

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ВЫСШЕЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**



**В.В. КОВАЛЕНКО
А.П. РЯЗАНЦЕВ**

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СПОСОБА БОРЬБЫ
С ПУЧЕНИЕМ ПОРОД ПОЧВЫ В УСЛОВИЯХ УГОЛЬНЫХ
ШАХТ**

Монографія

Днепропетровск
НГУ
2013

УДК 622.831.3

ББК 33.14

К 56

Рекомендовано до друку вченою радою Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет» (протокол № 9 від 01 жовтня 2013).

Рецензенти:

Шашенко О.М. – д-р техн. наук, проф., зав. кафедри будівництва і геомеханіки Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет»;

Борщевський С.В. – д-р техн. наук, проф. кафедри будівництва шахт і підземних споруд Донецького національного технічного університету.

У монографії викладено результати досліджень капітальних виробок з нестійкими породами підшоши на прикладі ПАТ «ДТЕК Шахта Комсомолець Донбасу».

Проаналізувавши чинники, що впливають на стійкість порід підшоши, автори запропонували спосіб боротьби зі здиманням порід на основі створення в підшоші виробки тришарової конструкції, сформованої із трьох зон. Із застосуванням методів фізичного та математичного моделювання було побудовано діаграми для визначення раціональних параметрів способу. Отримані залежності лягли в основу рекомендацій до впровадження пропонованого способу підвищення стійкості капітальних виробок з нестійкими породами підшоши.

Для наукових та інженерно-технічних працівників інститутів і гірничодобувних підприємств. Може бути корисною аспірантам і студентам вузів.

Коваленко, В.В.

К 56 Обоснование параметров способа борьбы с пучением пород почвы в условиях угольных шахт : моногр. / В.В. Коваленко, А.П. Рязанцев. – Д.: Национальный горный университет, 2013. – 119 с.

ISBN 978-966-350-434-6

В монографии изложены результаты исследований капитальных выработок с неустойчивыми породами подошвы на примере ПАО «ДТЭК Шахта Комсомолец Донбасса».

Проанализировав факторы, которые влияют на стойкость пород подошвы, авторы предложили способ борьбы с пучением пород на основе создания в подошве выработки трехслойной конструкции, состоящей из трех зон. С применением методов физического и математического моделирования были построены диаграммы для определения рациональных параметров способа. Полученные зависимости легли в основу рекомендаций к применению предлагаемого способа повышения устойчивости капитальных выработок с пучащими породами подошвы.

Для научных и инженерно-технических работников институтов и горнодобывающих предприятий. Может быть полезной аспирантам и студентам вузов.

УДК 622.283:691.327

ББК 38.54:34.66:38.33

ISBN 978-966-350-434-6

© В.В. Коваленко, О.С. Рязанцев, 2013
© Державний ВНЗ «Національний гірничий університет», 2013

СОДЕРЖАНИЕ:

Введение	5
Глава 1. Анализ состояния и условий поддержания капитальных и основных подготовительных горных выработок.....	6
1.1. Состояние и перспективы развития топливно-энергетического комплекса	6
1.2. Состояние подземных горных выработок угольных шахт Украины.....	8
1.2.1. Меры борьбы с пучением пород почвы в выработках.....	10
Глава 2. Пучение пород почвы протяженных горных выработок и борьба с ним	16
2.1. Развитие представлений о механизме пучения пород в почве выработок.....	16
2.1.1. Физико-механические и реологические свойства пучащих пород.....	26
2.2. Общая характеристика горно-геологических условий ПАО «ДТЭК Шахта Комсомолец Донбасса».....	28
2.3. Натурные исследования состояния капитальных выработок. Анализ факторов, влияющих на процессы пучения.....	30
2.3.1. Устройство замерных станций	31
2.4. Выбор способа борьбы с пучением пород почвы в капитальных выработках.....	38
Глава 3. Лабораторные исследования параметров способа борьбы с пучением пород почвы капитальных выработок путем моделирования на эквивалентных материалах.....	42
3.1. Общие положения	42
3.2. Теоретические аспекты моделирования методом эквивалентных материалов.....	45
3.3. Подбор эквивалентных материалов и технология выполнения моделей.....	47
3.4. Определение влияния коэффициента разрыхления на физико-механические показатели породного массива.....	51
3.5. Определение эффективных мер борьбы с пучением пород почвы на моделях из эквивалентных материалов.....	57
3.6. Анализ результатов моделирования методом эквивалентных материалов.....	62
Глава 4 Аналитические исследования способа борьбы с пучением пород почвы.....	73
4.1. Выбор метода исследований	73

4.2.	Описание принятой расчетной схемы и рассматриваемой математической модели	76
4.3.	Исследование НДС горных пород в окрестности капитальной выработки арочной формы.....	83
4.4.	Исследование НДС горных пород в окрестности капитальной выработки при использовании способа борьбы с пучением.....	86
Глава 5	Шахтные исследования способа обеспечения устойчивости горных выработок в пучащих породах	100
5.1.	Выбор участка для проведения шахтного эксперимента.....	100
5.2.	Создание экспериментального участка с использованием способа борьбы с пучением. Технология выполнения работ	100
5.3.	Результаты шахтных исследований по повышению устойчивости пород почвы на экспериментальном участке.....	106
5.4.	Технологические схемы способа борьбы с пучением. Прогноз применения способа для повышения устойчивости пород почвы капитальных горных выработок.....	107
5.5.	Определение ожидаемого экономического эффекта от внедрения способа обеспечения устойчивости капитальных выработок в условиях неустойчивых пород почвы ПАО «Шахта Комсомолец Донбасса».....	109
	Список использованной литературы.....	111

Введение

Увеличение глубины разработки угольных пластов Донбасса, ухудшение горно-геологических и горнотехнических условий их разработки способствуют снижению устойчивости капитальных и подготовительных выработок шахт.

В настоящее время на угольных шахтах Украины неудовлетворительное состояние горных выработок приводит к высоким затратам на их ремонт и восстановление, при этом существенно усложняются работы по всей технологической цепи действующего горного предприятия. Ремонтно-восстановительным работам подвергаются ежегодно от 7 до 15% выработок, затраты достигают величин, сравнимых со стоимостью проведения выработок, и, тем не менее, существенная их часть продолжает оставаться в неудовлетворительном состоянии.

Анализ работы шахтостроительных организаций показывает, что нередко к моменту сдачи горного предприятия в эксплуатацию значительная часть горных выработок требует выполнения восстановительных работ, в ряде случаев выработки перекрепляются практически полностью, особенно вследствие пучения пород почвы. Это приводит к перерасходу дефицитных крепежных материалов, увеличению трудозатрат на подготовку новых лав и, как следствие, увеличению себестоимости добываемого впоследствии угля.

В соответствии с этим одной из основных задач, стоящей перед угледобывающими предприятиями, наряду с увеличением добычи угля, является снижение его себестоимости. Таким образом, научные исследования, направленные на комплексное решение этой задачи путем повышения устойчивости подземных выработок и снижения затрат на выполнение трудоемких ремонтных работ, являются актуальными и имеют важное народнохозяйственное значение.

Работа выполнена в соответствии с программой научно-исследовательских работ Национального горного университета по госбюджетной теме ГП-321 (№ гос. регистрации 0103U001292).

Глава 1

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И УСЛОВИЙ ПОДДЕРЖАНИЯ КАПИТАЛЬНЫХ И ОСНОВНЫХ ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

1.1. Состояние и перспективы развития топливно-энергетического комплекса

Экономическое развитие любой страны находится в прямой зависимости от состояния топливно-энергетического комплекса. Важное место принадлежит степени обеспеченности страны собственными природными ресурсами и, в частности, энергоносителями. Это обусловлено, прежде всего, ограниченностью природных ресурсов вообще и различной степенью обеспеченности ими отдельных государств мирового сообщества в частности. На мировом рынке наблюдается тенденция к трансформации конкуренции товаропроизводителей за рынки сбыта в конкуренцию за обладание и разработку природных ресурсов, т.н. зоны национальных интересов. Полезные ископаемые служат мощным фундаментом в развитии экономики каждого государства, а также инструментом политического и экономического влияния на мировом рынке.

Традиционные энергоносители – нефть, природный газ и уголь. В течение XX столетия существенно изменилась структура топливно-энергетического баланса мирового хозяйства. В мировых запасах ведущее место в начале XX ст. принадлежало углю, а в последние десятилетия доля нефти и газа составила 3/5 мирового потребления энергоресурсов. Несмотря на это нефть и природный газ являются дорогими энергоносителями. Учитывая структуру мировых запасов, а также постоянный рост цен на нефть в перспективе следует ожидать увеличения доли угля в топливно-энергетическом балансе мира. Бесперспективным является использование дорогих энергоносителей для нужд энергетической отрасли, т.к. это идет вразрез с общей тенденцией вывода энергетической отрасли из ряда нерентабельных.

Анализ показывает, что до 1960г. в мировом энергопотреблении доминировало твердое топливо (уголь) [1]. В настоящее время доля потребления угля на мировом конкурентном рынке топлива составляет 30%, нефтепродуктов - 23,2%, природного газа - 22,6%. Таким образом, на рынке топливных ресурсов уголь сейчас уверенно занимает первое место по объемам потребления. Такое положение обусловлено главным образом низкими ценами на него по сравнению с ценами на нефть и природный газ. Существенное влияние имеют также постоянство уровня цен на уголь, его большие залежи, возможность импортирования из многих стабильных источников.

Производство электроэнергии является одним из основных секторов потребления первичных энергоресурсов. Этот сектор является типичной конкурентной средой, где используются разнообразные технологии производства электроэнергии, которые основываются на всем спектре

природных энергоносителей. Наблюдается тенденция активного перехода на экологически чистые альтернативные источники энергии. Но, несмотря на это, роль угля в общих объемах потребления энергоресурсов является основной.

На основании анализа данных по добыче и потреблению угля следует, что увеличение объемов добычи угля наряду со снижением затрат и себестоимости угля приобретает все более актуальное значение для угольной промышленности и топливно-энергетического комплекса.

Украина имеет структуру энергетики, которая формировалась на протяжении десятилетий. Большинство её составляющих определялась энергетической политикой и общей энергосистемой бывшего СССР. Украина принадлежит к энергодефицитным странам, т.к. за счет собственных источников она покрывает свои потребности в топливно-энергетических ресурсах только на 50%. Большую часть энергоресурсов (нефть, газ) она вынуждена импортировать. За счет собственной добычи покрывается 10-12% потребностей в нефти и 20...25% – в природном газе.

За последние 15...20 лет в Украине удельный вес угля в производстве электроэнергии несколько снизился. Однако большие запасы этого вида органического топлива: общие запасы угля – 103 млрд. т.(в том числе 26 млрд. т. коксующегося) ориентируют народное хозяйство страны на интенсивное развитие угольной промышленности. Разрабатываются и подготовлены к освоению 23,7 млрд. т балансовых запасов категории А+В+С₁ из которых 31% – коксующиеся угли, 11,5% – антрациты [6].

Начиная с 1965г. на первое место по объемам потребления выходит жидкое топливо (нефть), а уголь занимает второе, и эта ситуация сохраняется за ним по настоящее время [2, 3]. В ТЭК Украины, учитывая структуру и объемы запасов природного топлива, добыча угля имеет стратегическое значение в обеспечении промышленности энергоресурсами (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Добыча природного топлива в Украине в 1970-2013 гг.

Топливо	1970	1980	1985	1990	1995	1998	2013
Топливо, всего млн.т. у. т.	249,2	215,1	190,6	130,6	84,2	79,8	82,7
Нефть (с конденсатом), млн. т	13,9	7,5	5,9	5,2	4,2	4,0	3,97
Газ природный, млрд. куб. м	60,9	56,7	42,9	28,1	18,1	18,0	19,5
Уголь, млн. т	207,1	197,1	189,0	164,8	83,6	76,2	79,2

В марте 1999 г. инвестиционный проект «Отработка угольного пласта L3 механизированным комплексом ВМВ-14 (РЗ) повышенной производительности» был одобрен Советом по вопросам специальных экономических зон и специального режима инвестиционной деятельности в Донецкой области. Основная идея данного инвестиционного проекта заключается в увеличении объемов добычи угля за счет расширения очистных работ по высокопродуктивному пласту L3 и модернизации технологии добычи

на основе применения механизированного комплекса повышенной производительности. В рамках инвестпроекта в ОАО «Комсомолец Донбасса» был организован дополнительный участок по добыче угля в виде условно выделенной экономико-организационной структуры без создания юридического лица. Этот добычный участок в текущем году уже добыл более 120 тыс. тонн угля.

Иностранный инвестор – словацкая фирма KIMEX s.r.o. – предоставил участку основное очистное оборудование на общую сумму 7,8 млн. дол. США. Компания за счет собственных активов обеспечила поставку дополнительного оборудования и провела комплекс мер по подготовке очистных забоев к работе. Иностранная техника работает в трех лавах шахты «Комсомолец Донбасса». В планах предприятия за 39 месяцев реализации инвестиционного проекта дополнительно добыть около 1667 тыс. тонн рядового угля на сумму 170034 тыс.грн [4]. Производительность очистного забоя возрастет до 2 тыс. тонн в сутки, а шахты в целом – на 20%. Зольность добываемого угля будет снижена на 3...6%. При этом дополнительно будет создано 201 рабочее место. В целом же реализация проекта в рамках территорий со специальным режимом инвестиционной деятельности позволит шахте получить прибыль в размере 37 млн. грн., которая в дальнейшем будет реинвестирована в производство.

Работа с иностранным партнером будет способствовать укреплению долгосрочных экономических связей и собственных позиций на зарубежных рынках угольной отрасли.

1.2. Состояние подземных горных выработок угольных шахт Украины

Особую актуальность в настоящее время приобрела проблема обеспечения устойчивости выработок, от состояния которых зависит бесперебойная работа шахты по добыче угля. Современное состояние горнопроходческих работ характеризуется постоянным ростом протяженности поддерживаемых выработок и увеличением затрат на их проведение и поддержание. Кризисное состояние в Донбассе наметилось с конца 70-х годов. Снижение добычи в среднем на 2% в год после 1990 года достигло уровня 10...15% [6, 7]. Положение усугубляется старением шахтного фонда, изношенностью оборудования и растянутостью коммуникаций. Три четверти шахт имеет возраст более 30 лет. Каждая третья шахта опасна по газовым выбросам. Газоносность угольных пластов достигает 40 м метана на тонну сухой беззольной массы. С каждой тонной угля из шахт, в среднем, откачивается 6 кубометров воды. В 2012 г. средняя глубина разработки приблизилась к 800м, а на отдельных шахтах достигла 1600м.

Протяженность поддерживаемых выработок за период с 1994 до 2013г. снизилась до 11тыс. км, что объясняется уменьшением числа шахт и добычных забоев. При этом длина выработок, подлежащих ремонту, выросла с 4581 км до 5892 км, а процент ремонтируемых выработок вырос с 30,1 до 53,4. На трудоемких ремонтных работах занято свыше 11% подземных рабочих и свыше 70% рабочих, занятых на проведении и поддержании выработок.

В связи с усложнением горно-геологических условий поддержания, связанных с уходом большинства шахт на глубину, увеличилось количество ремонтируемых выработок (в 1996г объем ремонтных работ – 5704км., в 1999г – 6021км) [8].

В результате неудовлетворительного состояния крепи, на шахтах Украины ежегодно ремонтируется около 7...15% всех поддерживаемых и более 65% вновь проходимых выработок. При этом данные цифры отражают не только объем ремонтируемых участков выработок, но и капитальных, состояние которых в значительной степени предопределяет нормальную работу как отдельных блоков и горизонтов, так и всего технологического комплекса шахты. На проведение ремонтных работ затрачиваются значительные трудовые ресурсы. Работы по подрывке и перекреплению проводятся зачастую по одним и тем же участкам с определенной периодичностью.

Увеличение объемов добычи неразрывно связано с увеличением протяженности поддерживаемых выработок и проведением новых капитальных и подготовительных горных выработок для отработки новых горизонтов.

Из-за сложных горно-геологических условий эксплуатации значительная часть поддерживаемых выработок (от 20 до 60% общей длины) подвергается ремонтам (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Состояние горных выработок ПАО «ДТЭК Шахта Комсомолец Донбасса»

Наименование выработок	Протяженность, м	Среднее сечение, м ²	Не удовлетворяют ПБ, м				
			всего	в том числе			по профилю пути
				по сечению	по высоте	по зазорам	
штреки	35476	13,3	2970	1590	880	500	6020
квершлаг	18042	14,0	1520	1100	220	200	2140
уклоны	46320	9,8	4880	4220	660	0	0
другие виды	12762	8,2	870	470	400	0	0

Изучение состояния капитальных и основных подготовительных выработок шахт Украины, а также анализ затрат, связанных с поддержанием и ремонтом горных выработок, показывают, что наибольшую трудность при поддержании выработок в рабочем состоянии представляет борьба с таким видом проявления горного давления, как пучение пород почвы.

Значительная часть запасов Донбасса, расположенных на глубинах свыше 600 метров, залегает среди глинистых и песчанистых сланцев [9]. Практика показывает, что особо значительными пучащими свойствами обладают именно эти породы. С увеличением глубины разработки увеличивается интенсивность пучения и резко возрастает трудоемкость и стоимость работ по ликвидации последствий этого вредного явления. Отрицательное влияние указанного фактора на устойчивость выработок можно охарактеризовать тем, что

протяженность ремонтируемых выработок с подрывкой вспученных пород почвы только на шахтах Украины достигает 2500 км в год [10]. Если к этому добавить, что уровень механизации работ при подрывке почвы не превышает 9%, в то время как при проведении выработок с механизированной погрузкой угля и горной породы он составляет более 80%, то становится очевидным, насколько важным является поиск эффективных методов борьбы с этим явлением.

Обеспечение устойчивости капитальных выработок в условиях проявления горного давления в виде выдавливания пород почвы является возможным при детальном изучении особенностей процесса пучения пород с учетом обобщения существующих представлений о факторах, оказывающих влияние на развитие процесса.

1.2.1. Меры борьбы с пучением пород почвы в выработках

На шахтах распространены различные способы борьбы с пучением пород почвы [11...14]. Однако, несмотря на это процесс пучения, как правило, при этом не прекращается, поэтому очень часто данные мероприятия приходится проводить неоднократно. Выполнение ремонтно-восстановительных работ связано с увеличением затрат по материалам, увеличением объема породы, выдаваемой на поверхность, и задалживанием большого числа рабочих на ремонт и укрепление. Поэтому возникает необходимость детальной разработки эффективных и экономически выгодных методов предотвращения пучения.

Выбор мер по борьбе с пучением должен производиться для каждого конкретного случая с учетом всех этих факторов.

В.М. Городничев [16] предлагает меры борьбы с проявлениями пучения подразделить на меры по предотвращению пучения или снижению до допустимого минимума его вредных проявлений и меры по ликвидации последствий пучения. Из числа последних на шахтах обычно применяют: подрывку почвы без укрепления выработки; подрывку с заменой крепи; проведение параллельной выработки взамен вышедшей из строя.

Многие исследователи [17...18], исходя из того, что величина и интенсивность пучения зависят от напряженного состояния и прочностных свойств пучащих пород, подразделяют меры борьбы с пучением на следующие группы:

I группа. Меры, связанные с ослаблением напряженного состояния пород, окружающих выработку, и уменьшением давления их на крепь (расположение выработок за пределами пучащих пород; выбор конструкции, прочных размеров и величины податливости крепи; устранение возможности отрицательного влияния соседних выработок).

II группа. Меры, позволяющие сохранить естественную прочность пород, окружающих выработку (осушение шахтных полей; организация на шахтах надежной системы водоотлива и правильная его эксплуатация; осушение выработок, устройство дренажных канав и откачка затопленных

выработок; изоляция боковых пород от влияния шахтных вод и влаги воздуха путем устройства сплошной влагонепроницаемой крепи, торкретирования поверхности выработок, применения песчаной засыпки, опрыскивания или смазки поверхностей пород химическими растворами).

III группа. Меры, связанные с повышением прочности пород, окружающих выработку (крепление почвы горных выработок штангами; борьба с пучением взрывным способом; электрический способ закрепления глин; химические и электрохимические способы закрепления глин).

Поскольку пучению в наибольшей степени подвержены глины и глинистые породы, новые направления в борьбе с пучением предусматривают прежде всего улучшение физико-механических свойств глинистых пород.

В основе большинства применяемых способов борьбы с пучением горных пород лежат современные представления о физико-механической сущности процесса пучения, сводящиеся к тому, что первопричиной пучения является изменение напряженного состояния пород. Выше было показано, что после проведения выработки под действием напряжений окружающие породы теряют прочность. Смещение пород в образованную в массиве полость (горную выработку) представляется как выдавливание пластичного материала из-под целиков.

Считается, что после проведения выработки прочностные свойства окружающих пород значительно изменяются. В частности, для пород почвы пласта характерны:

- приобретение ими пластических свойств (потеря сцепления упрочнения) под действием увеличившегося горного давления, особенно при влиянии очистных работ;
- уменьшение силы сцепления частиц пород (в первую очередь, глинистых) под действием воды и влаги воздуха.

Перспективным способом является проведение выработок вприсечку к выработанному пространству [19]. В этом случае выработка проводится в заранее ослабленном массиве, в условиях обрушения консолей пород непосредственной и основной кровли. Основными причинами, сдерживающими в настоящее время применение этого способа, являются необходимость изменения порядка подготовки выемочных полей и трудности сохранения присечки при сложной гипсометрии пласта.

Важным направлением предотвращения пучения почвы является искусственное снижение напряжений в массивах вмещающих пород. Это направление включает в себя надработку и подработку пластов, а также применение средств принудительного обрушения пород. Так, на многих шахтах Польши в пучащих породах бетонная крепь нередко имеет «разгрузочные окна», через которые периодически вынимают грунт, ослабляя, таким образом, активное давление пород на крепь [20].

Эффективным способом повышения устойчивости пород почвы является создание щелевой разгрузки массива [21]. Поскольку механизм пучения пород почвы объясняется возникновением значительных напряжений в породах почвы, которые представлены пластичными глинами, то создание разгрузочной

щели позволяет устранить деформации пород почвы в выработанное пространство для выработок с затухающим характером пучения почвы.

В иностранной литературе для борьбы с пучением почвы рекомендуются металлические замкнутые арки, в одних случаях жесткие, в других – податливые со специальными компенсационными устройствами. В американской и английской литературе для крепления пучащей почвы предлагается применять анкерную крепь, как наиболее экономичную и эффективную.

В бывшем СССР опытные и промышленные испытания анкерной крепи в целях борьбы с пучением на шахтах различных угольных бассейнов проводились работниками ЛГИ, МГИ, ДРИ, ДонУГИ, КНИУИ, УкрНИИОМШСа и другими организациями [14, 20...22].

Положительный эффект применения анкерной крепи был получен только при сравнительно благоприятных горно-геологических и горнотехнических условиях: при устойчивых породах небольшом мощности; наличии прочных пород почвы, в которой можно закрепить замки анкеров; незначительном влиянии очистных работ на проявление пучения.

В большинстве случаев применение анкерной крепи приводило к снижению скорости пучения (в 1,5...2 раза) только в начальный период после ее установки, вследствие чего срок первоначальной подрывки почвы несколько отодвигался. В дальнейшем закрепленные и незакрепленные анкерами участки пород вели себя одинаково, причем анкерная крепь мешала работе по подрывке почвы.

В некоторых случаях применение анкерной крепи не дало положительных результатов из-за наличия в почве выработки мощных неустойчивых пород, в которых не удавалось прочно закрепить замок анкера, или из-за большой скорости смещений почвы вследствие значительного горного давления и наличия пластичных пород.

Способы второго направления могут применяться как самостоятельно, так и вместе со снижением напряженного состояния пород.

Упрочнение пород анкерами, цементированием, использованием силы взрыва и химическими методами не получило широкого применения и находится в стадии совершенствования.

Наиболее широкое применение находят различные виды крепи [9, 16, 19, 21], особенно в выработках, не подверженных влиянию очистных работ. Ввиду большого разнообразия горно-геологических и горнотехнических условий проведения и поддержания подземных горных выработок, в которых наблюдается значительное давление пород почвы, для борьбы с пучением применяются различные виды крепи. В капитальных горных выработках, проведенных вне зоны влияния очистных работ, где крепь работает в режиме установившегося всестороннего горного давления, применяются жесткие крепи с большой несущей способностью [23]. В подготовительных выработках, крепь которых работает в режиме неустановившегося горного давления со значительным смещением пород почвы, применяются податливые крепи [25].

Материалом для изготовления крепей, предназначенных для борьбы с пучением, служат дерево, металл и бетон.

Главной задачей применения анкерной крепи является повышение механической прочности слоев пород, связываемых между собой с помощью анкеров.

По общепринятым сейчас представлениям, работа анкерной крепи в почве выработок при проявлении деформации пучения характеризуется следующими признаками:

- слои малоустойчивых пород «пришивают» анкерами к устойчивым нижележащим породным слоям;

- несколько породных слоев, скрепленных между собой, противодействуют изгибающему моменту сил, как единая составная балка, которая имеет значительно большее предельное сопротивление на изгиб, чем сумма сопротивлений отдельных слоев;

- «сшитая» анкерами толща пород лучше противодействует тангенциальным напряжениям, возникающим в ней.

Однако трудности, связанные с выполнением ремонтно-восстановительных работ на участках, закрепленных с использованием анкерной крепи, в значительной мере повлияли на негативное отношение к данному виду крепи, как к средству борьбы с пучением.

В настоящее время известно значительное количество способов, направленных на обеспечение устойчивости выработок в условиях пучащих пород [19...21, 23, 25]. Тем не менее, большинство из них не нашло применения на шахтах по различным причинам.

В результате использования электрического способа закрепления глин породы почвы значительно уплотняются, теряя способность намокать и разбухать. Вследствие электроосмоса в зоне анода глина обезвоживается; в зоне катода вода удаляется дренажными устройствами. Однако данный способ закрепления глин не нашел широкого применения на шахтах Украины.

Электрохимический способ отличается от электрического тем, что в грунт вводят добавки NaCl и CaCl₂, интенсифицирующие процесс.

Химические способы испытывались в шахтных условиях явно недостаточно, поэтому судить об их эффективности трудно. В технической литературе известны некоторые химические способы уменьшения водопроницаемости пород. Например, для уменьшения водопроницаемости поверхность глин поливают раствором NaCl; при расходе на 1 м² грунта 3—5 кг NaCl происходит снижение фильтрации с 13 до 1,5% [20].

Анализируя приведенные выше методы улучшения физико-механических свойств глинистых пород, следует сказать, что они не могут быть признаны совершенными вследствие их сложности и высокой стоимости.

Основным способом предотвращения пучения до сих пор является применение специальных крепей, препятствующих его проявлению: замкнутые металлические и бетонные крепи, крепи с обратным сводом, деревянная крепь, усиленная лежнями и вандрутами, стропильная крепь [26].

Одним из способов повышения устойчивости считается увеличение скорости проведения выработок. Практикой установлено, что чем быстрее проводятся и крепятся горные выработки, тем меньше интенсивность пучения пород. Скорость проведения капитальных выработок, не подверженных влиянию очистной выемки, существенно влияет на их устойчивость. Особенно важны темпы подвигания таких выработок в породах, находящихся в пластическом состоянии или легко приобретающих под влиянием влаги пластические свойства. Недостатком данного способа является то, что в таких условиях выработки необходимо проводить с наибольшей скоростью и, чтобы сократить время воздействия агентов выветривания на обнаженные породы, немедленно возводить постоянную крепь, изолирующую их от влаги [16].

Одним из способов предотвращения пучения пород является сохранение прочности пород, которая существенно зависит от их уровня естественной влажности. Осушение пучащих пород и изоляция их от влияния влаги производятся с целью предупреждения явления пучения, прекращения или уменьшения его интенсивности.

В зарубежной литературе описаны случаи удовлетворительной изоляции пучащих пород от воздействия атмосферы путем торкретирования стенок выработок (США). Однако успех достигался только в том случае, если пучащие породы располагались не в почве выработки.

На руднике «*Longing loan*» штата Виктория (Австралия) [20] в условиях сильного пучения пород для изоляции их от влаги воздуха проводили выработку несколько большего сечения, чем обычно; на почву насыпали слой песка, на который укладывали лежни; рамы крепили сплошь и обшивали досками, а по бокам и в кровле штрека производили засыпку песком толщиной 0,3 м. В течение всего срока службы крепь этой выработки хорошо сохранялась, а пучение пород прекратилось.

В Англии при применении крепи из металлических балок используются затяжки в виде гофрированных стальных щитов, которые обеспечивают надежную изоляцию пород от влияния влаги.

Для изоляции поверхности пучащих пород от воздействия влажного воздуха применяют сплошное крепление бетоном, сборным железобетоном или деревом. В зависимости от расположения пучащих пород относительно выработки и величины давления на крепь, последняя может быть замкнутой или обычной.

Большое значение для уменьшения пучения пород имеет правильная организация откачки шахтных вод. Так, на многих шахтах Донбасса прекращение явлений пучения почвы обеспечивалось устройством водоотводной канавки, закрепленной бетоном и содержащейся в хорошем состоянии. Иногда воду вместо канавок пропускают по металлическим трубам, что также способствует ликвидации пучения.

Достаточно эффективным способом борьбы с пучением является изменение физико-механических свойств глинистых пород под действием камуфлетных взрывов в почве выработки [24]. Многочисленными исследованиями и наблюдениями [17, 18, 20, 21 и т.д.] установлено, что одним

из основных факторов, влияющих на величину и интенсивность пучения почвы горных выработок, является механическая прочность глинистых пород, подстилающих угольный пласт. Показателями механической прочности глинистых пород являются их сцепление, угол внутреннего трения и сопротивление сжатию и растяжению. В свою очередь, эти показатели в большой мере обуславливаются плотностью породы. Чем выше плотность пород почвы, тем выше их сопротивление сдвигу, сжатию и растяжению и тем меньше они подвержены пучению.

Как показывают теоретические исследования механики грунтов [27] и исследования механизма пучения почвы на моделях [28], деформации глинистых пород начинаются в первую очередь в промежуточных зонах. Следовательно, прочность глинистых пород в этих зонах определяет возможность возникновения и интенсивность развития деформаций сдвига в почве пласта.

Изменение пористости, объемного веса и влажности глинистых пород под действием взрыва приводит к изменению их прочностных свойств.

При уплотнении пород взрывами камуфлетных зарядов их пористость вокруг камуфлетных пустот уменьшается, а фильтрационная способность снижается.

Образуемые в результате взрыва камуфлетные полости являются резервуарами, в которые вмещается часть пород, выдавливаемых из-под целиков, что приводит к уменьшению величины пучения почвы.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что наиболее рациональным для обеспечения устойчивости выработки в условиях активного пучения пород почвы является совместное использование нескольких мероприятий. Это позволяет снизить недостатки отдельных способов и повысить эффективность комплекса мероприятий в целом. Исходя из вышеизложенного, разработка высокоэффективного способа борьбы с пучением пород почвы представляет собой совокупность мероприятий, направленных на снижение величины поднятия пород почвы с учетом геомеханических особенностей приконтурного массива.

Глава 2

ПУЧЕНИЕ ПОРОД ПОЧВЫ ПРОТЯЖЕННЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК И БОРЬБА С НИМ

2.1. Развитие представлений о механизме пучения пород в почве выработок

Процессы пучения пород широко известны в горнорудной промышленности, они наблюдаются при строительстве шахт, метро и железнодорожных тоннелей. Однако наиболее распространено пучение пород в угольной промышленности. Пучение горных пород представляет собой разновидность деформаций вмещающих пород в выработках, которые практически обнаруживаются как естественный процесс значительного уменьшения поперечного сечения выработок с нарушением крепи и шахтных путей, происходящий, в основном, за счет пород почвы.

Пучение пород – это один из наиболее распространенных видов проявлений горного давления, однако эффект вспучивания пород почвы в подземных выработках является до сих пор недостаточно изученным, несмотря на значительное количество исследований, выполненных в этой области. Сложность проблемы горного давления вообще и пучения в частности не позволила до сих пор найти универсальных решений, которые бы полностью и повсеместно удовлетворяли требованиям промышленности. В одних случаях одни и те же способы эффективны, а в других – бесполезны. Это является, скорее всего, следствием неправильного подхода к различным случаям проявления пучения пород почвы в выработках, когда не учитывается физическая суть исследуемого феномена. Поэтому изучение различных форм проявления пучения пород, анализ имеющихся представлений о механизме вспучивания и разработка на этой основе конкретных мер борьбы, соответствующих этим явлениям, представляет собой важную техническую задачу, направленную, прежде всего, на снижение себестоимости добываемого угля.

Пучение имеет разнообразные формы, степень проявления, скорость развития и зависит от многих факторов. В более метаморфизованных породах пучение в выработках, расположенных вне зоны влияния очистных работ, имеет затухающий характер и характеризуется сравнительно невысокой интенсивностью и скоростью развития. В менее метаморфизованных породах при соответствующей глубине и влажности этот процесс чаще всего является незатухающим. В выработках же, расположенных в зоне влияния лавы, интенсивность и скорость пучения пород независимо от их метаморфизации значительно возрастают, а сам процесс зачастую приобретает определенные особенности, например, цикличность при способе управления кровлей в очистном забое полным обрушением.

В настоящее время существует несколько гипотез, объясняющих причину выдавливания пород в горных выработках (пучения):

- набухание пород под действием влаги;
- увеличение объема пород в зоне неупругих деформаций вследствие их пластического разрыхления;
- выпирание пород под влиянием опорного давления в боках выработки;
- вязкое течение пород в результате неравновесного состояния массива в почве выработки;
- сорбционное набухание пористых газонасыщенных сред;
- потеря упругопластической устойчивости пород в области неупругих деформаций и т.д. [17, 28, 31 и т.д.].

Впервые упоминание о пучении пород в горных выработках появилось, по нашим сведениям, в 1923 г. В своей работе Б.И.Бокий отмечал: вздувание почвы является результатом выдавливания мягких пород из-под пят околоштрековых целиков.

Касаясь пучения пород, М.М.Протодяконов ограничивается только пояснением отдельных случаев: физического налитывания некоторых пород водой, химического соединения пород с водой, пучения соленосных мергелей под действием влажного рудничного воздуха, увеличения в объеме мергеля с тонковкрапленным серным колчеданом вследствие окисляющего действия кислорода воздуха.

Н.М. Покровский [25] указывает, что пучению подвержены породы, которые по своему типу могут быть отнесены к пластичным. Горное давление в этих породах, характеризующихся малой механической прочностью, зависит от их упругих свойств и наличия воды. В зависимости от водопоглощающих свойств пород вода увеличивает их объем, что способствует росту давления и пучению почвы. Основная же причина деформации почвы – давление вышележащих пород и обусловленное им действие в почве напряжений.

В 1927 г. М.И. Евдокимов-Рокотовский [26], исходя из практики тоннелестроения, отмечал, что горное давление, направленное снизу вверх, возникает при непосредственном участии боковых сил; при этом слабые нарушенные или полуразрушенные породы почвы выпираются кверху, что особенно наглядно при пластовом залегании пород.

Профессор Белов В.И., начиная с 1927 г., в своих работах также обращал внимание на явление пучения и на сложности деятельности горных инженеров в условиях пучащих пород, Высказывая предположения о возможных причинах пучения, автор дает и некоторые рекомендации по борьбе с этим явлением [29, 30].

П.М. Цимбаревич [31] рассматривает механическую сторону пучения как возможное давление на крепь со стороны почвы в условиях равновесия системы “крепь - горная порода”. В основу представления о природе выдавливания пород в горные выработки автором положена аналогия выпирания грунта из-под штампа, причем в качестве опорного давления по бокам выработки принимается вес столба породы от подошвы до ключа свода естественного равновесия.

Однако, метод. П.М. Цимбаревича хотя и объясняет в известной степени наблюдаемую на практике картину явления, в сущности своей схематичен и не отражает природы процесса прежде всего потому, что рассматривается стати-

ческая механическая задача, в то время как в действительности имеет место непрерывный, развивающийся во времени, процесс движения горных пород.

Подобным же образом В.Д. Слесарев [36] рассматривал давление со стороны почвы выработки как боковой распор второго порядка (рис. 2.1.).

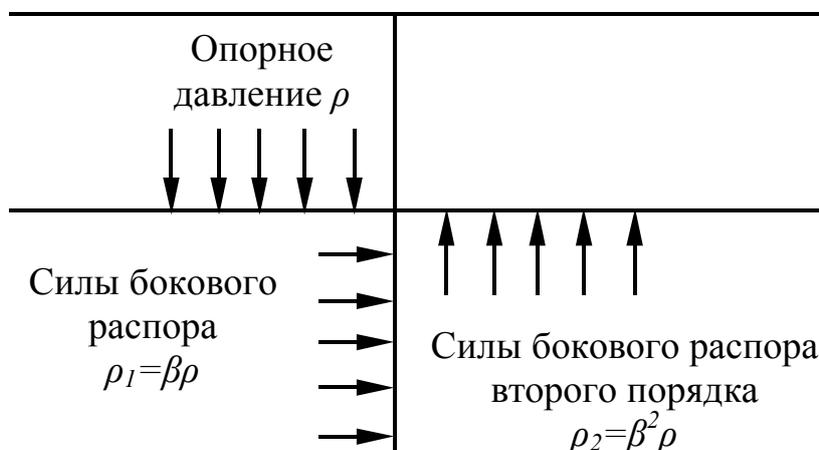


Рис. 2.1. Возникновение давления со стороны почвы по В.Д. Слесареву

Исходя из теории напряженного состояния, возникающего в сыпучей несвязанной среде, в почве выработки действуют силы бокового распора

$$p_1 = (\gamma H + p_0) \operatorname{tg}^2 \frac{90^\circ - \rho}{2},$$

где H – глубина расположения выработки; p_0 – дополнительное давление на штрековые целики, вызванное ведением очистных работ и другими причинами.

Силы бокового распора p_1 вызывают в свою очередь боковой распор второго порядка p_2 , который создает давление со стороны почвы

$$p_2 = (\gamma H + p_0) \operatorname{tg}^4 \frac{90^\circ - \rho}{2}.$$

Недостатками описанных выше задач является либо отсутствие явной зависимости между величиной давления и глубиной заложения выработки (П.М. Цимбаревич), либо настолько прямая зависимость между этими величинами (В.Д. Слесарев), что ни одна крепь не в состоянии выдержать такую нагрузку.

Основываясь на теории пластов для случая невесомой сыпучей среды, В.В. Соколовский показал, что давление со стороны почвы выработки является закономерным явлением и вывел формулу зависимости величины давления со стороны почвы от величины давления в боках выработки, сил сцепления частиц и угла внутреннего трения породы [32]. Однако, применения в горном деле эта формула не нашла ввиду наличия трудностей, связанных с получением параметров, входящих в нее.

Согласно гипотезе Д.С. Ростовцева [33] явление пучения объясняется так: в горном массиве породы находятся в напряженном состоянии, обладая громадными запасами потенциальной энергии от собственного веса и, отчасти, от тектонических процессов. При обнажении боковых пород эти напряжения

должны разрядиться посредством расширения кровли и почвы в сторону обнаженной поверхности, то есть в направлении друг к другу. Таким образом предлагается рассматривать некоторые виды пучения почвы как форму освобождения накопившейся в ней потенциальной энергии от давления пород в нетронутом массиве. То есть, рассматривается упругая задача, хотя имеющие место перемещения почвы имеют пластический характер.

Гипотезу Д.С. Ростовцева развил бельгийский ученый А. Лабасс [34], который определил количественную зависимость между давлением на крепь и неупругим расширением пород в области, непосредственно окружающей выработку. При этом и Д.С. Ростовцев и А. Лабасс не выделяли деформации почвы в общем механическом процессе.

Авторы специальных работ о пучении пород А.В. Гурдус [17], И. Целигоров [18]. И.М. Белозович и А.П. Бондаренко [19] не ставили своей целью дать обобщение причин пучения пород, а ограничили свои выводы рекомендациями мер борьбы с пучением для определенных условий. Однако эти работы позволили значительно глубже вникнуть в суть изучаемого явления и понять его природу.

Из отмеченных выше работа А.В. Гурдуса является, пожалуй, одной из первых, в которой приводится большой фактический материал и делается попытка всестороннего изучения явления выдавливания пород почвы горных выработок. Автором были выполнены шахтные исследования, основной целью которых было установить, при каких горно-геологических условиях выдавливание пород в выработке развивается интенсивнее, а при каких – медленнее.

Выдвинутая в связи с этим А.В. Гурдусом классификация интенсивности процесса выдавливания горных пород в зависимости от прочности кровельной толщи весьма условна и спорна, поскольку им сделан вывод о том, что в случае широких выработок и наличия крепких пород в кровле процесс выдавливания пород проявляется интенсивно, то в тех же условиях в узких выработках почти не наблюдается; этот вывод ничем не доказан и не соответствует действительности. Ошибочность этого утверждения была доказана позже Ю.З. Заславским [35] и В.Т. Глушко [37].

В результате изучения причин вспучивания горных пород каменноугольной.формации Донбасса А.В.Гурдус предложил следующую схему действия сил горного давления, приводящих к пучению (рис. 2.2).

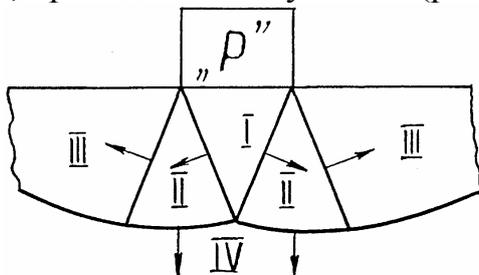


Рис. 2.2. Схема действия сил горного давления, приводящих к пучению по А.В. Гурдусу

Нагрузка "Р" в подземных выработках представляет собой давление кровли либо на угольный забой в очистном пространстве, либо на предохранительный целик в стене выработки и передается в форме конуса, направленного вершиной по направлению давления. Далее нагрузка распределяется по четырем зонам: 1- непосредственного давления, 2- промежуточные зоны, 3 - участок почвы в самой выработке, где слагающие силы давления, передающегося из зоны 1 через зону 2, стремятся привести породу в движение (выжать) и зона 4 - где силы давления затухают. Согласно такой схеме, непосредственной причиной вспучивания является продольное сжатие пород почвы выработки.

