

**Министерство образования и науки Украины  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ВЫСШЕЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**



**Р.Н. ТЕРЕЩУК**

**КРЕПЛЕНИЕ КАПИТАЛЬНЫХ НАКЛОННЫХ  
ВЫРАБОТОК АНКЕРНОЙ КРЕПЬЮ**

Монография

Днепропетровск  
НГУ  
2013

УДК 622.281.74  
ББК 33.141  
Т 35

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

Рецензенти:

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

**Борщевський С.В.** – д-р техн. наук, проф., проф. кафедри будівництва шахт і підземних споруд Державного вищого навчального закладу «Донецький національний технічний університет».

**Терещук Р.М.**

Т 35 Крепление капитальных наклонных выработок анкерной крепью: моногр. / Р.М. Терещук. – Д. : Национальный горный университет, 2013. – 150 с.

ISBN 978–966–350–435–3

В монографии изложены результаты исследований способа крепления капитальных наклонных выработок при помощи анкерных систем с учетом установленных автором закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния приконтурного массива. Рассмотрены полученные на их основе технические решения, а также разработаны рекомендации по креплению анкерной крепью наклонных выработок в условиях шахт ООО «ДТЭК Добропольеуголь».

Материал монографии может быть использован в учебном процессе при изучении дисциплин горного и строительного профиля и специалистами научно-исследовательских и проектных организаций.

УДК 622.281.74  
ББК 33.141

ISBN 978–966–350–435–3

© Р.М. Терещук, 2013  
© Державний ВНЗ «НГУ», 2013

---

---

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	5
<b>ГЛАВА 1. Состояние подземных горных выработок. Перспективы расширения области применения анкерной крепи</b> .....	6
1.1. Роль угольной промышленности в топливно-энергетическом комплексе.....	6
1.2. Анализ состояния горных выработок на угольных шахтах Украины, их поддержание и ремонт.....	7
1.3. Анкерная крепь как перспективный вид крепления горных выработок.....	12
<b>ГЛАВА 2. Анализ горно-геологических и горнотехнических условий ООО “ДТЭК Добропольеуголь”</b> .....	29
2.1. Общие сведения о ООО “ДТЭК Добропольеуголь”.....	29
2.2. Гидрогеологические и горнотехнические условия на шахтах ООО “ДТЭК Добропольеуголь”.....	31
2.3. Состояние горных выработок шахт ООО “ДТЭК Добропольеуголь”.....	35
2.4. Характеристика условий разработки шахты “Алмазная” и визуальные обследования протяженных горных выработок.....	38
2.5. Анализ результатов шахтных исследований.....	43
<b>ГЛАВА 3. Лабораторные исследования закономерностей деформирования породного массива в окрестности выработки, закрепленной анкерной крепью</b> .....	51
3.1. Общие сведения о моделировании.....	51
3.2. Теоретические основы моделирования методом эквивалентных материалов.....	53
3.3. Выбор, методика приготовления и определения физико-механических свойств эквивалентного материала.....	55
3.4. Методика формирования моделей и их нагружения.....	62
3.5. Проведение экспериментов и анализ полученных результатов.....	64
<b>ГЛАВА 4. Аналитические исследования закономерностей деформирования породного массива в окрестности выработки с анкерной крепью</b> .....	79
4.1. Выбор метода исследований.....	79
4.2. Обоснование расчетной схемы и выполнение расчетов.....	87
4.2.1. Выбор способа решения задачи.....	87
4.2.2. Исследование НДС горных пород в окрестности капитальной наклонной выработки арочной формы, пройденной в однородном породном массиве, и закрепленной анкерной крепью.....	97
4.2.3. Исследование НДС горных пород в окрестности капитальной наклонной выработки арочной формы, пройденной в неоднородном породном массиве, и закрепленной анкерной крепью.....	106

---

<b>ГЛАВА 5. Шахтные исследования проявления горного давления в выработках, закрепленных анкерной крепью.....</b>	<b>117</b>
5.1. Общие требований к анкерной крепи.....	117
5.2. Горно-геологические условия экспериментального участка.....	118
5.3. Выбор вида анкерной крепи, ее конструкции и параметров.....	119
5.4. Технология выполнения работ при проведении выработок с анкерной крепью.....	121
5.5. Система контроля безопасного состояния выработки с анкерной крепью.....	124
5.6. Визуальные и инструментальные наблюдения за экспериментальным участком.....	125
5.7. Определение экономической эффективности применения анкерной крепи.....	130
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>135</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>136</b>

---

## ВВЕДЕНИЕ

Угольная промышленность – одна из ведущих отраслей народного хозяйства, важнейшая задача, которой в условиях рыночной экономики, состоит, прежде всего, в повышении производительности труда и снижении себестоимости продукции.

Интенсификация очистных работ, увеличение площади сечения выработок, постоянный рост глубины разработки привели к существенному ухудшению условий строительства и эксплуатации горных выработок.

Большим резервом повышения эффективности работы шахт является совершенствование способов крепления и поддержания капитальных и подготовительных выработок, создание и широкое внедрение надежных и экономичных видов крепи.

Направление на увеличение несущей способности традиционных видов крепи для обеспечения эксплуатационного состояния выработок, себя не оправдало. Перспективное направление в улучшении состояния выработок, как показывает опыт последних лет, связано с укреплением породного массива в окрестности выработки и использование его несущей способности как элемента крепи. Такой принцип работы имеет анкерная крепь, которая также обеспечивает сокращение трудоемкости работ по креплению, снижение затрат, улучшение условий труда и значительное повышение технико-экономических показателей добычи угля. Ограниченное применение анкерной крепи на угольных шахтах Украины объясняется недоверием работников шахт к этому виду крепи из-за непредсказуемости режима ее работы, отсутствием опыта эксплуатации и контроля за состоянием крепи. В этой связи, исследование закономерностей взаимодействия системы “анкер-породный массив” и разработка методики для определения параметров анкерной крепи являются актуальной задачей, имеющей важное научное, социальное и народнохозяйственное значение, решению которой и посвящена монография.

---

# ГЛАВА 1

## СОСТОЯНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК. ПЕРСПЕКТИВЫ РАСШИРЕНИЯ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АНКЕРНОЙ КРЕПИ

### 1.1. Роль угольной промышленности в топливно-энергетическом комплексе

Энергетика – основа развития экономики государства. Ориентация страны на развитие энергетической базы определяется ее ресурсным потенциалом.

Традиционными источниками энергии в настоящее время являются минеральные энергоносители – нефть, природный газ, уголь. Так, мировое потребление энергии в пересчете на условное топливо составляет примерно 10,6 млрд. тонн у.т. в год, из которых 38% приходится на нефть, 30% на уголь, 20% природный газ, 12% другие источники энергии [1].

За последние годы в топливно-энергетическом балансе мира доля угля снизилась, так как нефть и природный газ отличаются более высокой транспортабельностью и технологичностью, и, естественно, пользуются значительным преимуществом по сравнению с твердым органическим топливом. Однако, в мировых ресурсах и запасах, ведущее место принадлежит углю, на долю которого приходится 94% общих геологических ресурсов и 80% разведанных запасов ископаемого топлива, тогда как на нефть и природный газ, вместе взятые, соответственно лишь 6 и 20% [1]. Учитывая структуру мировых запасов и принимая во внимание постоянный рост цен на нефть, в перспективе многие прогнозы свидетельствуют о росте доли угля в топливно-энергетическом балансе мира [2-4].

В течение последних 35 лет добыча угля в мире увеличилась в 2,5 раза, а наиболее ценных коксующихся углей с 473 млн. тонн до 800 млн. тонн [3].

В Украине в 1997 году после шестилетнего периода снижения добычи угля также произошел ее рост до 75,9 млн. т, в 2000 г. – 80,3 млн. т., в 2011 г. – 81,99 млн. т, в 2012 г. – 85,95 млн. т. [5]. За эти годы существенно ухудшилось

---

качество добываемого угля. Так, средняя по отрасли зольность с 22,5% выросла до 36%, а на отдельных шахтах доходит до 50%.

Несмотря на опережающее развитие более экономичной открытой добычи, ведущая роль подземного способа (на его долю приходится около 50% мировой добычи [1]) в будущем сохранится, так как на шахтах, в основном, добывается высококачественный энергетический и коксующийся уголь.

За последние 15...20 лет в Украине удельный вес угля в производстве электроэнергии несколько снизился [2]. Однако большие запасы этого вида органического топлива (табл. 1.1) (разрабатываются и подготовлены к освоению 23,7 млрд. т балансовых запасов категории А+В+С<sub>1</sub> из которых 31% – коксующиеся угли, 11,5% – антрациты [6]) ориентируют народное хозяйство страны на интенсивное развитие угольной промышленности. Поэтому совершенствование топливно-энергетического комплекса Украины в настоящее время должно идти за счет увеличения потребления угля и сокращения в нем доли нефтепродуктов.

Таблица 1.1

Запасы и ресурсы углей в Украине, млрд. т.

Общие ресурсы		Балансовые запасы	
Всего	В т.ч. коксующиеся	Всего	В т.ч. коксующиеся
103	26	58	19

Исходя из изложенных выше мировых тенденций прироста добычи угля и увеличения, в перспективе, доли угля в топливно-энергетическом балансе Украины до 50%, были разработаны ряд «Программ...» [7, 8], предусматривающие широкомасштабную реконструкцию действующих и закладку новых шахт.

