной нагрузке p.

Выполним расчет прочности плиты искусственного перекрытия при следующих исходных данных. Высота свода обрушения над выработкой принята равной 0,45 ее ширины в осушенных рудах и 0,65 – в водонасыщенных. Для создания перекрытия принят бетон класса В15.

Расчет плиты выполнен по компьютерной программе расчета сечений железобетонных конструкций по СНиП 2.03.01-84. Бетонные и железобетонные конструкции.

Расчет произведен для ширины очистной камеры в свету 10; 12 и 15 м. Расчетный пролет плиты перекрытия: 13; 15 и 18 м. Пролет свода обнажения: 16; 18 и 21 м.

Распределенная нагрузка на перекрытие, кН/м^2: в осушенном рудном массиве с естественной влажностью 158,4; 178; 226,3; в обводненном массиве 239,2; 269,1; 347,1.

Расчет параметров проведен в трех сечениях: на опоре, на расстоянии четверти пролета от опоры, в центре пролета.

Таблица 3

Расчет прочности железобетонной плиты перекрытия толщиной 3 м

Месторасположение сечения	Пролет камеры в свету, м	Равномерно распределенная нагрузка, кН/м^2	Поперечная сила, кН	Изгибающий момент, кН·м	Угол поворота сечения, рад.	Перемещение сечения, мм	Процент армирования	Продольная арматура А-III, см^2
Влажность массива естественная								
На опоре			1029,6	0	0,269	-	0,03	3
Четверть пролета	10	158,4	566,3	2325,7	-	-	0,09	24
Середина пролета			0	3346,2	-	1,091	0,12	33
На опоре			1336,5	0	0,464	-	0,03	3
Четверть пролета	12	178,2	735,1	3483,3	-	-	0,12	33
Середина пролета			0	5011,9	-	2,175	0,17	48
На опоре			2036,7	0	1,018	-	0,03	3
Четверть пролета	15	226,3	1120,2	6369,8	-	-	0,21	60
Середина пролета			0	9165,2	-	5,730	0,31	90
Руда водонасыщенная								
На опоре			1554,8	0	0,405	-	0,03	3
Четверть пролета	10	239,2	855,2	3511,9	-	-	0,12	33
Середина пролета			0	5053,1	-	1,647	0,17	48
На опоре			2018,3	0	0,701	-	0,03	3
Четверть пролета	12	269,1	1110,1	5260,1	-	-	0,18	51
Середина пролета			0	7568,5	-	3,285	0,25	72
На опоре			3075,3	0	1,538	-	0,03	3
Четверть пролета	15	347,1	1691,5	961,80	-	-	0,32	93
Середина пролета			0	1383,89	-	8,649	0,47	138

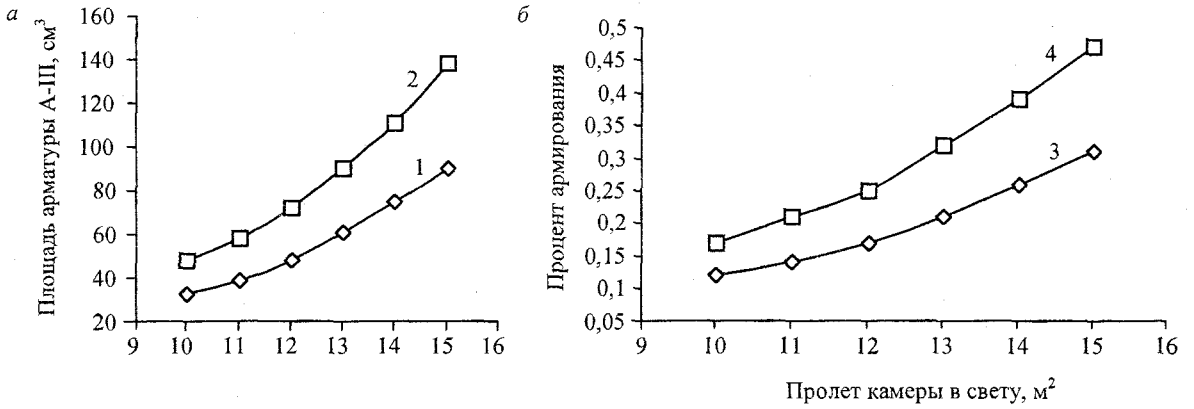


Рис.3. Зависимости площади арматуры в растянутой зоне от пролета камеры в свету:

а – площадь продольной арматуры А-III при естественной влажности массива (1) и водонасыщенной руде (2); *б* – процент армирования при естественной влажности массива (3) и водонасыщенной руде (4)

Результаты расчета указывают, что наиболее опасным сечением в плите, как и предполагалось, является центральное (табл.3).

Значения поперечных сил у опор находятся в интервале от 1020 до 3070 кН, что не превышает предела прочности плиты на срез. Изгибающие моменты и, соответственно, площадь продольной арматуры в центре пролета существенно увеличиваются с шириной камеры (рис.3). Например, площадь арматуры на 1 м ширины потолочины камеры пролетом 15 м в свету почти втрое больше, чем в потолочине камеры пролетом 10 м (90 и 33 см^2/м). При водонасыщении рудного массива (рис.3, *а*, кривая 2) указанное соотношение сохраняется (138 и 48 см^2/м).

Теоретически путем армирования потолочины можно обеспечить устойчивость перекрытия камер пролетом 10; 12; 15 м. Однако в перекрытие камеры шириной 15 м необходимо уложить по 10 стержней А-III диаметром 34 мм на каждый метр по длине камеры. Такое количество арматуры превышает разумные пределы. Поэтому предельный пролет камеры не должен превышать 10-12 м с армированием центральной части пролета перекрытия арматурой А-III диаметром 32 мм из расчета шесть стержней на 1 м длины камеры.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Авершин С.Г.* Горные работы под сооружениями и водоемами. М.: Углетехиздат, 1954.

2. Временные указания по охране сооружений и природных объектов, находящихся в зоне влияния подземных горных пород на рудниках Талнахского и Октябрьского месторождений // ВНИМИ. Л., 1982.

3. *Галеркин Б.Г.* Упругие тонкие плиты. М.: Госстройиздат, 1933.

4. *Иофис М.А.* Инженерная геомеханика при подземных разработках / М.А.Иофис, А.И.Шмелев. М.: Недра, 1985.

5. *Нисковский Ю.Н.* О разработке угольных месторождений под водоемами // Зап. ЛГИ. 1960. Т.XLII.

6. *Нисковский Ю.Н.* Определение безопасной глубины отработки месторождений под водоемами методом гидроконтроля в моделях из эквивалентных материалов // Зап. ЛГИ. 1961. Т.XLIV. Вып.1.

7. *Хохлов И.В.* Ведение горных работ под водоемами в Печерском угольном бассейне. М.: Углетехиздат, 1958.

8. *Шиман М.И.* Предотвращение затопления калийных рудников. М.: Недра, 1992.