Такой подход к объяснению механизма вспучивания в дальнейшем был использован рядом исследователей. В результате проведенных исследований [20] И.Л. Черняк получил практическое подтверждение гипотезы, высказанной А.В. Гурдусом и представленной схемой действия сил горного давления, приводящих к пучению [17]. В схеме, полученной им опытным путем на моделях (рис. 2.3), так же как и в схеме, предложенной А.В. Гурдусом, можно выделить зону активного состояния пород I, промежуточную зону III с сеткой линий скольжения, состоящей из пучка прямых и семейства криволинейных линий скольжения, и зону пассивного отпора II.

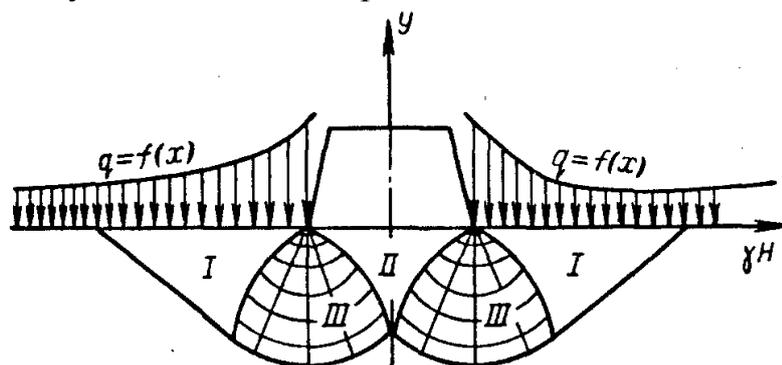


Рис. 2.3. Схема плоскостей скольжения по И.Л. Черняку

Таким образом, на слоистых моделях установлено, что величина смещений увеличивается с ростом толщины наименее прочного слоя. При значительном различии в прочности слоев смещения могут ограничиваться более прочным слоем. Угол наклона поверхностей скольжения к горизонту уменьшается при увеличении прочности слоя. Увеличение мощности слоя приводит к увеличению пучения только тогда, когда это увеличение происходит в пределах размеров зоны неупругих деформаций.

Результаты натуральных исследований и на моделях [28] показывают, что пучение глинистой почвы возникает, когда породы почвы менее прочны, чем породы в боках и кровле выработки. Деформации почвы можно объяснить тем, что более прочные породы, находящиеся на основании из менее прочных пород, играют роль штампов и деформируются существенно меньше по сравнению со слабыми породами основания.

Обширный фактический материал наблюдений за проведением горных выработок на шахтах Артемовского месторождения на Дальнем Востоке в ус-

ловиях интенсивного выдавливания пород приведен в работе Целигорова А.Н. [18]. В своей работе автор приводит также данные лабораторного изучения горных пород (глин и песков), включающих угольные пласты. Однако, рассматривая результаты лабораторных исследований, полученные А.И. Целигоровым в совокупности с результатами исследовательской работы проведенной А.В. Гурдусом, можно сделать вывод, что авторами не установлено наличие каких-то специфических свойств или признаков, по которым можно было бы относить горные породы к “пучащим” или “непучащим” и это, пожалуй, самый важный вывод этих исследований.

Очередной попыткой объяснить механизм выдавливания горных пород в выработках и дать количественную оценку выдавливания является работа В.М. Городничева [16]. Автор подходит к раскрытию явления выдавливания горных пород с позиций теории упругости, что заранее предопределило ошибочность устанавливаемых зависимостей, так как и деформации пород, и сами породы в рассматриваемом явлении менее всего могут быть отнесены к упругим. Следовательно, ошибочным является рассматривать деформации со стороны почвы, которые проявляются в виде пучения, как смещения пород за счет разрыхления в зоне раздавливания. Несоответствие предпосылки, принятой автором, реальному характеру деформирования пород предопределило непригодность рекомендуемых им расчетных формул для практики.

С.С. Давыдов [39] также представляет качественную сторону пучения как результат влияния вертикального давления в боках выработки, вследствие чего в почве образуются три зоны: активного сопротивления пород, в которых наибольшие давления вертикальны: пассивного сопротивления пород, в которых наибольшие давления горизонтальны, и промежуточная зона, в пределах которой возникают радиальные поверхности скольжения. Вертикальная, нагрузка стремится вытеснить породу выше поверхности скольжения, чему препятствуют силы сцепления между частицами пород и трение, вызванное весом вытесняемой массы породы.

Обобщая вопросы пучения глинистых пород и характер их деформаций при проведении горных выработок, М.В. Сыроватко [40] отводит главную роль в явлениях пучения минералогическим и коллоидно-химическим особенностям некоторых разновидностей глин. Рассматривая деформации глинистых пород, автор предлагает собственно пучением считать явления, обусловленные взаимодействием глин и внешней среды без участия горного давления и гравитационной воды, а деформации, вызванные давлением горного давления, а также текучестью глинистых пород под воздействием гравитационной воды, не относить к процессам собственно пучения.

М.Н. Шейхет [41], развивая взгляды М.В. Сыроватко, рассматривая механизм пучения пород при проходке выработок, устанавливает два основных типа пучения глинистых пород :

- пучение вследствие их набухания, что связано со специфическими особенностями минералогического и коллоидно-химического состава глинистых пород и проявляется в увеличении объема пород;

- пучение вследствие горного давления, которое проявляется в виде течения породы, выдавливаемой в выработку.

Обе эти причины, по мнению М.Н. Шейхета, как правило, действует совместно и могут быть осложнены дополнительными факторами, например наличием воды в выработках и т. д.

К.В. Руппенейт [24], рассматривая давление пород на крепь как упруго-пластическую задачу и учитывая возникновение вокруг выработки области неупругих деформаций, в пределах которой порода находится в разрушенном состоянии, считает, что одной из основных причин пучения является переход горных пород (в основном глин и глинистых сланцев) в условиях обводнения в пластическое состояние.

С предположением К.В. Руппенейта о том, что основной причиной пучения пород является пластическое состояние глин и глинистых сланцев в результате их обводнения, нельзя согласиться, так как оно не объясняет многочисленных случаев пучения совершенно сухих пород. Наличие влаги в породах почвы является, скорее дополнительным, чем основным фактором, способствующим развитию процесса пучения.

Следующим этапом в развитии представлений о механизме пучения явились исследования, основанные на комплексном изучении явления пучения, включающем аналитические, шахтные и лабораторные исследования процесса вспучивания пород. Основные работы нового направления появились между 1960...1970 гг., то есть в тот период, когда началось активное освоение глубоких горизонтов и проявления пучения пород резко интенсифицировались.

Существенный вклад в развитие представлений о механизме пучения в этот период внесли такие известные ученые, как А.П. Максимов, В.Т. Глушко, Ю.З.Заславский, В.А. Лыткин и др. [28, 35, 37, 42 и т.д.].

Для установления физической сущности пучения Максимов А.П. в течение многих лет изучал природу деформаций горных пород в условиях, когда эти деформации проявляются в форме выдавливания (пучения) [28]. Эти наблюдения позволили установить наличие медленного, но непрерывного течения горных пород внутрь открытой полости. Простые эксперименты, выполненные на грунтовой модели, подтвердили правильность взгляда на природу деформаций горных пород такого типа, как на вязкопластическое течение. Учитывая это, Максимов А.П. счел правомерным рассматривать механизм пучения горных пород карбона на основе реологической модели Бингама-Шведова. Предложенная им модель была интересна только с качественной стороны, количественно определить деформации пород почвы в этой модели не представляется возможным по причине невозможности определения констант, входящих в итоговое уравнение, например числа Рейнольдса для горных пород.

Заславский Ю.З., подводя итог результатам исследований многих авторов [35], предлагает основными факторами, определяющими процесс пучения, считать:

- напряженное состояние пород в окрестности выработки, обусловленное весом вышележащей толщи, т.е. величиной " γH ";
- прочностные характеристики пород; угол их падения;

- слоистость массива;
- ориентировку выработки, параллельно или перпендикулярно напластованию;
- обводненность выработки;
- ее размеры (в основном ширина);
- сопротивление крепи и срок службы выработки.

Обобщив результаты многочисленных исследований [17...21, 28], Ю.З. Заславский делает вывод, что прочность пород сама по себе без учета прочих факторов не может определить склонность породы к пучению, поскольку при сочетании определенных факторов породы, устойчивые в одном случае, будут пучащими в другом.

Автором была проведена работа, имевшая целью установить в первом приближении для капитальных выработок, пройденных по простиранию, предельные условия, при которых породы, вмещающие выработку, пучат.

Для достижения поставленной цели были обследованы выработки с пучащими породами почвы, выполнены инструментальные наблюдения и определены физико-механические свойства горных пород.

Основным критерием, для оценки возможности вспучивания был избран безразмерный параметр $\gamma H/R_{сж}$. Приняв в качестве "порога пучения" величину $L_0 = 20$ см, т.е. такую величину вспучивания, при которой процесс пучения начинает заметно сказываться на состоянии выработки, Заславский Ю.З. построил график, по которому в первом приближении можно делать прогноз о проявлении пучения пород почвы. По данным автора, в выработках шириной 3...5 м пучение начинает проявляться при значениях $\gamma H/R_{сж} = 0,4 \dots 0,25$. Эти результаты хорошо согласуются с наблюдениями, полученными И.Л.Давидовичем и В.Т.Глушко.

Немногим позже для расчета величины поднятия почвы выработок Ю.З. Заславский предложил следующую расчетную схему (рис.2.4) [35]. Породные слои в почве он рассматривал как защемленные балки, находящиеся под действием продольно-поперечной нагрузки. В процессе вспучивания слоя в середине его пролета и у концов, т.е. в боках выработки возникают растягивающие напряжения, что приводит к излому пород.

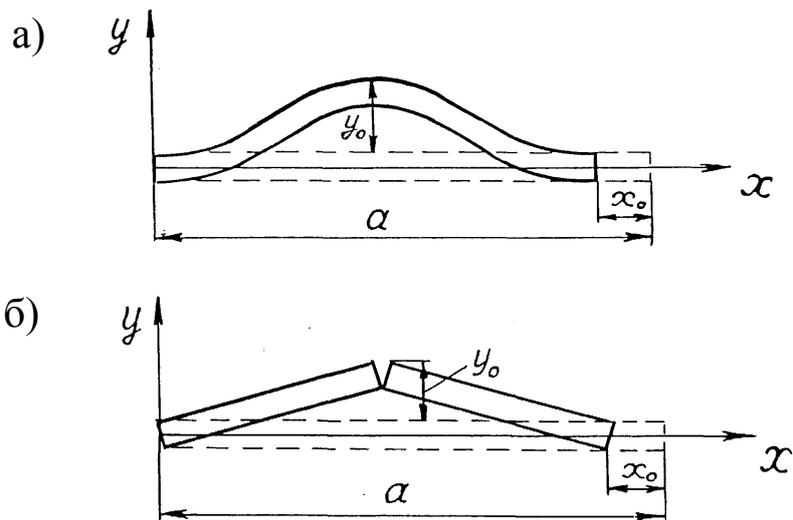


Рис. 2.4. Схема расчета величины поднятия почвы выработок по Ю.З. Заславскому

Несколько иное решение задачи о пучении пород почвы в выработках, выполнено В.А. Лыткиным [85] также на основе реологической модели Бингама-Шведова. Расчетная схема задачи показана на рис. 2.5.

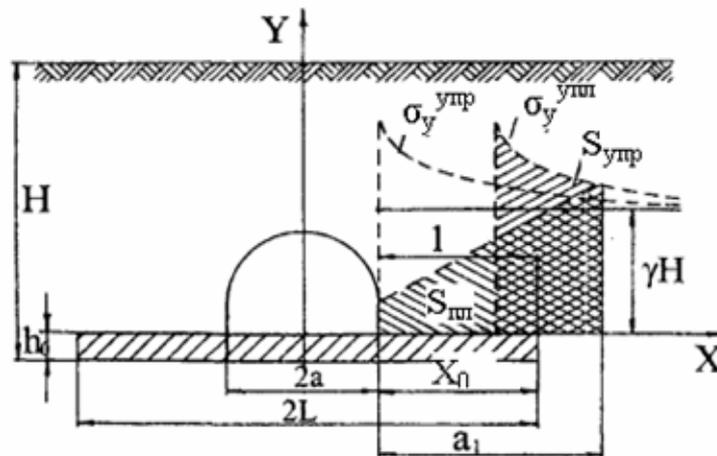


Рис. 2.5. Схема к определению объема пучения породы (по В.А. Лыткину)

Она принимается в виде залегающего в почве выработки слоя пучащей породы мощностью h_0 , зажатого между значительно более жесткими слоями. В связи с образованием выработки вокруг нее создается концентрация напряжений. Величина их вертикальной составляющей на уровне кровли пучащего слоя определяется из решения упругой задачи и может быть приближенно вычислена по формуле:

$$\sigma_y^{упр} = \frac{\gamma H}{\sqrt{x^2 - a^2}},$$

где a – полупролет выработки.

Объем вспученной породной массы может быть найден из выражений:

$$V = \frac{4(1 - \mu^2)L^2}{E} \left[\frac{1}{2} \pi \gamma H - 4k_1 A - \frac{2k_1 L}{h_0} B \right],$$

$$\text{где } A = \arccos \frac{a}{L} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{a}{L} \right)^2} \right), \quad B = \frac{2}{3} \sqrt{1 - \left(\frac{a}{L} \right)^2} - \frac{a}{L} \arccos \frac{a}{L}.$$

В работах Шашенко А.Н., Роевко А.Н., Тулуба С.Б., Татарина А.А. и др.[47, 67, 72, 75 и др.] на основе лабораторных, натуральных и аналитических исследований предложен новый подход к изучению проблемы пучения пород почвы подземных выработок. В его основе лежит гипотеза о потере упругопластической устойчивости породного массива в окрестности одиночной выработки, которая была сформулирована в итоге обобщения большого количества результатов натуральных измерений смещений контура выработок в условиях пучения пород почвы и лабораторного моделирования на моделях из эквивалентных материалов. Эти исследования позволили выделить в окрестности выработки по мере удаления от забоя наличие четырех областей, характеризующихся различной интенсивностью протекания механических процессов (рис. 2.6).

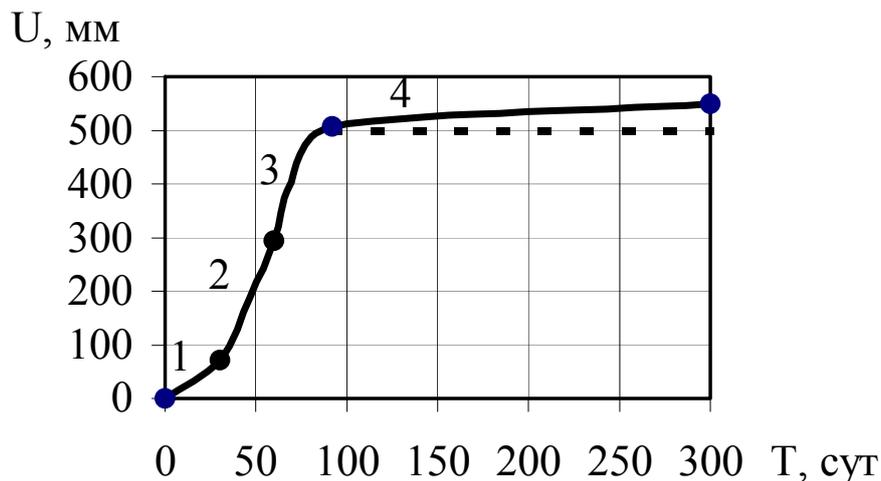


Рис. 2.6. Схема потери упругопластической устойчивости по Шашенко А.Н. (пунктиром показана стабилизация процесса пучения во времени)

На схеме представлены области: 1 - упругого деформирования; 2 - пластических деформаций; 3 - вспучивания пород почвы; 4 - стабилизации (дестабилизации) процесса пучения. Согласно данной гипотезе начало пучения пород почвы всегда связано с образованием зоны, характеризующейся быстрым ростом деформаций в течение достаточно короткого промежутка времени, что происходит после того, как пластические деформации достигают некоторых предельных (критических) значений. После этого механическая система вновь обретает состояние равновесия. Скорость перехода из одного энергетического состояния в другое определяется, в значительной мере, структурными особенностями пород в массиве.

2.1.1. Физико-механические и реологические свойства пучащих пород

Наблюдения показывают, что наиболее интенсивное пучение наблюдается в выработках, породы почвы которых состоят в основном из глинистых компонентов – глины, глинистых, песчано-глинистых и песчанистых сланцев. Породы эти обычно характеризуются относительно низкими прочностными показателями.

Наиболее полные данные о физико-механических свойствах пород Донецкого бассейна приведены в работе В.Т. Глушко и Г.Т. Кирничанского [38].

Как показывают исследования В.Т. Глушко [37], естественная влажность горных пород в пределах одного и того же литологического слоя неодинакова. Породы непосредственной кровли и почвы пласта отличаются повышенной влажностью. Отмечается также, что изменение напряженного состояния пород при очистной выемке приводит к изменению влажности. Вода поступает по трещинам в выработку, отжимается силами давления в сторону образовавшейся искусственной полости – выработки, увлажняет почву и может явиться одной из причин пучения пород.

Структура и структурные связи обуславливают в первую очередь деформационные и прочностные свойства пород. Глинистые породы обычно достаточно устойчивы при ненарушенных структурных связях. Эта устойчивость резко падает при увлажнении или осушении глинистых пород и механическом воздействии на них.

Принадлежность глинистых пород к тому или иному типу по гранулометрическому составу при прочих равных условиях также предопределяет склонность пород к пучению. Исследования глинистых пород почвы угольных пластов Красноармейского и Донецко-Макеевского районов Донбасса, проведенные В.Т. Глушко [43], показали, что склонность к пучению пород одного и того же типа зависит от содержания глинистых частиц. Так, аргиллиты, содержащие более 30% глинистых частиц, склонны к пучению; аргиллиты, не подверженные пучению, содержат 10...11% глинистых частиц. Алевролитовый аргиллит подвергается пучению при содержании глинистых частиц 20...31% и не склонен к пучению при их содержании 5...15%.

За срок существования выработок влажность пород увеличивается в зависимости от условий увлажнения на 5...10% на глубину до 2 м от контура выработки. Увеличение влажности глинистых пород приводит к потере прочности их, что обуславливает переход пород в пластическое состояние.

Естественная влажность глинистых пород изменяется не только с удалением от почвы выработки, т.е. в глубину, но и по площади.

Набухаемость зависит от тех же факторов, что и пластичность. Она растет с повышением степени дисперсности, особенно с увеличением содержания фракции тонких глинистых и коллоидных частиц.

Пластичные и плотные глины имеют наибольшую влажность и высокий показатель набухаемости (в процентах к первоначальному объему). Они характеризуются наибольшим давлением набухания, которое может достигать 1,5МПа.

Ранее считалось [24], что набухание глин является одной из основных причин пучения глинистых пород, однако фактический объем пород, участвующих в пучении и вспучивающихся в выработку, значительно превышает тот объем, который мог бы быть в результате набухания, поэтому в более поздних работах ролью набухания в процессе пучения пренебрегают.

Наблюдения за пучением почвы, представленной глинами, показали, что вне зоны влияния очистных работ смещения могут иметь затухающий и незатухающий характер. Смещения пород почвы затухают как во времени, так и с удалением от контура в глубь массива и фиксируются по вертикали на расстоянии $5 \dots 6 R_0$, где R_0 – полупролет выработки.

Интенсивность смещений почвы зависит от влажности глин и уровня действующих напряжений. Для выработок, не подверженных влиянию очистных работ и закрепленных одинаковой крепью с равным поперечным сечением, основным фактором, определяющим напряжения, является глубина расположения выработки от поверхности. При небольших колебаниях глубины выработок от поверхности на интенсивность пучения оказывают влияние пластические свойства глин, зависящие от ее влажности. При высокой влажности глин уменьшается их длительная прочность, и глины при более низких напряжениях могут деформироваться упруго-вязко-пластически без разрушения. С уменьшением влажности глин их поведение приближается по своему характеру к глинистым сланцам и упруго-вязко-пластическое течение может сопровождаться образованием микро- и макротрещин, а также увеличением объема пород.

Глины почвы выработок можно рассматривать в зависимости от их влажности и состава как упруго-вязкие или упруго-вязко-пластические тела. К первым можно отнести влажные глины, поведение которых может быть сравнимо с поведением модели Максвелла. Ко вторым можно отнести более сухие глины (в зависимости от минерального и гранулометрического состава) с разной влажностью, поведение которых может быть сравнимо с поведением упруго-вязко-пластической модели.

Если глины рассматривать как упруго-вязко-пластические тела, то при напряжениях, меньших предела длительной прочности породы, пучение почвы может быть упруго-вязким, а процесс пучения – затухающим. При напряжениях, больших предела длительной прочности, пучение будет следствием упруго-вязко-пластических деформаций и разрушения пород.

Особое место занимают горно-геологические и горнотехнические факторы, прямо или косвенно влияющие на величину горного давления и прочностные свойства пород: минералогический состав и мощность пучащих пород, естественная влажность пород почвы и обводненность выработки, гидростатический напор, глубина ведения работ, литологические особенности геологического разреза, тектонические нарушения, форма и размеры выработки, схема вскрытия и порядок отработки шахтного поля, параметры системы разработки (в частности, размеры целиков), наличие соседних выработок, системы осушения, конструкция и прочность крепи, а также интенсивность и степень выветривания окружающих пород.

Как правило, большинство перечисленных факторов действует в совокупности, поэтому при определении природы процесса выделяют основной фактор, который оказывает наибольшее влияние на формирование и протекание процессов пучения. Такими факторами являются глубина расположения выработки, прочность вмещающих пород и влияние очистного пространства.

Таким образом, пучение пород почвы является одним из наиболее сложных геомеханических процессов, развивающихся в окрестностях горных выработок. В данной работе представлены результаты исследований, которые выполнялись, основываясь на гипотезе упругопластической потери устойчивости в результате деформирования пород почвы применительно к горногеологическим условиям шахты «Комсомолец Донбасса».

2.2. Общая характеристика горно-геологических условий ПАО «ДТЭК Шахта Комсомолец Донбасса»

Открытое акционерное общество «Шахта «Комсомолец Донбасса» находится на территории Шахтерского района, г. Кировское Донецкой области. Поле шахты расположено на территории одного из крупных геолого-промышленных регионов Донбасса. Шахта сдана в эксплуатацию в декабре 1980 года с плановой добычей 1300 тыс. тонн в год. Производственная мощность освоена шахтой в 2002 году (добыча составила 2301,50 тыс. тонн) и достигает в среднем 2100 тыс. тонн в год с графиком освоения до 2010 года, с учетом реализации проектов: «Вскрытие и подготовка блока № 2» и «Подготовка бремсбергового поля пл. L₃, и L₄».

Каменноугольные отложения представлены переслаиванием различных по составу и мощности слоёв песчаников, глинистых и песчаных сланцев. В табл. 2.2 представлены характеристики вмещающих пород по пласту L₄.

Добываемый уголь представлен маркой Т, с зольностью 31,8%. Содержание серы в углях от 28%. Полезная мощность угольного пласта L₄ составляет 1,0 м, при вынимаемой мощности 1,05м. Полезная мощность угольного пласта L₃ составляет 1,25...1,06м, при вынимаемой мощности 1,57...1,38м. Добываемый уголь используется в качестве рядового энергетического топлива на тепловых электростанциях Украины и соседних стран.

Поле шахты вскрыто шестью вертикальными стволами. Подготовка шахтного поля – погоризонтная; горизонты заложены на отметках 418м, 628м и 810м с устройством на этих отметках околоствольных дворов.

Система разработки – длинными столбами по восстанию. Способ проветривания – всасывающий, схема проветривания – секционная.

Таблица 2.1

Характеристика вмещающих пород пласта L₄

Наименование лито-типов	% рас-про-стране-ния	Мощ-ность преоб-лад., м	$\sigma_{сж}$ в ест. состоянии по керну скв. (сред-нее), *10 ⁵ Па	Кoeff. размяг-чения	$\sigma_{сж}$ по АК (среднее), *10 ⁵ Па	Прогноз ус-тойчивости
Непосредственная кровля						
Сланец глинистый	55	8-9	110...879 (352)	0,27...0,77 (0,48)	150...490 (350)	Неуст. (весьма неустойч.)
Сланец алеврогли-нистый	30	5-13	111...857 (423)	0,18...0,76 (0,47)	300...590 (450)	Неустойч. (малоустойч.)
Сланец алевроитовый	15	7-11	350...1048 (582)	0,32...0,74 (0,54)	490...590 (630)	Малоустойч. (среднеустойч.)
Непосредственная почва						
Сланец алевроитовый	60	4...8	176...1001 (434)	0,22...0,98 (0,57)	330...960 (630)	Среднеустойч.
Сланец глинистый	30	0,2...1,3	149...485 (337)	0,23...0,74 (0,29)	130...460 (300)	Среднеуст. (неустойч.)
Сланец алевроитогли-нистый	9	2...5	190...690 (421)	0,21...0,87 (0,47)	330...590 (470)	Среднеустойч.
Песчаник	1	4,28	467...1823 (970)	0,2...0,44 (0,32)	1160	Устойч.

Основные разрабатываемые пласты геологической свиты $C_6^2 - L_7, L_4, L_3$, из них запроектирована и реализована отработка пластов L_4 и L_3 как «сближенных», из которых пласт L_4 является «защитным» по отношению к пласту L_3 . Оработка запасов «сближенных» пластов осуществляется на «групповой полевой» воздухоподающий - откаточный горизонт, заложенный в междупластии.

Непосредственная кровля представлена, в основном, глинистым сланцем. Структура тонкозернистая, текстура полосчатая, слоистая, крепость $f=4$. Почва пласта – песчанистый сланец – серый, мелкозернистый, слабослоистый, с крепостью $f=6$, слабосклонен к размоканию, склонен к пучению. В период строительства шахты с целью сокращения сроков сдачи в эксплуатацию и увеличения темпов проведения вскрывающих выработок «магистральный» горизонт был заложен в более «мягких» породах на отметке – 628м. После отработки запасов блоков №1 и №3 активно проявился процесс повышенного горного давления от краевых частей целиков пл. L_4 и пл. L_3 , выраженный в пучении пород почвы.

Таким образом, обеспечение электровозной откатки связано с постоянным ремонтом (подрывкой) рельсового пути.

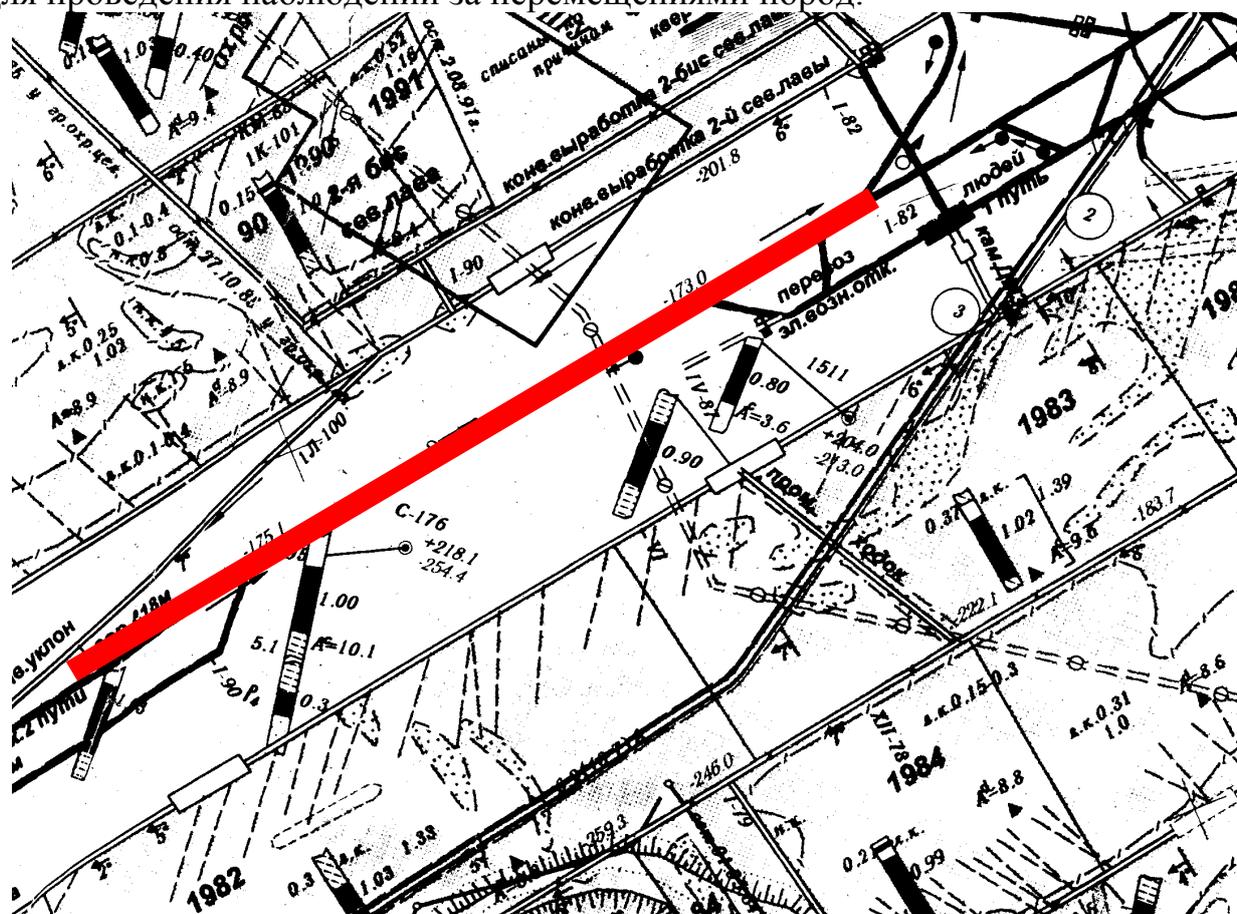
2.3. Натурные исследования состояния капитальных выработок. Анализ факторов, влияющих на процессы пучения

На магистральных откаточных выработках горизонтов 418, 628 и 810м «пучение» связано в основном с высокой обводненностью вмещающих горных пород, которая объясняется спуском воды из шахты «Стожковская», где приток воды составляет в I квартале $348 \text{ м}^3/\text{час}$, во II квартале - $650 \text{ м}^3/\text{час}$, в III квартале $190 \text{ м}^3/\text{час}$, в IV квартале – $100 \text{ м}^3/\text{час}$. В среднем в 2013 году приток воды составил $322 \text{ м}^3/\text{час}$, при этом вода поглощается породами почвы выработок, представленными глинисто-песчаными сланцами и песчаниками. Глинистые сланцы под действием воды склонны к пучению на высоту до 2,0 м, а песчаники под диагональным давлением «сжимают» сечение выработки. Немаловажным фактором также является длительный период эксплуатации выработок и высокая интенсивность электровозной откатки.

Шахтные исследования позволяют получить общее представление о характере пучения и математическое обоснование процесса. Основными факторами, определяющими параметры процесса пучения, являются: глубина разработки, прочность вмещающих пород, их мощность и петрографический состав, а также площадь поперечного сечения выработки.

Практика показывает, что выдавливание пород почвы в горных выработках является типичным реологическим процессом. Для исследования характера проявлений пучения пород почвы в откаточных выработках, не подверженных влиянию очистных работ, были заложены экспериментальные участки, в кваршлагае на горизонтах 418, 628 и 810м. Всего было заложено 37 замерных станций (14 – на гор.418м, 12 – гор.628м, 11 – гор.810м).

На рис. 2.7 в качестве примера представлена схема части восточного откаточного квершлага гор. 418м, в которой были устроены замерные станции для проведения наблюдений за перемещениями пород.



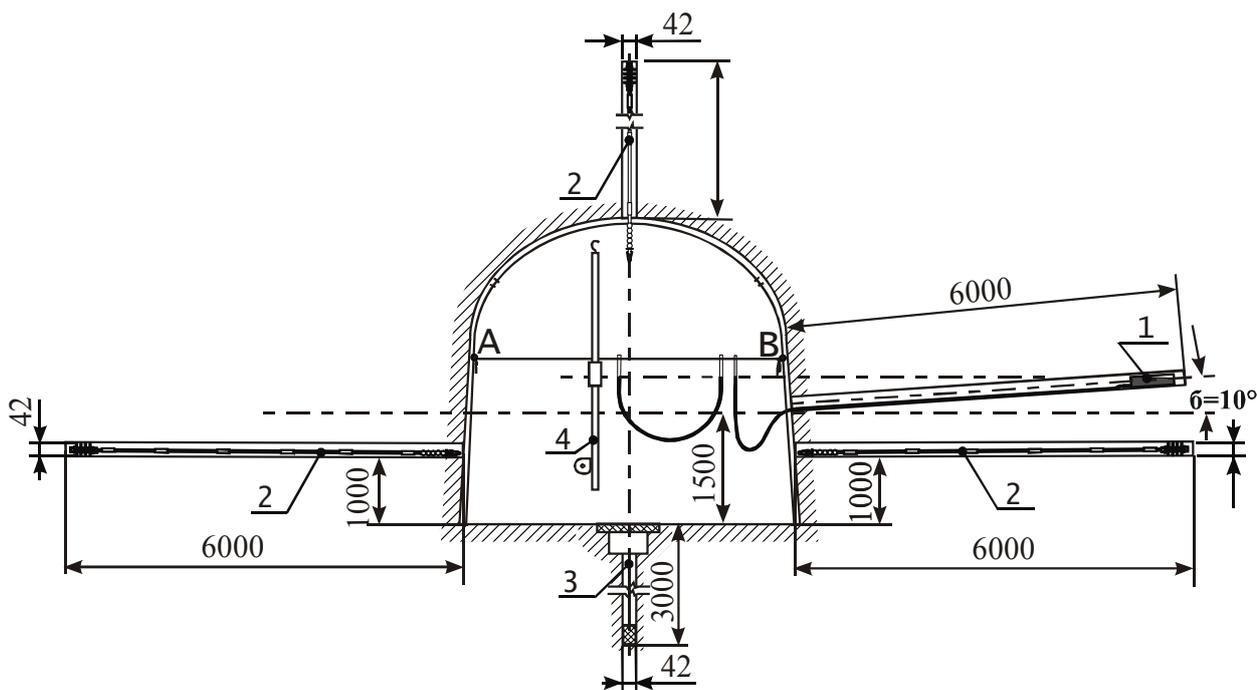


Рис. 2.8. Схема замерной станции

В комплект входило от четырех до шести реперов. Вывод от каждого репера в горную выработку был жестким (стержни, трубки). Расстояние между соседними реперами вдоль скважины составляло 10...15 диаметров скважины. Стержни от нижних реперов проходят через все реперы, расположенные ближе к устью шпура (скважины). Реперы закреплялись в шпурах (скважинах) с помощью клиновых распорных устройств. Заклинивающие устройства устанавливались в шпуре на разной глубине, причем репер с наиболее длинным выводом устанавливали на глубину 6м, где не ожидается перемещения. По нижнему реперу (на глубине до 1м) регистрировали смещения почвы выработки. С помощью гидрорепера (1) осуществлялось измерение перемещений пород грунта и кровли. Глубинные реперы (2) позволили определить перемещения вмещающих пород, в кровле и по бокам выработки на расстоянии до 6м. Для определения перемещений пород со стороны подошвы использовали глубинный репер (3). Глубинный репер представлял собой деревянную пробку, через которую пропусклась стальная проволока. Пробка специальными досыльными трубами подавалась на заданную глубину. Расклинивание репера в скважине осуществлялось путем обжатия реперного устройства скважиной в течение определенного времени.

Регистрация перемещений глубинных реперов механического типа осуществлялась на основе периодических измерений у устья скважины и с использованием дистанционных измерительных средств.

Наблюдения велись на протяжении 12 месяцев. Установлено, что величина и скорость смещения слоев от контура выработки вглубь массива носит затухающий характер (рис. 2.9). Наблюдения за смещениями реперов показали отсутствие существенных смещений в почве на глубине более 2 м. В то же вре-

мя репера, установленные на глубине 1,0 и 2,0 м, имели смещения соответственно 190 и 50 мм при смещении контура почвы 445 мм. На основании результатов наблюдений за смещениями реперов в приконтурном массиве восточного откаточного квершлага гор.418м после 3 месяцев наблюдений построен график изменения смещений вмещающих пород в зависимости от расстояния до контура выработки.

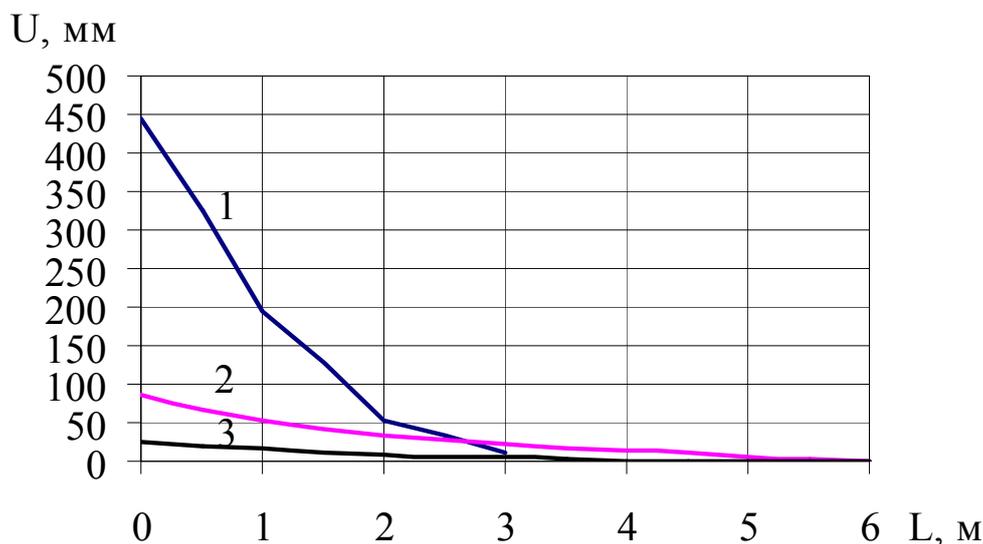


Рис. 2.9. График зависимости смещений пород от глубины заложения реперов (1 – смещения пород почвы, 2 – боков выработки, 3 – кровли)

Измерения смещений породного контура производились на участках выработки, где предварительно были выполнены ремонтно-восстановительные работы, связанные с подрывкой пород почвы. Это было выполнено для установления реальных темпов протекания процесса пучения «в чистом виде», т.е. как если после процесса проведения выработки.

Наибольшие смещения имели место по оси штрека. Репера, установленные у боков штрека, имели примерно одинаковые смещения. По изменениям отметок на соответствующих участках замерных станций определялась величина поднятия пород почвы и изменение сечения выработки.

Динамика процесса пучения характеризуется значительной интенсивностью процесса в начальный период (40...60 суток), когда реализуются значительные деформации породного массива в сторону выработанного пространства. Далее процесс носит затухающий характер, в результате чего интенсивность процесса значительно снижается, но не стабилизируется окончательно.

В зависимости от горно-геологических условий смещение кровли в окрестности выработок происходит в виде расслоения и последующего послойного сдвижения, ступенчатого опускания блоков по пересекающим слои трещинам, а также плавного опускания без видимых разрывов сплошности.

Общая длина экспериментальных участков составила 170 м, расстояние между соседними замерными станциями - 10 м. На каждой из станций, согласно методике проведения замеров в горных выработках [46], замерялись величинами

ны смещений пород в кровле выработки и каждого из боков, а также – почвы. При выполнении шахтных исследований по определению характера пучения использованы работы А.Н.Шашенко [46] и А.Н.Роечко [47], связанные с обеспечением устойчивости выработок в условиях пучения пород почвы. Данный метод дает возможность не только констатировать наличие пучения, но и определить его интенсивность (рис. 2.10). Первая серия замеров по всем станциям была выполнена в мае 2002 г. Всего в шахтных условиях было выполнено 5 серий замеров в течение года (с мая 2002 г по февраль 2003 г). Согласно проведенным замерам установлено, что процесс пучения носит сходный характер для выработок, находящихся на разных горизонтах. В условиях шахты «Комсомолец Донбасса» интенсивность реализации смещений пород почвы в стадии потери упругопластической устойчивости не зависит от глубины.