## **1.2. Анализ состояния горных выработок на угольных шахтах Украины, их поддержание и ремонт**

Стабилизация работы угольной отрасли Украины и достижение намечаемых Министерством топлива и энергетики рубежей по объему добычи и снижению себестоимости угля невозможны без концентрации горных работ. Опыт

---

[9] показывает, что концентрация добычи угля будет достигнута только при наличии высокопроизводительной (в широком диапазоне горнотехнических условий) надежной техники для очистных и подготовительных работ.

Важным фактором, определяющим состояние угольной промышленности страны и перспективы ее дальнейшего развития, являются вопросы обеспечения эксплуатационного состояния горных выработок в течение всего срока их целевого использования. Нарушение эксплуатационного состояния выработок приводит к потере производственной мощности предприятий, то есть снижает реальную добычу полезного ископаемого и увеличивает его себестоимость. Этот показатель только в условиях Донецкого угольного бассейна составляет 8...10% [10].

Проблема обеспечения устойчивости горных выработок приобретает особенно большое значение с увеличением глубины разработки, так как при этом повышается величина горного давления, что обуславливает значительные деформации крепи горных выработок. Средняя глубина разработки угольных месторождений в Украине приближается к 800 м, 60,8% шахт работают на глубине более 600 м и 15% – более 1000 м [11]. Понижение глубины разработки за последние 30 лет в среднем по Украине, составило 505 м, или 16,8 м в год (рис. 1.1).

Для обеспечения эксплуатационного состояния горных выработок приходится вести ремонтные работы, заключающиеся в полном перекреплении отдельных участков или всей выработки, замене деформированных элементов крепи, применении временной усиливающей крепи, увеличении плотности установки рам и замене межрамных ограждений крепи, подрывке вспученных пород почвы и др.

Около 95% протяженности горных выработок закреплено долговечными крепями, в том числе 88% – металлической и сборной железобетонной крепью, но объемы ремонта выработок из года в год увеличиваются.

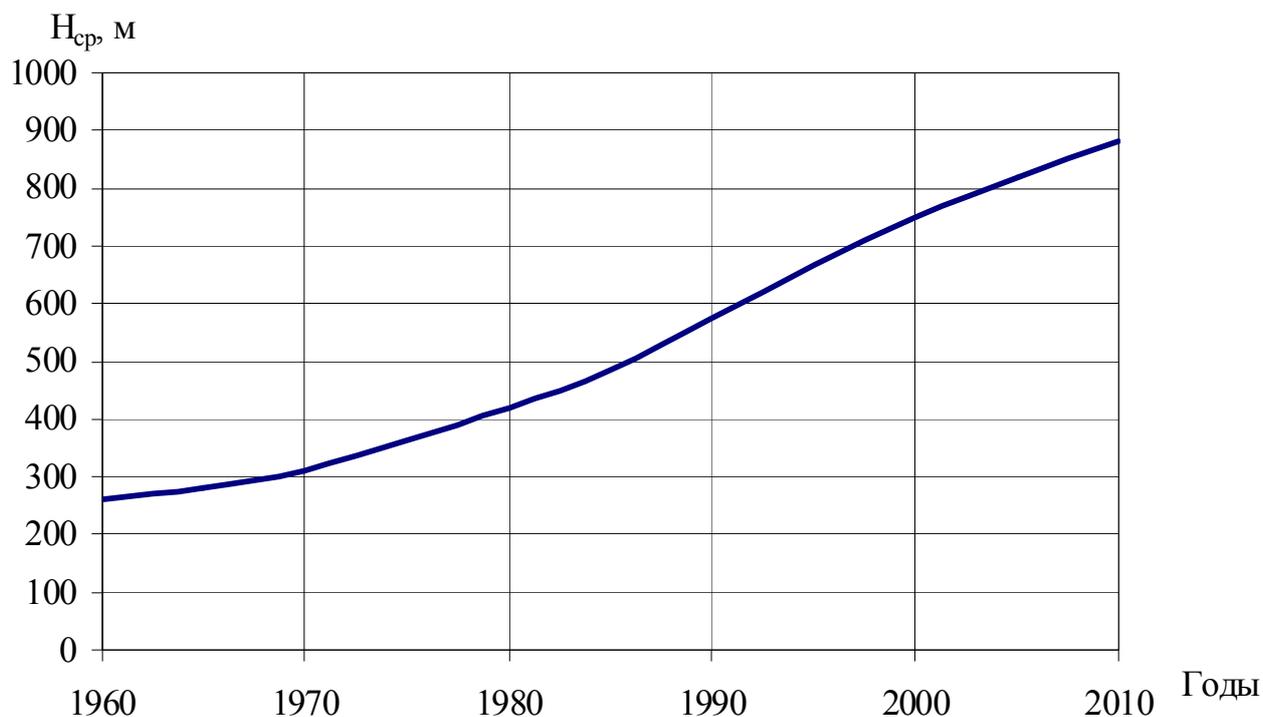


Рис. 1.1. Изменение глубины разработки на шахтах Украины

Протяженность перекрепляемых выработок составляет 46,6% по отношению к пройденным, а отремонтированных в 1,7 раза превышает протяженность пройденных выработок [12].

Несмотря на большой объем ремонтных работ и их высокую трудоемкость протяженность выработок с неудовлетворительным состоянием остается значительной – 15...17% от общей протяженности поддерживаемых выработок [13] (рис. 1.2), и в целом по угольным шахтам Украины на 2012 г. составила 15,5%.

В Донецком бассейне ежегодно ремонтируется около 31% выработок от их общей протяженности [14].

Расширение географии ведения горных работ, увеличение их глубины, вызывает дополнительные сложности. Направление на увеличение несущей способности крепи для обеспечения эксплуатационного состояния выработок себя не оправдало. С 1970 года средняя несущая способность крепи горных выработок возросла более чем в 2 раза достигнув  $195 \text{ кН/м}^2$ , однако затраты на под-

держание возросли в 2,4 раза, стоимость крепления увеличилась в 2,3 раза, а трудоемкость работ – в 2,5 раза [15].



Рис. 1.2. Состояние горных выработок на шахтах Украины за 1995...2012 гг.

При переходе на большие глубины смещения контура увеличились примерно в 3 раза [16]. Применение податливых крепей с большим запасом на осадку (до 85% всех выработок [17]) также не дало положительного результата, так как крепь из СВП, обладающая низкой несущей способностью в податливом режиме, не способна противодействовать повышенному горному давлению. В итоге состояние горных выработок остается неудовлетворительным.

Более 40% их ремонтируется до сдачи в эксплуатацию, 52% действующих выработок деформировано. Ухудшение состояния выработок из-за процесса пучения составляют 45% от общего объема деформированных выработок [10].

---

Отечественный опыт [18] сооружения выработок за последние 25...30 лет показывает, что, несмотря на довольно высокую степень механизации, общая производительность труда при проведении выработок возросла незначительно.

С 1995 до 2012 гг. протяженность поддерживаемых выработок значительно снизилась, что объясняется уменьшением числа шахт, добычных забоев и общей реструктуризацией угледобывающей промышленности. При этом длина выработок, подлежащих ремонту, выросла с 4580 км до 5890 км, что объясняется усложнением горно-геологических условий поддержания, связанного с уходом большинства шахт на глубину. На трудоемких ремонтных работах занято свыше 11% подземных рабочих и свыше 70% рабочих, занятых на проведении и поддержании выработок.

Крепление горных выработок является сложным и трудоемким процессом в цикле горнопроходческих работ. Стоимость крепи составляет 30...60% стоимости выработки, а затраты времени на крепежные работы занимают 25...55% трудозатрат, из них около 92% относятся к тяжелому физическому труду [19].

Одним из путей сокращения трудоемкости крепления горных выработок является снижение доли ручного труда. В настоящее время доля ручного труда на шахтах Донбасса составляет – 43,8% [20].

По-прежнему основными видами крепи горных выработок являются металлическая арка из спецпрофиля с различными видами затяжки и породной забутовкой, выполняемые вручную, и металлобетонная крепь. Обе основные конструкции крепи трудномеханизируемые, энергоемкие и не обеспечивают надежного поддержания выработок.

Анализ состояния поддержания и ремонта горных выработок на угольных шахтах Украины показывает, что проблема повышения устойчивости их до настоящего времени полностью не решена и требует создания, промышленного освоения и внедрения эффективных конструкций крепи подготовительных выработок и средств механизации их возведения.

---

### 1.3. Анкерная крепь как перспективный вид крепления горных выработок

Область целесообразного применения того или иного вида крепи подготовительных горных выработок зависит от влияния значительного количества факторов. Основные из них: назначение и срок службы выработки, состав и строение вмещающих ее пород, величина и характер проявления горного давления и смещения пород контура выработки, длительность выполнения операций при ее проведении, объем ремонта и затраты на поддержание, трудоемкость возведения и извлечения крепи, степень механизации (табл. 1.2), стоимость ее изготовления, проветривания выработки и др.

По характеру взаимодействия с породами и назначению можно выделить следующие типы крепи:

- 1) подпорная – создающая существенное сопротивление (подпор) смещающимся в выработку породам;
- 2) ограждающая – предохраняющая выработку от случайного выпадения отдельных кусков породы;
- 3) изолирующая – предохраняющая породы от выветривания.

В условиях шахт Донецкого угольного бассейна для поддержания выработок различного назначения и срока службы применяют 96 видов крепи [15].

Традиционные конструкции крепи из металла, монолитного и сборного бетона и железобетона, дерева, естественных и искусственных камней не позволяют обеспечить эксплуатационное состояние выработок в течение всего срока службы.

В последние годы все большее распространение получает анкерная крепь [21 и др.]. Доля использования этой крепи в Украине и за рубежом приведены на рис. 1.3.

Так в США в 1951 году 450 шахт использовали анкерную крепь, а в 1958 г. ею было закреплено более 35% всех горных выработок, а в 1991 г. – свыше 50%. Она также занимает господствующее положение и в горнорудной промышленности.

Таблица 1.2

## Оценка крепей по уровню механизации возведения

Крепь	Уровень механизации, %	
	Существующий	Возможный
Металлическая рамная	5,0	38,0
Монолитная бетонная с механизированной укладкой бетона	12,6	57,7
Тюбинговая, блочная бетонная	38,3	61,6
Анкерная	18,9	100
Набрызгбетонная	57,7	83,0

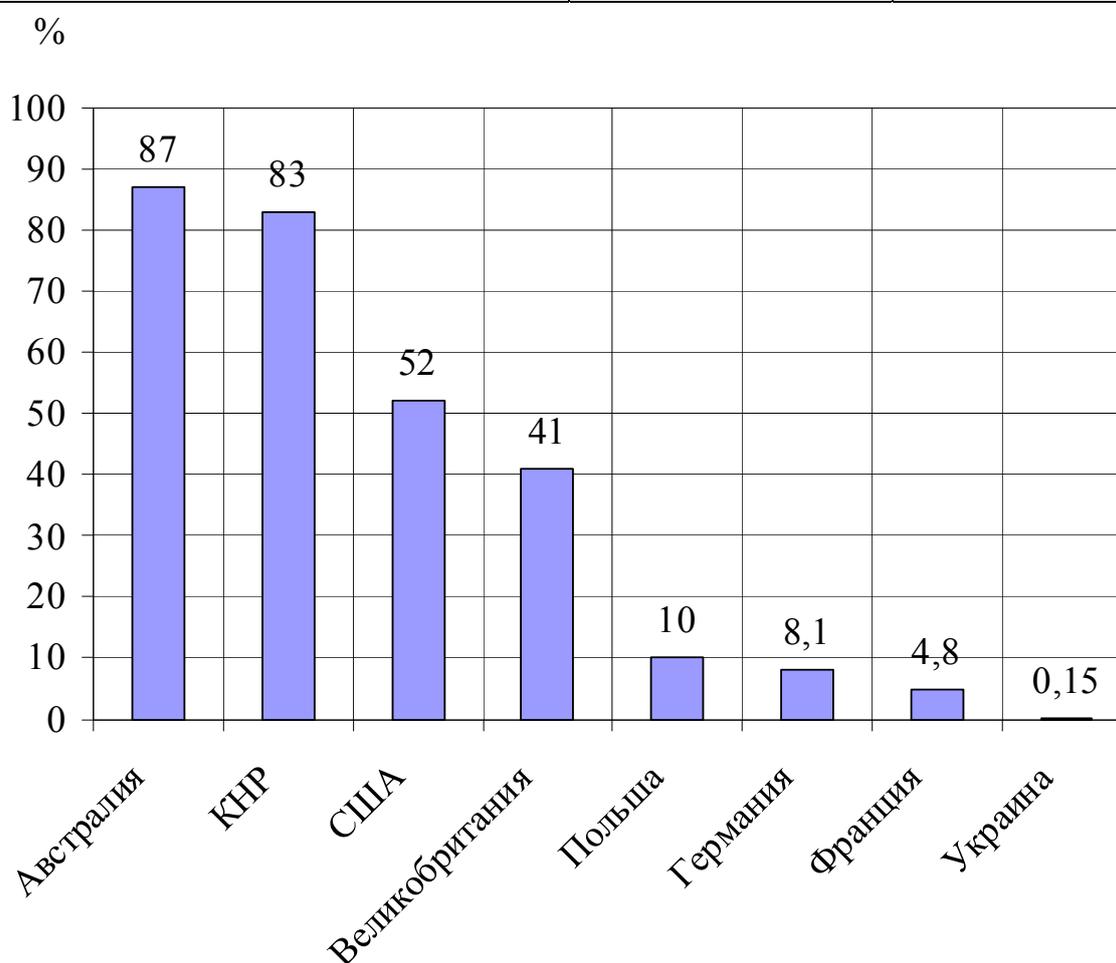


Рис. 1.3. Доля выработок, закрепленных анкерной крепи

В ФРГ в 60-ых годах интенсивно возросло применение анкерной крепи с 0,03% от общей протяженности горных выработок в 1958 году до 1,77% в

---

1961 г. [22]. Во Франции в 1968 г. удельный вес анкерной крепи в общей протяженности поддерживаемых выработок составил 4,8% [23]. В Австралии, где применяется американская технология добычи полезного ископаемого, до 90% выработок закреплено анкерами, в КНР – до 84%, в Польше – более 10%. За последние годы объемы применения анкерной крепи в этих странах значительно возросли. В период 1987...1994 г.г. в угольной отрасли Англии произошел переворот, связанный с внедрением в производство новой технологии крепления выработок с помощью анкерной крепи. Более 70% выработок закрепляется анкерами, что позволило британской угольной промышленности сократить расходы и снизить себестоимость угля до мирового уровня. Применение анкерования горных выработок позволило существенно улучшить условия безопасности ведения работ. За период с 1987 по 1994 г.г. травматизм при проходке выработок сократился с 3,4 до 0,9 случаев на 100 тыс. чел.-смен. Общее число случаев вывалов кровли на шахтах Бритиш Коул (за 1989...1995 годы) сократилось с 267 до 6 случаев в год. В настоящее время Великобритания является мировым лидером применения анкерной крепи на шахтах со сложными геотехническими условиями.

В 80-ых годах, на угольных шахтах для крепления горных выработок, наибольшее распространение получили распорные и щелеклиновые анкеры. Их доля, в общем объеме анкерной крепи, составляла 75...80% [18]. Сейчас около 70% анкеров используются совместно с быстротвердеющими синтетическими заполнителями. Остальные 30% – это механические анкеры, хотя и они нередко применяются с цементным заполнителем или “точечными” синтетическими заполнителями.

Несмотря на то, что были отдельные случаи успешного применения анкерной крепи, в бывшем СССР объемы использования ее в 1978 году составляли: черная металлургия – 14,1%, цветная металлургия – 17,8%, угольная промышленность – 4,7%, из которых основная часть приходилась на Кузбасс [24]. В настоящее время на шахтах Украины анкерная крепь применяется ограниченно (рис. 1.4).

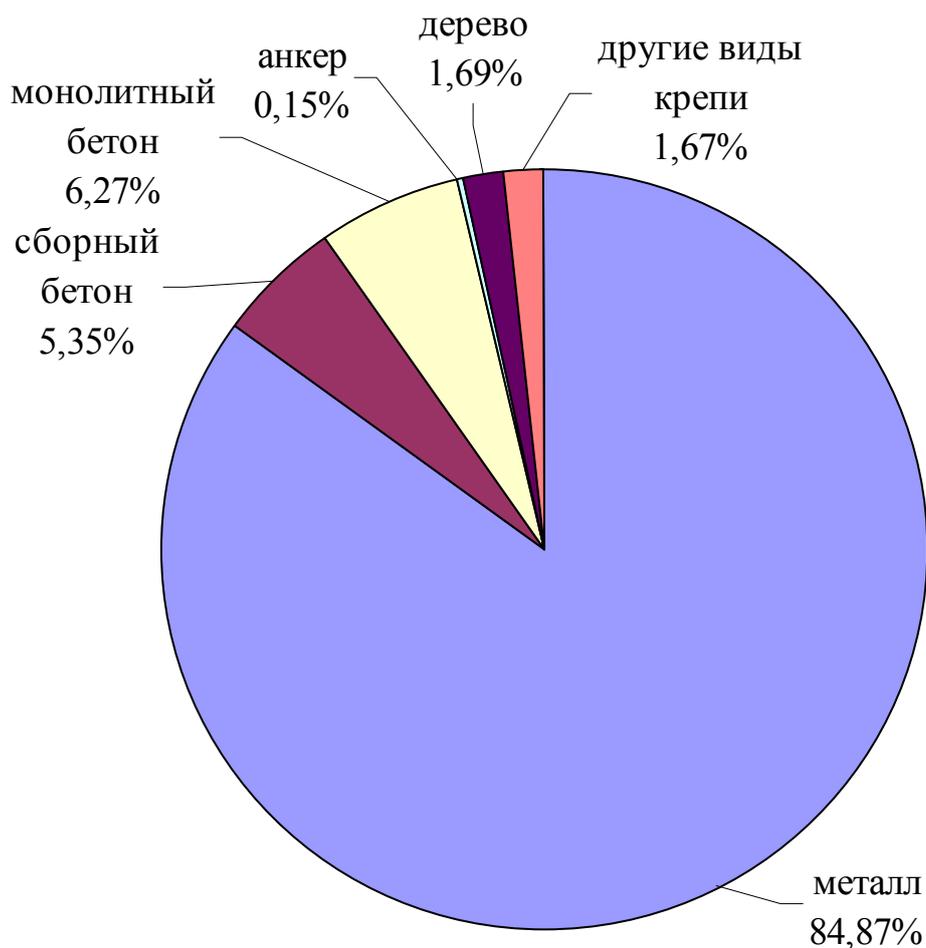


Рис. 1.4. Доля различных видов крепи применяемых на шахтах Украины

Так, с 1980 по 1995 г.г. протяженность выработок, закрепленных анкерной крепью, сократилась с 112 до 23 км [25], а сейчас составляет 19,6 км, тогда как металлом – 11023,9 км, сборным бетоном – 694,4 км, монолитным бетоном – 815,1 км, деревом – 219,6 км, другими видами крепи – 217,1 км. Фактический объем применения анкерной крепи в условиях Донецкого бассейна составляет 0,8%, из которого протяженность выработок не удовлетворяющая правилам безопасности – 2%, тогда как выработок закрепленных металлом – 13,3%, сборным бетоном – 7,4%, монолитным бетоном – 3,7%, деревом – 10,8% [26].