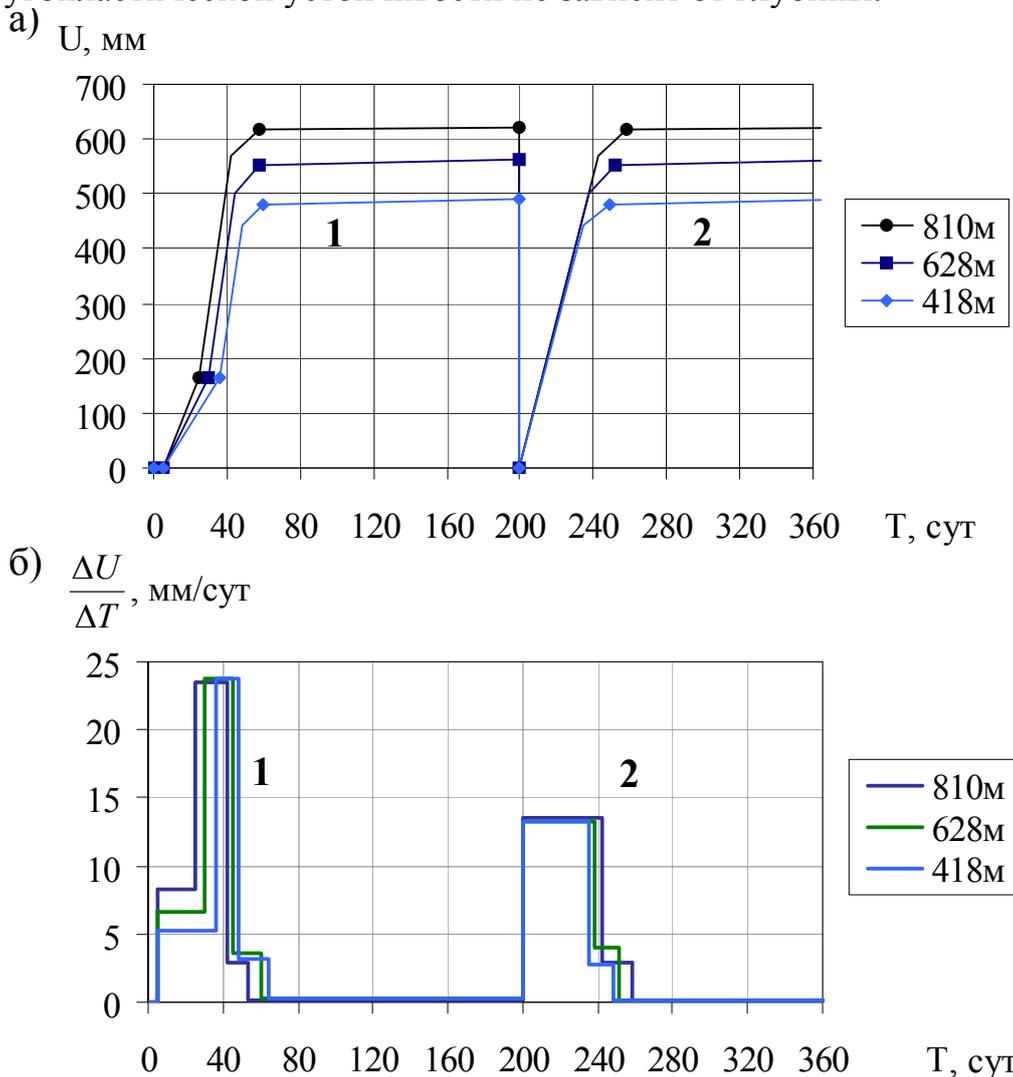


Рис. 2.10. Смещения (а) и скорость смещения (б) пород почвы в выработках с замерными станциями на разных горизонтах (1 – до подрывки, 2 – после проведения подрывки)

После проведения работ по подрывке почвы наблюдалось активное развитие процессов пучения в начальный период (30...50 суток) и затухающий ха-

рактически в последующий период. Различная интенсивность протекания процессов пучения в выработках на разных горизонтах в начальный период (25...35 суток) объясняет, почему смещения пород почвы проявляются быстрее на более глубоких горизонтах. Установлено, что средняя величина пластических деформаций на контуре выработки составляет 180мм и не зависит от глубины её расположения, а величина конечных пластических деформаций различна и нелинейно зависит от глубины расположения выработки и длительности протекания процесса. На основании рис. 2.10 получена характерная зависимость изменения интенсивности процесса пучения (после проведения подрывки почвы) в течение данного периода экспозиции в выработках на различных горизонтах (рис. 2.11).

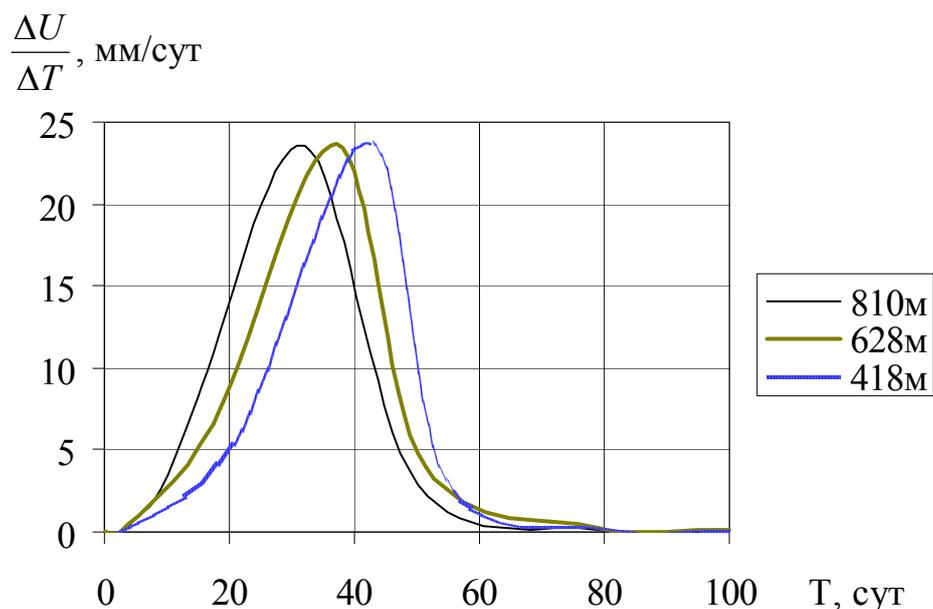


Рис. 2.11. Зависимость изменения интенсивности пучения во времени

Максимальная интенсивность пучения не зависит от глубины горизонта и равна 24мм/сут для условий шахты «Комсомолец Донбасса». Таким образом, для процесса пучения с использованием программы *Curve Expert 1.3* определена эмпирическая зависимость изменения интенсивности пучения во времени:

$$U' = (87 - 0,1 \cdot H) \cdot \sqrt{\frac{31}{(1 + e^{7-0,2T})}};$$

$$U'' = (248 + 0,005 \cdot H) \cdot \sqrt{\frac{306}{\left(1 + \frac{3 \cdot 10^5}{e^{0,35T}}\right)}}$$

где U' и U'' – интенсивность пучения до и после проведения подрывки соответственно, мм/сут; H – глубина горизонта, м; t – продолжительность эксплуатации выработки после проведения подрывки, сут.

Однако размер смещений пород почвы находится в нелинейной зависимости от глубины расположения выработок (рис. 2.12). Замеры проводились по участкам, на которых были проведены работы по подрывке пород почвы на ве-

личину до 500 мм. Величина подрывки (500 мм) выбрана, исходя из характера проявления пучения пород в данной выработке.

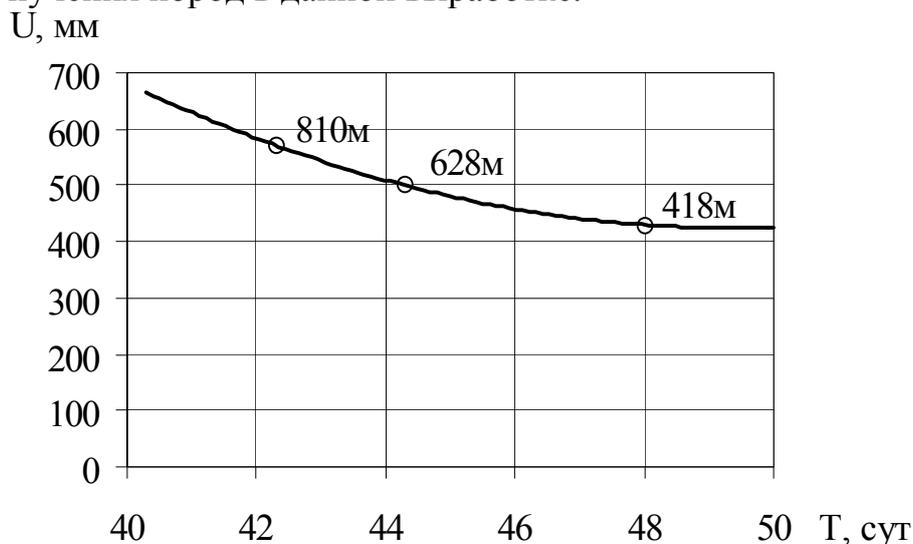


Рис. 2.12. Смещения пород почвы капитальных выработок на разных горизонтах при максимальном значении интенсивности пучения (24 мм/сут)

По результатам, полученным на основе наблюдений за смещениями почвы, построен график, приведенный на рис. 2.13.

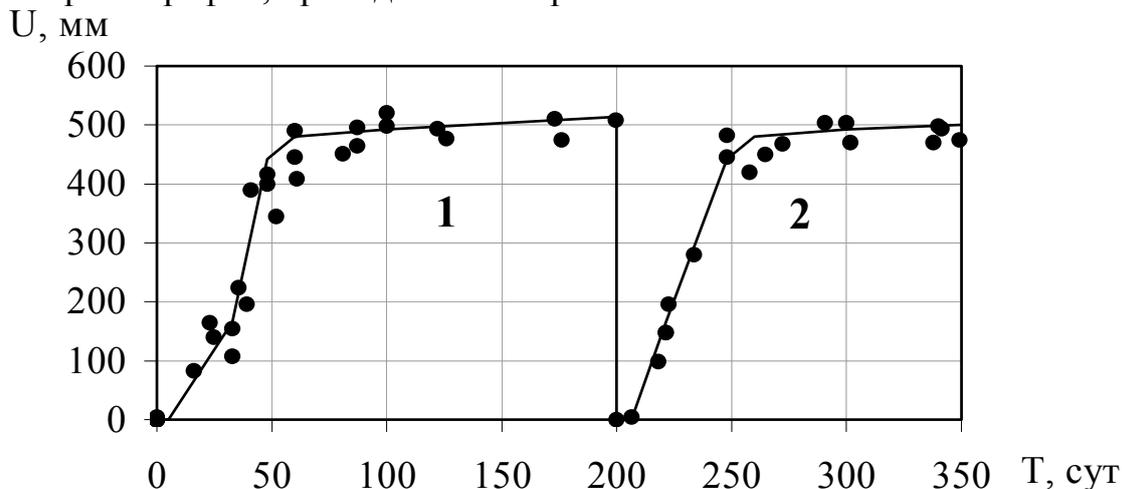


Рис. 2.13. Зависимость величины поднятия почвы на экспериментальных участках от срока эксплуатации восточного откаточного квершлага гор.418м (1 – до подрывки, 2 – после проведения подрывки)

Величина поднятия почвы изменяется неравномерно, после 3-х месяцев после проведения подрывки наблюдается максимальное пучение, которое в дальнейшем имеет затухающий во времени характер, и после полугода наблюдений достигла 500...520 мм. После 6 месяцев наблюдений на экспериментальном участке была выполнена подрывка почвы (рис.2.13), в результате чего наблюдалась цикличность характера проявления процессов пучения. Размер смещений пород почвы являлся идентичным на соответствующих участках диа-

граммы, что позволяет говорить о некоторой закономерности процессов, происходящих в приконтурном массиве пород до и после проведения подрывки.

В дальнейшем массив экспериментальных данных по каждой из станций обрабатывался в лабораторных условиях на ПЭВМ. Эти исследования позволили выделить в окрестности выработки по мере удаления от забоя наличие нескольких областей (рис. 2.14).

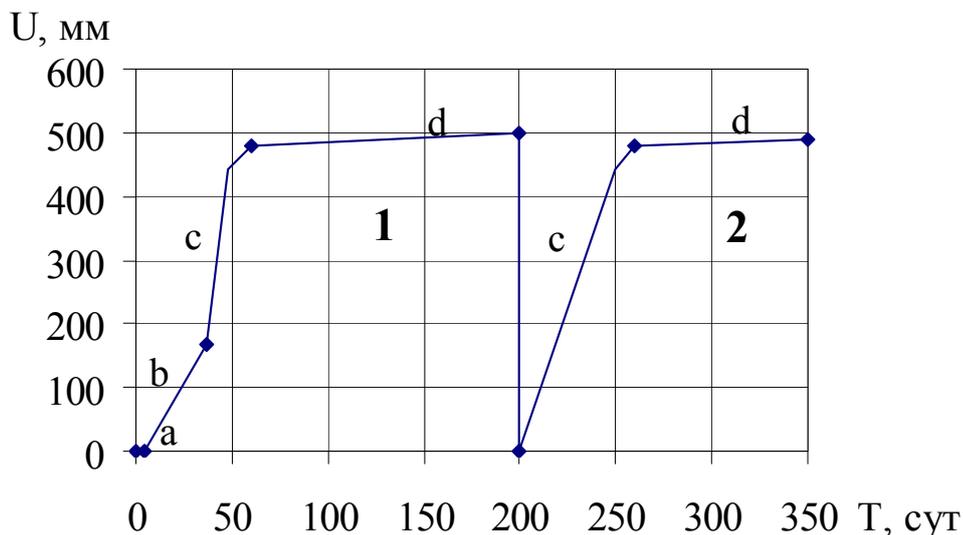


Рис. 2.14. Вертикальная конвергенция пород почвы гор. 418м (1 – до подрывки, 2 – после проведения подрывки)

Данные области характеризуются различной интенсивностью протекания механических процессов: а) область упругого деформирования; б) область пластических деформаций; в) область интенсивного пучения пород почвы; д) область стабилизации или продолжения процесса пучения пород почвы.

Область вспучивания пород почвы (в) хорошо прослеживается на графике смещений – она характеризуется достаточно быстрым протеканием процесса и резким увеличением смещений после достижения ими некоторого критического предела в предшествующей области (см. рис. 2.10, 2.14). Область (д) завершает процесс активного деформирования приконтурного породного массива. Интенсивность деформаций резко падает, они либо стабилизируются, либо не стабилизируются во времени.

Анализ литературных источников с подобными натурными исследованиями показывает, что все они, с поправкой на конкретную горно-геологическую ситуацию, качественно достаточно близко отражают картину развития пучения пород почвы. Это обстоятельство уже само по себе говорит о том, что в основе рассматриваемого явления лежит некоторая общая физическая закономерность.

Начало пучения пород почвы выработок всегда связано с образованием области (в). Характерной ее особенностью является очень быстрый рост деформаций в течение достаточно короткого промежутка времени (зона 1), происходящий после того, как пластические деформации достигают некоторых

предельных (критических) значений. После проведения подрывки почвы (зона 2), отмечено, что область (с) характеризуется меньшей интенсивностью процесса при большей продолжительности, что является результатом потери упругопластической устойчивости породами почвы и переходом в новое равновесное состояние.

Таким образом, в горно-геологических условиях шахты «Комсомолец Донбасса» вспучивание пород почвы в капитальных выработках носит циклический характер и представляет собой затухающий во времени в пределах цикла процесс потери упругопластической устойчивости приконтурного массива, характеризующийся наличием четырех стадий – упругой, упругопластической, потери упругопластической устойчивости и затухания интенсивности деформаций – в первом цикле и двух стадий – потери упругопластической устойчивости и затухания интенсивности деформаций, в последующих циклах, что позволяет на этой основе разрабатывать технические решения по управлению его параметрами.

Пучение пород наиболее интенсивно протекает в начальный период эксплуатации выработки, после выполнения работ по проведению или перекреплению выработки с проведением подрывки пород почвы. В течение первых 2-х месяцев интенсивность пучения достигает 24 мм/сут независимо от глубины залегания горизонта, снижаясь до 0,75...1 мм/сут после 6 месяцев. Средняя величина пластических деформаций на контуре выработки составляет 180мм и не зависит от глубины её расположения, а величина конечных пластических деформаций различна и нелинейно зависит от глубины расположения выработки и длительности протекания процесса, что позволяет прогнозировать периодичность ремонтных работ и оценивать эффективность применяемых технических решений. Результаты исследований процессов пучения до и после проведения подрывки показали идентичный характер развития геомеханических процессов при периодичности подрывки почвы каждые 3...4 месяца. Полученные результаты имеют хорошую сходимость с результатами работ Шашенко А.Н., Роевко А.Н., Сдвижковой Е.А., Тулуба С.Б., Татарина А.А. [47, 67, 72, 75], основанных на теории потери упругопластической устойчивости (научная школа проф. А.Н. Шашенко). Анализ натурных исследований проведенных автором и представленных в отмеченных выше работах показывает, что все они, с поправкой на конкретную горно-геологическую ситуацию, качественно достаточно близко отражают картину развития пучения пород почвы. Это обстоятельство говорит о том, что в основе явления лежит некоторая общая физическая закономерность.

2.4. Выбор способа борьбы с пучением пород почвы в капитальных выработках

На основании приведенного выше анализа способов борьбы с пучением пород почвы в капитальных выработках для условий слабых углевмещающих

пород (типа песчанистых и глинистых сланцев) предложен способ борьбы с пучением, в основе которого лежит комплекс мер, учитывающих характер протекания геомеханических процессов в породах, склонных к большим пластическим деформациям [49].

Способ обеспечения устойчивости выработки в условиях пучащих пород предполагает образование в почве выработки зоны разрыхленных пород (1), а также несущего слоя (3) (рис. 2.15). Разрыхленные породы служат демпфером при развитии процессов пучения. Зона укрепленных пород обеспечивает устойчивость пород почвы за счет перераспределения напряжений на боковые породы приконтурного массива.

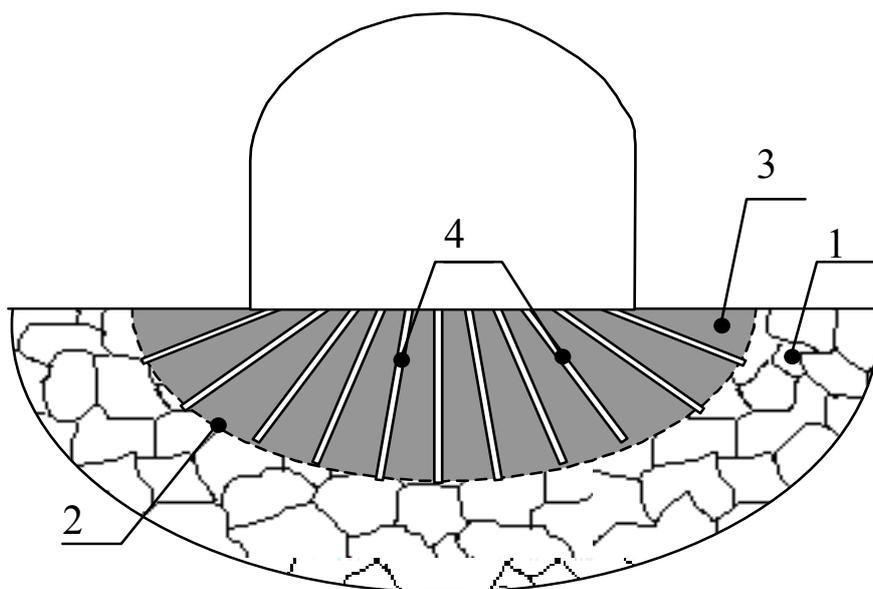


Рис. 2.15. Схема способа борьбы с пучением пород почвы

Первый этап включает создание в почве выработки зоны разрыхленных пород. Первоначально в почве выработки бурят шпуры по веерной схеме (рис. 2.16, а). Для задания необходимой глубины разрыхленной зоны при взрывании шпуры бурят с некоторым превышением по длине. Производится зарядание шпуров ВВ, в количестве, необходимом для разрыхления пород почвы. С помощью взрывания камуфлетных зарядов образуется зона трещиноватых пород (рис. 2.16, б). После выполнения взрывных работ производится уборка породы до контура выработки.

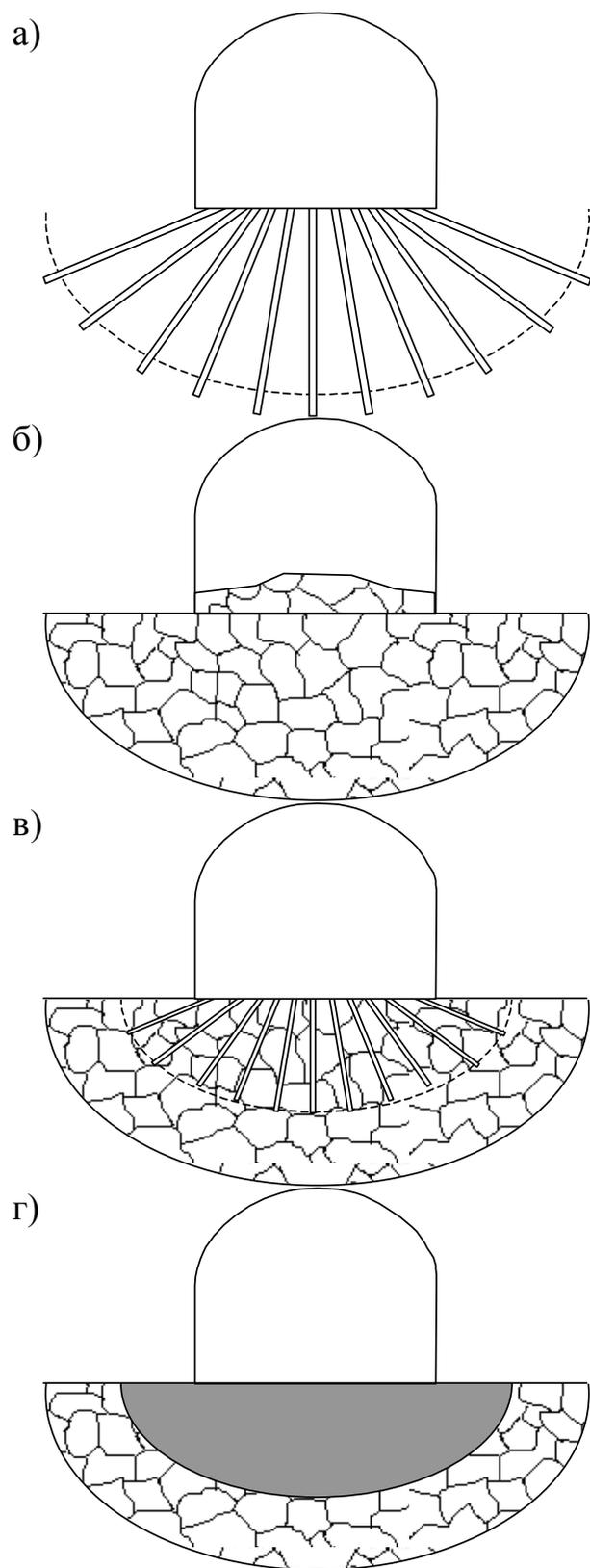


Рис. 2.16. Порядок выполнения работ, входящих в способ борьбы с пучением пород почвы

Во время выполнения работ **второго этапа** в разрыхленных породах создается зона укрепленных пород, т.н. породобетонная зона. Вначале производят бурение дополнительных шпуров по разрушенным породам в почве выработки (рис. 2.16, в). С помощью пакерной установки производят нагнетание полимерного водонепроницаемого состава для образования сплошного слоя. Затем, после образования полимерной пленки, в шпуры нагнетается тощий цементный раствор для обеспечения проникновения между шпурами. Так формируют верхний несущий слой (зона укрепленных пород) (рис. 2.16, г).

Полимерный состав изолирует слой укрепленных пород (область 3, рис. 2.15) от проникновения влаги со стороны слоя разрушенных пород (область 1 рис. 2.15). Слой разрушенных пород служит в качестве демпфера, поглощая деформации со стороны вмещающих пород почвы.

Таким образом, при соответствующей механизации процесса новый комбинированный способ учитывает недостатки и достоинства иных вариантов и является эффективным в конкретных горно-геологических условиях шахты «Комсомолец Донбасса». В связи с этим важное значение приобретает выбор рациональных параметров данной технологической схемы, при которой обеспечивается поддержание выработки в устойчивом состоянии без больших трудовых затрат в течение длительного периода времени. Для определения параметров данного способа для конкретных условий шахт требуется проведение физического моделирования на эквивалентных материалах. Это позволит определить качественную картину защитного действия разработанного комплекса мер в зависимости от размеров породонесущей оболочки, размеров зоны трещиноватых пород.

Глава 3

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ СПОСОБА БОРЬБЫ С ПУЧЕНИЕМ ПОРОД ПОЧВЫ КАПИТАЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК ПУТЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ЭКВИВАЛЕНТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

3.1. Общие положения

Физические и технологические процессы горного производства отличаются значительной сложностью, так как характеризуются большим числом параметров, взаимозависимых друг от друга. Изучение таких процессов сопряжено с существенными трудностями как при аналитических, так и при натурных исследованиях, поэтому природа многих из них еще до конца не ясна, хотя теоретический уровень горной науки, особенно за последние годы, значительно возрос. Этому в известной мере способствовало широкое использование при исследованиях физических и технологических процессов различных методов моделирования.

Наряду с дальнейшим более тщательным изучением физико-механических, и особенно реологических, свойств горных пород необходимы дополнительные исследования на моделях физических процессов сдвижений и деформаций пород в окрестности горных выработок для установления общих закономерностей проявления горного давления, а также с целью разработки на этой основе соответствующих инженерных мероприятий. При решении этих задач применяют методы эквивалентных материалов, фотоупругости, центробежного и иные виды моделирования [46]. Эти же методы весьма успешно используются при исследовании физических процессов газовыделений, устойчивости откосов карьеров, проветривания горных выработок и т.д.

Цель моделирования как метода исследования заключается в воспроизведении на модели процесса, подобного происходящему в натуре. Этот метод позволяет на уменьшенной или увеличенной по отношению к реальному объекту модели проводить качественные и количественные исследования изучаемого процесса в натуре, который по разным причинам часто бывает мало доступен или вовсе недоступен для более или менее детального изучения.

Материальные модели по существу представляют собой макеты реальных объектов, в которых воспроизводят те же физические процессы или им аналогичные. Для изготовления моделей применяют как материалы природы, так и материалы другой физической природы. С помощью таких моделей можно решать весьма сложные и важные практические задачи.

Таким образом, моделирование в познании реальной действительности является звеном, связывающим теорию с практикой: теория – идеальная модель – эксперимент (моделирование) – действительность.

Первые исследования явлений деформаций и разрушений толщи вмещающих пород на физических моделях проведены в конце XIX века. Вопросы, связанные с моделированием геомеханических процессов, детально рассмотрены в работах М. Файоля, А. Леона и Ф. Вильгейма, Ф.Ю. Левинсона-Лессинга, М.М. Протодяконова, Г. Шпаккелера, Е. Леера и К. Зейдля, Г. Доммана, Ф.А. Белаенко и Г.Л. Павленко и др. Однако, в большинстве поставленных тогда опытов не удовлетворялись основные требования механического подобия, в связи с чем результаты исследований представляют скорее качественные, чем количественные характеристики изучаемых явлений.

Большое значение для получения основных относительных количественных характеристик неоднородных напряженных состояний элементов сложных механических систем имела разработка оптического метода исследования напряжений. Данный метод впервые нашел применение для исследования характера напряженного состояния вокруг подземных выработок в работе Ф.Ю. Левинсона-Лессинга [51]. В работах Л.Э. Прокофьевой-Михайловской оптический метод получил дальнейшее развитие.

В работах ВНИМИ рассмотрены опыты по изучению оптическим методом характера распределения напряжений в объемных моделях, а также по изучению влияния динамических нагрузок, создаваемых взрывом.

Поляризационно-оптический, или просто оптический, метод моделирования позволяет устанавливать распределение и значения напряжений в массивах пород и элементах сооружений любой конфигурации, когда деформации модели происходят без разрыва сплошности. Оптический метод основан на свойстве большинства прозрачных изотропных материалов (целлулоид, бакелит, фенолит и др.), называемых оптически чувствительными, при приложении механических нагрузок приобретать оптическую анизотропию и проявлять способность двойного лучепреломления.

Работы по моделированию геомеханических условий шахт получили значительное развитие с появлением метода центробежного моделирования, удовлетворяющего требованиям механического подобия при одновременном действии указанных сил. В нашей стране данный метод разработан Г.И. Покровским [52] и Н.Н. Давыденковым [46]. Метод центробежного моделирования с успехом и большой степенью надежности применяют при решении задач, связанных с определением размеров устойчивых потолочин камер, оптимальной формы и параметров бортов карьеров и отвалов, давления обрушенных пород на днища очистных блоков, влияния длительной нагрузки на крепь капитальных выработок, пройденных в пластичных глинистых породах и др. Достоинством центробежного моделирования является то, что это единственный из методов моделирования, в котором, благодаря использованию натуральных горных пород, соблюдается соответствие между размерами частиц и молекул. Для некоторых задач это имеет особо важное значение. Однако, несмотря на большие достоинства этого метода, оправдавшего себя при решении ряда статических задач механики грунтов [52], а также при исследовании некоторых задач, связанных с давлением

обрушенной руды на стены камеры [53], при центробежном моделировании крайне затруднительно, а иногда и совсем невозможно, воспроизводить слоистые толщи разнородных по составу и свойствам пород. Большие технические трудности представляет и воспроизведение в модели перемещения забоя во времени, что ограничивает область эффективного применения данного метода, поэтому в ряде случаев возникает необходимость обращения к другим методам моделирования.

Более информативным является метод моделирования геомеханической ситуации с помощью эквивалентных материалов, предложенный Г.Н. Кузнецовым в 1936 г. [54]. Основные принципы этого метода сводятся к замене в модели естественных горных пород искусственными материалами с физико-механическими свойствами, которые, в соответствии с принятым масштабом моделирования, находятся в определенных соотношениях с физико-механическими свойствами натуральных горных пород [46].

Одним из преимуществ метода моделирования на эквивалентных материалах является возможность измерения показателей, отражающих НДС массива в интересующих областях, которые в натуральных условиях осуществить практически невозможно ввиду труднодоступности участков массива.

Идея моделирования методом эквивалентных материалов заключается в следующем:

- модель толщи пород и вырабатываемого полезного ископаемого изготавливается из некоторых искусственно подобранных материалов с соблюдением геометрического подобия модели и натуры;

- в целях достижения механического подобия материалы, из которых должна изготавливаться модель, подбираются не с произвольными физико-механическими свойствами, а с такими, которые находились бы в определенных соотношениях с физико-механическими константами горных пород. Материал, удовлетворяющий по своей механической прочности указанным требованиям, при заданных свойствах моделируемой горной породы и заданном линейном масштабе модели имеет название эквивалентного данной породе материала;

- эти соотношения определяются на основании общего закона динамического подобия с учетом одновременного действия сил тяжести и внутренних напряжений;

- моделирование крепления и закладки осуществляется путем введения в модель специальных приборов, работа которых также должна удовлетворять требованиям механического подобия натуре;

- при соблюдении указанных выше условий, а также необходимых начальных и контурных условий, механические процессы, происходящие в модели в связи с проведением в ней выработок, геометрически подобных натуре, должны развиваться в форме, близкой к действительной. При этом, так же как и в натуре, развитие указанных процессов будет происходить под действием сил тяжести самой модели, либо с применением каких-либо внешних нагрузок, имитирующих отброшенную часть породного массива.

В результате многочисленных исследований уточнены способы определения масштаба времени в моделях; разработаны основные требования и условия, обеспечивающие правильное построение моделей; значительно расширен диапазон рецептуры материалов.

3.2. Теоретические аспекты моделирования методом эквивалентных материалов

Идея моделирования методом эквивалентных материалов, как уже отмечалось выше, заключается в соблюдении всех необходимых условий подобия модели и натуры.

На основании общего определения свойств подобных физических явлений можно охарактеризовать механически подобные системы как такие системы, у которых все параметры, характеризующие механические процессы, происходящие в одной системе, могут быть получены простым умножением соответственных параметров другой системы на постоянные переходные множители. При этом для параметров различной физической природы множители различны, но для однотипных параметров этот множитель (константа подобия) имеет одно неизменное значение.

Теория подобия сформировалась на основании работ многих российских ученых. Наиболее известны в этой области работы А.А. Гухмана, В.Л. Кирпичева, М.В. Кирпичева, И.К. Конакова, М.А. Михеева, Н.Н. Павловского, Б.С. Петухова, Л.И. Седова и др. [55].

Механический процесс характеризуют три основные единицы измерения: длина, время и масса. Численные величины единиц измерения для всех прочих элементов, характеризующих рассматриваемый процесс, и, например, скорости, ускорения, внутренние напряжения в элементах системы, приобретают вполне определенные значения. В соответствии с этим механическое подобие определяется заданием переходных множителей (масштабов) для длины (геометрическое подобие), времени (кинематическое подобие) и массы (динамическое подобие) [55, 56].

Геометрическое подобие имеет место, если все размеры пространства, занятого изучаемой системой, и размеры ее отдельных элементов будут изменены в определенное число раз по сравнению с размерами пространства, занятого моделирующей системой.

Кинематическое подобие имеет место в этих двух системах в том случае, если сходственные частицы, двигаясь по геометрически подобным траекториям, проходят геометрически подобные пути в промежутки времени, отличающиеся постоянным множителем.

Динамическое подобие имеет место в том случае, если массы двух любых сходственных частиц, т. е. частиц, соответственным образом расположенных в пространстве и времени, отличаются друг от друга постоянным множителем.

Геометрическое подобие характеризуется соотношением:

$$\frac{l'_H}{l'_M} = \frac{l''_H}{l''_M} = \dots = \frac{l^i_H}{l^i_M} = C_l, \quad (3.1)$$

где l_H, l_M – линейные размеры модели и области в натуре.

Кинематическое подобие:

$$\frac{\tau'_H}{\tau'_M} = \frac{\tau''_H}{\tau''_M} = \dots = \frac{\tau^i_H}{\tau^i_M} = C_\tau, \quad (3.2)$$

где τ_H, τ_M – промежуток времени в натуре и модели.

Динамическое подобие:

$$\frac{m'_H}{m'_M} = \frac{m''_H}{m''_M} = \dots = \frac{m^i_H}{m^i_M} = C_m, \quad (3.3)$$

где m_H, m_M – масса частицы в натуре и модели.

Соотношение, выражающее основной критерий динамического подобия, называется критерием подобия или числом Ньютона и записывается в виде:

$$Ne = iden. \quad (3.4)$$

Для моделирования с использованием метода эквивалентных материалов требуется соблюдение условий однозначности [57], которые определяются заданием:

- геометрических условий, описывающих форму и размеры тела, в котором протекает процесс;
- физических условий, характеризующих физические свойства среды и тела;
- граничных условий, определяющих особенности протекания условий на границах тела;
- временных условий, отражающих особенности протекания процесса во времени.

Однако, подбор эквивалентных материалов, удовлетворяющих одновременно всем указанным выше условиям, представляет достаточно сложную задачу, требующую соответствующей теоретической и экспериментальной проработки. Тем не менее, известное несовершенство методики определения механических характеристик эквивалентных материалов, которые удовлетворяли бы всем рассмотренным требованиям механического подобия, не исключают возможности успешного применения метода эквивалентных материалов для решения определенного круга задач.

Рассматривая плоскую задачу, в которой процессы деформирования и разрушения происходят при статическом действии сил, можно ограничиться удовлетворением условий подобия лишь в отношении численных значений характеристик прочности соответственно выбранному масштабу модели. Модули, характеризующие упругие и пластические свойства модели, могут быть подобраны без соблюдения точного соответствия с масштабом модели при условии понижения модулей деформации конструкций, имитирующих работу крепи.

В случае преобладающего влияния динамических процессов условия подобия характеристик прочности и деформируемости имеют большое значение, т.к. позволяют моделировать условия обрушения пород в выработанное пространство под действием возникающих динамических нагрузок, а также перемещение под действием собственного веса (например, добыча на мощных крутопадающих пластах).

При построении и испытании моделей необходимо кроме удовлетворения определяющих критериев подобия, соблюдения геометрическое подобие модели, а также подобие начального состояния и граничных условий.

3.3. Подбор эквивалентных материалов и технология выполнения моделей

Конкретный состав эквивалентных материалов может быть различным в зависимости от масштаба модели и типа моделируемых горных пород. Выбор эквивалентного материала является одним из основных вопросов при решении той или иной конкретной задачи с помощью метода моделирования.

В качестве исходных материалов для создания модели применяют кварцевый песок, молотую слюду, тальк, мел, глину, которые должны соответствовать определенным требованиям. Так, например, песок следует отбирать чистым (без глинистых включений) с размерами зерен от 0,20 до 0,12 мм для мелкомасштабных и от 0,85 до 0,30 мм для крупномасштабных моделей.

Связующие вещества во всех применяемых эквивалентных материалах по своей природе разделяют на четыре группы [46]:

- 1) углеводороды нефтяного происхождения (парафин, церезин, вазелин и т.п.), обладающие пластичными или упругопластическими свойствами;
- 2) неорганические вещества (гипс, цемент, жидкое стекло, тиосульфат натрия), являющиеся хрупкими;
- 3) синтетические полимеры (карбамидная, эпоксидная, кремнеорганическая и др. смолы), имеющие хрупкие или упругопластические свойства;
- 4) смолы естественного происхождения (канифоль, пек и др.), относящиеся к хрупким веществам.

Использование комбинированных связующих или специальных модификаторов и присадок дает возможность варьировать как количественными, так и качественными характеристиками эквивалентных материалов. Физико-механические свойства массива горных пород всегда являются одним из главных факторов, определяющих характер развития процессов проявления горного давления. При моделировании этих процессов методом эквивалентных материалов знание указанных характеристик для материалов моделей совершенно необходимо, так как в осуществлении определенного соотношения между физико-механическими характеристиками горной породы и материала модели заключается основа данного метода. Полный комплекс этих характеристик включает в себя показатели всех свойств материала: прочностных, деформационных, реологических и других

физических (объемный вес, пористость, и пр.), а также его структурного строения с соответствующими характеристиками механических свойств на имеющихся поверхностях ослабления.

Направленное регулирование свойств материалов осуществлялось варьированием исходных компонентов в рецептуре получения эквивалентных материалов. В многокомпонентных смесях свойства изменяют за счет состава и соотношения между отдельными компонентами связующего или наполнителя. В этом случае один и тот же показатель, характеризующий свойства, может быть достигнут с помощью различных рецептур.

В качестве эквивалентного материала в настоящих исследованиях был использован искусственный материал на основе песка и парафина. Для мелкомасштабных моделей использовались пески мелкозернистые, крупностью $d = 0,21 \dots 0,12$ мм, а также технический парафин. Обладая низкой точкой плавления ($42 \dots 54^\circ\text{C}$), большой однородностью, способностью хорошо проникать и обволакивать мелкоистираемый материал инертных наполнителей, парафин представляет собой удобный цементирующий материал. Исходя из заданных параметров, был подобран материал модели, состоящий из кварцевого песка, графита и парафина. После этого вычисляли вес каждой составляющей смеси, а затем количество компонентов, необходимых для приготовления материала модели.

В качестве дополнительных вяжущих, отражающих структуру углевмещающих пород, при приготовлении пластичных смесей использовался технический вазелин и графит.

В емкость с сухим песком добавлялся в соответствующих пропорциях графит (порошок), вазелин и измельченный парафин. Данную смесь тщательно перемешивали, после чего укладывали в металлическую емкость с плотной крышкой. Для равномерного перемешивания компонентов и получения однородной смеси емкость прогревалась в течение 3 часов (при $T = 130 \pm 3^\circ\text{C}$) в условиях «водяной бани».

При моделировании процессов механики горных пород является необходимым обеспечение подобия следующих физико-механических характеристик эквивалентных материалов: прочности на сжатие, растяжение и изгиб, модуля упругости, сцепления при сдвиге, пластичности, а также реологических показателей. Одинаковыми по величине в модели и натуре должны быть такие безразмерные показатели как коэффициент Пуассона и угол внутреннего трения.

Условия подобия характеризуются выполнением следующих равенств [57]:

Для внешних сил:

$$P_M = \frac{l_M^3 \gamma_M}{l_H^3 \gamma_H} P_H, \quad (3.5)$$

где γ_H , γ_M – объемный вес материала природы и модели;

Для процессов разрушения:

$$R_{СЖ.М} = \frac{l_M}{l_H} \cdot \frac{\gamma_M}{\gamma_H} \cdot R_{СЖ.Н}; \quad (3.6)$$

$$R_{P.М} = \frac{l_M}{l_H} \cdot \frac{\gamma_M}{\gamma_H} \cdot R_{P.Н} \quad (3.7)$$

Для соблюдения подобия процессов механики горных пород в области упругих деформаций должны выполняться следующие равенства:

$$E_M = \frac{l_M}{l_H} \cdot \frac{\gamma_M}{\gamma_H} \cdot E_H; \quad (3.8)$$

$$\mu_M = \mu_H, \quad (3.9)$$

где E_M , E_H – модуль упругости модели и природы соответственно;
 μ – коэффициент Пуассона.

Механические процессы в массиве горных пород в области пластических деформаций во всем диапазоне напряжений от начальных до разрушающих без учета влияния времени будут подобны, если соблюдается условие подобия пластических деформаций:

$$\frac{\varepsilon_{П.М}}{(\varepsilon_V + \varepsilon_{П})_M} = \frac{\varepsilon_{П.Н}}{(\varepsilon_V + \varepsilon_{П})_H}, \quad (3.10)$$

причем $(\varepsilon_V + \varepsilon_{П}) = f(\sigma)$ во всем диапазоне напряжений от начальных (упругих) до разрушающих (пластических) (без учета влияния времени).

Для испытания и правильной оценки физико-механических свойств экспериментальных смесей в лаборатории производились исследования по определению объемных и удельных весов материалов, предела прочности на сжатие σ , модуля Юнга E и коэффициента Пуассона μ . Определение σ , E и μ выполняли на цилиндрических образцах сечением 21,1 см² и высотой 140 мм с помощью малогабаритного пресса, изготовленного в лаборатории моделирования и конструкционных материалов кафедры строительных геотехнологий и геомеханики Национального горного университета. Указанный прибор позволяет регистрировать нагрузку и соответствующие ей деформации на слабых образцах модельного материала. Цилиндрические образцы изготавливались в металлических разъемных гильзах.

Методика проведения испытаний следующая [57, 58]. Стандартное уплотнение материала осуществляли с помощью лабораторного копра. После уплотнения и остывания образец вынимали из формы и подвергали испытанию. Объемный вес определялся обычным методом: путем измерения объема точной навески материала в мерном стеклянном цилиндре.

В ходе исследований было испытано 10 различных составов эквивалентного материала. Для каждого состава было проведено 6 серий испытаний всего около 60 испытаний. В результате определены 4 состава, которые по своим физико-механическим параметрам наиболее полно воспроизводят свойства горных пород шахты “Комсомолец Донбасса”. Результаты испытаний приведены в табл. 3.1...3.4.

Таблица 3.1

Основные физико-механические параметры эквивалентного материала для угля

Характеристика материала	Натуры	Модели
1. Объемная масса, т/м ³	1,35	1,2...1,25
2. Предел прочности на одноосное сжатие, МПа	15	0,11...0,13
1. Модуль Юнга, МПа	$5,4 \cdot 10^3$	$0,058 \cdot 10^3$
2. Коэффициент Пуассона	0,16	0,16

Таблица 3.2

Основные физико-механические параметры эквивалентного материала для
песчанистого сланца

Характеристика материала	Натуры	Модели
3. Объемная масса, т/м ³	2,3	1,6...2,0
4. Предел прочности на одноосное сжатие, МПа	30	0,23...0,28
5. Модуль Юнга, МПа	$8 \cdot 10^3$	$0,118 \cdot 10^3$
6. Коэффициент Пуассона	0,24	0,24

Таблица 3.3

Основные физико-механические параметры эквивалентного материала для
глинистого сланца

Характеристика материала	Натуры	Модели
1. Объемная масса, т/м ³	2,4	1,6...2,0
2. Предел прочности на одноосное сжатие, МПа	40	0,23...0,28
3. Модуль Юнга, МПа	$1,3 \cdot 10^4$	$0,0187 \cdot 10^4$
4. Коэффициент Пуассона	0,24	0,24

Таблица 3.4

Основные физико-механические параметры эквивалентного материала для
песчаника

Характеристика материала	Натуры	Модели
1. Объемная масса, т/м ³	2,5	1,7...2,0
2. Предел прочности на одноосное сжатие, МПа	60	0,41...0,44
3. Модуль Юнга, МПа	$1,5 \cdot 10^4$	$0,0211 \cdot 10^4$
4. Коэффициент Пуассона	0,21	0,21

В дальнейших лабораторных исследованиях применялись следующие смеси:

- состав №1 (песок – 95,9%, парафин – 2,9%, графит – 0,7%, солидол – 0,5% по массе) соответствует **песчанистым сланцам**,
- состав №2 (94,8%:4%:0,7%:0,5%) – **глинистым сланцам**,
- состав №3 (92,3%:6,4%:0,8%:0,5%) – **песчаникам**,
- состав №4 (96,7%:1,9%:0,9%:0,5%) – **углям**.

3.4. Определение влияния коэффициента разрыхления на физико-механические показатели породного массива

Основными показателями при решении вопросов об устойчивости горных выработок являются механические свойства горных пород, отражающие характер зависимости между напряжениями и деформациями угля и углевмещающих пород [61].

Физико-механические параметры пород с различной степенью разрыхления использовались в дальнейшем (см. раздел 4) для обоснования способа борьбы с пучением и определения необходимой степени разрыхления пород демпферной зоны на основе математического моделирования.

Для характеристики механических свойств пород необходимо определить: модули упругости и коэффициенты Пуассона; пределы прочности при одноосном сжатии и растяжении; пределы прочности при срезе. Но так как проведение испытаний по определению физико-механических параметров на образцах глинистых пород является в значительной степени затруднительным, испытания проводились на образцах из эквивалентного материала с соблюдением условия механического подобия (см. п. 3.3) на основе известных методик [65, 66]. Для этого проводились контрольные эксперименты со стандартными монолитными образцами из эквивалентного материала и образцами песчанистого сланца, взятыми в качестве проб из скважин в шахтных условиях. Образцы испытывались на сжатие при отсутствии бокового расширения.

Для обоснования способа борьбы с пучением проведены лабораторные исследования параметров деформирования предварительно нарушенного породного массива на основе эквивалентного материала. Учитывая то, что предел прочности на сжатие и модуль деформации (для пород с ненарушенной структурой – модуль упругости) в значительной степени определяют характер протекания процесса деформирования, так называемой зоны разгрузки (зоны разрыхленных пород), целью данных исследований являлось определение данных параметров с целью последующего их использования для аналитического моделирования способа борьбы с пучением пород почвы и определения его эффективности при различной степени разрыхления пород в демпферной зоне.

Во время лабораторных экспериментов определялись зависимости изменения продольных деформаций от несущей способности разрушенного породного массива при различном коэффициенте разрыхления. Работы выполнялись на винтовом прессе (рис. 3.1). С помощью индикатора часового типа 1 определялась величина уплотнения разрыхленного материала при соответствующих значениях напряжений, возникающих в материале, которые определялись при помощи тензодатчика 2.

Коэффициент разрыхления нарушенных пород зависит от их гранулометрического состава, поэтому для получения материала с заданной величиной коэффициента разрыхления был использован ситовой метод [65].

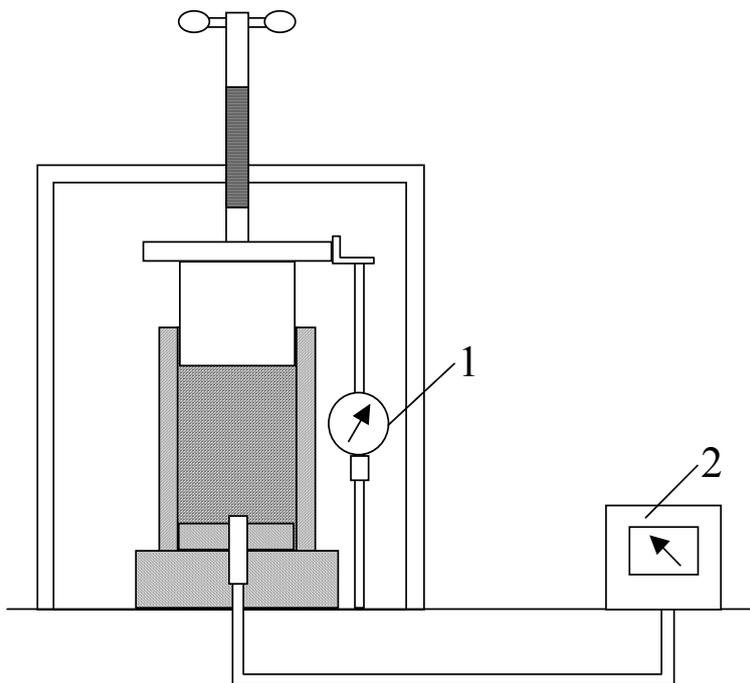


Рис. 3.1. Схема винтового пресса для определения степени уплотнения разрыхленного материала без влияния бокового давления

Материал был просеян через сита, с уменьшающимся размером ячеек. Начальный коэффициент разрыхления задавался на основе выделения нескольких фракций (табл. 3.5).

Таблица 3.5

Подбор коэффициента разрыхления смеси по гранулометрическому составу

Коэффициент разрыхления	Гранулометрический состав, %							
	<0,1мм	0,25-0,1мм	0,25-0,5мм	0,5-1мм	1-2мм	2-5мм	5-10мм	>10 мм
$K_p=1,0$	-	-	-	-	-	-	-	100
$K_p=1,1$				7	8	15	-	70
$K_p=1,2$	-	-	-	15	15	10	-	60
$K_p=1,3$	-	-	5	15	30	-	-	50
$K_p=1,4$	-	3	17	20	20	-	-	40

На основании проведенных исследований на одноосное сжатие без бокового давления построены соответствующие компрессионные кривые (рис. 3.2).

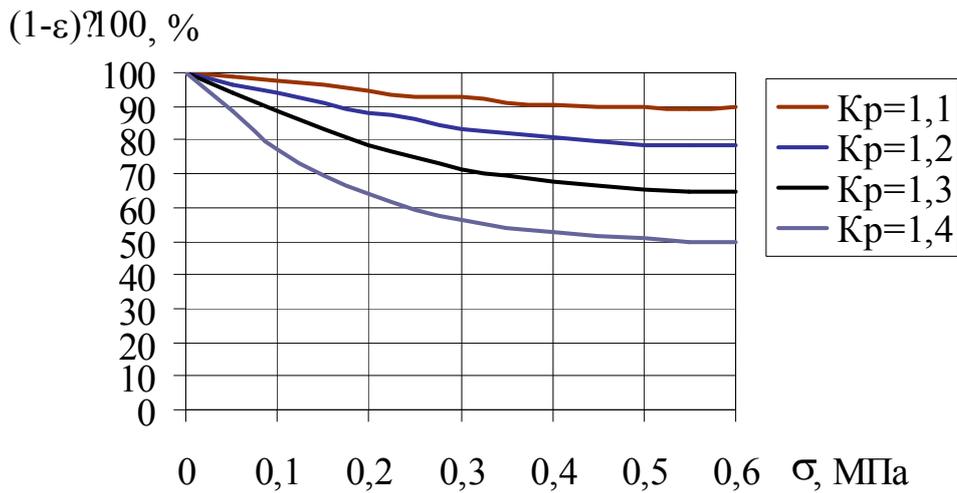


Рис. 3.2. Компрессионные кривые эквивалентного материала с различным коэффициентом разрыхления

В результате данных лабораторных экспериментов с использованием винтового прессы (для испытаний разрыхленных образцов) и гидравлического (для монолитного образца) построен рис. 3.3.

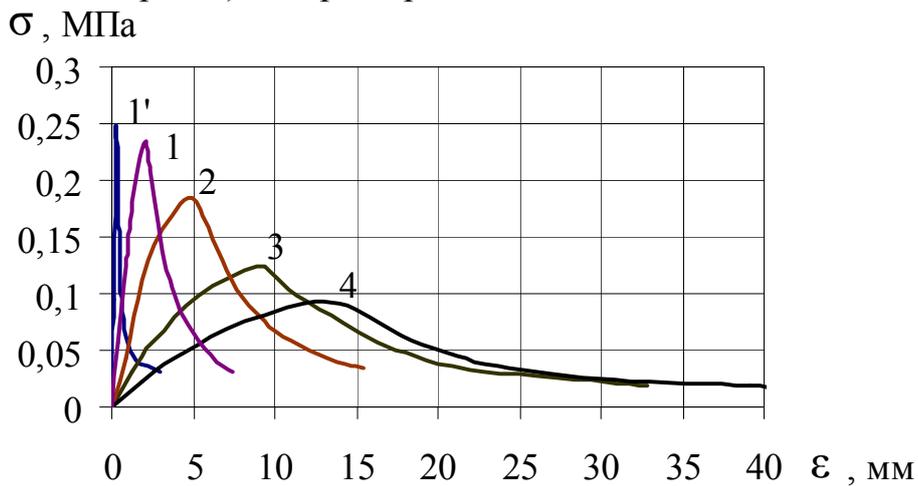


Рис. 3.3. Кривые деформирования эквивалентного материала, соответствующего песчанистому сланцу при различной степени разрыхления ($1'$ – монолитный образец; $1 - K_p=1,1$; $2 - K_p=1,2$; $3 - K_p=1,3$; $4 - K_p=1,4$)

На основе испытаний моделей из эквивалентного материала выполнен пересчет с учетом коэффициентов подобия физико-механических параметров массива разрыхленных пород демпферного слоя при различной степени разрыхления (см. п.3.3). Данные представлены на рис. 3.4.

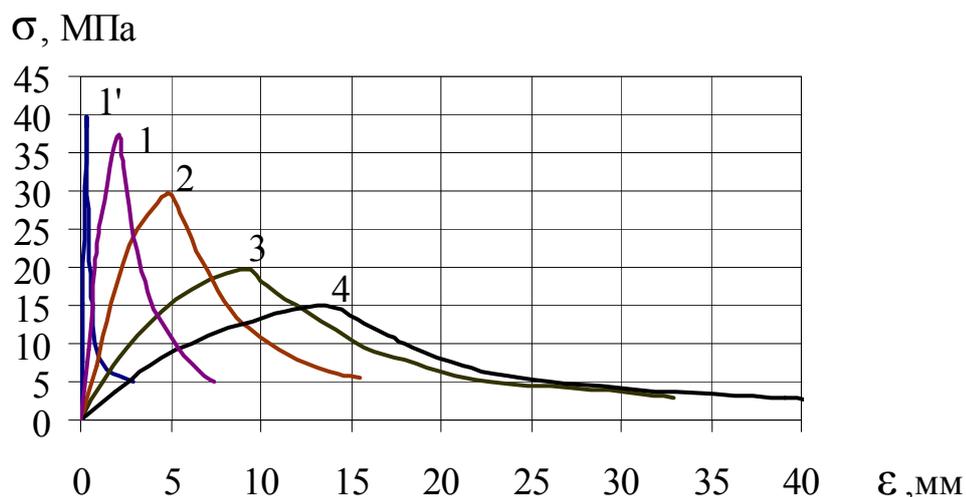


Рис. 3.4. Кривые деформирования, преобразованные для песчанистого сланца с различным коэффициентом разрыхления (**1'** – монолитный образец; **1** – $K_p=1,1$; **2** – $K_p=1,2$; **3** – $K_p=1,3$; **4** – $K_p=1,4$)

Учитывая то, что с помощью эквивалентного материала моделировались геомеханические ситуации реальных горных пород, которые по развитию процессов деформирования во времени могут отличаться от процессов, наблюдаемых на моделях, для определения характера деформирования во времени были проведены испытания образцов материала и песчанистого сланца. На основе данных исследований построены кривые консолидации для эквивалентного материала (рис. 3.5) и песчанистого сланца (рис. 3.6) при равных условиях нагружения (нагрузка 80% предела прочности на одноосное сжатие). Кривые консолидации показывают как реализуются деформации во времени. Установлено, что кривые консолидации имеют сходный характер по степени реализации деформаций во времени с отличием по длительности данных сроков реализации. Соблюдение подобия в масштабе времени представляется возможным на основе сравнения представленных графических зависимостей. Структурно-нарушенный массив характеризуется различной по времени степенью реализации деформаций.

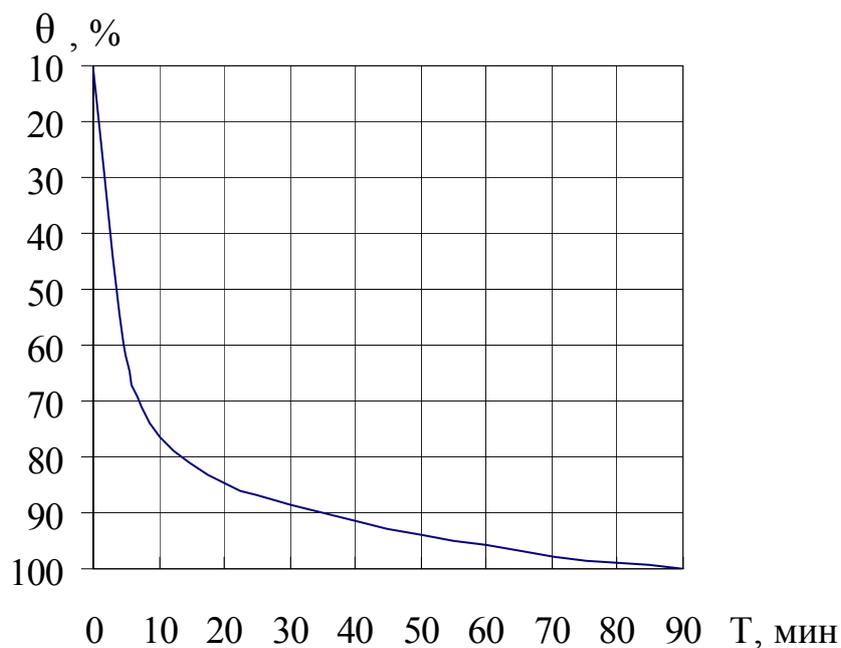


Рис. 3.5. Кривая консолидации для эквивалентного материала при $\sigma=0,2\text{МПа}$

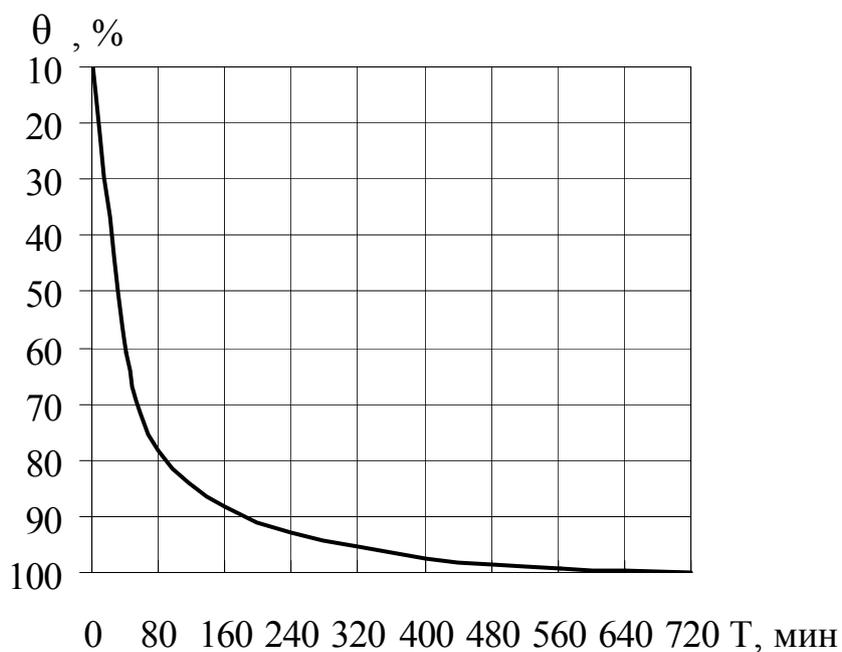


Рис. 3.6. Кривая консолидации для песчанистого сланца при $\sigma=28\text{МПа}$

Представленная на рис. 3.7 сравнительная диаграмма зависимости реализации деформаций эквивалентного материала с различным коэффициентом разрыхления объясняет принцип работы зоны укрепленных пород и зоны разгрузки при разной степени разрыхления пород.

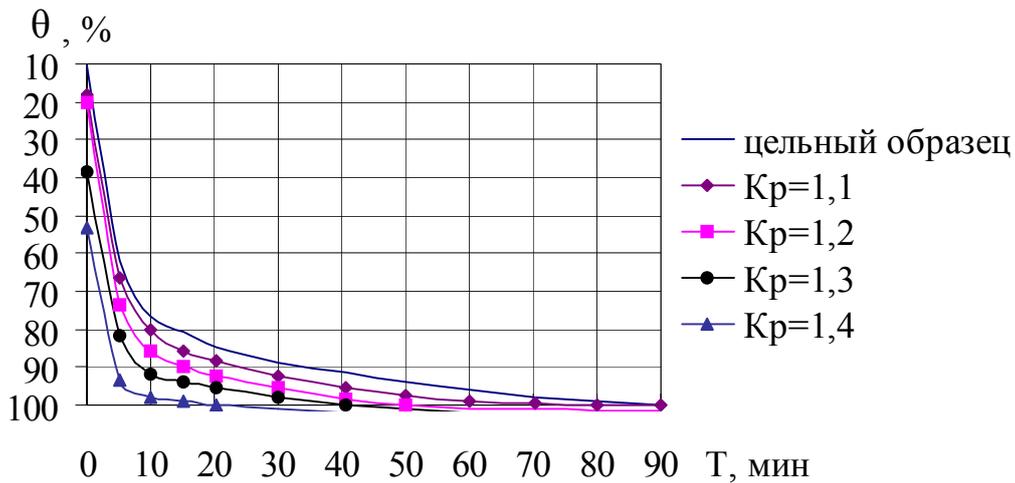


Рис. 3.7. Кривая консолидации для образцов эквивалентного материала с различным коэффициентом разрыхления при $\sigma=0,2\text{МПа}$

Следовательно, одной из задач решаемых при проведении дальнейших исследований будет определение необходимой степени разрыхления пород демпферной зоны с целью обеспечения высокой эффективности работы предлагаемого способа. Полученные кривые деформирования материала при различной степени разрыхления (см. рис. 3.4) позволили обобщить представленный практический материал и построить кривую изменения предела прочности разрыхленных пород от деформаций с изменяющимся значением коэффициента разрыхления (рис. 3.8).

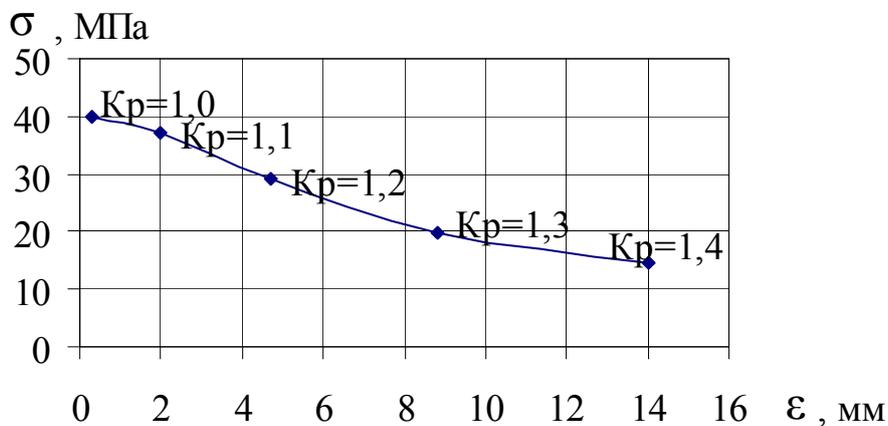


Рис. 3.8. Кривая изменения предела прочности разрыхленных пород при различной степени разрыхления

Зависимость между коэффициентом разрыхления и модулем деформации предварительно разрыхленных пород песчанистого сланца определена на основе анализа графической зависимости на рис. 3.8 и представлена на рис.3.9.

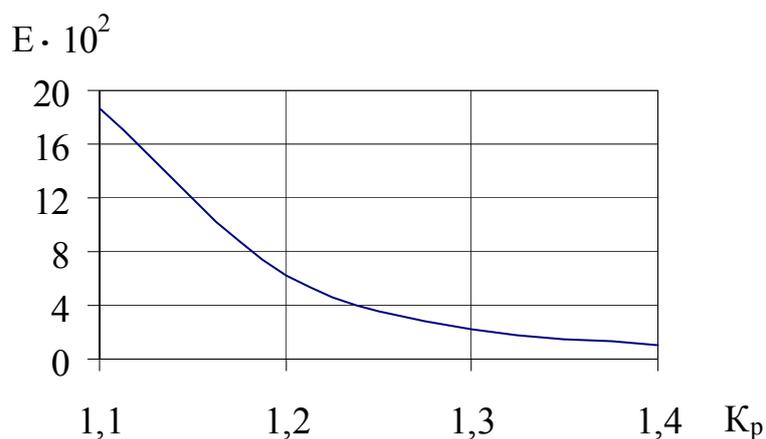


Рис. 3.9. Зависимость изменения величины модуля деформации от коэффициента разрыхления

3.5. Определение эффективных мер борьбы с пучением пород почвы на моделях из эквивалентных материалов

Разработка мероприятий, направленных на обеспечение устойчивости выработок в условиях пучащих пород является сложной и многоплановой задачей, для решения которой необходимо детальное изучение процесса, а также проведение экспериментов по определению оптимальных параметров рассматриваемого способа борьбы с пучением.

Технология проведения испытаний моделей на основе эквивалентных материалов основана на использовании плоского стенда, на котором осуществляются эксперименты (рис. 3.10).



Рис. 3.10. Стенд для моделирования на эквивалентных материалах

Стенд представляет собой систему домкратно-рычажных механизмов, при помощи которых усилие передается на переднюю стенку. На передней стенке стенда сформирована полость, в которую помещается эквивалентный материал. С лицевой стороны полость закрыта слоем органического стекла, которое позволяет наблюдать за протеканием процесса, а также выполнять необходимые замеры.

Методика моделирования состоит в следующем. Перед загрузкой материала в экспериментальную область боковые грани модели, а также стекло смазываются графитовой смазкой, что обеспечит снижение влияния сил трения от взаимодействия материала и ограничивающих поверхностей при проведении эксперимента. Модель изготавливают путем наращивания слоев снизу вверх. При этом для каждого слоя подбирают эквивалентный материал, соответствующий прочностным и деформационным характеристикам породы в натуре. Прогретый материал засыпают в полость послойно, по 5 см. Затем слой выравнивают и уплотняют специальными приспособлениями. Между слоями разных эквивалентных материалов просыпается тонкий слой измельченного мела для обеспечения визуального разграничения слоев. Уплотнение каждого слоя происходит вследствие статического приложения груза массой 20 кг. После того, как модель сформирована, на вертикальные рычаги стенда загружается статическая нагрузка величиной 10 кг. В таком состоянии модель находится в течение часа. Затем нагрузка снимается и демонтируется стекло. После этого на открытую часть модели мелом наносят мерную сетку. Для этого используется шаблон, который позволяет наносить сетку с размером ячеек 2×2 см. Затем в модели создается полость, имитирующая горную выработку (рис. 3.11).

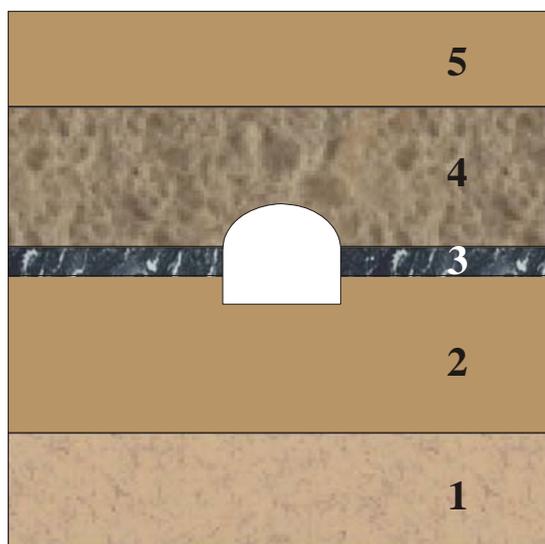


Рис. 3.11. Расчетная схема определения устойчивости выработки в условиях пучащих пород шахты ПАО «ДТЭК Комсомолец Донбасса»

Предварительно были выполнены эксперименты по определению влияния слоистости массива в почве выработки на развитие процессов вспучивания.

Для горно-геологических условий пласта l_4 шахты “Комсомолец Донбасса” моделировалась слоистая среда. В табл. 3.6 представлены слои, в порядке очередности их подготовки для проведения экспериментов (снизу вверх).

Таблица 3.6

№ п/п	Моделируемый слой	Мощность, м
1	Песчаник	5
2	Песчанистый сланец	7
3	Уголь	1,25
4	Глинистый сланец	6
5	Песчанистый сланец	4

Далее при создании модели в основании выработки моделируются мероприятия по предотвращению пучения. Сначала в почве выработки удаляется материал и моделируется полость в форме полуовала, что соответствует границам зоны разрыхленных пород. В эту полость укладывается предварительно подготовленный эквивалентный материал с различным процентным составом исходных компонентов равномерно перемешанных фракций, за счет чего достигается заданный параметр коэффициента разрыхления. Поверх разрыхленного материала укладывался усеченный эллиптический цилиндр из уплотненного эквивалентного материала (песчаника), что позволило смоделировать слой уплотненных цементированных пород (рис. 3.12).

Зона I – зона разрыхленных пород; зона II – зона уплотненных пород, создается при помощи уплотненного материала, моделирующего свойства песчаника.

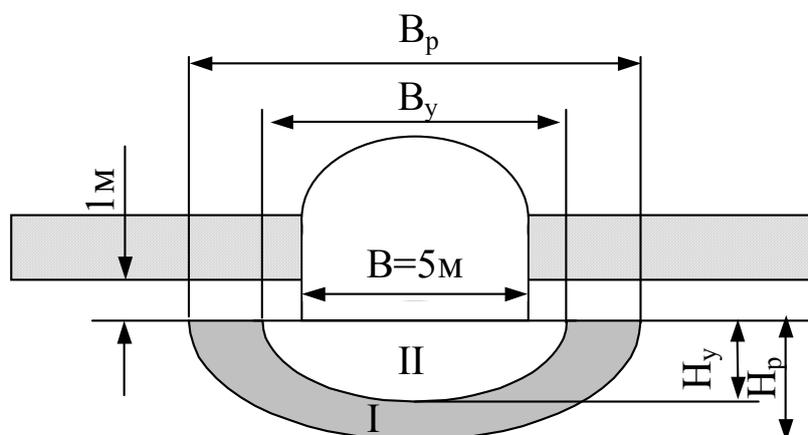


Рис. 3.12. Схема способа борьбы с пучением пород

В результате проведенных подготовительных работ по созданию физической модели конечная реализация расчетной схемы имела вид, представленный на рис. 3.13. Выработанное пространство закрепляется устройством, имитирующим работу крепи, с соблюдением необходимых параметров жесткости, упругости и податливости в замковых соединениях. На контуре выработки (кровля, почва, бока) наносят маркеры для регистрации деформаций и смещений в период испытания. Замеры изменения расстояния между точками позволят судить о горизонтальной и вертикальной конвергенции.

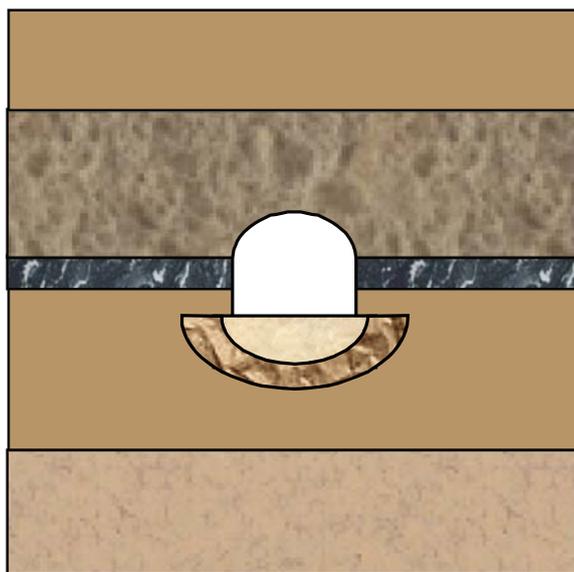


Рис. 3.13. Расчетная схема определения параметров способа борьбы с пучением пород почвы

По завершении подготовительных работ стекло монтируется на место, закрепляется при помощи винтовых ключей и ребер жесткости. Деформации, возникающие на модели в течение всего эксперимента, фиксируются при помощи фотоаппарата, установленного на штативе перед моделью.

Нагрузка на модель передавалась через вертикальные рычаги, с интервалом 5 кг. После того, как деформации элементов модели установились – производилась съемка замеров, и выполнялись снимки при помощи стационарно установленного фотоаппарата.

Завершающим этапом моделирования являлось собственно испытание модели, т.е. воспроизведение в определенном масштабе времени процесса изменения полей напряжений, деформаций и смещений с разрывом сплошности при разработке. Исходя из задачи моделирования, при испытании модели более подробно изучают развитие деформаций, разрушений и смещений пород в призабойном пространстве и взаимодействие пород с крепью. На основе полученных данных определялась эффективность способа при различных параметрах зон разрыхленных и уплотненных пород (глубина, ширина и коэффициент разрыхления для разрыхленной зоны).

Всего испытано 45 моделей, имитирующих горнотехнические условия и параметры способа борьбы с процессами пучения (табл 3.7).

Таблица 3.7

Ход лабораторных работ по рассмотренным вариантам

Разрыхленная зона																	
		H=2,5 B=8,5		H=2,75 B=9,75		H=3 B=10		H=3,25 B=10,2		H=3,5 B=10,75		H=3,75 B=13		H=4 B=10		H=4 B=11	
Уплотненная зона		H=1		B=7		2											
		H=1,5		B=8								3					
		H=1,75		B=7		4											
		H=2		B=5,75		13											
		H=2		B=7		14				12						5	
		H=2		B=6,5		9		10									
		H=2,25		B=6,25						11							
		H=2,25		B=6				8						7			
		H=2,25		B=6,2						6							

При проведении испытаний параметры зоны уплотненных пород варьировались в диапазоне: по глубине – 1...2,25м; по ширине – 5,75...8м. Параметры границ зоны разрыхленных пород изменялись в пределах 2,5...4м по глубине и 8,5...13м по ширине. Изменение параметров способа позволяет изменять НДС вмещающего массива, а также влиять на устойчивость выработки за счет обеспечения баланса между напряжениями, возникающими со стороны пород почвы и напряжениями в уплотненной зоне.

Целью данной работы являлось обоснование рациональных параметров способа борьбы с процессами пучения на основе результатов физического моделирования на эквивалентных материалах. Основной задачей при определении данных параметров являлась минимизация расходов, связанных с выполнением предлагаемых мероприятий. Поэтому при проведении исследований была выбрана схема, по которой выполнялся выбор последующего варианта. Учитывая то, что для получения необходимых данных при стандартном подходе потребовалось проведение значительного количества испытаний, был выбран способ наименьших квадратов. Каждый последующий вариант моделировался с учетом полученных ранее результатов.

В результате создания буферной зоны из разрыхленных пород достигается реализация избыточных напряжений и плавное включение в работу, посредством несущей зоны, боковых пород, с последующим перераспределением напряжений. Таким образом, для данного способа на основе физического моделирования методом эквивалентных материалов определялась качественная картина влияния схем с различной геометрией демпферной и несущей зон на изменение устойчивого состояния выработки при соблюдении равных условий проведения эксперимента.

Значения коэффициента разрыхления демпферной зоны ($K_p=1,3$) и предела прочности на одноосное сжатие эквивалентного материала зоны уплотненных пород ($\sigma_{сж}=0,4\text{МПа}$) были постоянными во время всех испытаний на физических моделях. Исходя из предварительно проведенных испытаний, минимально необходимое количество моделей по каждому варианту было принято равным 3.

3.6. Анализ результатов моделирования методом эквивалентных материалов

При проведении экспериментов определялись геометрические параметры уплотненной и разрыхленной зон. Одним из основных влияющих параметров являлась форма обратного свода уплотненной зоны. Предварительными экспериментами установлено, что наибольшей устойчивостью при создании зоны укрепленных пород обладает эллиптическая форма. В начальный период загрузки модели происходит перераспределение напряжений. Активно работает демпферная зона, передавая напряжения со стороны пород почвы на несущий слой из укрепленных пород. Вертикальное давление, которое проявляется со стороны пород кровли и боков выработки в данном случае

уравнивает нагрузки со стороны пород почвы, обеспечивая необходимую устойчивость системы «кровля-почва». Для обеспечения равновесного состояния породного массива необходимо в первую очередь сохранение несущей способности слоя укрепленных пород. Большое значение при определении размеров данного слоя имело определение рациональных параметров зоны разрыхленных пород, т.к. именно данная зона служит буфером между породами, находящимися в запредельном напряженно-деформированном состоянии и породобетонным слоем, который работает в упругом режиме.

При проведении экспериментов на физических моделях было установлено, что при достижении нагрузок на крепь, равных 6,4кН, в почве выработки, у стоек, образуются трещины, направленные к центральной оси. При увеличении нагрузок со стороны породного массива трещины в почве развиваются и происходит отрыв слоя пород на глубину 1м. По линии отрыва данный слой имеет эллиптическую форму. При нагрузках свыше 7,2кН активно проявляется процесс пучения – оторванный слой пород, сминаемый по бокам стойками крепи, выдавливается в выработку, в значительной степени уменьшая поперечное сечение. Смоделированная ситуация в значительной степени отражает процессы, характерные для НДС породного массива приконтурной части выработки в условиях шахт Центрального Донбасса. Проведенные подготовительные исследования позволили смоделировать характерные неблагоприятные условия ПАО «ДТЭК Шахта «Комсомолец Донбасса» (рис.3.14...3.27).

Величина смещений пород по горизонтали и по вертикали позволили обозначить граничные условия, исходя из которых, в дальнейшем, определялась эффективность применяемых мероприятий, а также на основе анализа полученных данных параметры предложенного способа.

В ходе лабораторных экспериментов было установлено, что уже при достижении нагрузки равной 4кН в приконтурном массиве модели, на границе с зоной разрыхленных пород наблюдается изгиб горизонтальных линий сетки и начало процесса закрытия трещин и пустот в демпферной зоне. Вначале активно деформировалась демпферная зона по бокам выработки. Наблюдалось значительное проседание вышележащих и подстилающих пород в этих областях. Затем в работу включалась центральная часть демпферной зоны.

Во многих случаях при значительной ширине и малой глубине укрепленной зоны (см. рис. 3.16) наблюдалось нарушение данной зоны в виде трещины по центру.