В настоящее время в отечественной и зарубежной практике известно более 600 различных конструкций металлических, железобетонных, пластмассовых, бамбуковых, деревянных, канатных и других разновидностей анкеров [27] (рис 1.5).

---

Из анализа классификации анкерной крепи (рис. 1.5), видно, что она обладает большими возможностями, чем обычные крепи поддерживающего типа.

Анкерная крепь, являясь прогрессивной и экономически выгодной для крепления подземных сооружений, применяется в широком диапазоне горно-технических условий. Установлена возможность применения анкерной крепи в подготовительных выработках пологого, наклонного и крутого падения, в том числе в выработках, попадающих в зону влияния временного и остаточного горного давления; на сопряжениях очистных и подготовительных выработок, в очистных забоях при управлении кровлей полной закладкой, в восстающих выработках, для поддержания межгоризонтных целиков на крутых пластах, монтажных камерах под механизированные комплексы [28]. Она относится к крепям бесподпорного типа и по сравнению с обычными подпорными конструкциями имеет следующие преимущества:

- повышает безопасность ведения горных работ, так как лучше любой другой крепи противостоит взрывным работам и может устанавливаться в забое как временная;

- обладает потенциальными возможностями для полной механизации процесса крепления;

- требует меньшего расхода крепежных материалов (табл. 1.3) и меньших сечений горных выработок на 18...25%;

- сокращает капитальные затраты на 40...60%, трудоемкость работ на 20...30%;

- имеет меньшее аэродинамическое сопротивление (по сравнению с рамной крепью, примерно в 2,5 раза)

- увеличивает темпы горнопроходческих работ на 30...40% [29-31].

Принцип анкерования состоит в обеспечении устойчивости прилегающего к выработке пород за счет нетронутого массива, расположенного за контуром неупругих деформаций, и путем непосредственного увеличения несущей способности этих пород скреплением отдельных слоев или кусков анкерами, закрепленными различными способами в пробуренных шпурах.



Показатели фактического расхода металла (т) на крепление 1 км выработки  
по Донецкому бассейну

Вид крепи / Год	1984	1995	2012
Металлическая	306	379	398
Сборная железобетонная	95	114	125
Металлическая анкерная (в самостоятельном виде)	14	23	36

В зависимости от структурного строения пород кровли и формы поперечного сечения выработки различают пять основных условий применения анкерной крепи:

1. Слабоустойчивые слоистые породы непосредственной или ложной кровли подвешиваются анкерами к основной кровле.

2. Различные породные слои, скрепляясь анкерами, образуют составную балку, предохраняющую кровлю от обрушения (“сшивка” пород).

3. Около каждого анкера куски трещиноватой породы прижимаются друг к другу, образуя прочный блок. По периметру выработки составляется кольцо из таких блоков.

4. В трещиноватой однородной горной породе большой мощности анкерная крепь предохраняет выработку от вывалов отдельных кусков.

5. При проведении выработок по сильно трещиноватому мелкослоистому массиву анкерная крепь предохраняет выработку от коржения и высыпания горных пород.

Несмотря на огромное разнообразие анкерной крепи, все они могут быть систематизированы в рамках двух основных групп: замковые, то есть закрепленные в скважине специальным устройством (замком) и беззамковые, закрепление которых происходит за счет контакта с породными стенками скважины по всей длине ее рабочей части. Прочность закрепления различных видов анкеров приведена в табл. 1.4. В качестве несущих элементов применяются стержни и канаты из металла и синтетических материалов.

Несущая способность различных видов анкеров

Вид анкера	Несущая способность, кН				
	Распорные	25...80	55...100	65...110	75...120
Клинощелевые	2...12	10...33	10...50	–	–
Железобетонные	25...50	77...95	96...120	96...120	96...120
Сталеполимерные	25...45	60...100	60...120	60...120	60...120
Трубчатые	20...35	30...50	40...60	–	–
Комбинированные	20...60	50...90	75...115	95...140	100...170
Прочность пород, МПа	до 20	30	40	50	60

Канатные анкера, благодаря их гибкости, применяются чаще всего в случаях, когда необходимо упрочнить породы на глубину, превышающую поперечные размеры горной выработки.

Закрепление беззамковых конструкций анкеров осуществляется специальными смесями на основе минеральных и синтетических составов, которые подаются в шпуровые нагнетанием или в капсулах (патронах), представляющих собой легко разрушающуюся оболочку, в которой размещены обособленные капсулы с вяжущим составом и затвердителем.

Альтернативу этим анкерам составляют анкера, закрепляемые минеральными заполнителями, в качестве исходного материала могут использоваться речной песок, отходы обогащения или доменного производства, буровая мелочь и т.п. Пластификатором может служить вода или водные растворы [32].

К числу перспективных и сравнительно новых разработок следует отнести трубчатые конструкции анкеров – гидрораспорного, взрывного и пружинного закрепления [33-35]. Закрепление этих анкеров в породах осуществляется за счет фрикционного сцепления материала трубы (стали) со стенками шпура без применения вяжущих составов.

---

Сотрудниками Национальной горной академии Украины создана анкерно-пневматическая крепь, предназначенная для временного крепления забоя выработок, проходимых в слабых породах (глинах) [36].

ИГТМ НАН Украины разработаны, освоены в производстве и испытаны в шахтных условиях армированные стеклопластиковые трубчатые анкера с механическим клиновым или комбинированным закреплением в шпуре.

Жесткие анкера в соответствии с современными понятиями следует классифицировать как “ограниченно податливые”. В то же время для выработок с большой ожидаемой конвергенцией необходимы податливые анкера. В этой связи разработаны “скользящие” анкера, допускающие критическую конвергенцию 30...50% высоты выработки в проходке, и податливые анкера с величиной податливости до 550 мм, при этом обеспечивающие несущую способность до 150 кН [37].

Границей области применения анкерных крепей принят уровень напряженного состояния пород, при котором проявления горного давления реализуются только в форме заколообразования и вывалов по естественным поверхностям ослабления, без существенных смещений контура выработки во времени, то есть крепь рассматривается как средство предотвращения обрушения в выработку отслоившихся элементов массива и их прикрепления к устойчивым слоям породы.

На шахтах угольной промышленности анкерную крепь применяют в качестве постоянной и временной конструкции, в самостоятельном виде и в сочетании с традиционными подпорными металлическими, бетонными и набрызгбетонными крепями. Особенно она выгодна в тех выработках, где установка другого вида крепи невозможна или же связана с большими затруднениями, например, в выработках большого поперечного сечения. Иногда анкерный болт используют для вспомогательных целей: к нему подвешивают конвейер, монорельсовые дорожки, различные трубопроводы или кабели.

В последние годы анкерная крепь нашла свое применение и в гражданском строительстве. Ее стали применять для закрепления откосов бортов карье-

---

ров, укрепления фундаментов зданий, оснований водоподводящих и канализационных сооружений [38].

В самостоятельном виде анкерную крепь применяют при креплении подземных сооружений, размещенных в слабообводненных, достаточно монолитных породах вне зоны геологических нарушений при смещениях пород кровли не более 100 мм. Предельно возможная относительная деформация кровли горной выработки, закрепленной анкерами, не должна превышать 2%. Сверх этой величины кровли обычно обрушаются.

При смещении кровли выработок 50...100 мм и более анкерную крепь используют в комбинации с поддерживающими крепями. Упрочняя массив, анкерная крепь существенно уменьшает смещения контура, позволяет удешевить конструкцию основной поддерживающей крепи и повысить надежность эксплуатационного состояния подземного сооружения. Так, в сочетании с рамной крепью, анкерная позволяет уменьшить 1,5...2 раза плотность установки рам [18].

Южгипрошахт разработал унифицированные типовые сечения горных выработок, закрепленных анкерной крепью. Исходя из условий залегания боковых пород, приняты три основные формы сечений горных выработок под анкерную крепь: прямоугольная, прямоугольная с наклонной кровлей, сводчатая – циркульный свод и вертикальные стены. Исследования [10, 15], проведенные в условиях глубоких шахт Донбасса, позволяют рекомендовать длину, несущую способность и число анкеров на 1 м<sup>2</sup> обнажения, данные которых приведены в табл. 1.5.

За рубежом подготовительные выработки проводятся в основном сечением арочной формы. В ФРГ такую форму имеют более 95% штреков, во Франции более 80% [39]. Но в угольной промышленности Великобритании, Австралии и США проведение выработок прямоугольного поперечного сечения является самой распространенной технологией. Анкера используют в качестве единственного средства крепления [40]. Длина анкеров обычно составляет

1,2...2,4 м при диаметрах от 16 до 22 мм, несущая способность – 250...260 кН [41].

Таблица 1.5

Несущая способность анкеров при различных прочностях пород

Анкер	Несущая способность анкера, кН, при прочности пород, МПа			Рекомендуемое число анкеров на 1 м <sup>2</sup> обнажения	
				кровли	боков
Металлические	12	20	20	1,25	0,75
Железобетонные	25	30	25	1,0	0,5
Полимерные	30	35	35	0,75	0,5
Трубчатые	35	—	—	0,7	0,45
Прочность пород, МПа	до 40	40...60	более 60		

Бурение скважин под анкерную крепь на зарубежных шахтах производится диаметром 25...41 мм, в Украине – 34...46 мм [27].

Самым главным условием успешного применения анкерных крепей является обязательная гарантия качественного закрепления анкеров в породе. В отличие от поддерживающих конструкций, где некачественные крепежные работы легко определяются визуально, выявить допущенный при установке анкеров брак без специального оборудования весьма сложно. Вместе с тем некачественно установленные анкера представляют реальную угрозу, поскольку могут быть причиной внезапных вывалов и обрушений пород. Это обстоятельство является одной из основных причин весьма осторожного отношения, а иногда и просто недоверия к анкерной крепи со стороны производителей. Однако при соответствующем контроле за установкой анкеров, соответствием размеров пробуренных скважин расчетным, прочностью закрепления анкеров в скважине и величиною предварительного их натяжения, крепь не менее безопасна, чем любая другая конструкция.

---

Надежная работа анкерной крепи и безопасное состояние заанкерowanych пород в подземных сооружениях характеризуются следующими основными параметрами:

- предварительным натяжением анкеров при установке;
- прочностью закрепления анкеров в породах;
- рабочей нагрузкой на крепь;
- смещением и расслоением заанкерowanych пород в процессе эксплуатации выработки.

Усилие заякоривания анкера определяют с помощью домкратов, оборудованных динамометром. Создание необходимых значений предварительного натяжения анкера достигается применением динамометрических ключей и гаек-ковертов. Для измерения рабочей нагрузки на анкер под опорную плиту анкера помещают деформометр (механический, тензометрический и др.), тарированный в единицах силы. Контроль смещений и расслоений заанкерowanych пород осуществляется с помощью реперов и ультразвукового каротажа пробуренных в породе скважин. Перечисленные способы контроля достаточно освоены и применяются на практике.

Вопросами механизации возведения анкерной крепи за рубежом занимаются известные фирмы: “Джой”, “Тор”, “Кенпаметалл” (США), “Консолидейтед Пневматик” (Великобритания), “Секома” (Франция), “Атлас Копко” (Швеция).

С экономической точки зрения анкерная крепь целесообразна при ее массовом применении, когда стоимость одного анкера достаточно низка, а также при достижении производительности труда по установке анкеров 6...8 штук чел.-смену [42].

Анализ тенденции применения различных видов крепи за рубежом [43-48] показывает, что на угольных шахтах, при сохраняющемся преобладании металлической рамной крепи, определилась устойчивая тенденция к росту объемов применения анкерной и набрызгбетонной крепей как самостоятельно, так и в сочетании друг с другом и с элементами других крепей.

---

Ограниченное применение анкерной крепи на угольных шахтах Украины объясняется недоверием работников шахт к этому виду крепи из-за непредсказуемости режима ее работы, отсутствием опыта эксплуатации и контроля за состоянием крепи, существующей системой оплаты работ, не стимулирующей сокращение издержек производства, недостаточной информацией о новейших достижениях в области конструкций анкеров и технологии их установки.

На основании изученного опыта зарубежных шахт и экспериментальных работ по внедрению анкерной крепи на шахтах Украины представляется возможным увеличение объемов применения этого вида крепи. Но нужно провести ряд теоретических и экспериментальных работ, а именно:

- исследовать горно-геологические условия разработки и выделить регионы со сходными условиями;
- для каждого региона, а в дальнейшем, и для отдельных шахт и участков, изучить распределение компонентов поля напряжений вокруг горных выработок;
- исследовать влияние трещиноватости пород на прочностные и деформативные свойства массива вблизи выработки;
- выполнить моделирование и натурные исследования, связанные с поэтапным внедрением анкерной крепи;
- создать на выделенных шахтах экспериментальные участки с выработками, закрепленными анкерной крепью;
- разработать типовые схемы крепления анкерной крепью для различных горно-геологических условий и поперечных сечений выработок;
- создать базу для подготовки и обучения специалистов по анкерному креплению.

Выполнив эти и ряд других работ, возможно увеличить применение анкерной крепи на угольных шахтах Украины.

Характеризуя состояние проблемы повышения устойчивости выработок, необходимо отметить следующее.

---

Постоянное увеличение глубины ведения горных работ, протяженности поддерживаемых выработок, отработка пластов, находящихся в сложных горно-геологических условиях, существенно ухудшило условия поддержания выработок в эксплуатационном состоянии. Применяемые конструкции крепей, в основном подпорно-ограждающего типа, в настоящее время не в состоянии обеспечить достаточную устойчивость выработок. Об этом свидетельствуют все увеличивающиеся затраты на ремонт и поддержание выработок, с одновременным увеличением доли применения металлической крепи (в первую очередь – тяжелых профилей).

Как показывает анализ средств и способов повышения устойчивости выработок, наибольший эффект в сложившихся условиях дают мероприятия и крепи, направленные на сохранение целостности окружающего выработку массива и использование его несущей способности.

Между тем, объем применения новых типов крепей и средств поддержания выработок в настоящее время невелик. На сегодняшний день металлическая податливая крепи является основным способом обеспечения устойчивости выработок. Так, на шахтах Донбасса этим видом крепи закреплено 91,3% всех пройденных выработок. Вместе с тем существующие типы податливых крепей, несущая способность которых не превышает 0,1 МПа, не могут в условиях больших глубин оказать влияние на развитие геомеханических процессов вблизи выработки. Учитывая недостатки традиционной металлической крепи, нельзя оставлять без внимания ее многочисленные достоинства, а также имеющиеся огромные мощности для изготовления этого вида крепи и значительные резервы для повышения ее несущей способности.

Учитывая это, на ближайшую перспективу возможны два взаимодополняющих направления решения задачи повышения устойчивости выработок: с одной стороны – совершенствование конструкции металлической крепи на основе широкого привлечения технических решений по повышению ее надежности и использованию несущей способности приконтурного массива; с другой

---

стороны – расширение объемов применения новых конструкций крепи, в том числе анкерной, набрызгбетонной, крепей с разгрузкой и упрочнением массива.

В научной литературе имеется большое количество гипотез о схеме работы заанкерванной кровли выработок, но можно выделить несколько основных групп.

К первой группе относятся гипотезы, согласно которым неустойчивые породы кровли подвешиваются при помощи анкеров к устойчивым вышележащим породам. В этой схеме подразумевается, что анкерная крепь оказывает только силовое противодействие обрушающимся породам. Она применима при малых размерах зон обрушения. Такова основа предложений П.Б. Бакки [49], Б.К. Чукана [50], А.П. Широкова [51], И.А. Юрченко [52], В. Подгорского [53] и других авторов. Высота зоны неустойчивых, склонных к обрушению пород, а следовательно, и длина анкеров определяются различным образом, в зависимости от высоты свода естественного равновесия, размеров возможных отслоений и вывалов, мощности неустойчивого приконтурного слоя, радиуса зоны необратимых деформаций и т.д. Расстояние между анкерами, как правило, определяется из условия равенства несущей способности замка анкера (иногда прочности штанги) весу горных пород неустойчивой приконтурной зоны, приходящейся на один анкер.

Согласно гипотезам второй группы, взаимодействие анкерной крепи с породами кровли приводит к образованию составной балки, трехшарнирной арки, свода и других грузонесущих конструкций. Такова основа предложений Г. Сена [54], Э. Томаса [55], Х. Мидендорфа, О. Якоби [56], А.А. Борисова [57], Б.К. Чукана [58], А. Югона, А. Коста [59] и других авторов. При этом параметры анкерного крепления определяются в зависимости от вида грузонесущей конструкции.

В условиях больших глубин достоверность расчетных параметров на основе этих гипотез снижается. Кроме того, в рамках таких схем не представляется возможным определить параметры анкерной крепи как средства для управления состоянием горных пород приконтурной зоны.

---

К третьей группе относятся гипотезы, согласно которым анкерная крепь рассматривается как средство повышения категории устойчивости приконтурных пород. Согласно работам [60, 61] анкерная крепь оказывается эффективным средством управления состоянием приконтурной зоны не только при заложении выработок в породах I и II категорий устойчивости, но и в породах более низких категорий устойчивости, в которых размер зоны разрушения превышает длину анкера.

Существующие способы и методы определения основных параметров анкерной крепи (аналитические, графический [62], энергетический [63] и др.), основанные на этих гипотезах, не позволяют достаточно полно и научно обоснованно решить задачу выбора параметров анкерования выработок и их зависимости от различных горно-геологических условий.

В связи с этим целью исследований является обоснование параметров анкерной крепи для капитальных наклонных выработок в условиях угольных шахт ООО «ДТЭК Добропольеуголь».