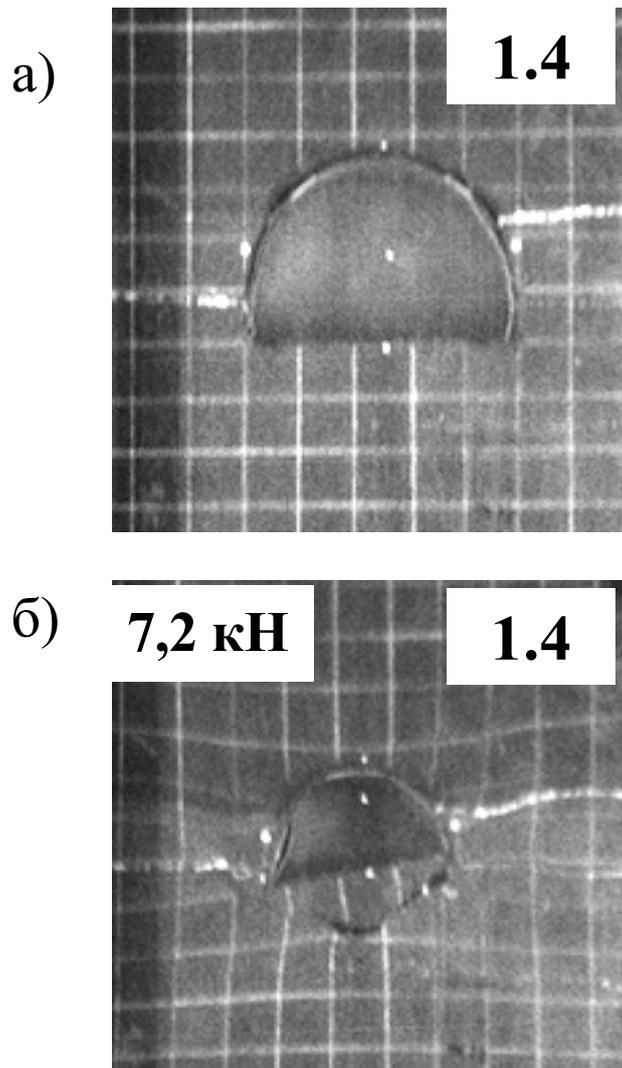


Рис. 3.14. Вариант 1 (выработка без мероприятий): начальная (а) и конечная (б) стадия эксперимента

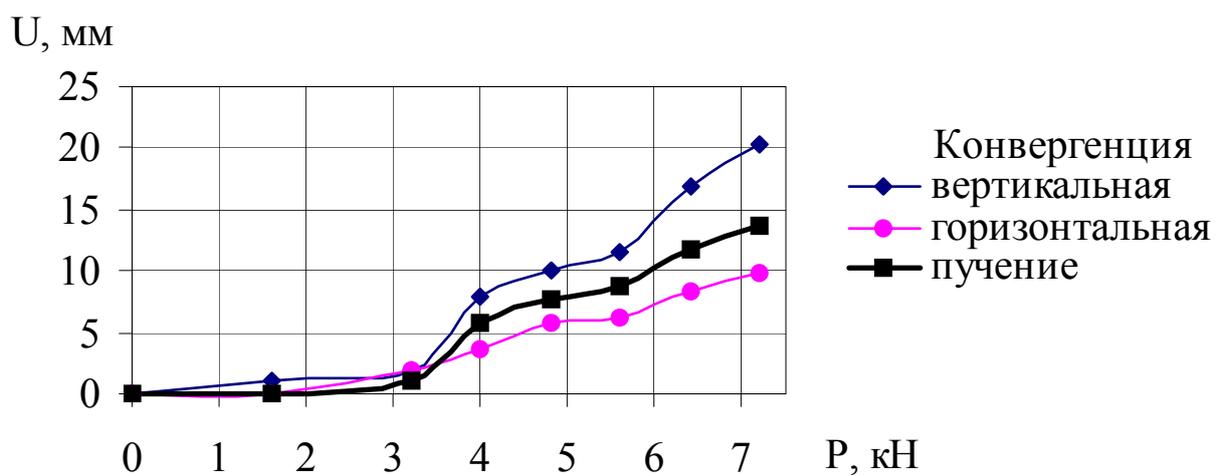


Рис. 3.15. Диаграмма смещений пород для варианта 1 (выработка без мероприятий)

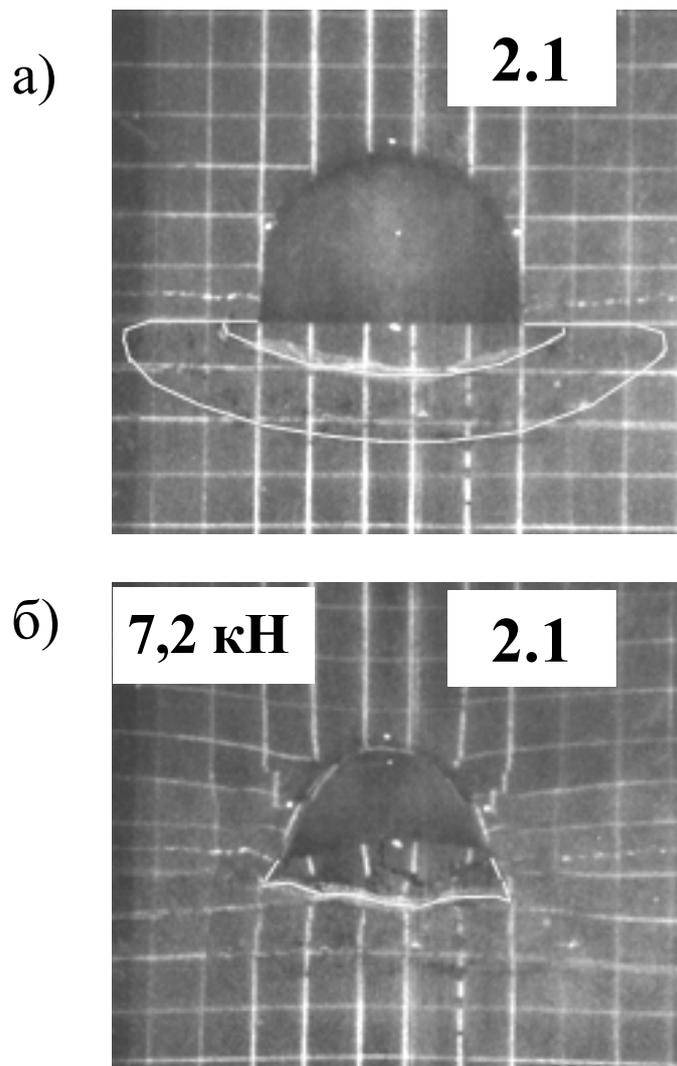


Рис. 3.16. Вариант 2 (укрепленная зона: глубина 1м, ширина 7м; разрыхленная зона: глубина 2,5м, ширина 8,5м): начальная (а) и конечная (б) стадия эксперимента

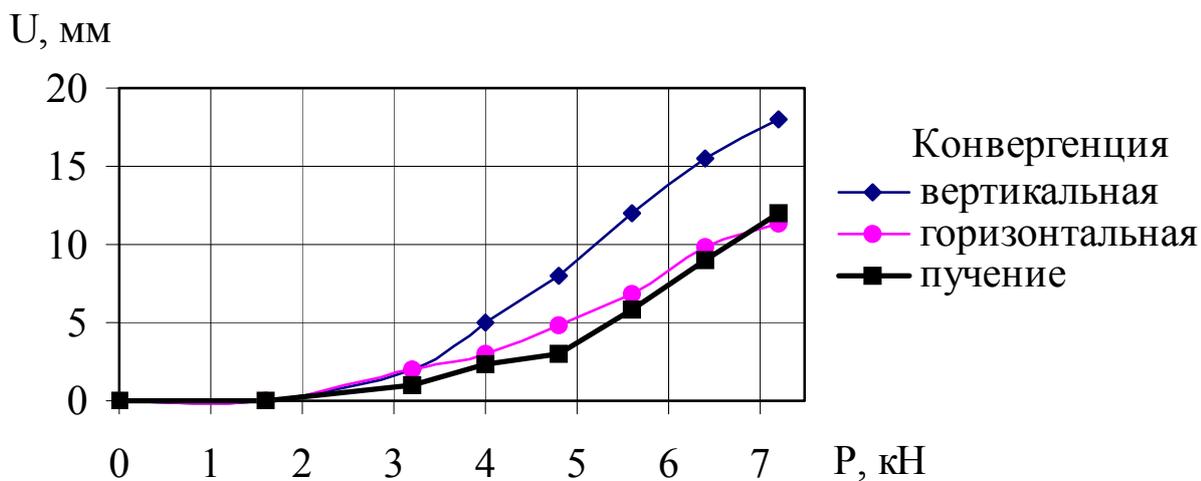


Рис. 3.17. Диаграмма смещений пород для варианта 2 (укрепленная зона: глубина 1м, ширина 7м; разрыхленная зона: глубина 2,5м, ширина 8,5м)

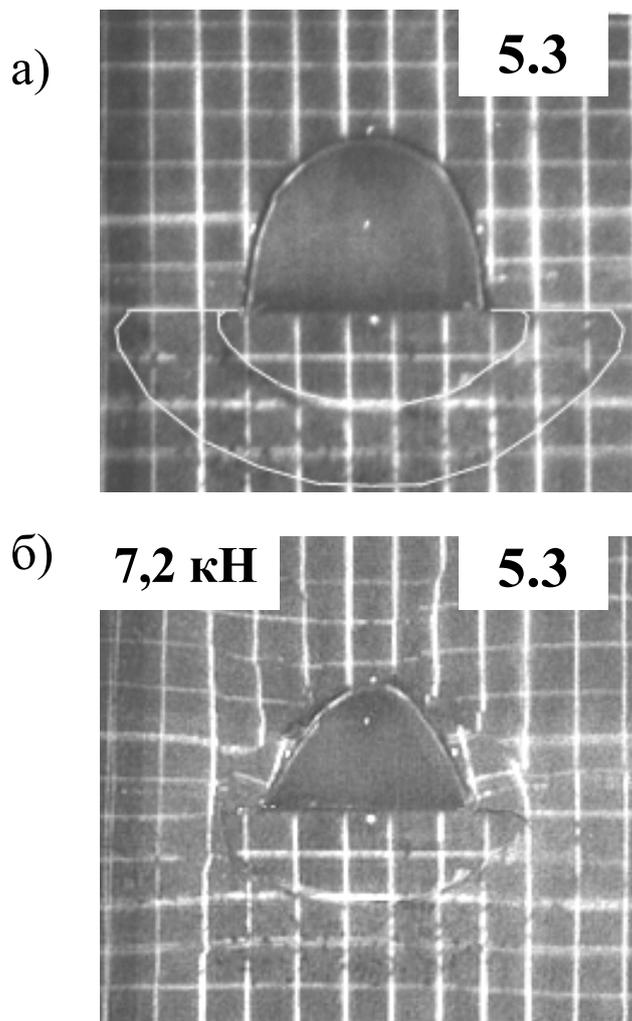


Рис. 3.18. Вариант 5 (укрепленная зона: глубина 2м, ширина 7м; разрыхленная зона: глубина 4м, ширина 11м): начальная (а) и конечная (б) стадия эксперимента

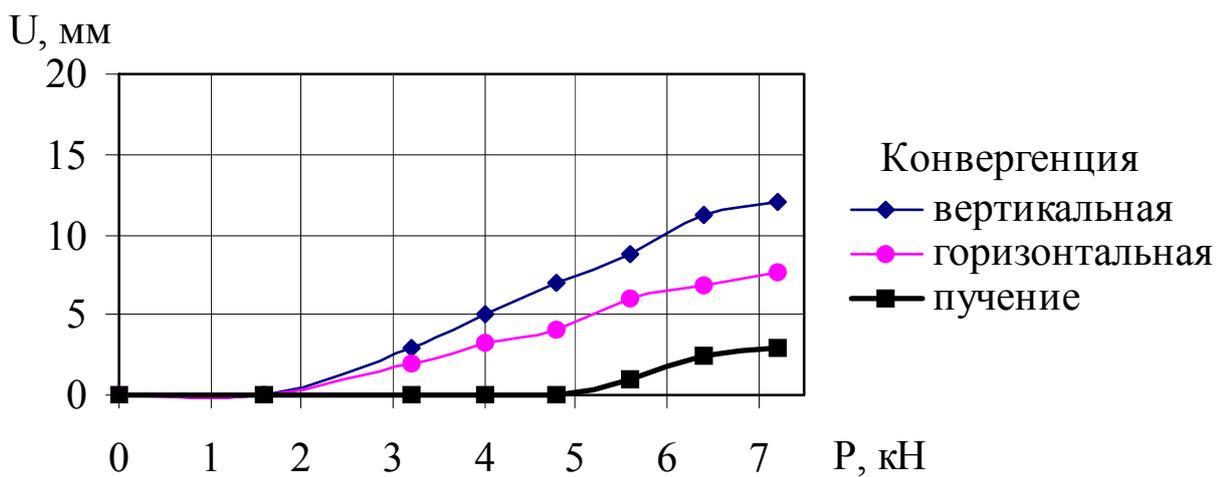


Рис. 3.19. Диаграмма смещений пород для варианта 5 (укрепленная зона: глубина 2м, ширина 7м; разрыхленная зона: глубина 4м, ширина 11м)

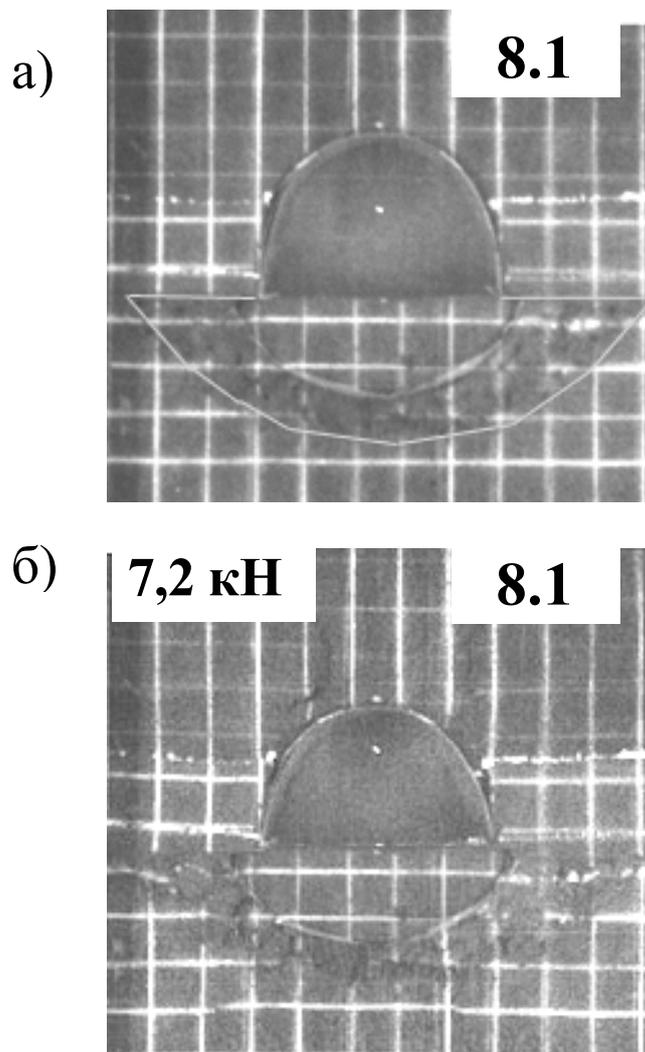


Рис. 3.20. Вариант 8 (укрепленная зона: глубина 2м, ширина 6м; разрыхленная зона: глубина 3м, ширина 12м): начальная (а) и конечная (б) стадия эксперимента

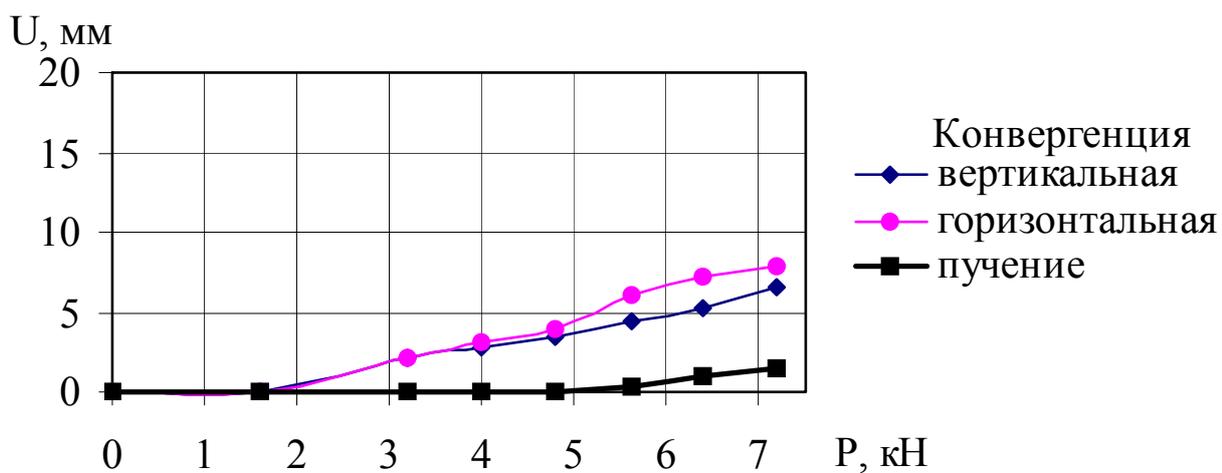


Рис. 3.21. Диаграмма смещений пород для варианта 8 (укрепленная зона: глубина 2м, ширина 6м; разрыхленная зона: глубина 3м, ширина 12м)

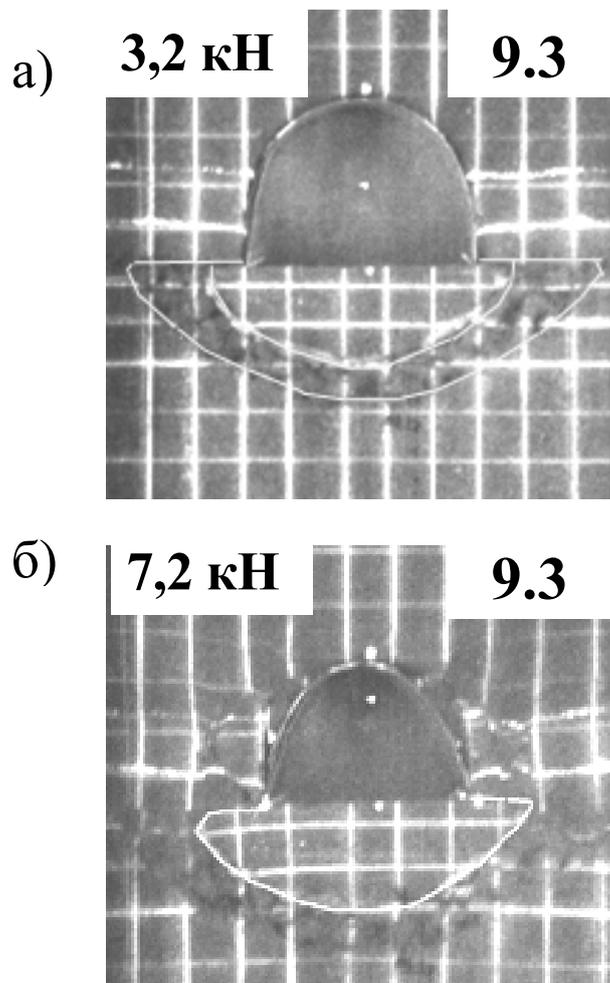


Рис. 3.22. Вариант 9 (укрепленная зона: глубина 2м, ширина 6,5м; разрыхленная зона: глубина 3м, ширина 10м): начальная (а) и конечная (б) стадия эксперимента

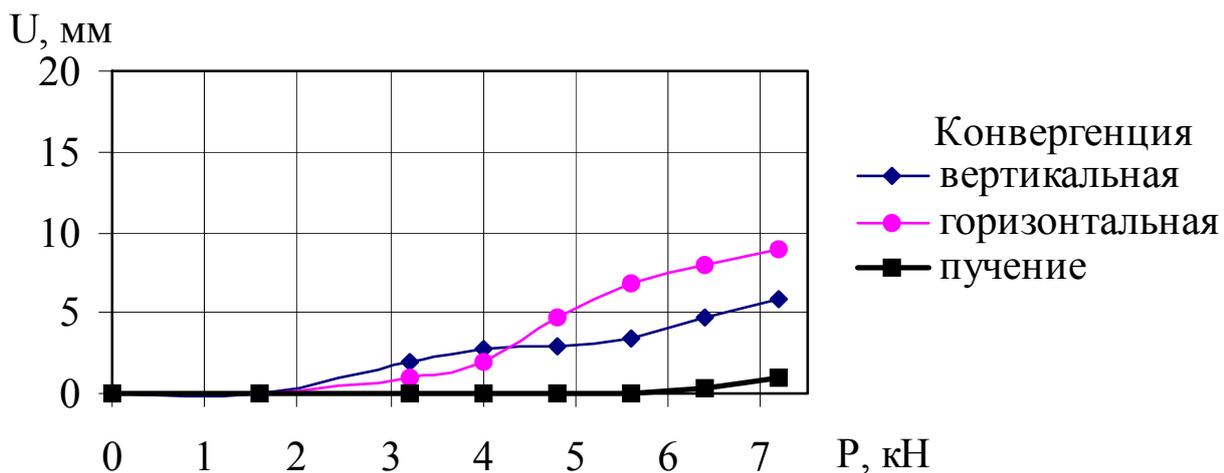


Рис. 3.23. Диаграмма смещений пород для варианта 9 (укрепленная зона: глубина 2м, ширина 6,5м; разрыхленная зона: глубина 3м, ширина 10м)

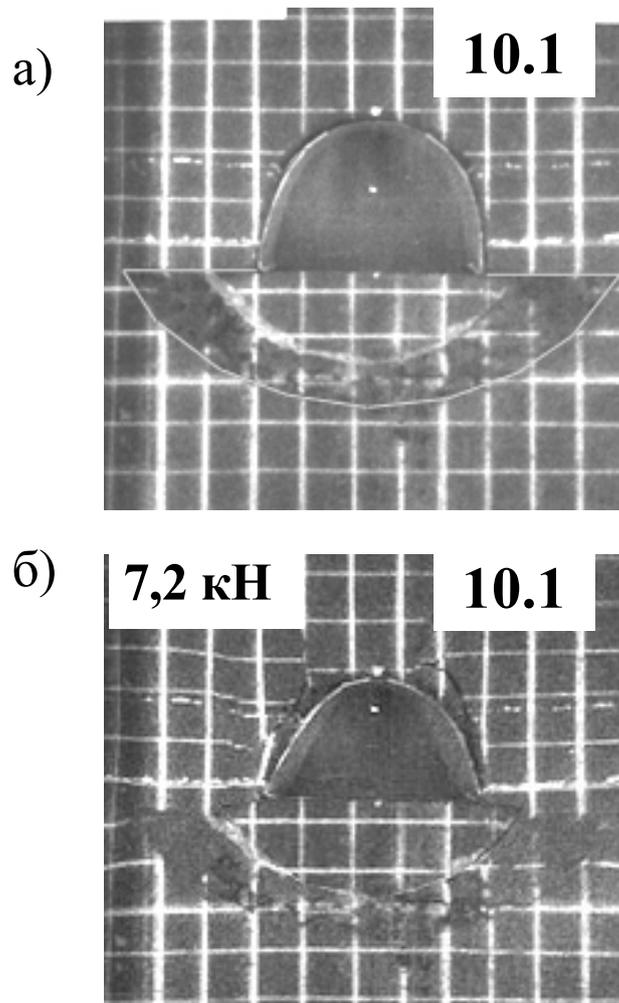


Рис. 3.24. Вариант 10 (укрепленная зона: глубина 2м, ширина 6,5м; разрыхленная зона: глубина 3м, ширина 11м): начальная (а) и конечная (б) стадия эксперимента

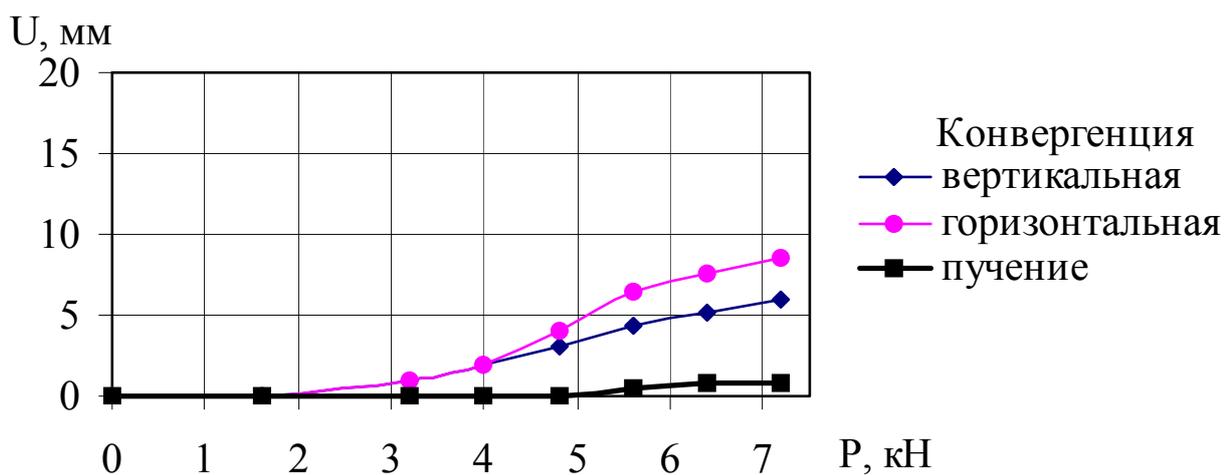


Рис. 3.25. Диаграмма смещений пород для варианта 10 (укрепленная зона: глубина 2м, ширина 6,5м; разрыхленная зона: глубина 3м, ширина 11м)

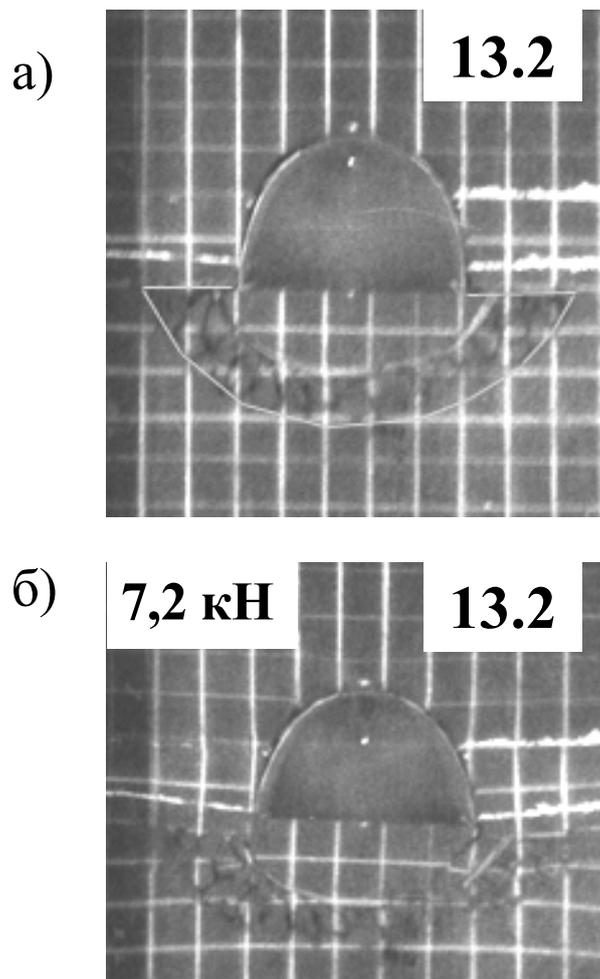


Рис. 3.26. Вариант 13 (укрепленная зона: глубина 1,75м, ширина 5,75м; разрыхленная зона: глубина 2,75м, ширина 9,75м): начальная (а) и конечная (б) стадия эксперимента

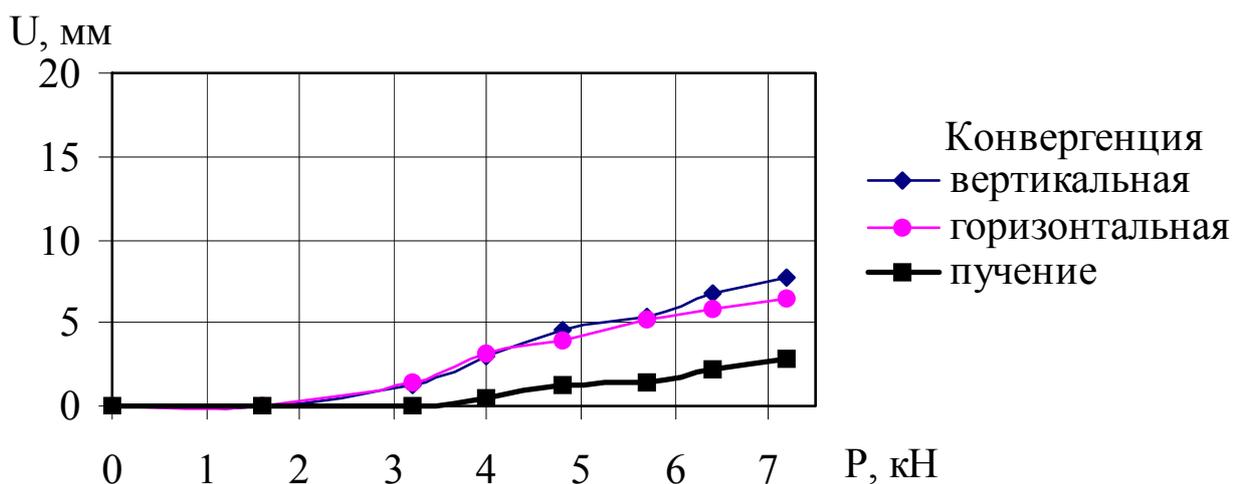


Рис. 3.27. Диаграмма смещений пород для варианта 13 (укрепленная зона: глубина 1,75м, ширина 5,75м; разрыхленная зона: глубина 2,75м, ширина 9,75м)

При увеличении глубины укрепленной зоны и изменении ее ширины потеря устойчивости проявлялась в обрезании краев данной зоны

вышележащими породами по бокам выработки. В результате было установлено влияние формы уплотненной зоны на ее устойчивое состояние – при переходе от круглой формы обратного свода зоны укрепленных пород к эллиптической изменяется угол среза боковых граней данной зоны (рис.3.28).

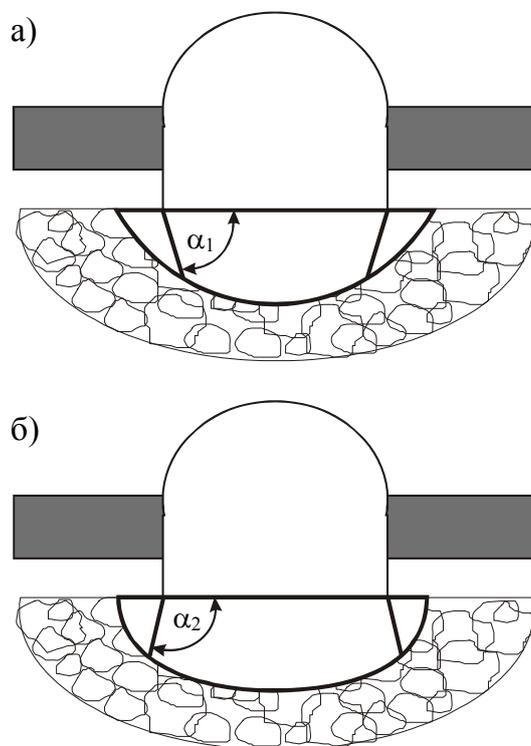


Рис. 3.28. Углы среза боковых граней в зависимости от формы уплотненной зоны (а – круглая, б – эллиптическая)

Величина угла изменяется от α_1 до некоторого значения α_2 , которое, в свою очередь, определяется такими физико-механическими факторами, как предел прочности на сжатие, срез, а также угол внутреннего трения. Данные параметры определяются опытным путем и являются различными для каждого конкретного случая. Учитывая особенности технологии создания укрепленной зоны в шахтных условиях (цементирование нарушенных пород), следует отметить, что определение вышеизложенных параметров может быть проведено на опытных образцах в шахтных условиях. Увеличение величины угла среза позволяет даже при нарушении укрепленной зоны сохранять геомеханическую систему «выработка-приконтурный массив» в устойчивом состоянии. Данная конструкция после обрезания боковых граней имеет призматическую форму с большей стороной по нижнему основанию, за счет чего, находясь в обжатом состоянии, сохраняет свое положение, чего не происходит при форме несущей конструкции в виде усеченной окружности.

Однако необходимо отметить, что даже при соблюдении эллиптической формы процесс может развиваться по II схеме (рис. 3.28, б) если степень разрыхления в разрыхленной зоне изменяется, увеличиваясь от центральной части к бокам (см. рис. 3.20). При сохранении коэффициента разрыхления зоны

разрушенных пород постоянным и увеличении несущей способности укрепленной зоны процесс будет проходить по I схеме (рис. 3.28,а).

С увеличением глубины зоны укрепленных пород до 2м и ширине в пределах 6,2...7м зона находится в устойчивом состоянии.

Это объясняется несущей способностью композитной породобетонной конструкции, которая обеспечивает необходимый физический барьер, а также перераспределяет напряжения из центральной части по бокам выработки. Уплотненная зона работает по принципу консольной балки, защемленной с обоих концов. При меньшей толщине уплотненной зоны после загрузки модели нагрузкой, эквивалентной 0,75 γH в шахтных условиях, происходит разрушение данной зоны.

Уплотненная зона должна выступать за пределы выработки на 0,75...1 м. При меньших размерах данной зоны происходит обрезание пород в боках выработки. Наличие уплотненной зоны большего размера по ширине негативно сказывается на устойчивости, т.к. избыточные напряжения разрушают уплотненную зону в средней части выработки (при толщине уплотненной зоны равной либо менее 1,75 м) или по краям на уровне боков выработки (при толщине уплотненной зоны менее 1,75 м).

По результатам проведенных исследований определены соотношения для уплотненной зоны: «глубина/ширина» и разрыхленной зоны: «размер по вертикали / размер по горизонтали». Следует отметить, что эллиптическая форма уплотненной и разрыхленной зон обеспечивали наилучшие результаты по сохранению поперечного сечения выработки в результате действия сил горного давления.

На основе проведенных исследований на эквивалентных материалах удалось определить рациональные параметры способа, которые позволяют достичь значительного повышения устойчивости выработки в пучащих породах.

Эффективное использование способа достигается при следующих размерах:

– уплотненная зона по глубине – не менее 2 м, по ширине – не менее 6,5 м;

– соотношение для уплотненной зоны: «ширина/ глубина» - 2,9...3,4 (рекомендуемое 3,25);

– глубина разрыхленной зоны – не менее 3 м, ширина – не менее 10,5 м;

– соотношение «глубина уплотненной зоны/ глубина разрыхленной зоны» - 0,7...0,5 (рекомендуемое 0,67);

– соотношение «ширина уплотненной зоны/ ширина разрыхленной зоны» - 0,6...0,7 (рекомендуемое 0,62).

Рекомендуемые соотношения определены по результатам замеров величины поднятия почвы с учетом минимизации объемов вспомогательных работ для конкретных условий.

Глава 4

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СПОСОБА БОРЬБЫ С ПУЧЕНИЕМ ПОРОД ПОЧВЫ

4.1. Выбор метода исследований

Разработка мер, направленных на борьбу с пучением пород почвы, является сложной задачей, для решения которой требуется использование комплексного подхода. На основе проведения физического моделирования получена качественная картина, однако, для подтверждения адекватности результатов, полученных на моделях из эквивалентных материалов, и получения количественных данных, характеризующих процессы, происходящие в массиве и на контуре выработки, необходимо проведение математического моделирования процесса пучения и определение с помощью численных методов параметров способа борьбы с пучением почвы.

В качестве аналитических методов для исследования механических процессов в породных массивах наиболее широко используются методы механики сплошной среды: механики твердого деформируемого тела (теории упругости, теории пластичности, теории ползучести, статистические методы), механики сыпучих, вязких и жидких тел, а также методы строительной механики.

Вопросу изучения процесса пучения аналитическими методами посвящено значительное количество работ, в которых используются разные подходы для описания сходных процессов. В зависимости от используемых физических моделей все методы оценки явления выдавливания пород в горные выработки можно разделить на четыре группы, в зависимости от используемого подхода:

- применение уравнений статики сыпучих сред (П.М. Цимбаревич [31], В.Д. Слесарев и др. [21]);
- использование реологических уравнений (В.А. Лыткин [42], А.П. Максимов [28] и др.);
- уравнения теории упругопластической устойчивости (А.Н. Шашенко [46]);
- эмпирические зависимости (Ю.З. Заславский [36], И.Л. Черняк [20] и др.).

На основе обзора существующих методов исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) породного массива выберем наиболее эффективный из них для оценки НДС массива вокруг выработок, с применением мер борьбы с пучением пород почвы.

Исследование НДС массива горных пород, вмещающего выработку, является довольно сложной задачей. Это обусловлено тем, что существует ряд факторов, оказывающих влияние на НДС породного массива, учесть которые в аналитических исследованиях довольно трудно.

Все многообразие существующих методов расчета НДС дает возможность использовать такой, который при оптимальных затратах времени, минимальных допущениях и упрощениях позволит с максимальной степенью реальности отразить процессы, происходящие в породном массиве вокруг горной

выработки. Имеется большое количество работ, связанных с применением классических механических моделей к задачам геомеханики [86...88 и др.].

Упругая сплошная среда впервые была использована в качестве механической модели массива горных пород в работах Леона А., Динника А.Н., Савина Г.Н., Лехницкого С.Г. [90, 91 и др.]. Впоследствии эти допущения были использованы при разработке модели взаимодействия породного массива с крепью выработки. Используя упругую модель для изучения взаимодействия пород с крепью выработок, Савин Г.Н. установил зависимость нагрузки на крепь от геометрических параметров крепи и модуля упругости материала.

В изучении упругой модели взаимодействия пород и крепи большое методологическое значение имеют работы Родина И.В. [92], предложившего различать природное поле напряжений, существовавшее до проведения выработок, и снимаемое поле напряжений, образовавшееся вследствие проведения выработок. Последнее, накладываясь на природное поле, и образует искомое поле напряжений.

Упругая модель также эффективно использовалась при исследовании взаимодействия крепи с неоднородным массивом пород и при изучении характера взаимодействия с вмещающим массивом крепи выработок некруглого сечения. Исследование упругой модели положено в основу методик расчета крепи, предложенных Фотиевой Н.Н. [93]. При этом следует отметить, что упругие решения дают результат, идущий в запас прочности крепи, т.к. неравномерность распределения контактных нагрузок здесь больше, чем в неупругих решениях.

Обобщая исследования упругой модели взаимодействия крепи с массивом горных пород, следует отметить существенную зависимость нагрузки на крепь от глубины расположения выработки, от толщины крепи и соотношения упругих характеристик крепи и пород. Поскольку смещения в упругой постановке малы, решить задачу об условиях установки несущей крепи и выбрать ее конструкцию не представляется возможным. Величины нагрузки на крепь, полученные из упругого решения, завышены, т.е. получаются с запасом, во многих случаях большим, чем того требуют реальные условия.

Исторически решение задач геомеханики началось с использования известных в теории упругости решений [94, 95]. Например, в работе Миренкова В.Е. [96] выработка представляется разрезом в пространстве и строится аналитическое решение. Исследуемый массив представлялся однородной изотропной средой.

Методы теории пластичности используются в механике горных пород тогда, когда напряженное состояние некоторой области породного массива превосходит соответствующее предельное линейно-деформируемое состояние. В работе Березанцева В.Г. [97] используется решение осесимметричной задачи теории предельного равновесия.

Методы теории ползучести дают возможность изучить механические процессы в породных массивах как пространственно-временные процессы. Однако учет временной координаты помимо пространственной координаты значительно осложняет решение задач механики горных пород. Работы [98, 99] посвящены исследованию поведения приконтурного массива как упруго-вязко-пластического тела с неограниченной ползучестью и способностью к релаксации.

Статистические методы дают возможность получить качественно новые результаты и объяснить некоторые явления и толкования, которые в рамках детерминистического подхода затруднены. Решения некоторых статистических задач механики горных пород приводятся в работах [100, 101].

Для исследования механических процессов породных массивов, где существуют области в ненарушенном линейно-деформируемом состоянии и области предельного равновесия пород, следует решать смешанные упругопластические задачи. Полученные решения упругопластических задач дают возможность наиболее точно определить основные параметры НДС массива и крепи горных выработок.

Общий недостаток решений задач геомеханики на основе соотношений теории упругости состоит в том, что число видов полостей в пространстве (имитация выработки), которые имеют простейшую геометрическую форму, весьма ограничено. Кроме того, чтобы исключить влияние дневной поверхности для применения известных решений теории упругости выработки рассматриваются на определенной глубине, а почти все решения пространственной задачи относятся к однородному изотропному пространству. Если же неоднородная среда все же рассматривается, то в этом случае на нее накладываются сильные ограничения.

Для устранения выше сказанных недостатков большие возможности открывает применение численных методов решения пространственных задач, которые с появлением быстродействующих персональных ЭВМ широко используются для решения задач механики горных пород.

Среди численных методов решения пространственных задач можно отметить метод конечных элементов, метод граничных элементов, метод сеток и прямые методы математической физики.

Цырульниковым М.Н. использован довольно простой для численной реализации метод (метод Галеркина), в котором компоненты напряжений и перемещений представляются в виде двойных сумм тригонометрических и экспоненциальных функций [102]. Однако в этой работе рассматривается только однородный массив.

Эверлинг Г. [103] предложен метод сетчатой модели для исследования картины распределения напряжений в массиве горных пород, вызванных ведением горных работ. Метод предусматривает дискретизацию области массива на конечное число прямоугольных элементов с размерами 10x10 м и решение системы уравнений равновесия сил, действующих на каждый элемент.

Надаши Н. совместно с коллегами предложен усовершенствованный метод расчета НДС с помощью пространственной решетки [104]. В отличие от метода сеток здесь учитывается собственный вес элементов, на которые разбивается область, что дает значительные преимущества этому методу по сравнению с другими методами, используемыми для решения задач геомеханики.

Метод граничных элементов (МГЭ) детально рассмотрен в работах Векслера Ю.А., Колоколова С.Б., Жданкина Н.А. [105 и др.], Новиковой Л.В. [106], Сдвижковой Е.А. [107], Петухова И.М., Зубкова В.В. [108].

Применение метода конечных элементов (МКЭ) к решению задач механики горных пород подробно описано в работах Амусина Б.З. и Фадеева А.Б. [109, 110], Ержанова Ж.С. и Каримбаева Т.Д. [111].

Аппарат МКЭ позволяет моделировать различные горно-геологические условия (слоистость, трещиноватость, ослабление физико-механических свойств в результате фильтрации). Это позволяет реализовывать неограниченные возможности в достижении подобия численной модели породному массиву. В частности, для моделирования сцепления слоев на контактах используются специальные «контактные» элементы [109]. Методом конечных элементов можно без препятствий рассматривать задачу с вырезом любой формы, а также конечное число вырезов в плоскости моделирования [112]. Наличие обрушенных пород в приконтурной части выработки моделируется в рамках метода заданием специальных упругих характеристик обрушенных неуплотненных пород соответствующим элементам данной группы на основе дополнительных исследований.

Решения в нелинейной постановке, в случае, когда наблюдается предельное деформирование пород, предполагают пластические деформации или хрупкое разрушение. При этом нелинейное решение получают как сумму последовательных упругих решений.

Проведенный анализ методов, применяемых для решения геомеханических задач, позволяет сделать вывод о целесообразности применения МКЭ для исследования НДС породного массива в окрестностях выработки при использовании мероприятий по борьбе с пучением.

4.2. Описание принятой расчетной схемы и рассматриваемой математической модели

Математическая модель должна отображать основные явления, возникающие вследствие возникновения концентрации напряжений и возможного сопутствующего изменения физико-механических свойств вмещающих пород в окрестности местных нарушений сплошности. Вследствие резкого повышения уровня напряжений в окрестности выработки горная порода может достигнуть своего предела прочности на сжатие. При этом происходит разрыхление слагающих ее материалов, сопровождаемое значительным увеличением объема. Это явление способствует релаксации (т.е. снижению уровня) напряжений в окрестности выработки. Таким образом, устанавливается новое состояние равновесия, соответствующее минимуму потенциальной энергии для данной конфигурации.

Геометрические параметры этой конфигурации не могут быть известны предварительно и обычно подлежат определению в процессе решения. Такая проблема называется задачей с неизвестной границей. Подобные задачи возникают, например, в ситуации, когда граничные условия задаются в неравенствах. Для их решения необходимо сформулировать некоторый функционал, являющийся модификацией функционала полной энергии деформации. Минимизация данного функционала производится численными методами. Подробное рас-

смотрение ряда таких задач имеется, в частности, в основополагающих работах [113, 114]. Значительные дополнения можно найти в работе [115].

При решении практических проблем эффективным является использование итерационных процедур. Формулируются некоторые исходные условия, для которых производится решение задачи. Затем производится проверка полученного решения на соответствие необходимым критериям. В данном случае подобным критерием является сформулированное в напряжениях условие разрыхления материала. После этого исходные данные задачи видоизменяются, согласно найденному решению, и процедура повторяется. Процесс можно считать законченным, когда интересующие нас геометрические характеристики области разрыхления становятся неизменными в процессе дальнейших итераций.

Более конкретно решения подобной задачи представлено в работах Шашенко А.Н., Амусина Б.З., Фадеева А.Б., [46, 109, 110]. Так, например, в работе [46] дано следующее описание. Пусть существует некоторая мера напряжений (эквивалентные напряжения), которую обозначим через σ_e . При одноосном нагружении вдоль оси 1 ($\sigma_2 = \sigma_3 = 0$) эффективные напряжения численно равны напряжению σ_1 . Предположим, что экспериментальным путем определен некоторый предел прочности при одноосном нагружении R_c , так что разрушение наступает при $\sigma_1 = R_c$. В механике разрушения принято, что для многоосного напряженного состояния процесс потери несущей способности материала начинается, когда в некоторой точке достигается равенство $\sigma_e = R_c$.

При достижении предельного значения R_c в некоторых точках области, прилегающей к зоне нарушения сплошности, начинается процесс разрыхления горной породы. Экспериментально и теоретически показано [116], что нагружение в глубине массива можно считать управляемым по деформациям, так что диаграмма «напряжение-деформация» имеет два различных ярко выраженных участка. На первом из них материал деформируется упруго, так что имеет место закон Гука. В частности, при одноосном нагружении вдоль оси 1 имеем $\sigma_1 = E_{11} \cdot \varepsilon_1$, где E_{11} – модуль Юнга в данном направлении. По достижении предела разрушения σ_c , имеет место переход на ниспадающий участок диаграммы « $\sigma_i - \varepsilon_i$ » ($\varepsilon_i > \sigma_i / E_{11}$) рис. 4.1. На этом участке с ростом деформаций напряжение постепенно уменьшается вплоть до некоторого предела σ_r (предельного остаточного напряжения). Обычно данный предел весьма мал ($\sigma_r \ll R_c$) и с достаточной степенью точности может быть принят равным нулю [117].