Идея исследований состоит в использовании закономерностей взаимодействия анкерных систем с породным массивом в приконтурной зоне капитальных наклонных выработок, для обоснования параметров анкерной крепи.

Объектом исследований является устойчивость наклонных выработок угольных шахт, пройденных в неоднородном породном массиве вне зоны влияния очистных работ.

Методическую основу исследований составляет комплексный подход, включающий анализ и обобщение литературных данных о способах и средствах крепления горных выработок, шахтные визуальные и инструментальные наблюдения, математическое моделирование с применением численного метода, физическое моделирование на моделях из эквивалентных материалов, проведение промышленных испытаний.

Таким образом, оценка эффективности известных средств и способов повышения устойчивости выработок показывает, что наибольший положительный эффект дают мероприятия, направленные на упрочнение массива и преду-

---

прежде чем его расслаивания (анкерная крепь). Определение параметров анкерной крепи сводится к изучению закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния приконтурного массива пород и определению ожидаемых смещений породного контура выработки.

---

## ГЛАВА 2

### АНАЛИЗ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ООО “ДТЭК ДОБРОПОЛЬЕУГОЛЬ”

#### 2.1. Общие сведения о ООО “ДТЭК Добропольеуголь”

Общество с ограниченной ответственностью “ДТЭК Добропольеуголь” состоит из двух шахтоуправлений «Добропольское» и «Белозерское», в которые входят 6 шахт: “Белицкая”, “Добропольская”, “Алмазная”, “Белозерская”, “Новодонецкая” и “Пионер”.

Поля шахт компании расположены в северо-западной части Красноармейского угленосного района Донбасса и представляют собой равнину степного характера площадью около 1900 км<sup>2</sup>.

Угленосные отложения Красноармейского региона включают более 50 угольных пластов рабочей мощности. Основная промышленная угленосность связана с отложениями свит  $C_2^5$ ,  $C_2^6$ ,  $C_2^7$ , содержащих более 30 угольных пластов, из которых более 10 расположены на значительной площади и имеют мощность 0,7...2,6 метра. Мощность остальных пластов не превышает 0,65 метра. Угол падения пластов колеблется в пределах 9...13 градусов.

Балансовые запасы каменного угля в недрах на территории района составляют, примерно, 4,5 млрд. тонн. Одна треть запасов представлена дефицитными углями, пригодными для коксования. Угли малометаморфизованных марок Д, Г, ГЖ. В центральной части региона сосредоточены газовые угли, близкие к жирным и жирные.

Промышленные запасы по состоянию на 01.01.2013 г. превышают 450 млн. тонн.

Все шахты обеспечены достаточным количеством разведанных запасов. Практически на каждой из них имеются резервные пласты или блоки, которые могут быть прирезаны к шахтам.

Средняя глубина разработки составляет 715 метров. Максимальная глубина очистных работ достигает 983 м (шахта “Алмазная”).

---

Все шахты опасны по пыли. Все обрабатываемые пласты не выбросоопасны. 4 шахты являются сверхкатегорными по газу и 2 – третьей категории.

Вскрытие шахтных полей на угольных предприятиях осуществлено, как правило, двумя центрально-сдвоенными вертикальными стволами и капитальными квершлагами. Исключение составляет шахта “Алмазная”, где кроме двух вертикальных стволов на основной горизонт 107 м с поверхности пройдено два наклонных ствола (конвейерный и грузовой).

Схема подготовки шахтного поля – панельная. Порядок отработки запасов в шахтных полях – от ствола к границам полей. Общее направление выемки ярусов в пределах панели – нисходящее. Оработка ярусов (выемочных полей) производится, в основном, обратным ходом.

Подготовка панелей производится тремя наклонными выработками, которые проводят по пласту с верхней или нижней подрывкой и крепятся металлической арочной податливой крепью.

Подготовка ярусов осуществляется ярусными штреками (конвейерным и вентиляционным), проводимыми по простиранию.

Система разработки на всех шахтах принята длинными столбами по простиранию с длиной выемочного столба от 700 м до 2000 м.

Число горизонтов одновременно находящихся в работе, колеблется от 1 до 3. Высокие темпы интенсификации горных работ привели к существенному усложнению условий разработки на шахтах. Так, за период с 2001 по 2012 гг. протяженность поддерживаемых выработок в ООО “ДТЭК Добропольеуголь” уменьшилась на 11,9%.

С углублением горных работ увеличивается ступенчатость транспорта. Количество транспортных ступеней от основного горизонта до очистного забоя составляет, в основном, две ступени.

За 2001...2012 гг. количество наклонных выработок (уклонов, ходков) возросло на 57, а их протяженность – на 44,8 км. Значительная часть этих выработок попадает в зону влияния очистных работ, что снижает их устойчивость, в то время как роль этих выработок в комплексе работ по добыче возрастает.

---

На всех шахтах применяется 100% конвейеризация транспортировки горной массы от очистных и подготовительных забоев до ствола шахт.

Способ проветривания на шахтах – всасывающий. Схема проветривания, как правило, комбинированная.

Для обеспечения шахт воздухом практически на каждой шахте дополнительно на флангах (реже в центре шахтного поля) пройдены вентиляционные стволы или скважины.

Динамика изменения основных показателей деятельности ООО “ДТЭК Добропольеуголь” приведена в табл. 2.1.

## **2.2. Гидрогеологические и горнотехнические условия на шахтах**

### **ООО “ДТЭК Добропольеуголь”**

Геологическое строение Красноармейского угольного региона характеризуется развитыми осадочными породами среднего и верхнего карбона, перекрытыми почти по всей площади более молодыми осадками (кайнозойскими, триасовыми, юрскими), суммарная мощность которых постепенно увеличивается с юга на север, достигая у северной границы 520 метров.

Литологический состав пород, вмещающих угольные пласты, представлен, в основном, аргиллитами, алевролитами, песчаниками и, реже, известняками. Усредненные разрезы разрабатываемых угольных пластов представлены на рис. 2.1.

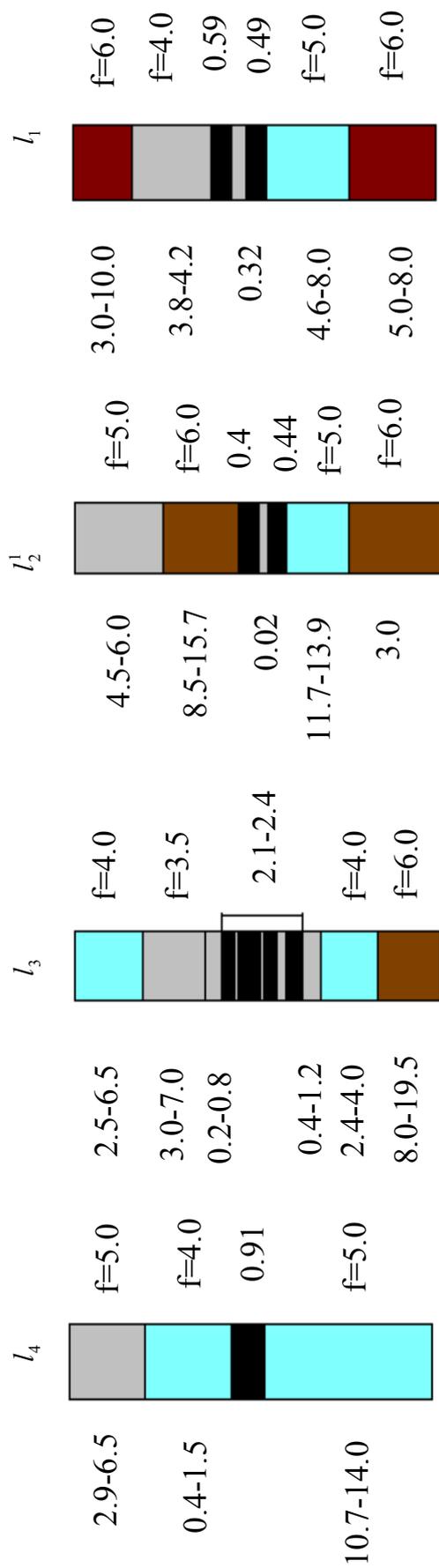
Основное простирание пород – северо-западное. В южной части региона наблюдается небольшой плавный дугообразный изгиб, в связи с чем, простирание пород принимает здесь меридиальное направление.

Направление пород изменяется от восточного на юге до северо-восточного в центральной и северной частях региона. Падение пород пологое и изменяется от 3 до 15 градусов.

Таблица 2.1

## Основные показатели деятельности ООО «ДТЭК Добропольеуголь»

Показатели	Год										
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012			
Добыча угля за год, тыс. т	3636,5	3333,2	3059,8	4112,7	3914,9	4141,5	3899,5	3893			
Количество очистных забоев, шт	10	11	11	10	9	9	8	8			
Протяженность действующих выработок на конец года, км	403,5	397,7	385,7	373,9	368,8	357,8	364,7	358,4			
Выработки не соответствующие паспорту поддержания (по требованиям ПБ), км	44,7	43,1	42,9	37,7	37,5	36,3	46,3	50			
в %	11,1	10,8	11,1	10,1	10,2	10,1	12,7	14			
Проведено выработок за год, км	18,9	16,7	15,2	18,3	20,3	19,4	20,1	18,7			
Всего отремонтировано выработок за год, км	4,47	3,53	4,02	7,56	5,07	5,55	3,29	3,74			
Число рабочих на поддержании и ремонте горных выработок, чел	562	580	557	534	508	552	521	540			



Условные обозначения.

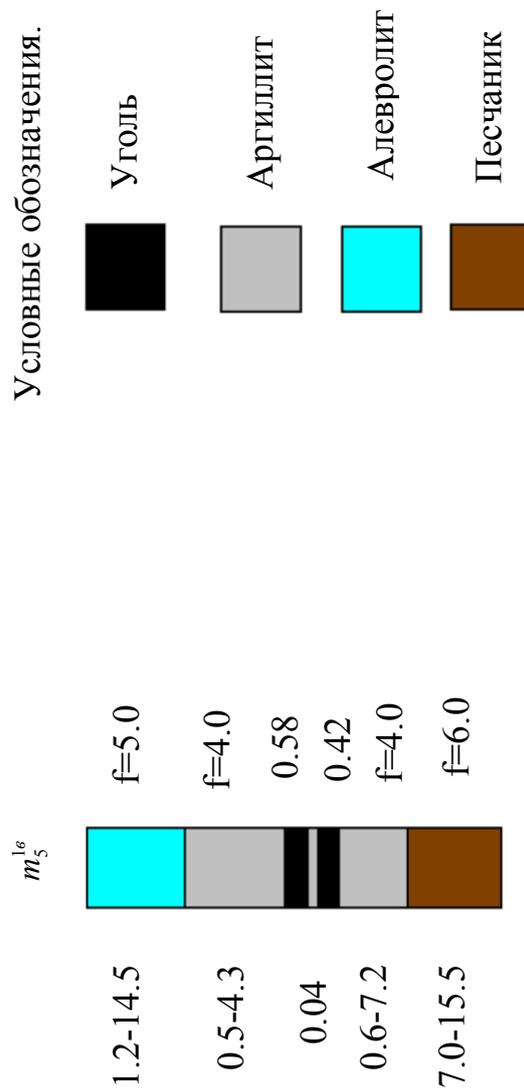


Рис. 2.1. Стратиграфические колонки разрабатываемых угольных пластов

Основными разрывными нарушениями в регионе являются надвиги субмеридиального направления, такие как Селидовский, Красноармейский, Самарский и Центральный. Все они пересекают породы в диагональном направлении по отношению к их простиранию.

Водоносность отложений карбона приурочена к трещиноватым песчаникам и известнякам. По условиям накопления и циркуляции воды относятся к трещиноватым, напорным. Фильтрационные свойства каменноугольных отложений изменяются существенно даже на небольших расстояниях в зависимости от их трещиноватости, как по глубине, так и по площади их залегания.

Химический состав подземных вод региона отличается большим разнообразием.

Угли разрабатываемых пластов отнесены к VI категории по классификации профессора М.М. Протодяконова с коэффициентом крепости  $f = 1,5$ , имеют ясно выраженную систему трещин с азимутом  $87...100^0$  и углом падения  $87...89^0$ .

Основные сведения о прочностных свойствах боковых пород, вмещающих угольные пласты, приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Основные прочностные характеристики горных пород

Тип пород	Предел прочности на сжатие, МПа	Предел прочности на растяжение, МПа	Объемная масса, $\gamma$ , т/м <sup>3</sup>	Модуль упругости, $E \cdot 10^{-4}$ , МПа	Коэффициент Пуассона
Аргиллит	20...35	2,5...3,5	2,4...2,6	0,5...1,1	0,21...0,25
Алевролит	35...45	3,0...4,0	2,4...2,6	0,7...2,2	0,2...0,26
Песчаник	60...70	4,0...5,0	2,5...2,7	1,4...1,7	0,21
Известняк	80...110	3,5...4,5	2,5...2,7	2,5...3,5	0,21

Содержание серы в углях изменяется от 0,6% до 5%.

Породы комковатой текстуры с поверхностями скольжения или “кучерявые” с отпечатками обуглившейся растительности имеют прочность в 2...3 раза

ниже, чем монолитные. На устойчивость пород кровли также оказывает влияние их слоистость и величина сцепления между слоями.

Существенное влияние на прочность вмещающих пород оказывает вода. Как уже отмечалось, трещиноватые известняки и песчаники отличаются высокой водообильностью, а непосредственный контакт воды с горными породами довольно негативно сказывается на прочности последних. Об этом свидетельствует и данные, приведенные в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Свойства пород, вмещающих основные угольные пласты,  
при водонасыщении

Пласт	Непосредственная кровля	Непосредственная почва
	Степень снижения прочности при водонасыщении	Степень снижения прочности при водонасыщении
$m_5^{1a}$	аргиллит 2,18...3,0 алевролит 1,0...1,63	аргиллит 1,49 ...1,98 алевролит 1,61...1,87
$m_4^0$	аргиллит 1,3...1,85 алевролит 1,5...2,0	аргиллит 1,38...1,84 алевролит 1,72...2,04
$l_3$	аргиллит 1,72...2,08 алевролит 1,11...2,01	аргиллит 1,41...1,76 алевролит 1,49...1,83
$l_1$	аргиллит 1,68...2,15 алевролит 1,71...1,75 песчаник 1,68...2,15	аргиллит 1,32...1,44 алевролит 2,01...2,12 —
$k_8^H$	аргиллит 1,21...2,03 алевролит 1,3...2,54	аргиллит 1,34...1,95 алевролит 1,13...1,52

### 2.3. Состояние горных выработок шахт ООО “ДТЭК Добропольеуголь”

Данные о горно-геологическом строении Красноармейского угольного региона, приведенные в п. 2.2, показывают, что сооружение и поддержание горных выработок шахт ООО “ДТЭК Добропольеуголь” осуществляется в очень тяжелых условиях. Горные породы, обладающие низкой прочностью,

слабой устойчивостью, теряющие свою прочность при насыщении их водой, склонные к пучению, а также наличие ряда геологических нарушений, в полной мере отражаются на состоянии протяженных горных выработках шахт.

Общая протяженность ежегодно поддерживаемых выработок на шахтах компании составляет около 400 км.

Для обеспечения работоспособности шахт часть поддерживаемых выработок (до 15% общей длины табл. 2.1) подвергается ремонтам.

Из данных табл. 2.1 следует, что протяженность действующих выработок из года в год сокращается (рис. 2.2). Вызвано это тем, что уменьшается также число действующих очистных забоев (рис. 2.3) и, соответственно, объемы проводимых вскрывающих и подготовительных выработок. Это приводит к некоторому снижению суммарной длины выработок, не удовлетворяющих требованиям правил безопасности (рис. 2.4). Только в 2010 г. наметилась тенденция к увеличению добычи полезного ископаемого и объемов сооружаемых выработок.

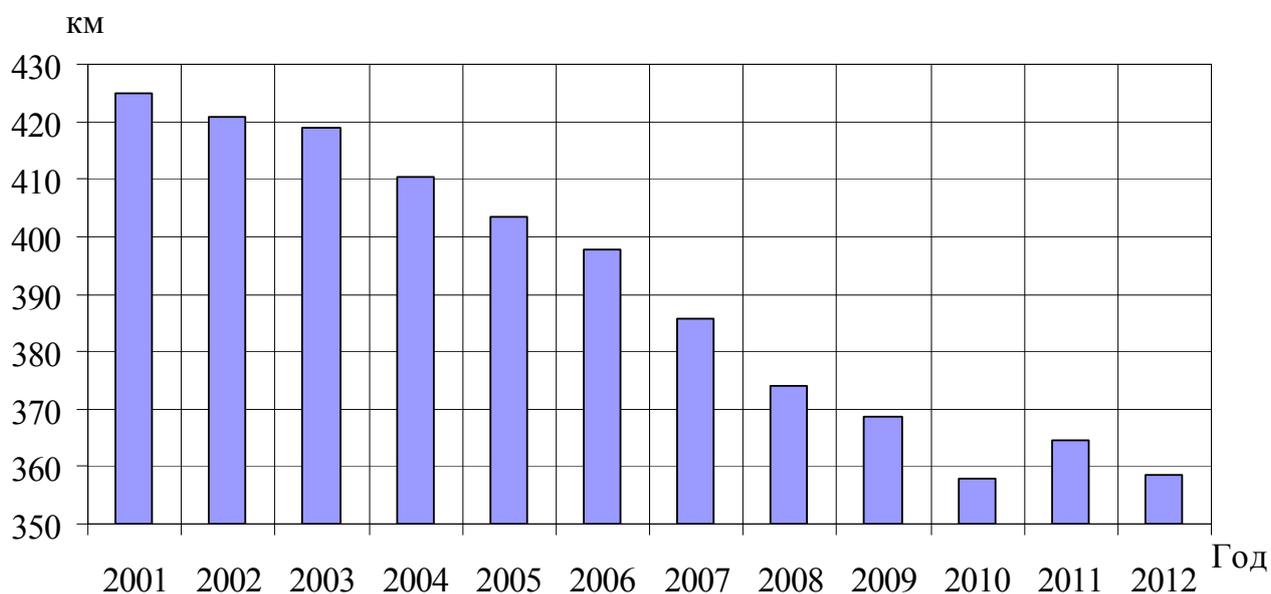


Рис. 2.2. Протяженность действующих выработок на конец года

Основная причина ремонтных работ кроется в наличии пучения пород почвы выработки (60%) и несоответствии несущей способности крепи действующей нагрузке (40%).