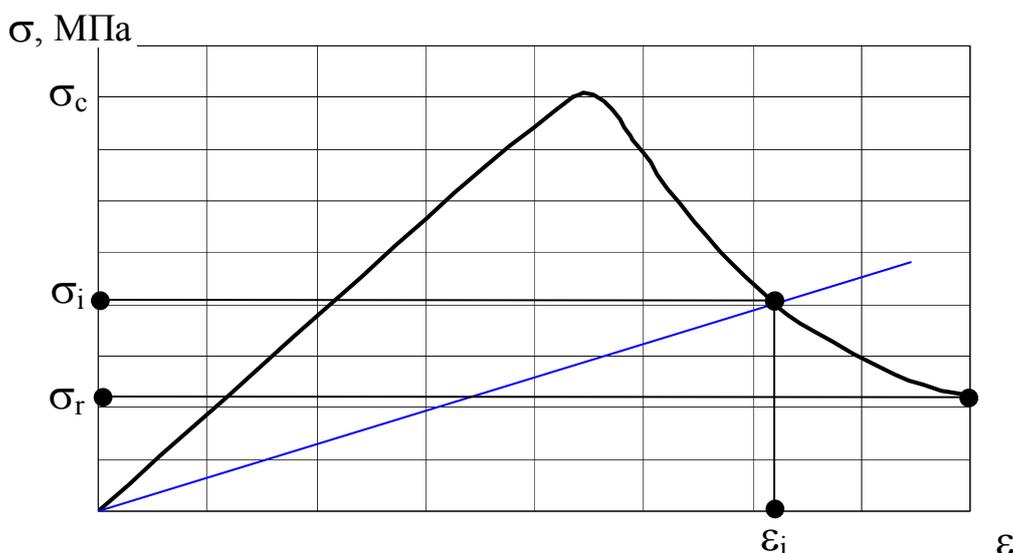


Рис. 4.1. Полная диаграмма сжатия образца горной породы

Также экспериментально установлено [117], что коэффициент Пуассона μ , который на участке упругого нагружения для большинства горных пород имеет значение от 0,16 до 0,35, на ниспадающем участке диаграммы «напряжения-деформации» принимает значения порядка $\mu = 0.5$, что соответствует состоянию полной несжимаемости материала.

Итак, на уровне соотношений связи между напряжениями и деформациями исходная формулировка задачи выглядит следующим образом.

Решение производится для плоского деформированного состояния. Пусть существует некоторая полость с границей – выработка, окруженная “бесконечным” породным массивом, деформирование которого подчиняется закону Гука. Наличие полости приводит к возмущению начального поля напряжений и образованию вокруг выработки зоны концентрации напряжений. На определенном этапе расчета вокруг выработки формируется область разрушенных пород, размеры которой определяются ее границей. На этой границе эквивалентные напряжения равны предельному значению прочности породы на одноосное сжатие. Вне этой границы упругие свойства среды по-прежнему задаются законом Гука, а в ее пределах – некоторыми соотношениями, описывающими состояние пород на ниспадающем участке полной диаграммы деформирования. Наличие этого участка свидетельствует о процессах необратимых изменений, в том числе и разрушении. Деформация при этом процессе заведомо является неупругой. Однако в первом приближении принимаем, что горная порода подчиняется закону нелинейной упругой деформации, так что в любой текущий момент времени соотношение “напряжения-деформации” задается соответствующим участком диаграммы (см. рис. 4.1), а предельное напряжение при котором происходит разрушение определяется по усредненным экспериментальным результатам.

Переход приконтурного породного массива из одного энергетического состояния в другое, сопровождается пластическим течением среды. Породный массив в пластической области разупрочняется и разрыхляется, приобретая в результате некоторую остаточную прочность и соответствующую ей величину

относительного увеличения объема, которые обеспечивают перемещения контура выработки.

В качестве способа решения граничной задачи о НДС массива в окрестности выработки используется метод конечных элементов (МКЭ). Этот метод достаточно широко апробирован и на практике доказал свою применимость в самых различных областях. Его суть заключается в том, что исследуемая область разбивается на множество подобластей (элементов). Внутри каждого элемента перемещения аппроксимируются некоторыми функциями, порядок которых зависит от числа узлов в элементе. В плоском 4-х узловом элементе перемещения задаются линейной функцией. Для каждого элемента формируется локальная матрица жесткости, связывающая перемещения и нагрузки в его узлах. Элементы стыкуются по узлам. В конечном итоге, формируется глобальная матрица жесткости и глобальный вектор нагрузок для всей исследуемой области. При этом жесткость каждого узла является суммой локальных жесткостей тех элементов, которым данный узел принадлежит.

Существует значительное количество программ, позволяющих выполнять расчет с использованием МКЭ. При этом процесс решения геомеханических задач методом МКЭ включает в себя две стадии. На первой выполняется подготовка исходных данных для численного решения граничных задач механики и физики. На второй стадии – осуществляется представление полученных результатов в виде, удобном для проведения сравнительного анализа. Одним из наиболее удачных пакетов для оценки НДС в окрестности выработок является пакет прикладных программ *CosmosM for OS Windows* (Structure Research and Analysis Corp.).

Программа предполагает выполнение следующих этапов:

1. Выбирается сетка разбивки и в соответствии с этим, исследуемая область представляется в виде конечного множества простейших элементов. Назначение сетки, т.е. выбор размеров элементов, производится с учетом неоднородности строения породного массива. В районе ожидаемых наибольших градиентов напряжений (например, вблизи контура выработки) используется более мелкое разбиение, на участках, где ожидается плавное изменение напряжений – более крупное.

2. Каждому элементу ставятся в соответствие физико-механические характеристики среды, заключенной внутри элемента, координаты узлов, условия нагружения и т.д.

3. Формируются матрицы жесткости элементов, матрица жесткости системы (МЖС) и, в соответствии с условиями нагружения, - вектора действующих внешних усилий.

4. На основе решения программой систем уравнений определяются неизвестные перемещения узловых точек.

5. По найденным значениям перемещений узлов вычисляются относительные деформации и напряжения в каждом элементе.

Процедура решения реализована в виде последовательности итераций. На первом этапе предполагается, что окружающий выработку массив является полностью упругим.

Задаются его физико-механические параметры: предел прочности на сжатие $R_c = 30$ МПа; предел прочности на растяжение $R_p = 3$ МПа; модуль Юнга $E = 8,0 \cdot 10^3$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,23$; объемный вес $\gamma = 2,3 \cdot \text{т/м}^3$.

Затем решается линейная статическая задача теории упругости и определяется НДС для данного этапа. Найденное НДС используется для определения границы области разрыхления на данной итерации. При этом необходимо иметь критерий разрушения, определяемый равенством эквивалентного и предельного напряжений.

После того, задача решена в упругой постановке и найдено первое приближение к геометрическим параметрам области разрыхления, изменяем исходные параметры задачи для решения на второй итерации (потери упругопластической устойчивости). Для этого формируется специальный командный файл для ППП CosmosM. Программа сканирует базу данных CosmosM и определяет зону разрыхления (т.е. те элементы, для которых на данном этапе решения характерно состояние потери устойчивости). Для этих элементов видоизменяются свойства материала (ниспадающий участок диаграммы рис 4.1, на котором напряжения достигают своего предельного значения).

Затем процедура решения повторяется с использованием метода секущих модулей. Совершается второй шаг итерации. Решается линейная упругая задача, для которой при составлении матрицы упругих свойств вместо модуля E_0 , вводится секущий модуль E_1 , определяемый по диаграмме (рис. 4.1). Дальнейший процесс итерации продолжается аналогичным образом до достижения заданной точности. Линейные задачи на каждом шаге приближения решаются с матрицей жесткости системы, составленной на основе секущих модулей. Секущие модули у элементов модели изменяются по-разному, в зависимости от уровня их нагружения.

С целью проверки правильности решения поставленной проблемы была рассмотрена тестовая задача (рис. 4.2). Выработка в виде круглого отверстия подвергается гидростатическому давлению. Механические параметры окружающей горной породы приняты теми же, что и выше. Ввиду наличия зоны концентрации напряжений некоторая прилегающая к выработке часть породы переходит в состояние разрыхления. Необходимо определить радиус зоны разрыхления прилегающих к выработке пород.

Различные цвета соответствуют разным зонам напряжений: синим цветом обозначена область, где диаграмма деформирования задается своей ниспадающей ветвью (см. рис. 4.1). Эта область является зоной разрыхления. Переход части элементов в разрыхленное состояние, и последующее сохранение нового устойчивого НДС означает завершение расчета. В соответствии с решением задачи, ее радиус r_l , отнесенный к радиусу выработки r_0 , равен $r_l/r_0 = 2,8$. Сходимость была достигнута на второй итерации.

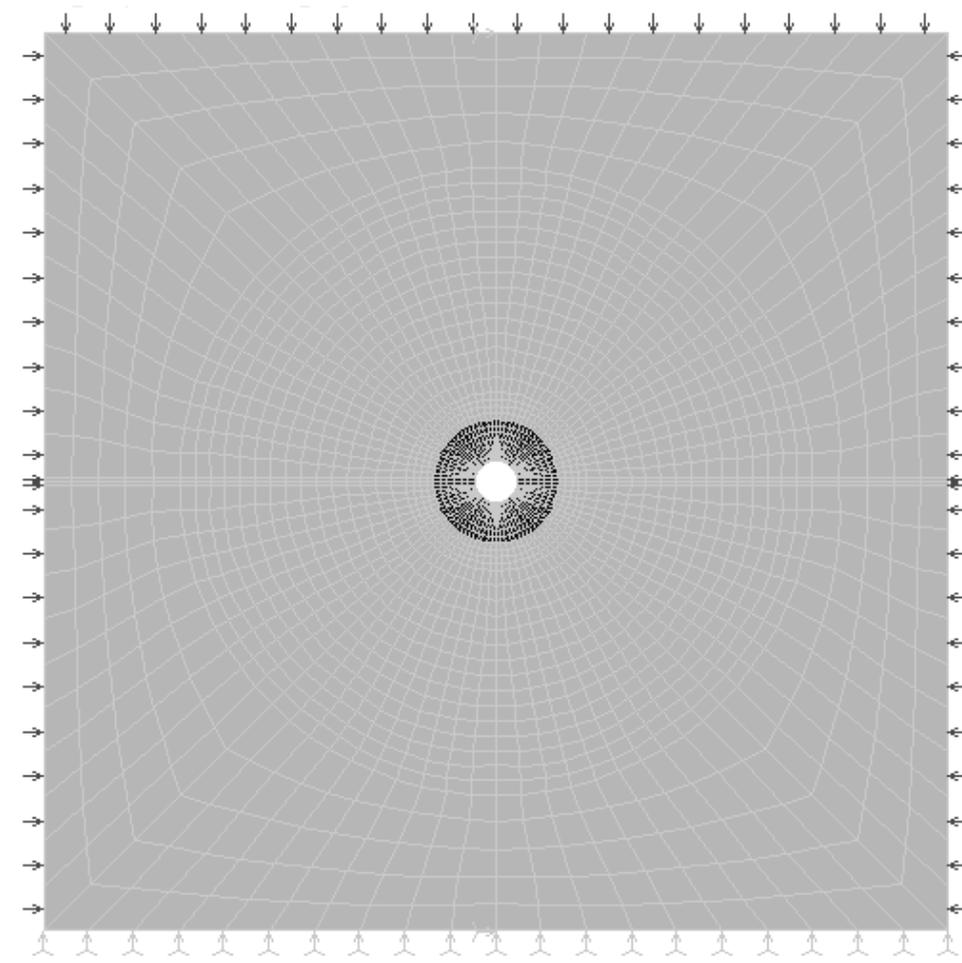


Рис. 4.2. Определение зоны разрыхления на тестовой задаче

На основании результатов, полученных при решении упругопластической задачи, исследуется НДС горных пород в окрестности капитальной выработки арочной формы в условиях слабых пород почвы. Расчетная схема представлена на рис.4.3, где приведены мощность угольного пласта, геологическая ситуация в окрестности выработки. Данный рисунок фактически определяет граничную задачу, которая служит для нахождения зоны разрыхления. В дальнейшем расчет выполняется для второй задачи. Определяются значения напряжений возникающих в приконтурном массиве, а также перемещения пород в сторону выработанного пространства для случая, когда используются мероприятия по борьбе с пучением почвы. Обеспечение необходимой устойчивости выработки достигается в результате снижения вертикальной конвергенции и изменения общего напряженно-деформированного состояния выработки.

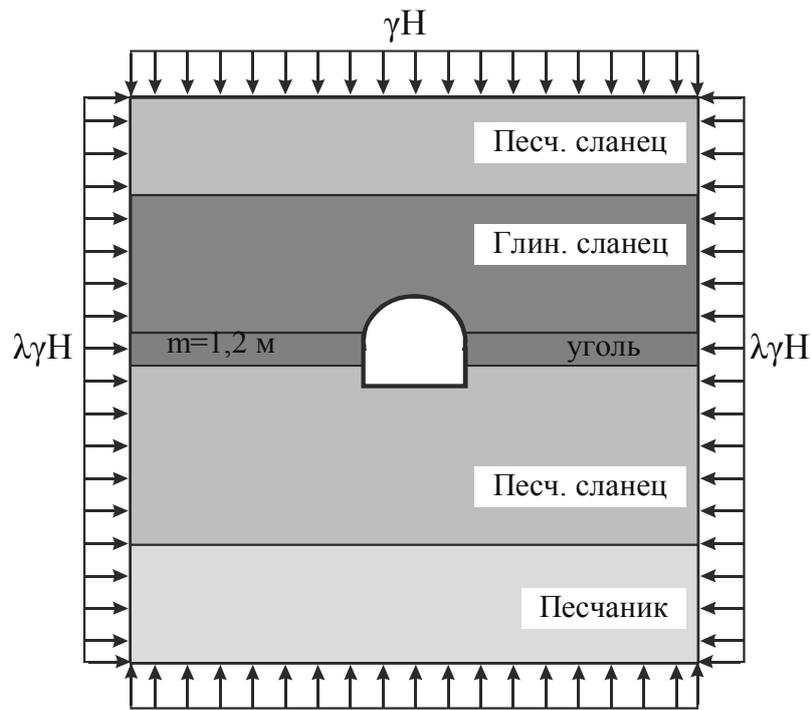


Рис. 4.3. Расчетная схема выработки на контрольном участке

После получения первоначальных данных и качественной картины перемещений во всей области прилегающего к выработке горного массива, в том числе на контуре, изменения площади поперечного сечения выработки, напряжений и деформаций к расчетной схеме были добавлены еще две элементные группы: зона разрыхленных пород (зона разгрузки) и зона уплотненных пород (рис. 4.4).

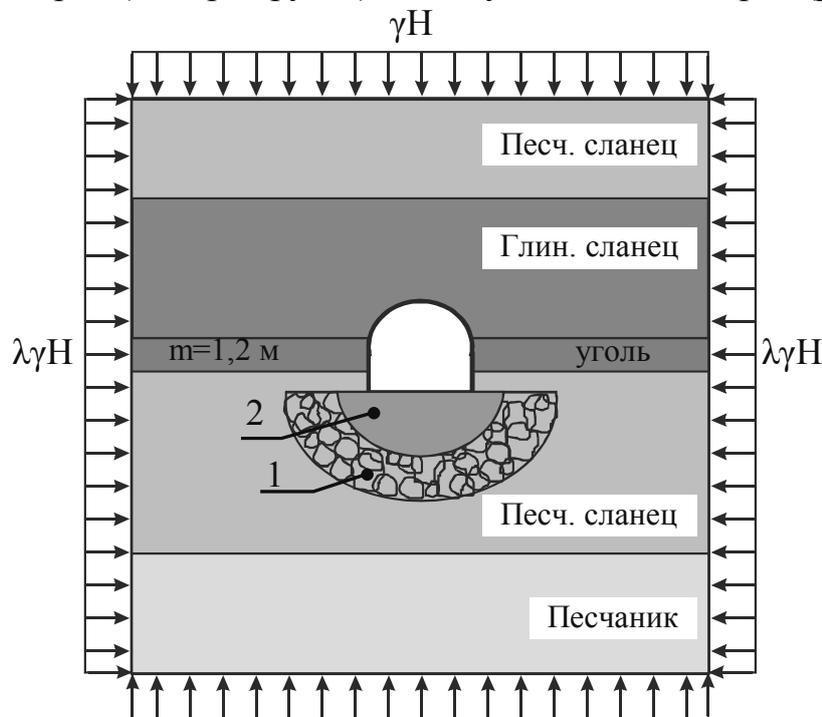


Рис. 4.4. Расчетная схема способа борьбы с пучением пород

Для этого был использован командный файл, с помощью которого производилось “наложение” геометрии и свойств новых групп на уже существующие

в программе. В результате программа прописывает все изменения и производит решение новой ситуации.

Путем добавления элементов по двум последним элементным группам определяли эффективность способа при данных параметрах зоны разрыхленных и зоны уплотненных пород. Область 1 – зона разрыхленных пород, область 2 соответствует зоне уплотненных пород.

4.3. Исследование НДС горных пород в окрестности капитальной выработки арочной формы

Первоначально определяли НДС массива вмещающих пород для случая, когда выработка просто закреплена арочной крепью. Были определены перемещения, напряжения и деформации. При расчете были использованы физико-механические свойства пород тестовой задачи.

Элементарная реализация расчетной схемы дана на рис. 4.5. Выработка шириной – 5 м и высотой – 3,5 м, помещена в центр массива с размером 50×50 м.

Для разбиения области применяются плоские линейные четырехугольные элементы. Первоначально существует четыре группы КЭ.

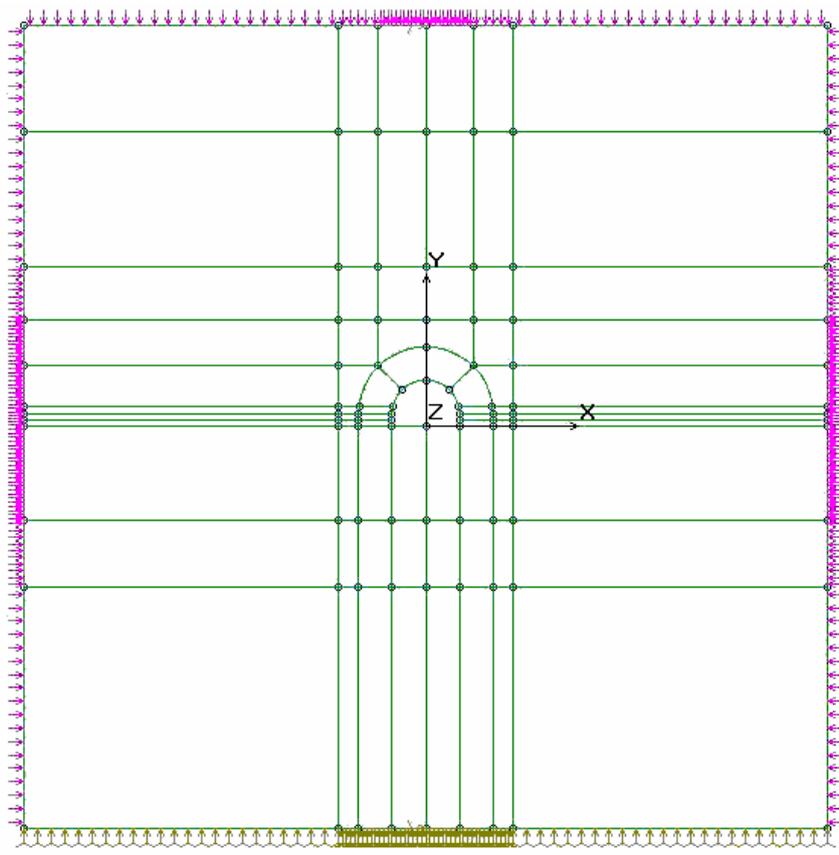


Рис. 4.5. Конечно-элементная реализация расчетной схемы

В ходе расчетов принято, что выработка расположена на глубине 418 м, соответствующей горному давлению (принятому гидростатическим), примерно, 10,5 МПа. Необходимые для расчета параметры представлены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Физико-механические параметры горных пород для расчета

Наименование	Песчанистый сланец	Глинистый сланец	Песчаник	Уголь
Модуль упругости, МПа	$8 \cdot 10^3$	$9 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^4$	$5,4 \cdot 10^3$
Коэффициент Пуассона	0,24	0,24	0,21	0,16
Прочность на сжатие, МПа	30	40	65	15
Прочность на растяжение, МПа	3	4	6,5	1,5
Объемный вес, т/м ³	2,3	2,4	2,5	1,35

При описанных выше условиях производится решение задачи в рамках линейной упругости и определяются те элементы, в которых выполняется начальные условия: $\sigma_e > R_c$. Если условие не соблюдается и напряжения, которые возникают в элементе, превышают предел прочности – порода в этой области подвергается разрыхлению (рис. 4.6).

Исследования проводились на основании определения элементов, для которых соблюдается условие потери устойчивости породного массива:

$$k_y = \frac{R_c k_c}{\sigma_e} < 1,$$

где k_y – коэффициент устойчивости,

k_c – коэффициент структурного ослабления горных пород, позволяющий учитывать наличие пустот и трещин в реальном массиве горных пород.

Чем меньше показатель k_y , тем больше интенсивность пучения, т.е. элементы, соответствующие породам в данной области, переходят из устойчивого состояния – в неустойчивое. Из 8872 КЭ в указанное состояние перешло 812. Эти элементы сформировали новые (пятую, шестую и седьмую) группы, которые соответствуют разрушенным породам. В области концентраторов напряжений (по углам) зона разрыхления характеризуется минимальными размерами. Относительный радиус зоны разрыхления r_L/r_0 равен 2,3...2,8, что подтверждает правильность выполненных расчетов.

На рис. 4.6 показаны результаты математического моделирования НДС выработки, закрепленной арочной крепью. Смещения пород кровли составили 35,4см, почвы – 32,7см. Для дальнейших расчетов данные параметры приняты в качестве исходных для определения эффективности способа при различных геометрических и физико-механических параметрах зон разрыхленных и уплотненных пород. Зона разрыхления достигает максимальных значений в почве выработки (центральной части), а также по контуру.

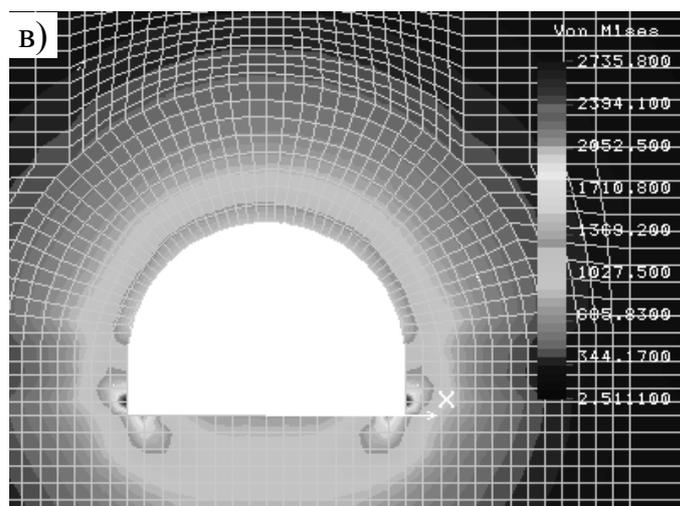
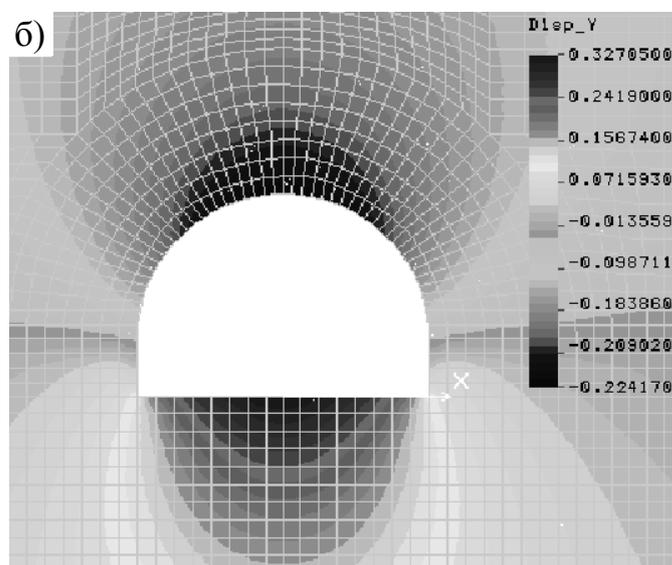


Рис. 4.6. Модель 1: (а) – зона разрыхления, (б) – картина смещений пород, (в) – картина результирующих напряжений по Ван-Мизесу

4.4. Исследование НДС горных пород в окрестности капитальной выработки при использовании способа борьбы с пучением

Далее для проведения моделирования параметров разрыхленной и укрепленной зон был написан специальный файл обращения. В данном файле были заданы две новые зоны (разрыхленная и укрепленная), а также указывалась геометрия новых зон с заданием параметров элементам, входящим в состав данных зон. При последующих решениях изменялись только геометрические размеры зон и физико-механические параметры зоны разрыхления (рис. 4.7).

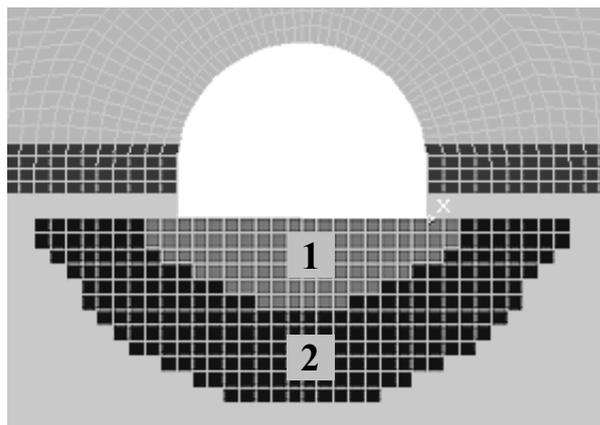


Рис. 4.7. Фрагмент новой расчетной схемы с указанием зоны укрепленных пород (1) и зоны разрыхленных пород (2)

На рис. 4.7 представлен фрагмент новой модели с указанием двух дополнительных областей в почве выработки. Зоны задавались поэлементно, что давало возможность корректировать не только их линейные размеры, но и с учетом результатов предыдущих численных решений корректировать форму каждой зоны.

Теперь к исходной группе плоских четырехугольных элементов (порода) добавляются пятая и шестая, в которые входят соответственно элементы разрыхленной и уплотненной зон. Уплотненная зона задавалась следующими параметрами (на основе испытания породобетонных образцов): модуль упругости $E = 1,2 \cdot 10^5$ МПа и коэффициент Пуассона $\mu = 0,2$.

Учитывая то, что степень разрыхления в значительной степени влияет на геомеханические процессы, происходящие в массиве горных пород, по каждой модели с заданной геометрией зон проведены исследования по определению влияния коэффициента разрыхления (1,1...1,4) пород демпферной зоны на изменение НДС вмещающих пород и на устойчивость выработки в целом (табл. 4.2).

Таблица 4.2

Физико-механические параметры демпферной зоны

Варианты по ситуациям	K_p	σ , МПа	E , МПа	G , МПа
1	1,1,	37,2	$1,86 \cdot 10^3$	$6,24 \cdot 10^2$

2	1,2	29,6	$6,29 \cdot 10^2$	$2,11 \cdot 10^2$
3	1,3	19,8	$2,25 \cdot 10^2$	$7,5 \cdot 10$
4	1,4	14,7	$1,05 \cdot 10^2$	$3,5 \cdot 10$

Остальные параметры 4-х элементных групп являлись неизменными при всех последующих расчетах.

Таким образом, на основе выполненных испытаний физических моделей (п.3.3) были определена качественная картина изменения НДС породного массива при различных размерах двух зон. На основе численных исследований рассматривалась количественная характеристика защитного действия способа при каждой конкретной ситуации. Анализировались такие параметры, как размер зоны разрушенных пород (на основе использования критерия Парчевского-Шашенко), величины смещений пород и размера эквивалентных напряжений.

Для упрощения выполнения математического моделирования и представления полученных результатов расчетная схема сходных параметров была сведена к следующему виду (рис.4.8).

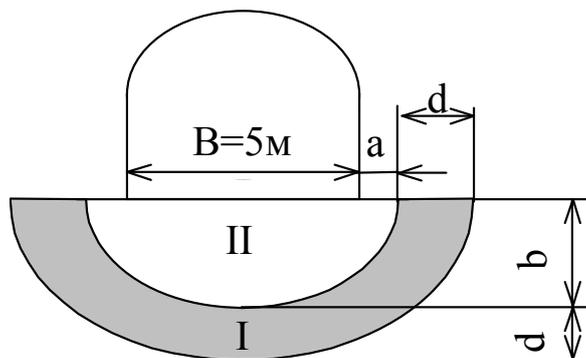


Рис. 4.8. Схема исходных параметров

При моделировании на эквивалентных материалах были получены качественные данные, характеризующие процесс изменения НДС выработки, а также установлена зависимость между шириной и глубиной укрепленной зоны, при которой данная зона имеет повышенную несущую способность. На основании этих данных, а также с учетом сетки разбиения областей на конечные элементы построен рис. 4.9.

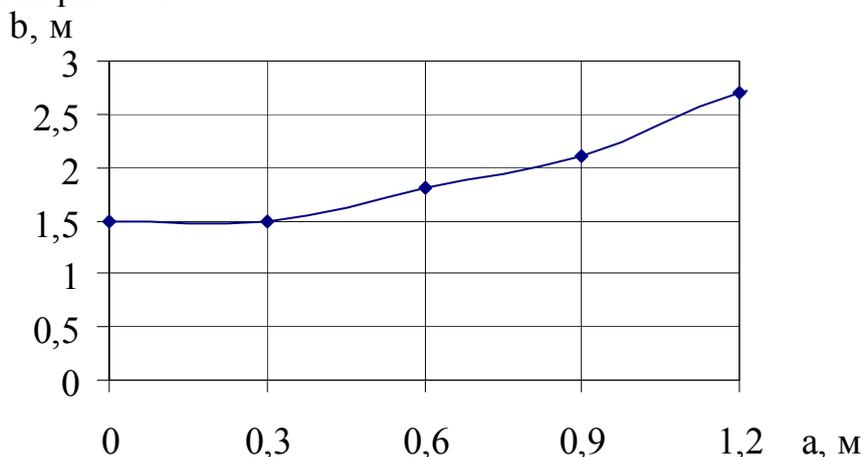


Рис. 4.9. Зависимость параметра глубины укрепленной зоны (**b**) от ширины укрепленной зоны (**a**)

Последовательность исследования численными методами НДС горных пород при различных ситуациях представлена в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Параметры исследуемого способа борьбы с пучением по ситуациям

		Разрыхленная зона				
		d=0,6м	d=0,9м	d=1,2м	d=1,5м	d=2,1м
Уплотненная зона	a=0	1	6	11	16	21
	a=0,3м	2	7	12	17	22
	a=0,6м	3	8	13	18	23
	a=0,9м	4	9	14	19	24
	a=1,2м	5	10	15	20	25

Были проведены исследования методом конечных элементов по 25 ситуациям. По каждой из ситуаций рассмотрено 4 варианта (моделировались условия с $K_p=1,1; 1,2; 1,3$ и $1,4$). Всего испытано 100 моделей.

В процессе решения задачи были выделены дополнительные группы плоских четырехугольных элементов (с 7-ой по 12-ую), для которых соотношения связи между напряжениями и деформациями нелинейны. Набор таких элементов, как уже сказано выше, определяет искомую зону разрыхления (рис. 4.10...4.13).

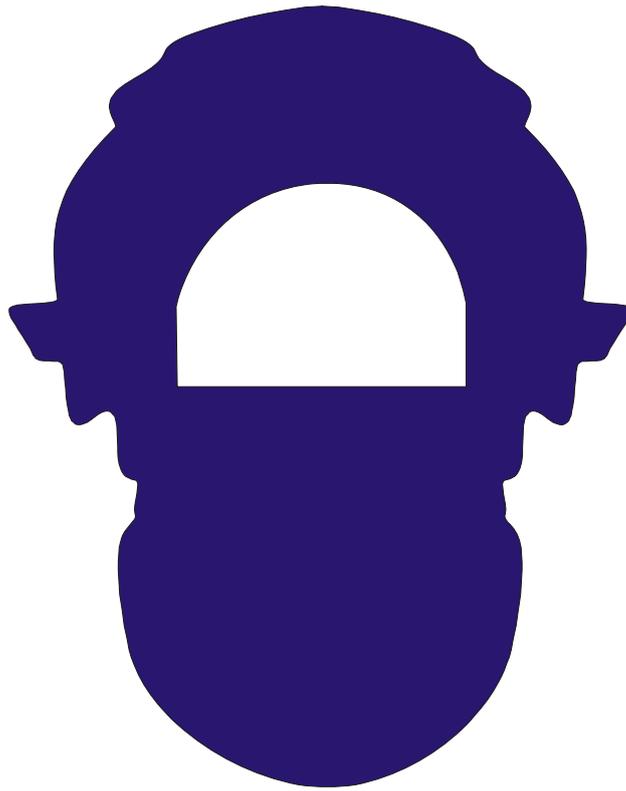


Рис. 4.10. Модель 6.2: зона разрыхления при $K_p=1,2$

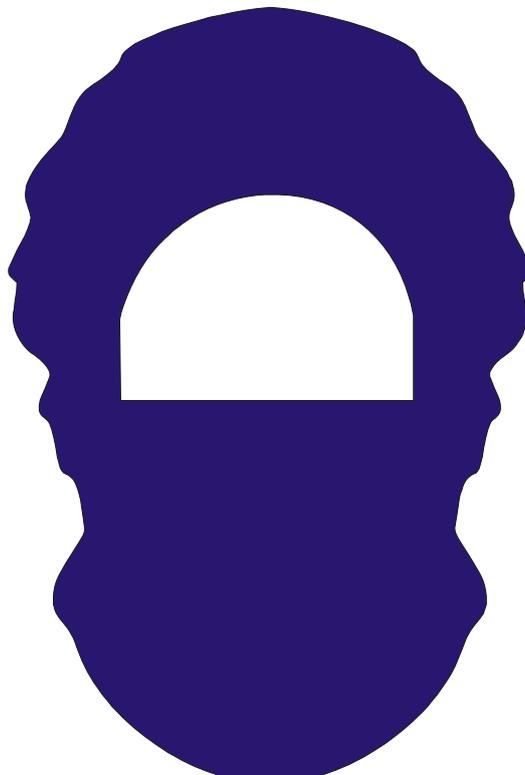


Рис. 4.11. Модель 12.2: зона разрыхления при $K_p=1,2$

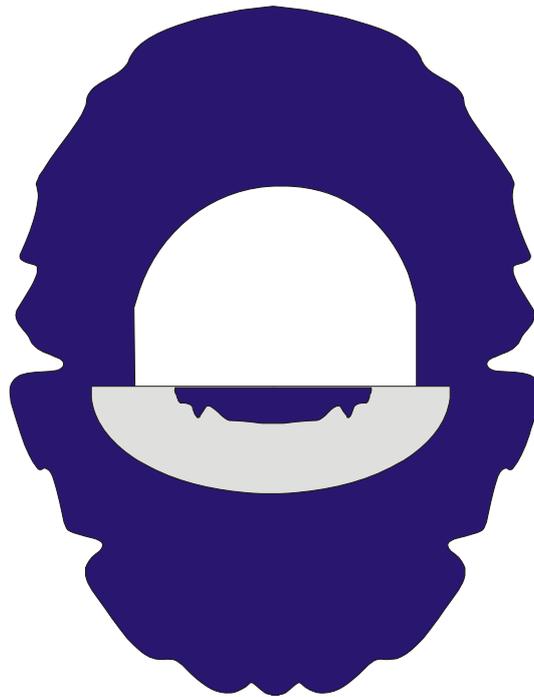


Рис. 4.12. Модель 18.2: зона разрыхления при $K_p=1,2$

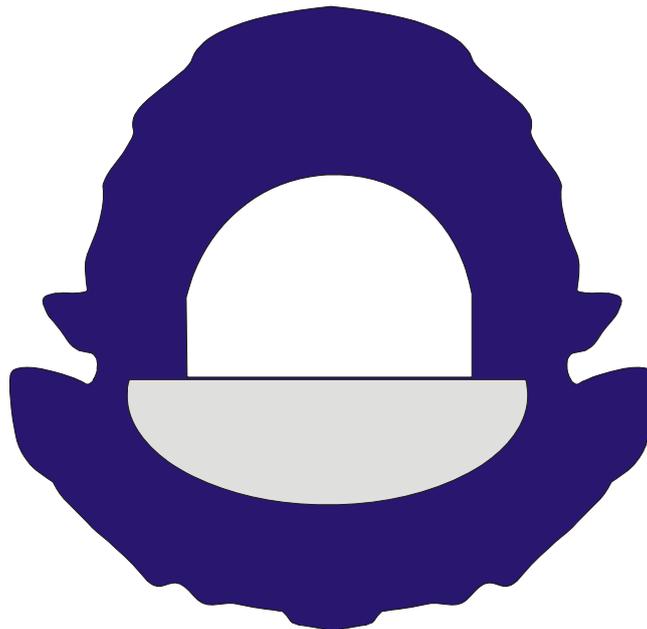


Рис. 4.13. Модель 24.2: зона разрыхления при $K_p=1,2$

Установлено, что с увеличением размеров разрыхленной и укрепленной зон при одинаковом значении ($K_p=1,1$) количество разрушенных элементов снижается от 749 (модель 18) до 730 (модель 19). Определено, что зона с наименьшим количеством разрушенных элементов наблюдалась на модели 20 (725 элементов). Таким образом, с использованием расчетов по критерию устойчивости Парчевского-Шашенко [118] является возможным выделение из рассмат-

риваемых геометрических параметров областей рациональных значений, при которых достигается повышение устойчивости.

Для сравнения смещений кровли и почвы данных моделей при физико-механических параметрах демпферной зоны, характеризующихся коэффициентом разрыхления $K_p=1,2$, результаты численного моделирования сведены по графикам (рис. 4.14...4.17). При увеличении значения коэффициента разрыхления разгрузочной зоны наблюдается снижение смещений со стороны пород почвы, при этом наблюдается увеличение смещений со стороны пород кровли.

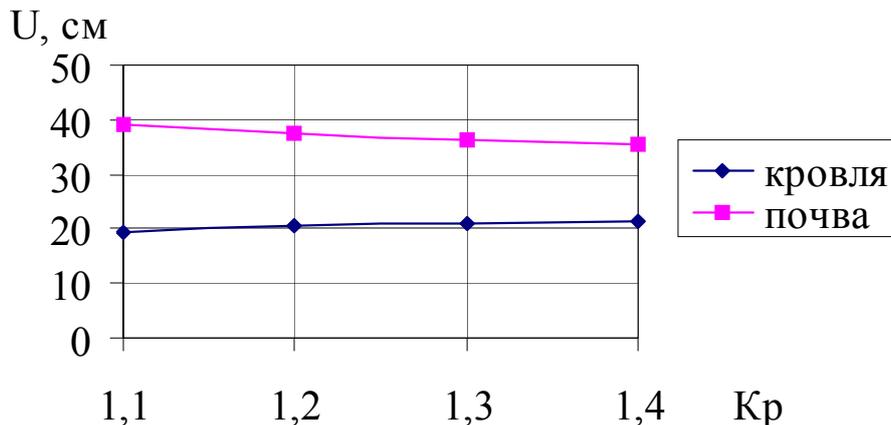


Рис. 4.14. Смещения пород кровли и почвы на модели 6

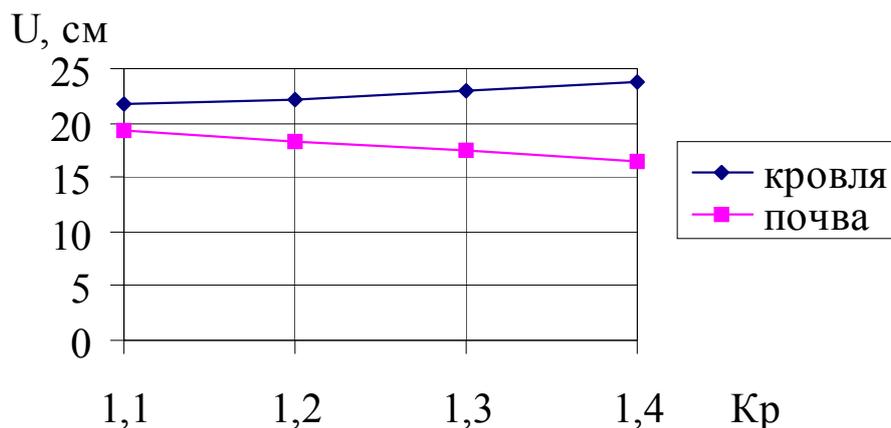


Рис. 4.15. Смещения пород кровли и почвы на модели 12

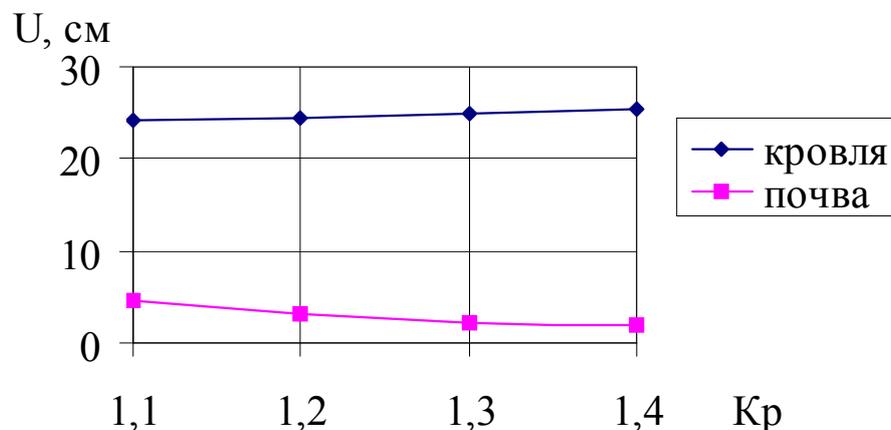


Рис. 4.16. Смещения пород кровли и почвы на модели 18

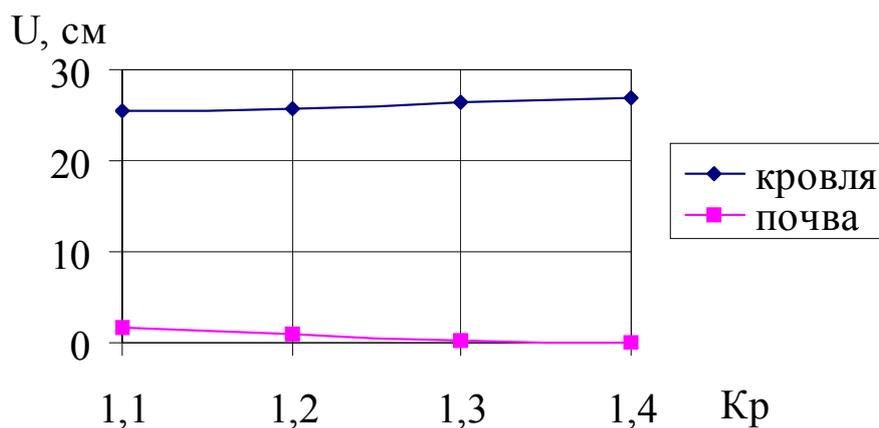


Рис. 4.17. Смещения пород кровли и почвы на модели 24

Происходит активная реализация деформаций и перераспределение напряжений в почве выработки. Увеличение размеров демпферной и укрепленной зон существенно снижают смещения пород со стороны почвы, за счет чего изменяется характер смещений кровли. Однако величина опускания кровли является незначительной в сравнении со степенью снижения перемещений пород со стороны почвы выработки.

Наименьшие смещения получены на моделях рассмотренных ситуаций с параметрами a больше 0,6м и d более 1,2м при $K_p=1,3 \dots 1,4$.

Далее представлены характерные картины разрушенных элементов, смещений пород и результирующих напряжений полученные на моделях 8, 9, 13 и 14 при коэффициенте $K_p=1,3$ (рис. 4.18...4.21).

Картины результирующих напряжений показывают характер изменения эпюры напряжений в приконтурном массиве при различной геометрии зон и степени разрыхления пород в зоне разгрузки. По картинам смещений пород можно судить об эффективности отдельных мероприятий. В результате выполнения расчетов установлено, что при снижении количества разрушенных элементов подстилающих пород и максимальном задействовании элементов демпферной зоны происходит снижение перемещений элементов укрепленной зоны, а также снижение напряжений на контуре. Проведенные исследования позволили выделить модели с параметрами a (от 0,6м и более), d (от 1,2м и более) при $K_p=1,3 \dots 1,4$, для которых получены удовлетворительные результаты по обеспечению устойчивости пород почвы. Анализ состояния укрепленной зоны модели 25 свидетельствует о недогруженности элементов данной зоны. Основная цель данных исследований определить минимально необходимые параметры, при которых сохраняется устойчивость пород почвы.

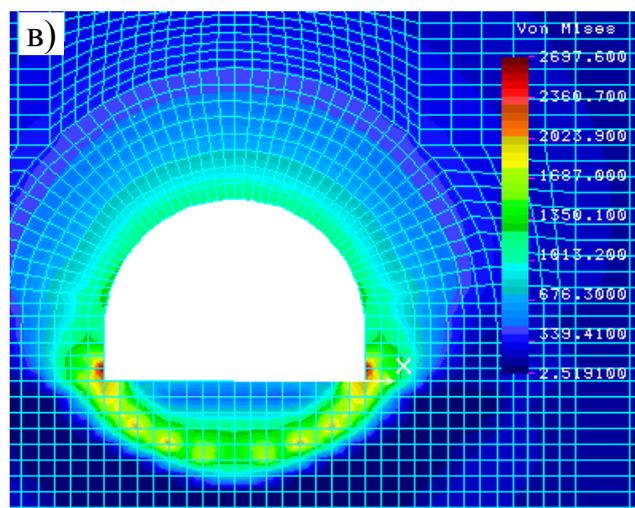
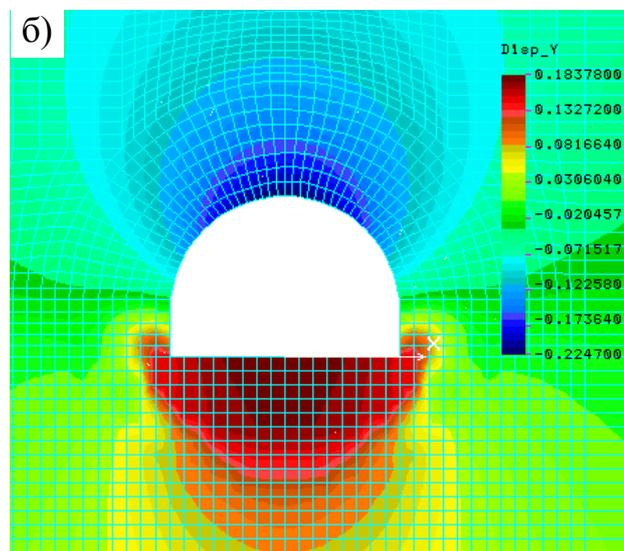
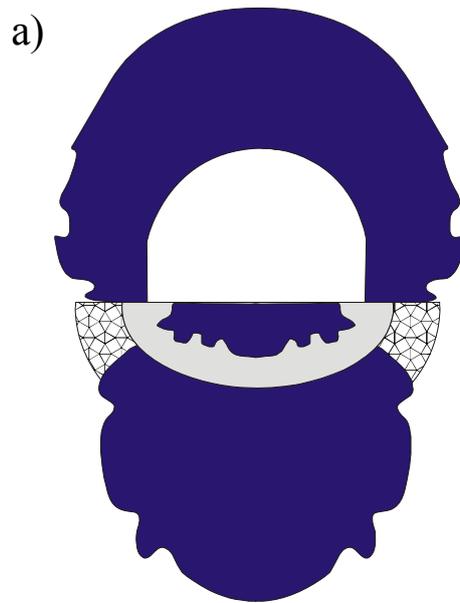


Рис. 4.18. Модель 8.3: (а) – зона разрыхления, (б) – картина смещений пород, (в) – картина результирующих напряжений по Ван-Мизесу

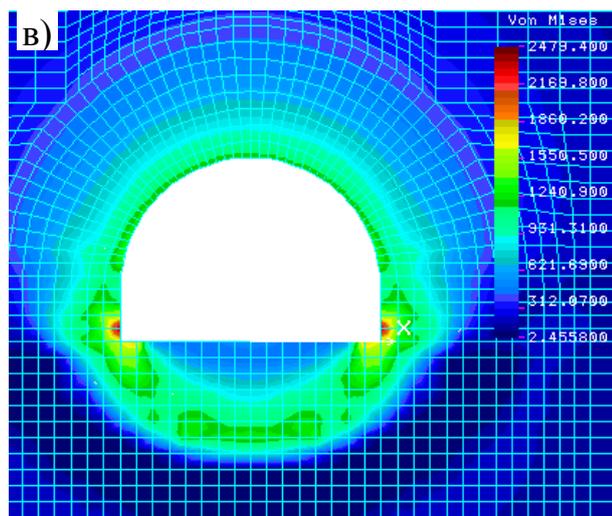
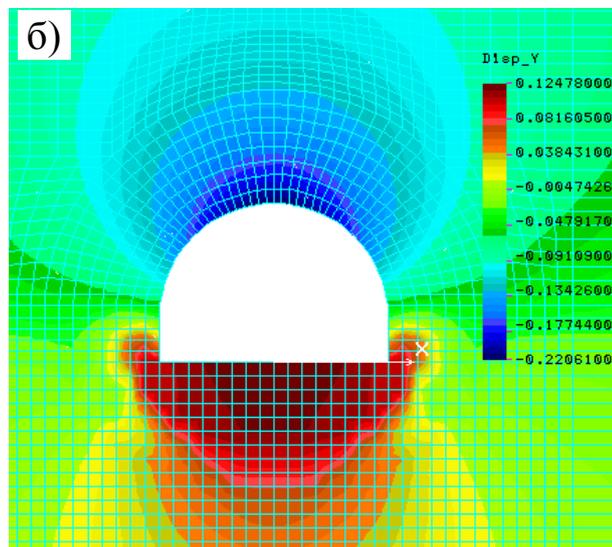
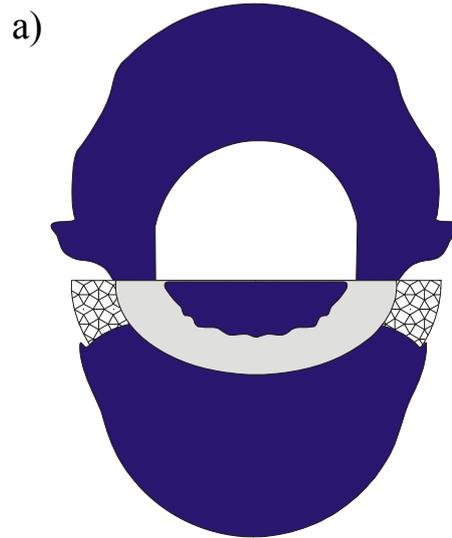


Рис. 4.19. Модель 9.3: (а) – зона разрыхления, (б) – картина смещений пород, (в) – картина результирующих напряжений по Ван-Мизесу

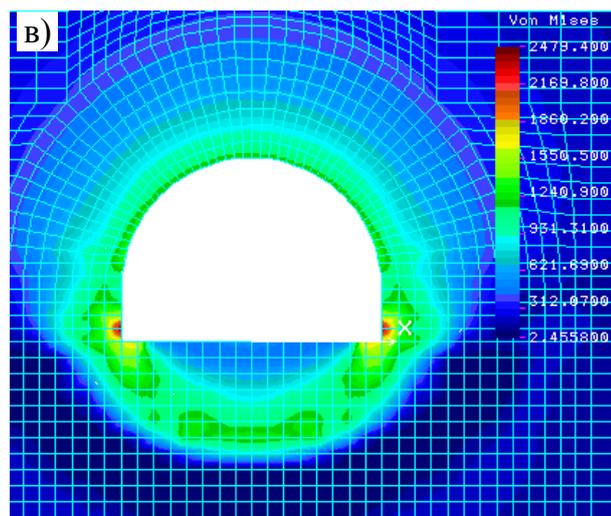
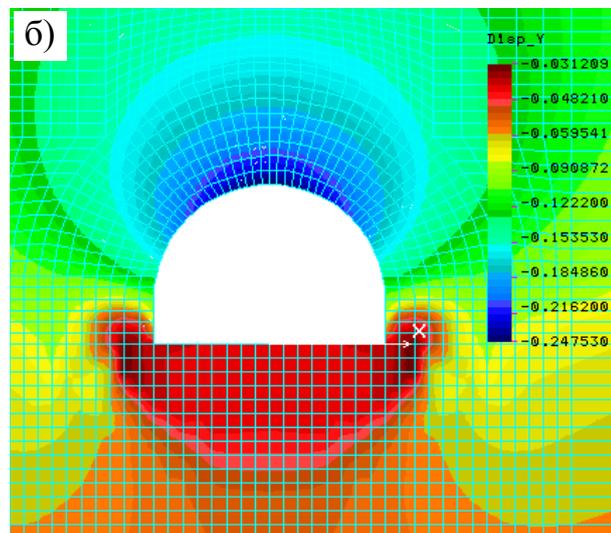
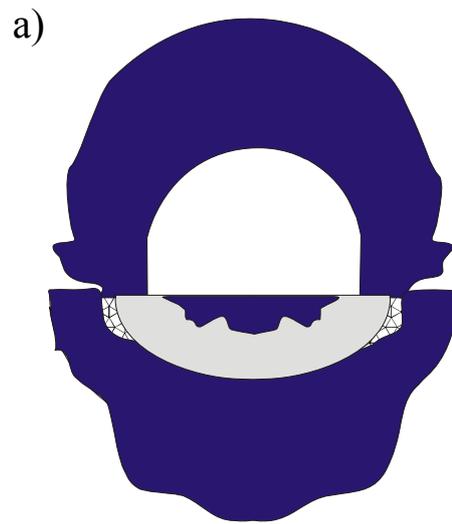


Рис. 4.20. Модель 13.3: (а) – зона разрыхления, (б) – картина смещений пород, (в) – картина результирующих напряжений по Ван-Мизесу

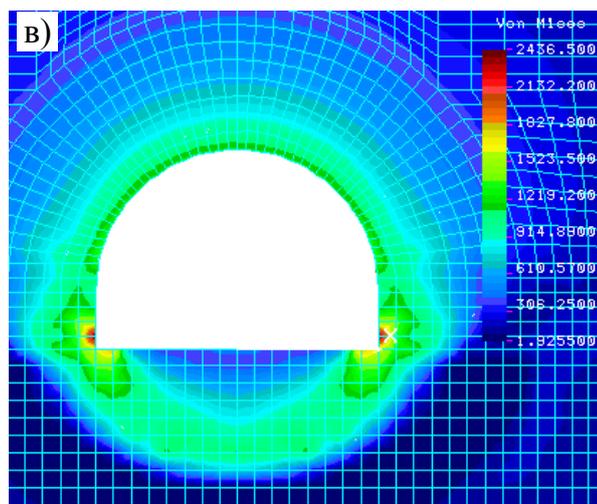
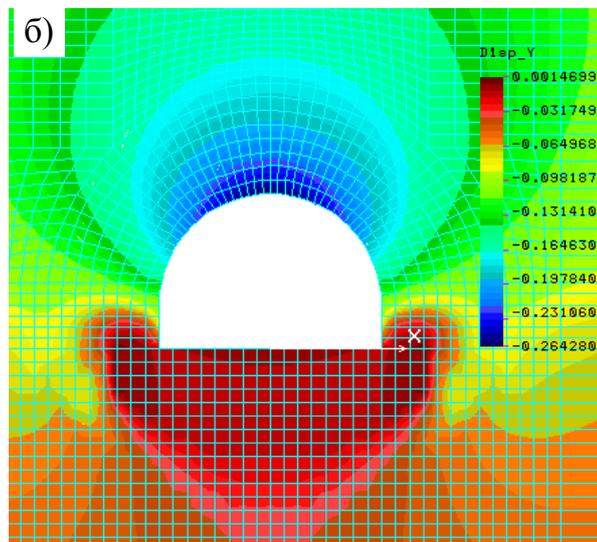
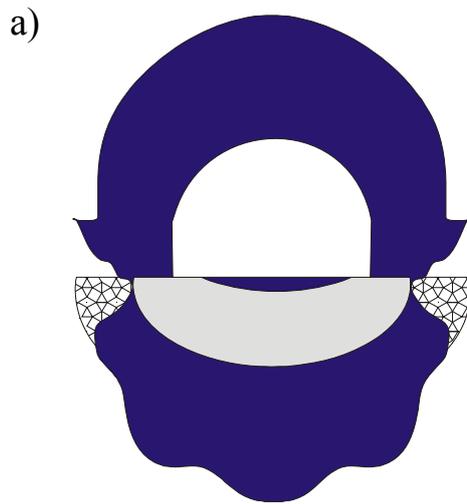


Рис. 4.21. Модель 14.3 ($K_r=1,3$): (а) – зона разрыхления, (б) – картина смещений пород, (в) – картина результирующих напряжений по Ван-Мизесу

Одним из показателей, который характеризует работу укрепленной зоны в заданном режиме, является коэффициент устойчивости. **Коэффициент устойчивости укрепленной зоны** характеризует отношение количества разрушенных элементов укрепленной зоны к общему количеству элементов в данной зоне. Для моделей с различной геометрией укрепленной зоны при одинаковом значении $K_p=1,3$ и $d=1,2$ м для определения коэффициента устойчивости укрепленной зоны построен рис. 4.22.

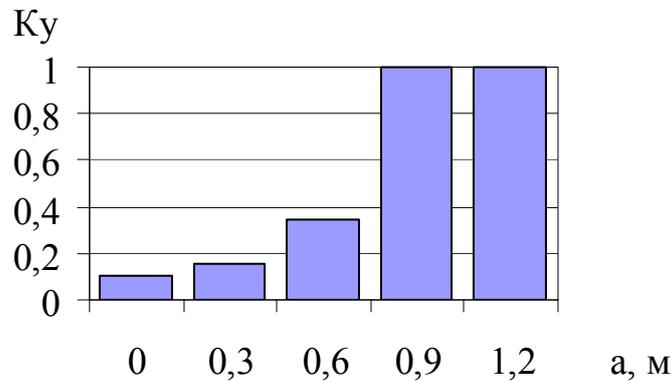


Рис. 4.22. Коэффициент устойчивости укрепленной зоны для моделей с $K_p=1,3$ и $d=1,2$ м

Анализ результатов численного моделирования методом конечных элементов позволил сделать следующие выводы. Пропорциональное увеличение геометрических размеров укрепленной и разгрузочной зон благоприятно влияют на повышение устойчивости пород почвы и снижение пучения. Однако смещения пород укрепленной зоны от ее геометрических размеров и толщины демферного слоя характеризуется нелинейной зависимостью (рис. 4.23...4.25).

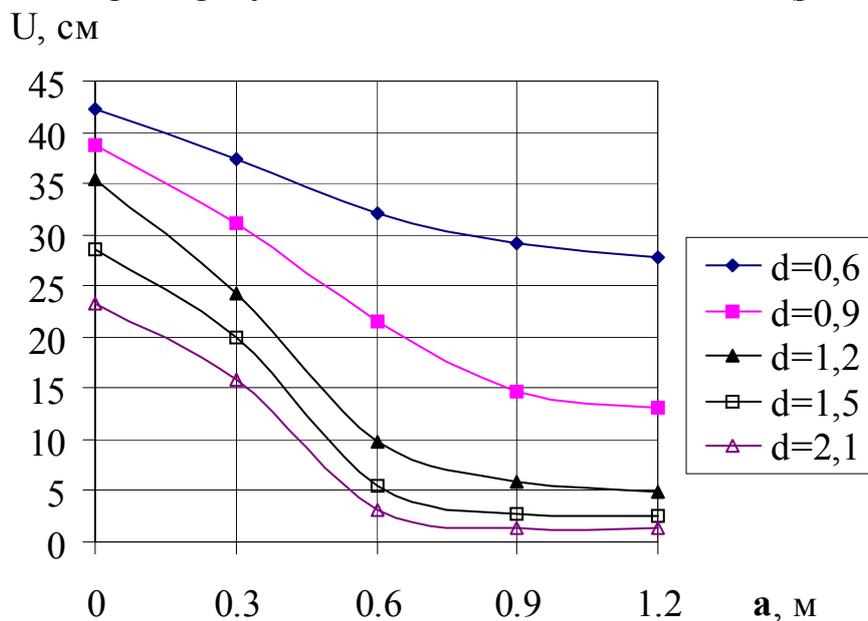


Рис. 4.23. Зависимость величины поднятия почвы от размеров зоны укрепленных пород (a) и зоны разгрузки (d) при $K_p=1,2$

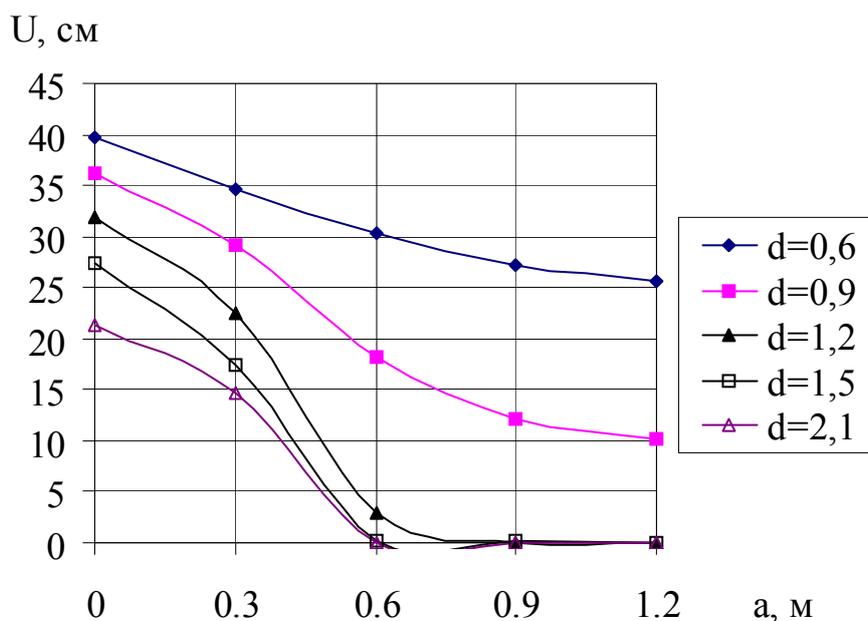


Рис. 4.24. Зависимость величины поднятия почвы от размеров зоны укрепленных пород (a) и зоны разгрузки (d) при $K_p=1,3$

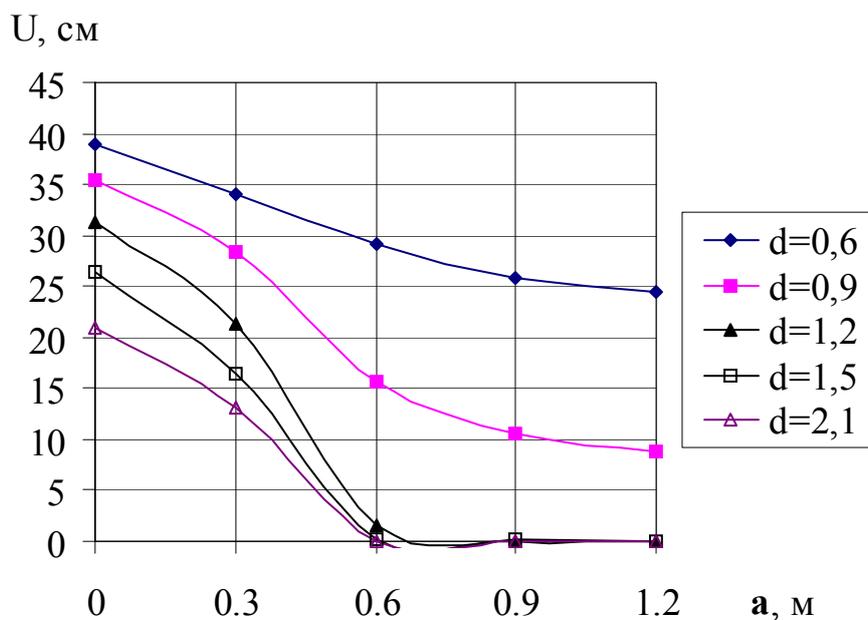


Рис. 4.25. Зависимость величины поднятия почвы от размеров зоны укрепленных пород (a) и зоны разгрузки (d) при $K_p=1,4$

Зоны концентрации напряжений наблюдаются на боковых стенках в местах контакта с почвой. По мере удаления от них уровень напряжений становится значительно ниже. При сравнении картин напряжений, полученных для выработки, закрепленной арочной крепью и выработки со способом борьбы с пучением установлено, что величина эквивалентных напряжений в зонах концентрации напряжений изменяется на 10...18%, в зависимости от размеров зон при постоянном значении K_p . При этом зона концентрации напряжений на контуре выработки смещается со стороны пород почвы в сторону боковых пород, а также в зону разгрузки. За счет этого снижается общее напряженное состояние в

почве выработки и происходит изменение очертания зоны разрыхления (рис. 4.6, 4.18...4.21).

При создании в почве выработки двухслойной конструкции (зоны разгрузки и зоны укрепленных пород) наблюдается значительное снижение величины поднятия пород почвы (см. рис. 4.20б, 4.21б), что совпадает с лабораторными результатами.

На основании результатов математического моделирования (рис. 4.23...4.25) построен график для выбора рациональных параметров способа обеспечения устойчивости пород почвы, при котором обеспечивается максимальное поднятие почвы на высоту до **5 см** (рис.4.26).

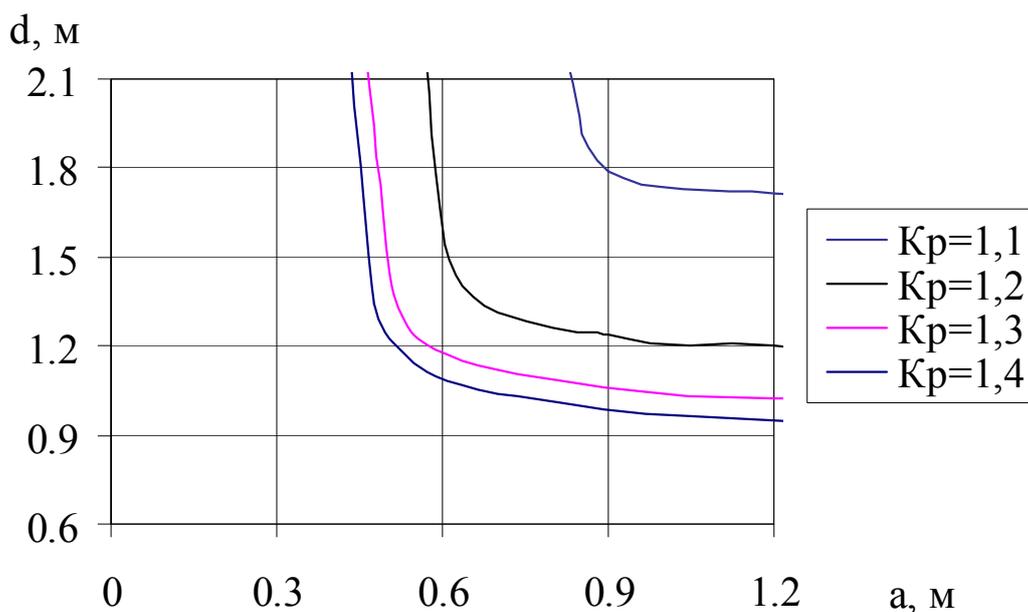


Рис. 4.26. Схема определения рациональных параметров a и d способа повышения устойчивости почвы

Представленная схема позволяет выбирать параметры способа с учетом конкретных горно-геологических условий. Увеличение коэффициента разрыхления от $K_p=1,3$ до $K_p=1,4$, обеспечивает сохранение уплотненной зоны в устойчивом состоянии, но не оказывает существенного влияния на увеличение устойчивости выработки в целом. Для выработки со слабыми породами почвы создание разрыхленной и укрепленной зон обеспечивает снижение смещений пород почвы в 1,2...1,42 раза в зависимости от размеров зон при степени разрыхления пород демпферной зоны 20...40% соответственно. Таким образом, наиболее рациональным с точки зрения обеспечения необходимой устойчивости почвы выработки при минимальных затратах на выполнение работ является создание демпферной зоны с коэффициентом разрыхления равным 1,3.

Для условий ПАО «ДТЭК Шахта Комсомолец Донбасса» разработаны и обоснованы на основе рис.4.26 рекомендации для определения рациональных параметров способа повышения устойчивости почвы выработок.

Глава 5

ШАХТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СПОСОБА ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК В ПУЧАЩИХ ПОРОДАХ

5.1. Выбор участка для проведения шахтного эксперимента

Практически все протяженные выработки ПАО «ДТЭК Шахта «Комсомолец Донбасса» характеризуются сложными условиями эксплуатации. С увеличением глубины активно интенсифицируются процессы пучения. Для проведения экспериментальных исследований на ПАО «ДТЭК Шахта Комсомолец Донбасса» был выбран северный параллельный откаточный штрек гор. 418 м. Данная выработка играет важную роль в обеспечении бесперебойной работы горизонта. Работы по созданию экспериментального участка длились в течение 3-х месяцев. На время проведения работ выработка использовалась по назначению, с соблюдением необходимых мер безопасности.

5.2. Создание экспериментального участка с использованием способа борьбы с пучением. Технология выполнения работ

В данной выработке на участке длиной 300 м были выполнены мероприятия, направленные на повышение устойчивости пород почвы в течение длительного срока эксплуатации.

Для осуществления работ по созданию экспериментального участка часть рельсового пути была демонтирована. После проведения тестовых взрывных работ установлено незначительное поднятие почвы (до 100мм). Дальнейшие работы, связанные с взрыванием зарядов на рыхление и нагнетанием раствора в почву выработки проводились без демонтажа рельсового пути и торможения работы технологической цепи горизонта. Согласно предложенному способу в почве выработки пробурили шпуры на глубину до 4,25 м (рис.5.1, а). Шпуры располагались веерообразно, образуя обратный свод. В шпуры помещались камуфлетные заряды и производилось взрывание (рис.5.1, б). После взрывания осуществлялась уборка взорванной породы до размеров проектного сечения выработки. Затем производилось бурение шпуров по разрушенным породам. Через дополнительные шпуры, длина которых меньше основных, производилось нагнетание полимерного пленкообразующего раствора до начала образования сплошного слоя на расстоянии, соответствующего длине дополнительных шпуров, с оставлением демпферного слоя разрушенных пород. После этого в дополнительные шпуры нагнетали скрепляющий раствор. В результате в почве выработки была сформирована породная конструкция, состоящая из нижнего демпферного и верхнего несущего слоев.

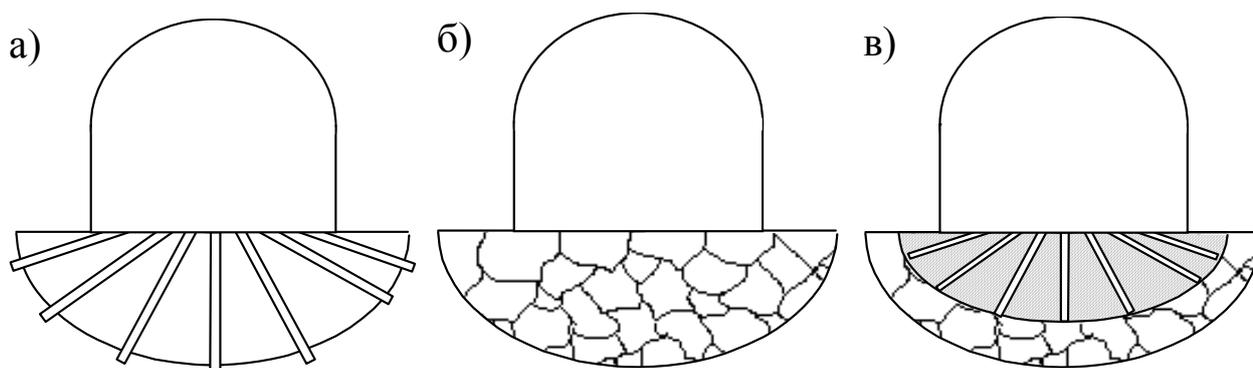


Рис. 5.1. Схема выполнения работ по созданию разрыхленной и уплотненной зон: а – бурение шпуров; б – взрывание зарядов; в – повторное бурение шпуров, нагнетание пленкообразующего раствора

Демпферный слой позволяет реализовать предельные напряжения, которые возникают в породном массиве в начальный период. После того, как демпферный слой сминается, в работу включается несущий слой и происходит перераспределение напряжений. В результате напряжения через уплотненный слой передаются на боковые породы. Система переходит в новое равновесное состояние.

При взрывании удлиненных цилиндрических зарядов ($l_{зар} > 5d_{зар}$) зоны разрыхления получают цилиндрической формы – их длина превышает длину заряда ($l_{зар}$) на $3...4d_{зар}$ [120].

При диаметре шпуров $d_{шп}=40$ мм длина котла $l_{котла}=l_{зар}+4d_{шп}$.

Масса зарядов ВВ в глубоких шпурах (3,5...4,25м) для передового рыхления зависит от крепости пород и для пород $f=4...6$ принимается равной 1,5...1,8кг на один шпур; для слабых пород может уменьшаться до 1,2кг [121].

Расстояние между соседними шпурами определяется объемом зоны разрушения, которая по различным источникам больше объема заряда в 1000...2000 раз [120].

В шахтах, опасных по газу и пыли, для взрывания пород принимаем предохранительное ВВ III-класса Аммонит АП-5-ЖВ. $Q_v=907$ ккал/кг, $\Delta_{пат}=1...1,15$ г/см³, масса патрона – 300г, работоспособность – 320см³, длина патрона $l_{пат}=26$ см.

Поскольку для обуривания будут использоваться шпуры различной длины, то величину шпурового заряда для одной группы шпуров принимаем 1,2 кг для другой 1,5кг.

Для шпуров с массой заряда ВВ 1,2 кг будет 4 патронов, минимально необходимая длина шпура определяется по формуле:

$$l_{зар} = l_{пат} \cdot 4 = 26 \cdot 4 = 1,04 \approx 1,1м,$$

$$l_{кот} = l_{зар} + 4d_{шп} = 1,1 + 0,168 = 1,26 \approx 1,3м.$$

Для шпура с массой заряда ВВ 1,5кг будет 5 патронов [122]:

$$l_{зар} = l_{нат} \cdot 5 = 26 \cdot 5 = 1,3 м$$

$$l_{кот} = l_{зар} + 4d_{ун} = 1,3 + 0,168 = 1,468 \approx 1,5 м.$$

Учитывая то, что в верхней части способом предполагается создание зоны укрепленных пород – длина шпуров равна 3,25м, а основные заряды располагаются на глубине зоны разрыхления (рис. 5.2).

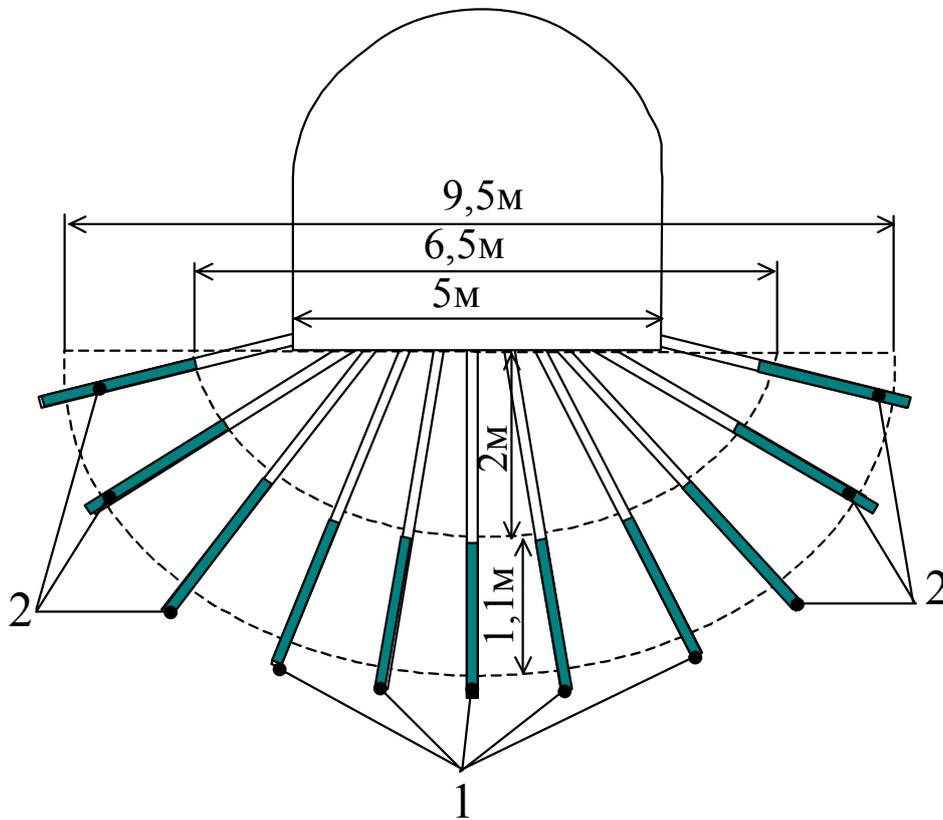


Рис. 5.2. Схема расположения шпуров (1 – шпуров с 5 зарядами ВВ; 2 – шпуров с 4 зарядами ВВ)

На основании данных [120] при расчетах принимаем, что объем разрушения одного заряда ВВ больше в 1500 раз объема ВВ, то расстояние между соседними шпуров первой группы будет:

$$V_{раз} = l_{нат} \cdot \frac{\pi d^2}{4};$$

$$V_{раз} = 1,3 \cdot 1500 = 1950 л = 1,95 м^3$$

$$d_{кот} = \sqrt{\frac{4V_{раз}}{l_{кот} \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,95}{1,5 \cdot 3,14}} = 1,29 м$$

Для второй группы:

$$V_{раз} = 1,5 \cdot 1500 = 2250 л = 2,25 м^3;$$

$$d_{кот} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2,25}{1,5 \cdot 3,14}} = 1,38 м.$$

Учитывая, что необходимо обеспечение равномерное дробление пород по всему сечению зоны разгрузки, с учетом минимального значения $d_{котл}=1,38$ принимаем расстояние по линии обратного свода между шпурами одной группы равным 1,3м. Таким образом количество шпуров при длине разгруженной зоны по внешней дуге $\bar{l}=15,6м$ определяем по формуле:

$$n = \frac{\bar{l}}{d} = \frac{15,6}{1,38} = 11,3$$

Принимаем 11 шпуров. Для обеспечения необходимого степени разрыхления производим расчет количества шпуров на 1пм.

Степень разрыхления демферной зоны при проведении ВР задаем величиной $K_p=1,3$, которая определена в ходе проведенных исследований как необходимый параметр для эффективного срабатывания разрыхленных пород на смятие и поглощения избыточных напряжений со стороны породного массива.

При взрывании шпуровых зарядов образуются зоны вытеснения, которые структурно ослабляют массив (рис. 5.3).

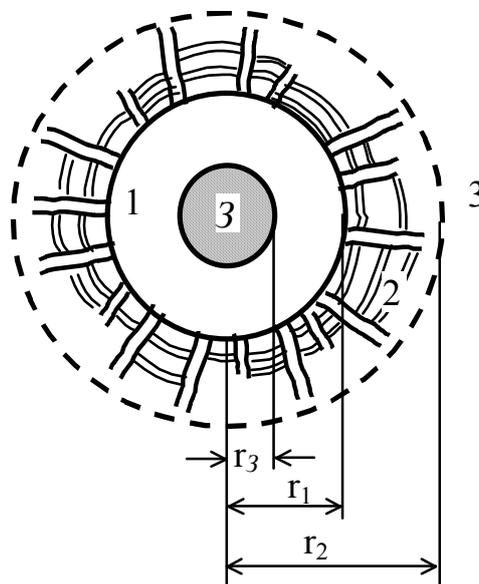


Рис. 5.3. Схема действия взрыва заряда в горной породе: 3 – заряд до взрыва; 1 – зона вытеснения (котел); 2 – зона разрушения; 3 – зона сотрясения; r_3 – радиус заряда; r_1 – радиус зоны вытеснения; r_2 – радиус зоны разрушения

При короткозамедленном взрывании происходит “погашение” данных зон и разрыхление массива. Степень разрыхления массива определяется

размером и количеством зон вытеснения. Количество шпуров, необходимое для разрыхления 1м почвы выработки определяем исходя из требуемой степени разрыхления.

Радиус зоны вытеснения зависит от прочности и упругих свойств породы, от величины и формы заряда, от общей работоспособности и бризантности ВВ и от плотности заряжания. В соответствии с геометрическим законом подобия радиус зоны вытеснения может быть выражен через радиус заряда:

$$r_1 = \bar{r}_1 \cdot r_3,$$

где r_3 - радиус заряда;

$\bar{r}_1 = \frac{r_1}{r_3}$ - приведенный радиус зоны вытеснения (котла), или коэффициент пропорциональности, учитывающий влияние вышеперечисленных факторов.

Согласно [120] для пород с $f=4...6$ при использовании цилиндрических зарядов Аммонита 5ЖВ – $\bar{r}_1=6$. Размер радиуса зоны вытеснения равен $r_1 = 6 \cdot 1,5 = 9$ см.

Исходя из того, что:

$$k_p = \frac{V_p}{V_{II}},$$

где V_p – объем зоны разрыхления; $V_{II} = (V_p - \sum V_{ЗВ}) \cdot \omega$ – объем пород разрыхленной зоны без учета пустот, сформированных от зон вытеснения, а также в результате образования трещин от взрывания сближенных зарядов; ω – коэффициент, учитывающий влияние смежных зарядов на трещинообразование (для пород с $f=4...6$, $\omega=0,8$).

$$\begin{aligned} \sum V_{ЗВ} &= V_p - \frac{V_{II}}{\omega} = V_p - \frac{V_p}{\omega \cdot k_p} = V_p \left(\frac{\omega \cdot k_p - 1}{\omega \cdot k_p} \right) \\ \sum V_{ЗВ} &= 15,75 \text{ м}^3 \cdot 0,0385 = 0,606 \text{ м}^3 \end{aligned}$$

Из (5.2, 5.4) следует, что глубина котлов, которая образуется от взрывания шпуров с 4 и 5 патронами, равна 1,3м и 1,5м соответственно. Таким образом, величина зоны вытеснения, образующейся от взрывания зарядов одного шпура, составляет для 4 патронов:

$$V_{ЗВ4} = S_{ЗВ} \cdot l_{ЗВ} = \pi \cdot r_1^2 \cdot l_{ЗВ} = 3,14 \cdot (0,09)^2 \cdot 1,3 = 0,0331 \text{ м}^3;$$

Для 5 патронов: $V_{ЗВ5} = 3,14 \cdot (0,09)^2 \cdot 1,5 = 0,0382 \text{ м}^3$.

Объем зоны вытеснения от шпуров одного ряда равен:

$$V_{ЗВ}^1 = \sum n \cdot V_{ЗВ} = 5 \cdot 0,0331 \text{ м}^3 + 6 \cdot 0,0382 \text{ м}^3 = 0,395 \text{ м}^3.$$

При взрывании принято расположение рядов в шахматном порядке. Во втором ряду количество шпуров равно 10 (6 шпуров с 5 патронами и 4 с 4).

Объем зоны вытеснения от шпуров второго ряда равен:

$$V_{3B}^2 = \sum n \cdot V_{3B} = 4 \cdot 0,0331 \text{ м}^3 + 6 \cdot 0,0382 \text{ м}^3 = 0,362 \text{ м}^3.$$

Расстояние между соседними рядами определяем с учетом достижения необходимой степени разрыхления на основании соотношения:

$$B = (V_{3B}^1 + V_{3B}^2) / \sum V_{3B},$$
$$B = (0,395 + 0,362) / 0,606 = 1,25.$$

Учитывая что, размер зон вытеснения от взрывания двух рядов шпуров превышает необходимый размер на 1пм выработки в 1,25 раза, максимальное расстояние между рядами будет равно 0,625м. Принимаем 0,6м.

Расстояние между шпурами в одном ряду составляло 0,5м.

Взрывание принято электрическое короткозамедленное.

При проведении работ по созданию разгрузочной зоны установлено поднятие почвы после взрыва на величину 7...10см.

После проведения взрывных работ осуществлялось бурение шпуров для формирования укрепленной зоны. После нагнетания полимерного пленкообразующего состава производилось нагнетание цементного раствора. Особое внимание было уделено формированию зон вблизи боков выработки. Для ускорения процесса схватывания и твердения тампонажного раствора были использованы ускорители схватывания на основе хлористого кальция 2...3% от веса цемента.

Выбор компонентов для формирования укрепленной зоны осуществлялся с учетом физико-химического состава шахтных вод, с целью предупреждения вредного влияния вод на работу зоны укрепленных пород. Был использован портландцемент марки 400. Расчет затрат по локальной смете представлен в приложении.

В результате проведенных исследований (см. разделы 3, 4) удалось установить, что демпферная зона в предложенном способе за счет измененных физико-механических параметров породной среды обеспечивает срабатывание зоны разрушенных пород в упругопластическом режиме высвобождая предельные напряжения, возникающие в прилегающем массиве через деформации смятия. Таким образом, в то время как в демпферной зоне происходит активная реализация деформаций в результате действующих избыточных напряжений со стороны зон активного состояния пород, выработка переходит в новое напряженно-деформированное состояние, которое характеризуется большей устойчивостью.

5.3. Результаты шахтных исследований по повышению устойчивости пород почвы на экспериментальном участке

На экспериментальном участке было установлено 9 замерных станций. По результатам, полученным на основе проведенных замеров, был выполнен анализ эффективности выполненного комплекса мероприятий, представляющих способ повышения устойчивости выработок. Наблюдения за состоянием экспериментального участка на протяжении 12 месяцев показали, что величина поднятия пород почвы составила 2...4 см за весь срок эксплуатации. Процесс смещения пород при выполнении работ по созданию экспериментального участка представлен на рис. 5.2. Вначале процесс пучения характеризуется значительной интенсивностью (1). Перед проведением работ по созданию способа проводилась подрывка пород (2). После этого в течение 3...5 суток выполнялись работы по созданию демпферной и укрепленной зон (взрывание, нагнетание полимерного, а затем цементного раствора). В результате взрывания камуфлетных зарядов (3) наблюдается поднятие пород на величину до 100мм. После этого выполняется цементирование укрепленной зоны. Далее величина поднятия пород (4) при эксплуатации экспериментального участка в течение 12 месяцев составила в общем 125...140мм, в том числе 100мм – поднятие почвы в результате взрывания камуфлетных зарядов и 22...40мм – от пучения.

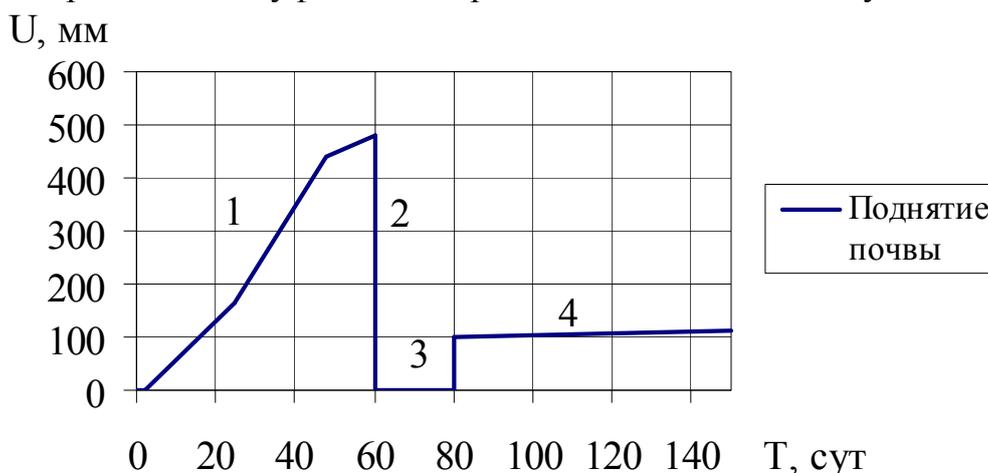


Рис. 5.2. Схема смещения пород при выполнении работ по созданию экспериментального участка

На основании исследования участков выработки, находящихся в сходных условиях, удалось получить сравнительную картину изменения величины смещения за данный период. В течение года подрывка пород почвы на контрольном участке проводилась в среднем 3 раза. Экспериментальный участок характеризуется устойчивым состоянием – средняя величина смещений пород почвы была равна 125 мм (рис.5.3).

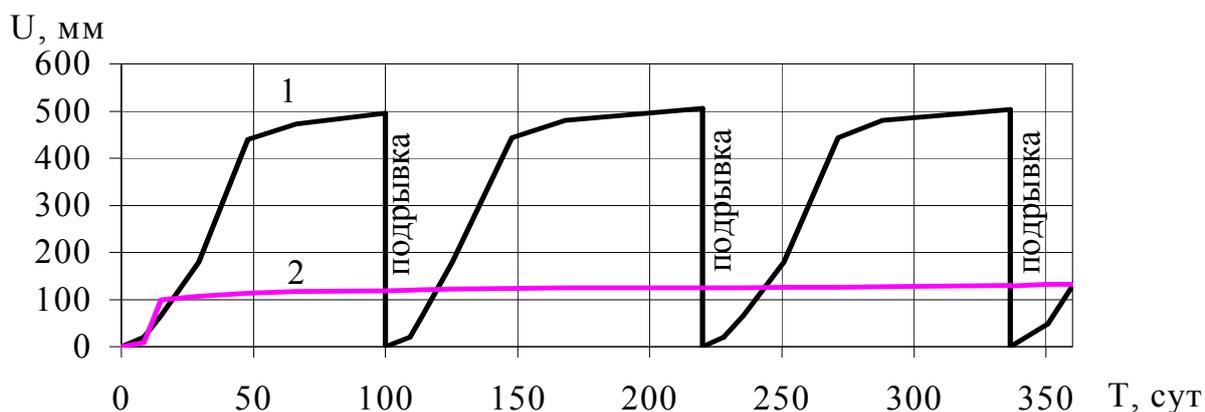


Рис.5.3. Смещения пород почвы на контрольном (1) и экспериментальном участках (2)

Проведенные шахтные исследования эффективности применения способа борьбы с пучением пород почвы подтвердили результаты физического и математического моделирования. Сотрудниками кафедры строительства и геомеханики Национального горного университета, разработаны рекомендации по обеспечению устойчивости капитальных выработок в условиях пучащих пород почвы.

5.4. Технологические схемы способа борьбы с пучением. Прогноз применения способа для повышения устойчивости пород почвы капитальных горных выработок

В результате проведенных исследований установлено, что величина поднятия пород почвы в капитальной выработке, в которой был применен способ повышения устойчивости, после 12 месяцев эксплуатации составила в пределах 20...40мм. Учитывая тот факт, что наиболее интенсивно перемещения пород со стороны почвы наблюдаются в течение первых 3-х месяцев, принимая в дальнейшем затухающий характер, следует говорить о высокой эффективности мероприятий, входящих в состав способа. Величина смещений пород кровли снижена на 30%.

Применение способа позволит снизить или практически исключить затраты на ремонт и поддержание выработок за счет проведения работ по обеспечению устойчивости выработки в условиях пучащих пород.

Для использования способа борьбы с пучением предложены следующие технологические схемы:

1. Капитальные выработки, проводимые буровзрывным способом с выполнением активной разгрузки пород почвы в забое одновременно с ведением буровзрывных работ по проходке. Инъекционное упрочнение пород укрепенной зоны с технологическим отставанием от проходческого забоя.
2. Активная разгрузка пород почвы в эксплуатируемых выработках, с последующим выполнением работ по формированию укрепенной зоны.

Технология выполнения работ по первой схеме представлена на рис. 5.4.

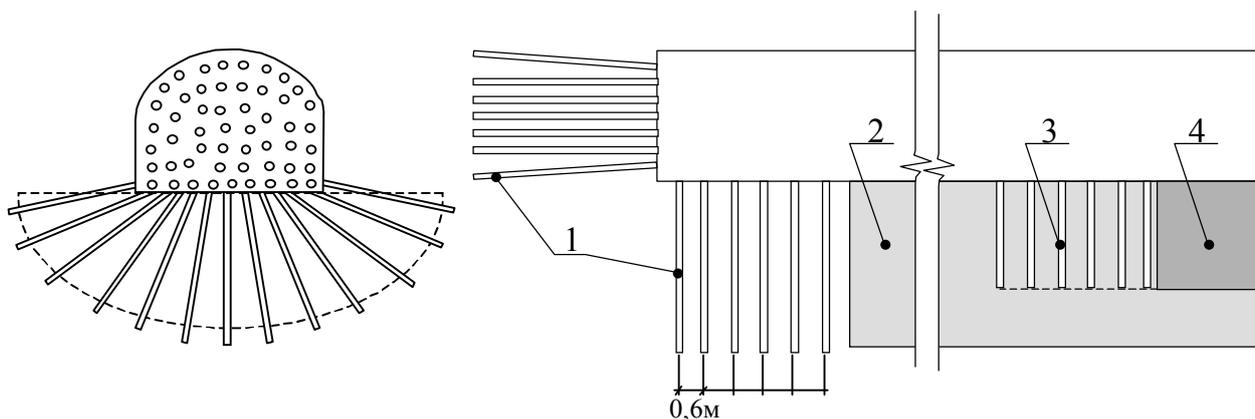


Рис. 5.4. Схема выполнения работ по обеспечению устойчивости пород почвы при проведении капитальной выработки

При проведении на забое и в почве выработки бурятся шпуры (1), в которые помещается заряд ВВ. Производится взрывание шпуровых зарядов в почве, затем на забое выработки. Для обеспечения равномерного дробления пород зоны разгрузки (2) при взрывании в почве зарядов ВВ используются короткозамедленные детонаторы. Величина заходки равна 1,5...2м. После взрывания производится уборка породы до контура выработки. Затем производится бурение шпуров по разрыхленным породам почвы (3). В шпуры помещаются инжекторы (пакерные установки), по которым производится нагнетание пленкообразующего полимерного раствора на глубину границы зоны укрепленных пород. После этого осуществляется нагнетание цементного раствора под давлением не более 0,3...0,5 МПа [123]. Работы по созданию зоны укрепленных пород (бурение шпуров, нагнетание раствора) осуществляются по мере разгрузки пород, заходками по 2...3м. Технологический разрыв во времени не должен превышать 3...5 суток. Представленный способ является эффективным для поддержания в устойчивом состоянии протяженных горных выработок, находящихся вне зоны влияния очистных работ и определяется капиталностью выработок.

Технология выполнения работ по второй схеме (при эксплуатируемой выработке) представлена на рис. 5.5.

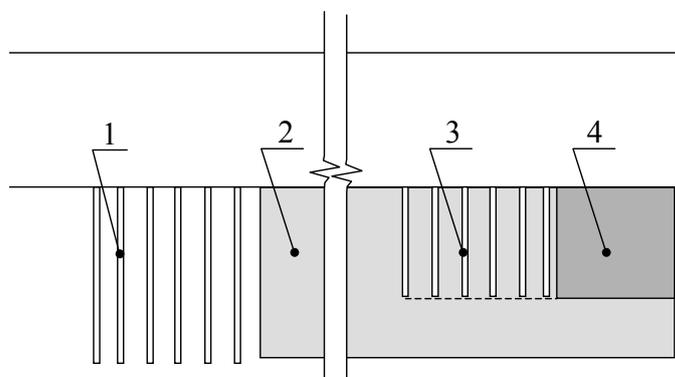


Рис. 5.5. Схема выполнения работ по обеспечению устойчивости пород почвы при эксплуатируемой капитальной выработке

При второй схеме основным отличием является выполнение работ по ремонту основного и укладке временного рельсового пути.

На стадии проектирования следует предусматривать применение способа при прогнозируемой величине смещений пород почвы свыше 200мм.

Данный способ может быть использован как для вновь проводимых, так и для эксплуатируемых капитальных выработок, когда пучение пород обусловлено изменением геомеханической ситуации в результате потери породами почвы устойчивости, а также после проведения работ по подрывке и перекреплению.

Способ отличается универсальностью, так как может быть использован в породах, склонных к размоканию под действием воды.

В зависимости от конкретных горно-геологических условий с учетом используемых на шахте технологий и оборудования возможно корректирование технологических параметров способа (размер заходов по созданию разгрузочной и укрепленной зон, размер технологического отставания по длине выработки, скорость выполнения работ по созданию способа, а также непосредственно геометрические параметры способа).

5.5. Определение ожидаемого экономического эффекта от внедрения способа обеспечения устойчивости капитальных выработок в условиях неустойчивых пород почвы ПАО «ДТЭК Шахта Комсомолец Донбасса»

На основании анализа затрат на ремонтные работы, выполненные в выработках шахты, были определены средние затраты на ремонт и поддержание 1 метра выработок и выполнен расчет ожидаемой экономической эффективности от использования способа.

На основании паспортов работ были определены объемы ремонтных работ, которые включали: подрывку, транспортировку породы, выравнивание рельсового пути и др.

Ожидаемый экономический эффект от реализации предложенного способа при эксплуатации выработки длиной 1000 м в течение 10 лет из расчета необходимости выполнения одной подрывки в год по всей длине выработки по принятой на шахте технологии составит соответственно:

$$\text{Э} = n \cdot C \cdot T - K,$$

где: Э – ожидаемый экономический эффект, тыс.грн.;

n – количество ремонтно-восстановительных работ по подрывке в год, исходя из объемов ремонтных работ, выполняемых на шахте принимаем n=1, это означает что суммарная длина участков по которым выполняется подрывка за год равна длине выработки;

C – стоимость ремонтно-восстановительных работ (старый способ: подрывка, исправление рельсового пути и т.д.), тыс.грн. C=350 тыс.грн.

T – срок, на который выполняется расчет (T=10), лет;

K – капитальные расходы, связанные с выполнением работ по новой технологии (способ борьбы с пучением), тыс.грн. K=1529 тыс.грн.

Таким образом ожидаемый экономический эффект за 10 лет составит:

$$\mathcal{E}=1\cdot 10\cdot 350 - 1529=1971 \text{ тыс.грн}$$

Ожидаемый экономический эффект за год равен:

$$\mathcal{E}^1=\mathcal{E}/T=1971/10=197 \text{ тыс. грн.}$$

Таким образом, ожидаемый экономический эффект от реализации предложенного способа обеспечения устойчивости капитальной выработки в условиях неустойчивых пород почвы, при длине выработки 1000 м, составит примерно 197 тыс.грн. в год при эксплуатации в течение 10 лет, из расчета необходимости выполнения подрывки 2 раза в год по всей длине выработки по принятой на шахте технологии.

Список используемой литературы

1. Жикаляк, Н.В. Природные энергоносители и экономика Украины: состояние, проблемы, перспективы [Текст] / Н.В. Жикаляк, А.М. Назаренко, А.В. Михелис // Уголь Украины. – 2000. – №8. – С.14-19.
2. Топливо-энергетический комплекс Украины в 2002 году (экспресс-анализ оперативной информации) [Текст] // Энергосбережение. – 2003. – №2. – С.7-9.
3. Журнал «Уголь Украины» [Электрон. ресурс] / Способ доступа: URL: <http://www.ucrcoal.com/docs/107/>. Загол. с экрана.
4. Специальные экономические зоны в Донецкой области. Новости [Электрон. ресурс] / Способ доступа: URL: <http://sez-tpd.org.ua/news/161299r.html> . Загол. с экрана.
5. Тулуб, С.Б. Перспективы инвестиционных проектов в Донбассе [Текст] / С.Б. Тулуб, В.Г. Агеев, С.В. Мартыненко // Науковий вісник НГА України. – 1999. – № 3. – С. 14.
6. Сургай, Н.С. Приоритеты в угле и цена их недооценки [Текст] / Н.С. Сургай // Науковий вісник НГА України. – 2000. – № 5. – С. 9 – 14.
7. Лысенко, А.Н. Некоторые аспекты развития угольной отрасли Украины и меры по стабилизации объемов добычи угля [Текст] / А.Н. Лысенко, Ю.П. Иванов // Уголь Украины. – 1999. – № 4. – С. 3 – 7.
8. Косков, И.Г. Основные направления совершенствования крепления горных выработок [Текст] / И.Г. Косков // Шахтное строительство. – 1985. – № 1. – С. 3 – 5.
9. Литвинский, Г.Г. Стальные рамные крепи горных выработок [Текст] / Г.Г. Литвинский, Г.И. Гайко, Н.И. Кулдыркаев. – К.: Техніка, 1999. – 216 с.
10. Лошкарева, Р.Н. Анализ потребления материальных ресурсов в угольной промышленности [Текст] / Р.Н. Лошкарева, В.Г. Халангот // Уголь Украины. – № 6. – 1992. – С. 45 – 47.
11. Компанец, В.Ф. Крепление выработок в сложных горно-геологических условиях глубоких шахт [Текст] / В.Ф. Компанец, Г.Г. Сугатенко, А.В. Курилин // Уголь Украины. – 1996. – №1. – С.26-28.
12. Мирончак, О.П. Новые крепи подготовительных выработок [Текст] / О.П. Мирончак, Г.Г. Сугаренко // Уголь Украины. – 1998. – №12. – С.42.
13. Смирняков, В.В. Совершенствование конструкций металлических крепей горных выработок [Текст] / В.В. Смирняков, В.К. Подолян // Шахтное строительство. – 1985. – №4. – С.26-28.
14. Рахутин, С.Я. Опыт крепления дующей почвы анкерной крепью [Текст] / С.Я. Рахутин // Научные труды КНИУИ, вып.3. – М.: Углетехиздат, 1958. – С.30-33.
15. Кошелев, К.В. Повышение устойчивости капитальных горных выработок на больших глубинах [Текст] / К.В. Кошелев, В.Ф. Трумбачев. – М.: Недра, 1972. – 127с.
16. Городничев, В.М. Современные методы борьбы с пучением горных пород [Текст] / В.М. Городничев. – М.: Госгортехиздат, 1960. – 100с.

17. Гурдус, А.Г. Изучение причин вспучивания горных пород каменноугольной формации Донбасса и меры борьбы с этим явлением [Текст] / А.Г. Гурдус. – Харьков: Государственное научно-техническое издательство, 1933. – 79с.
18. Целигоров, А.И. Некоторые вопросы изучения горных пород [Текст] / А.И. Целигоров. – М.: Углетехиздат, 1949. – 44с.
19. Белозович, И.М. Крепление горных выработок в поддувающих породах. [Текст] / И.М. Белозович, А.П. Бондаренко. – М.: Углетехиздат, 1951. – 102с.
20. Черняк, И.Л. Предотвращение пучения почвы горных выработок [Текст] / И.Л. Черняк. – М.: Недра, 1978. – 237с.
21. Городничев, В.М. Пучение горных пород и меры борьбы с этим явлением [Текст] / В.М. Городничев. – М.: Центр. ин-т техн. информации, 1954. – 130с.
22. Кошелев, К.В. Поддержание, ремонт и восстановление горных выработок [Текст] / К.В. Кошелев, А.Г. Томасов. – М.: Недра. 1985. – 215с.
23. Каретников, В.Н. Крепление капитальных и подготовительных горных выработок: Справочник [Текст] / В.Н. Каретников, В.Б. Клейменов, А.Г. Нуждихин. – М.: Недра, 1989. – 571 с.
24. Руппeneйт, К.В. Некоторые вопросы механики горных пород [Текст] / К.В. Руппeneйт. – М.: Углетехиздат, 1954. – 384с.
25. Покровский, Н.М. Проведение горных выработок [Текст] / Н.М. Покровский. – М.: Углетехиздат, 1950. – 120с.
26. Евдокимов-Рокотовский, М.И. Давление горных пород и расчет тоннельных обделок [Текст] / М.И. Евдокимов-Рокотовский. – Томск. 1927. – 173с.
27. Цытович, Н.А. Механика грунтов [Текст] / Н.А. Цытович. – М.: Государственное изд-во литературы по строительству и архитектуре, 1951. – 528с.
28. Максимов, А.П. Выдавливание горных пород и устойчивость подземных выработок [Текст] / Максимов А.П. – М.: Госгортехиздат, 1963. – 144с.
29. Белов, В.И. Исследование явлений пучения в горных выработках [Текст] / В.И. Белов // Горный журнал. – 1929. – №1. – С.45-49.
30. Белов, В.И. Крепление подземных выработок в сильно пучащих породах [Текст] / В.И. Белов // Горный журнал. – 1933. – №1. – С.15-20.
31. Цимбаревич, П.М. Рудничное крепление [Текст] / П.М. Цимбаревич. – М.: Углетехиздат, 1951. – 284с.
32. Соколовский, В.В. Статика сыпучей среды [Текст] / В.В. Соколовский. – М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1954. – 276с.
33. Ростовцев, Д.С. Управление кровлей при разработке полопадающих пластов каменного угля [Текст] / Д.С. Ростовцев. – Харьков–Киев: Государственное научно-техническое издательство. Украины, 1935. – 378с.
34. Лабасс, А. Давление горных пород в угольных шахтах [Текст] / А. Лабасс // Горное давление. – М.: Госгортехиздат, 1957. – 222с.
35. Заславский, Ю.З. Исследование проявлений горного давления в капитальных выработках глубоких шахт Донецкого бассейна [Текст] / Ю.З. Заславский. – М.: Недра, 1966. – 180с.

36. Слесарев, В.Д. Механика горных пород и рудничное крепление [Текст] / В.Д. Слесарев. – М.: Углетехиздат, 1948.
37. Глушко, В.Т. Механика горных пород и охрана выработок [Текст] / В.Т. Глушко, А.З. Широков. – Киев: Наукова думка, 1967. – 153с.
38. Глушко В.Т. Инженерно-геологическое прогнозирование устойчивости выработок глубоких шахт [Текст] / В.Т. Глушко, Г.Т. Криничанский. – М.: Недра, 1974. – 196с.
39. Давыдов, С.С. Расчет и проектирование подземных конструкций [Текст] / С.С. Давыдов. – М.: Стройиздат, 1950. – 376с.
40. Сыроватко, М.В. Гидрогеология и инженерная геология при освоении угольных месторождений [Текст] / М.В. Сыроватко. – М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по горному делу, 1960. – 499с.
41. Шейхет, М.Н. Давление пучащих пород на крепь подземных выработок [Текст] / М.Н. Шейхет. – М.: Углетехиздат, 1955. – 125с.
42. Лыткин В.А. Механизм пучения пород в подземных выработках [Текст] / В.А. Лыткин. – М.: Недра, 1965. – 165с.
43. Глушко, В.Т. Разрушение горных пород и прогнозирование проявлений горного давления [Текст] / В.Т. Глушко, В.В. Виноградов. – М.: Недра, 1980. – 214с.
44. Мириманов, И.Г. Некоторые вопросы подвижности глинистых пород [Текст] / И.Г. Мириманов. Тбилиси: Мицниереба, 1966. – 140с.
45. Мириманов, И.Г. Устойчивость горных выработок в глинистых породах [Текст] / И.Г. Мириманов. Тбилиси: Мицниереба, 1968. – 290с.
46. Шашенко, А.Н. Механика горных пород [Текст] / А.Н. Шашенко. – Днепропетровск: НГУ, 2002. – 302с.
47. Шашенко, А.Н. Устойчивость подземных выработок в неоднородном породном массиве [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук. / А.Н. Шашенко. – Д., 1988. – 507 с.
48. Роечко, А.Н. Устойчивость подготовительных выработок угольных шахт в условиях больших глубин разработки [Текст]: дисс. ... д-ра техн. наук / А.Н. Роечко. – Д., 1995. – 426 с.
49. Рязанцев, А.П. Разработка нового способа борьбы с пучением пород почвы [Текст] / А.П. Рязанцев // Сборник научных трудов Национального горного университета, №17, Т.2. – РИК НГУ, 2003. – С.79-83.
50. Полухин, В.А. Определение напряженно-деформированного состояния массива и повышение устойчивости выработки [Текст] / В.А. Полухин // Уголь Украины. – 1999. – №7. – С. 25-26.
51. Левинсон-Лессинг Ф. К вопросу о давлении в тоннелях [Текст] / Ф. Левинсон-Лессинг, А. Зайцев. – М.: ОНТИ, 1915. – 118 с.
52. Покровский Г.И. Центробежное моделирование в горном деле [Текст] / Г.И. Покровский, И.С. Федоров. – М.: Недра, 1969. – 247 с.
53. Рязанцев, А.П. Результаты натуральных измерений смещений контура квершлага гор.418 м шахты «Комсомолец Донбасса» [Текст] / А.П. Рязанцев // Прогрессивные технологии строительства, безопасности и

- реструктуризации горных предприятий. Материалы республиканской школы-семинара. – Донецк: Норд Пресс. – 2004. – С.159...163.
54. Кузнецов, Г.Н. Механические свойства горных пород [Текст] / Г.Н. Кузнецов. – М.: Углетехиздат, 1951. – 223 с.
55. Седов, Л.И. Методы подобия и размерности в механике [Текст] / Л.И. Седов. – М.: Гостехиздат, 1954. – 387 с.
56. Ильницкая, Е.И. Влияние масштабного фактора на прочностные свойства горных пород [Текст] / Е.И. Ильницкая // Физико-механические свойства, давление и разрушение горных пород. – М.: Из-во АН СССР, 1972. – С. 17-24.
57. Козин, А.М. Методическое руководство по подбору и испытанию эквивалентных материалов для моделирования [Текст] / А.М. Козин, Е.П. Рутковская. – М.: ИГД им. А.А. Скочинского, 1974. – 40 с.
58. Насонов, И.Д. Моделирование физических процессов в горном деле [Текст] / И.Д. Насонов, В.И. Ресин. – М.: Изд. Академии горных наук, 1999. – 343 с.
59. Денисов, Н.Я. О природе деформаций глинистых пород [Текст] / Н.Я. Денисов. – Речиздат, 1951. – С.28.
60. Денисов, Н.Я. О коллоидно-химической природе связности глинистых грунтов [Текст] / Н.Я. Денисов, П.А. Ребиндер. – Изд-во АН СССР, вып.6, 1946. – с.30.
61. Виноградов, В.В. Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок [Текст] / В.В. Виноградов. – К.: Наукова думка, 1986. – 191 с.
62. Баклашов, И.В. Механика подземных сооружений и конструкции крепей [Текст] / И.В. Баклашов, Б.А. Картозия. – М.: Недра, 1984. – 415 с.
63. Ставрогин, А.Н. Пластичность горных пород [Текст] / А.Н. Ставрогин, А.Г. Протосеня. – М.: Недра, 1979. – 301с.
64. Шашенко, А.Н. Критерий устойчивости в задаче о пучении пород почвы подземной выработки [Текст] / А.Н. Шашенко, М.Е. Каганов, А.Н. Роевко // Изв. вузов. Горный журнал. – 1994. – № 1. – С.23-29.
65. Кунтыш, М.Ф. Исследование методов определения основных физико-механических характеристик горных пород, используемых при решении задач горного давления [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / М.Ф. Кунтыш. – М.: ИГД им. А.А. Скочинского, 1964. – 166 с.
66. Матвеев, Б.В. Руководство по механическим испытаниям горных пород методом соосных пуансонов [Текст] / Б.В. Матвеев. – Л.: Изд-во ВНИМИ, 1960. – 80 с.
67. Устойчивость выработок в слабометаморфизованных породах Западного Донбасса в условиях повышенного увлажнения [Текст] / С.Б. Тулуб, А.А. Татарин, Л.Я. Парчевский, А.Н. Шашенко // Горн. информ.-аналит. бюллетень. – М.: изд-во МГТУ, 1999. – №8. – С.73-76.
68. Литвинский, Г.Г. Новый метод борьбы с пучением пород в горных выработках [Текст] / Г.Г. Литвинский, И.Н. Захарченко // Шахтное строительство, 1974, № 9. – С.8-12.
69. Криничанский, Г.Т. Элементы теории деформирования и разрушения горных пород [Текст] / Г.Т. Криничанский. – К.: Наукова думка, 1999. – 179 с.

70. Писаренко, Г.С. Сопротивление материалов деформированию и разрушению при сложном напряженном состоянии [Текст] / Г.С. Писаренко, А.Л. Лебедев. – К.: Наук. думка, 1969. – 209 с.
71. Рязанцев, А.П. Влияние коэффициента разрыхления на параметры способа борьбы с пучением пород почвы [Текст] / А.П. Рязанцев // Вісник ЖІТІ. – техн. наук. – 2004. – №2(28). – С.247-250.
72. Тулуб, С.Б. Прогнозирование и повышение устойчивости выработок в условиях пучения пород почвы [Текст]: дисс... канд. техн. наук / С.Б. Тулуб. Днепропетровск: НГУ, 1996. – 165 с.
73. Парчевский, Л.Я. О размерах области пластических деформаций вокруг горных выработок [Текст] / Л.Я. Парчевский, А.Н. Шашенко // Изв. ВУЗов. Горный журнал, 1988. – №3. – С. 39-42.
74. Ставрогин, А.Н. Прочность горных пород и устойчивость горных выработок на больших глубинах [Текст] / А.Н. Ставрогин, А.Г. Протосеня. – М.: Недра, 1985. – 271 с.
75. Татаринов, А.А. Прогнозирование и повышение устойчивости выработок в условиях слабометаморфизованных пород Западного Донбасса [Текст]: дисс... канд. техн. наук / А.А. Татаринов. – Днепропетровск, 1999. – 143 с.
76. Рязанцев, А.П. Влияние степени разрыхления пород демпферной зоны на параметры способа борьбы с пучением пород почвы [Текст] / А.П. Рязанцев // Вісник КДПУ: Наукові праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2004. – Вип. 1/2004(24). – С.72-75.
77. Зорин, А.Н. Механика разрушения горного массива и использование его энергии при добыче полезных ископаемых [Текст] / А.Н. Зорин, Ю.М. Халимендик, В.Г. Колесников. – М.: ООО Недра-Бизнесцентр. 2001. – 413с.
78. Виноградов, В.В. Исследование и разработка методов, алгоритмов и программы прогноза устойчивости капитальных горных выработок в сложных горно-геологических условиях [Текст]: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / В.В. Виноградов. – Днепропетровск, ДГИ, 1975. – 23с.
79. Безазьян, А.В. Определение величины коэффициентов структурного ослабления прочности горных пород в массиве [Текст] / А.В. Безазьян // Шахтное строительство, 1986. – №12. – С. 10-12.
80. Бычков, Г.В. Прочность горных пород в массиве [Текст] / Г.В. Бычков // Изв. Вузов. Горный журнал, 1985. – №1. – С. 7-10.
81. Ржевская, С.В. Измерение прочностных свойств в куске при выемке их из массива [Текст] / С.В. Ржевская, Р.Г. Петроченков // Исследование физических свойств горных пород и процессов горного производства. – М.: 1984. – С.125-130.
82. Фисенко, Г.Л. Методы количественной оценки структурных ослаблений массива горных пород в связи с анализом их устойчивости [Текст] / Г.Л. Фисенко // Современные проблемы механики горных пород. – М., 1972. – С.139-148.

83. Рубец, Г.Т. Статистический метод оценки прочности слабых и трещиноватых горных пород [Текст] / Г.Т. Рубец // Механика разрушения горных пород. – Фрунзе: Илим, 1980. – С.214-222.
84. Ержанов, Ж.С. Теория ползучести горных пород и ее приложения [Текст] / Ж.С. Ержанов. – Алма-Ата: Наука, 1964. – 115 с.
85. Ржевский, В.В. Основы физики горных пород [Текст] / В.В. Ржевский, Г.Я. Новик. – М.: Недра, 1973. – 286 с.
86. Борисов, А.А. Механика горных пород и массивов [Текст] / А.А. Борисов. – М.: Недра, 1980. – 380 с.
87. Шапарь, А.Г. Механика горных пород и устойчивость бортов карьеров [Текст] / А.Г. Шапарь. – К: Вища школа, 1973. – 120 с.
88. Шашенко, А.Н. Методы теории вероятностей в геомеханике [Текст] / А.Н. Шашенко, Н.С. Сургай, Л.Я. Парчевский. – К.: Техніка, 1994. – 216 с.
89. Карташов, Ю.М. Влияние отношения размеров образцов на показатели прочностных свойств горных пород [Текст] / Ю.М. Карташов, Б.В. Матвеев, М.А. Малык // Управление горным давлением в подземных выработках. Сб. научн. тр. ВНИМИ. – Л.: изд-во ВНИМИ, 1984. – С. 67-76.
90. Динник, А.Н. Устойчивость упругих систем [Текст] / А.Н. Динник. – М.: ОНТИ, 1935. – 183 с.
91. Лехницкий, С.Г. Определение напряжений в трансверсально-изотропном массиве цилиндрической выработки типа квершлага [Текст] / С.Г. Лехницкий // Горное давление, сдвигание горных пород и методика маркшейдерских работ. – Л.: ВНИМИ. – 1968. – сб.№68. С. 3-20.
92. Родин, И.В. Снимаемая нагрузка и горное давление [Текст] / И.В. Родин // Исследования горного давления. – М.: Госгортехиздат – 1960. – С. 352-371.
93. Фотиева, Н.Н. Расчет обделок тоннелей некругового поперечного сечения [Текст] / Н.Н. Фотиева. – М.: Стройиздат, 1974. – 240 с.
94. Лурье, А.И. Теория упругости [Текст] / А.И. Лурье. – М.: Наука, 1970. – 939 с.
95. Тимошенко, С.П. Теория упругости [Текст] / С.П. Тимошенко, Дж. Гудьер. – М.: Наука, 1975. – 576с.
96. Миренков, В.Е. Определение напряженно-деформированного состояния в пространстве с цилиндрической выработкой [Текст] / В.Е. Миренков // Горное давление в капитальных и подготовительных выработках – Новосибирск.: ИГД. – 1981. – С. 66-70.
97. Березанцев, В.Г. Осесимметричная задача теории предельного равновесия [Текст] / В.Г. Березанцев. – М.: Гостехиздат, 1952. – 120 с.
98. Шашенко, А.Н. Упругопластическая задача для структурно-неоднородного массива, ослабленного круглой выработкой [Текст] / А.Н. Шашенко // Прикладная механика, 1989, № 6. – С.48-54.
99. Рязанцев, А.П. Определение параметров способа борьбы с пучением пород почвы для условий капитальных выработок шахты «Комсомолец Донбасса» [Текст] / А.П. Рязанцев // Науковий вісник НГУ. – 2004. – №2. – С.41-43.

100. Агеев, В.Г. Устойчивость подземных выработок угольных шахт в трещиноватом породном массиве [Текст]: дисс. ... канд. техн. наук / В.Г. Агеев. Днепропетровск, 2000. – 123с.
101. Руппенейт, К.В. Деформируемость массивов трещиноватых горных пород [Текст] / К.В. Руппенейт. – М.: Недра, 1975. – 221 с.
102. Цырульников, М.Н. Анализ результатов расчета объемного напряженного состояния пород кровли впереди забоев горных выработок [Текст] / М.Н. Цырульников // Научные сообщения ИГД им. А.А. Скочинского. – Новосибирск: ИГД. – 1982. – № 204. С. 50-52.
103. Everling G. Ein Gebirga rockreehenmodellee als Planung ehilt [Текст] / G. Everling, A.G. Meyer // Gluckaut – Forach – Н.33. – 1972. – S. 81-88.
104. Niehida, Nadashi. Предложение об использовании метода сеток для трехмерного анализа смещений горных пород под влиянием подземной разработки. Ч.1. Исследование смещений пород при образовании подземных выработок [Текст] / NadashiNiehida, Tetsuroki ura Tsuyoshi Esaki, To Shire Shilahara // Nuxon tjre Rfnucu. J. Mining and I met Jap. – 1980. – №96. P. 455-260.
105. Векслер, Ю.А. Анализ объемного напряженно-деформированного состояния массива пород в окрестности забоя горной выработки [Текст] / Ю.А. Векслер, Н.А. Жданкин, С.Б. Колоколов // Аналитические и численные исследования в механике горных пород. – Новосибирск.: ИГД. – 1981. – С. 70-72.
106. Новикова, Л.В. Оценка влияния забоя выработки на напряженно-деформированное состояние крепи соседних выработок и окружающих пород [Текст] / Л.В. Новикова, Н.П. Уланова, Абдулах Касем // Науковий вісник НГА України. – 1998. – №1. – С. 29-31.
107. Сдвижкова, Е.А. Численный анализ работы металлической рамной крепи в условиях случайного нагружения [Текст] / Е.А. Сдвижкова // Горный информационный аналитический бюллетень. – 1997. – №4. – С. 163-166.
108. Петухов, И.М. Напряженное состояние массива горных пород около очистных выработок произвольной формы в плане [Текст] / И.М. Петухов, В.В. Зубков, И.А. Зубкова // ФТПРПИ. – 1982. – № 5. – С. 3-8.
109. Арусин, Б.З. Метод конечных элементов при решении задач горной геомеханики [Текст] / Б.З. Арусин, А.Б. Фадеев. – М.: Недра, 1975. – 144 с.
110. Фадеев, А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике [Текст] / А.Б. Фадеев. – М.: Недра, 1967. – 221с.
111. Ержанов, Ж.С. Метод конечных элементов в задачах механики горных пород [Текст] / Ж.С. Ержанов, Т.Д. Каримбаев. – 1975. – 238 с.
112. Новикова, Л.В. Распределение напряжений в массиве горных пород на участке сопряжения двух выработок [Текст] / Л.В. Новикова, А.И. Калашников, В.С. Лесников // Изв. ВУЗов. Горный журнал. – 1984. – №2. – С. 25.
113. Розин, Л.А. Метод конечных элементов и приложения к упругим системам [Текст] / Л.А. Розин. – 1977. – 160 с.
114. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в теории сооружений и в механике сплошных сред [Текст] / О. Зенкевич, И. Чанг. – 1974. – 239 с.

115. Сегерлинд, Л. Применение метода конечных элементов [Текст] / Л. Сегерлинд. – М.: Мир, 1979. – 392с.
116. Стренг, Г. Теория метода конечных элементов [Текст] / Г. Стренг, Дж. Фикс. – М.: Мир, 1977. – 350 с.
117. Деклу, Ж. Метод конечных элементов [Текст] / Ж. Деклу. – М.: Мир, 1976. – 96 с.
118. Рязанцев, А.П. Шахтные исследования эффективности применения нового способа борьбы с пучением пород почвы [Текст] / А.П. Рязанцев // Збірник доповідей Міжнародної науково-технічної конференції “Сталий розвиток гірничо-металургійної промисловості”. – Кривий Ріг: КТУ. – 2004. – Т1. – С. 91-93
119. Шашенко, А.Н. Устойчивость подземных выработок в неоднородном породном массиве [Текст]: автореф. дисс. ... докт. техн. наук / А.Н. Шашенко. – Днепропетровск, 1988. – 34с.
120. Кутузов, Б.Н. Разрушение горных пород взрывом. Взрывные технологии в промышленности [Текст] / Б.Н. Кутузов. М.: Изд-во МГГУ, 1994. – 239с.
121. Таранов, П.Я. Разрушение горных пород взрывом [Текст] / П.Я. Таранов, А.Г. Гудзь. М.: Недра, 1976. – С. 104-106.
122. Единые правила безопасности при взрывных работах. М.: Недра, 1976. – 318с.
123. Максимов, А.П. Тампонаж горных пород [Текст] / А.П. Максимов, В.В. Евтушенко. – М.: Недра, 1978. – 180 с.

Наукове видання

Коваленко Владислав Вікторович
Рязанцев Олександр Петрович

**ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СПОСОБУ БОРОТЬБИ
ЗІ ЗДИМАННЯМ ПОРІД ПІДОШВИ В УМОВАХ ВУГІЛЬНИХ ШАХТ**

Монографія
(Російською мовою)

Видано за редакцією авторів

Підписано до друку 02.10.2013. Формат 30×42/4.
Папір офсет. Ризографія. Ум. друк. арк. 7,0.
Обл.-вид. арк. 8,4. Тираж 300 пр. Зам. №

Підготовлено до друку та видруковано в Державному ВНЗ «Національний
гірничий університет». Свідоцтво про внесення до Державного реєстру
ДК №1842 від 11.06.2004 р.

49005 м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19