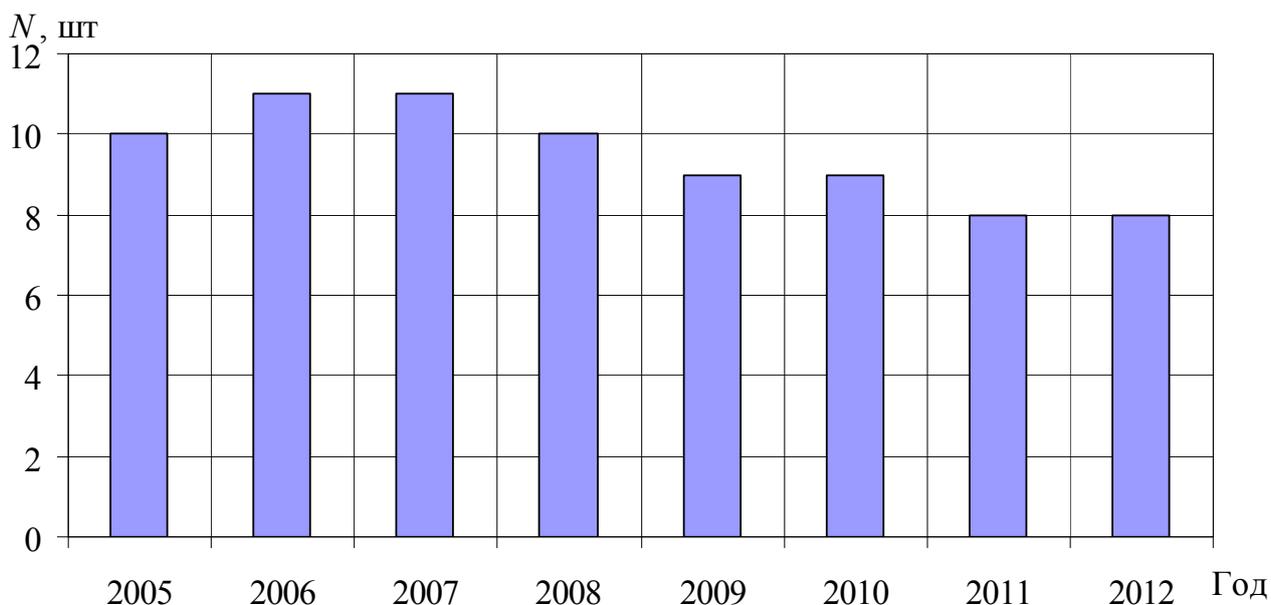


Рис. 2.3. Число действующих очистных забоев на конец года

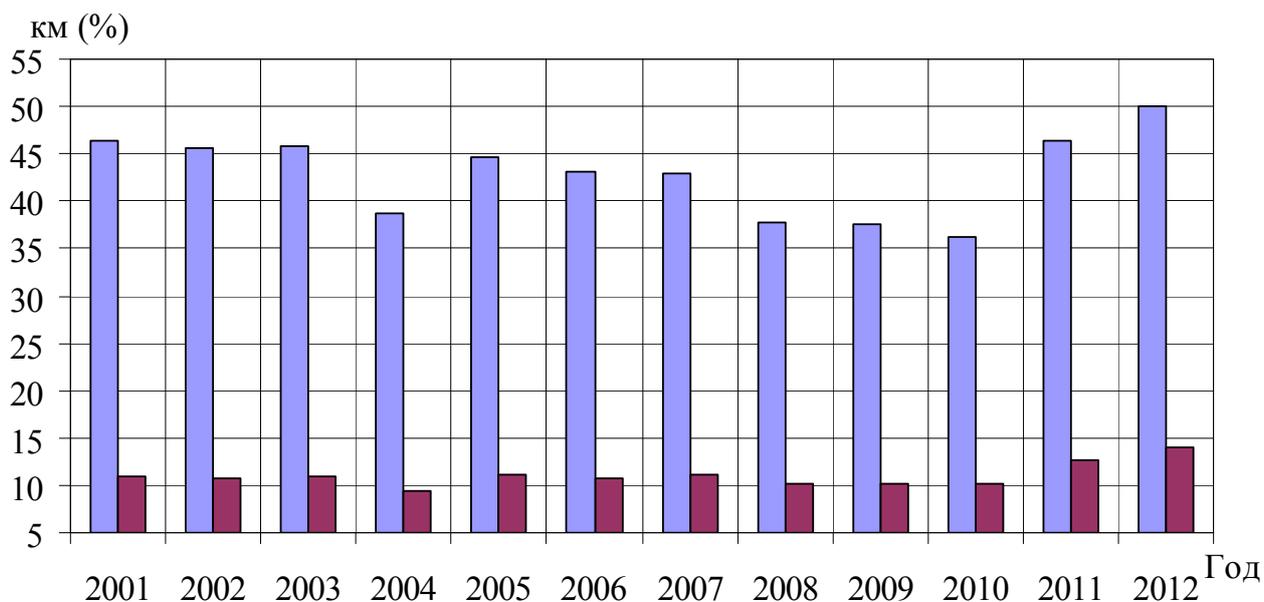


Рис. 2.4. Протяженность поддерживаемых выработок, не удовлетворяющих требованиям правил безопасности

Для крепления выработок на шахтах компании применяется, в основном, металлическая арочная податливая крепь из СВП (табл. 2.4).

В зависимости от прочности окружающих пород плотность установки арок изменяется от 1 до 2 рам на 1 погонный метр выработки. Межрамное ограждение выполняется из железобетонных или деревянных затяжек, а также из

металлической сетки. В целом по ООО ежегодно проводится 20 км горных выработок.

Таблица 2.4

Данные о применении металлической арочной податливой крепи, %

2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
91,7	91,1	91,8	90,3	90,3	90,8	90,4	90,1

Следует отметить, что несмотря на снижение объемов прохождения выработок за последние годы (табл. 2.1), для их крепления требуется существенный расход металлокрепи, связанный с ростом глубины разработки и ухудшением условий поддержания выработок.

В последние годы все больше встает проблема поставок металла на шахты ООО, обусловленная высокой стоимостью металла и низкой платежеспособностью предприятий. Поэтому на шахтах компании металлокрепь очень часто используется повторно из погашаемых и перекрепляемых выработок. В общем объеме крепления на долю повторно используемой крепи приходится от 25% до 35% протяженности закрепляемых выработок [64].

#### **2.4. Характеристика условий разработки шахты “Алмазная” и визуальные обследования протяженных горных выработок**

Участок шахты “Алмазная” расположен в Добропольском районе Донецкой области. В промышленном отношении шахта подчинена шахтоуправлению “Добропольское” ООО “ДТЭК Добропольеуголь”.

Развитие шахты осуществляется по локальным проектам. Производственная мощность по состоянию 01.01.2012 года составляет 750 тыс.т в год.

На балансе шахты находится 11 пластов:  $k_8^H$ ,  $l_1$ ,  $l_2^1$ ,  $l_3$ ,  $l_4$ ,  $l_5$ ,  $l_7$ ,  $m_2^H$ ,  $m_4^0$ ,  $m_4^2$ ,  $m_5^{16}$ , из них по состоянию на 01.01.2012 г. вскрыты пласты  $k_8^H$ ,  $l_1$ ,  $l_2^1$ ,  $l_3$ ,  $l_4$ ,  $m_4^0$ ,  $m_5^{16}$ , пласты  $l_2^1$ ,  $l_3$ , – разрабатываются.

---

Залегание пластов пологое с углом падения –  $9...13^{\circ}$ . Простираение – северо-западное с азимутом  $320^{\circ}$ . Падение – северо-восточное. Залегание пластов, в основном, спокойное. Горными работами вскрыты тектонические нарушения типа “сбросов” с амплитудой  $0,1...3,5$  м.

Балансовые запасы угля по всем пластам на 01.01.2012 г. – 99,5 млн.т промышленные – 69,65 млн.т.

Шахта по метановыделению отнесена к сверхкатегорной с относительной метанообильностью  $47,0$  м<sup>3</sup>/т.с.д. основными источниками метановыделения являются пласт  $l_3$  и его спутники.

Нормальный приток воды по шахте составляет  $418$  м<sup>3</sup>/час.

Шахтное поле вскрыто двумя главными центральными стволами. На горизонт  $107$  м с поверхности пройдены также два наклонных ствола.

Подготовка шахтного поля на всех пластах панельная. При этом на пласте  $l_3$  – две панели, на остальных пластах одна панель. Каждая панель подготавливается тремя выработками, расположенными в центре панели. Отработка панелей ведется ярусами в нисходящем порядке.

На всех пластах применяется система разработки – длинными столбами по простираению с обратным порядком отработки. Подготовка лав ведется по бесцеликовой технологии.

Транспорт горной массы по шахте полностью конвейеризирован.

Углевмещающие породы на изучаемой площади представлены аргиллитами, алевролитами и песчаниками. В таблице 2.2 представлены пределы колебаний физико-механических свойств вмещающих пород для основных угольных пластов.

Аргиллит серого, темно-серого цвета, горизонтально- и тонкослоистый, с включением сидеритовых конкреций, пирита в виде стержней неправильной формы. Иногда переслоенные углистым материалом, с отпечатками обуглившейся флоры, средней крепости от малоустойчивого до весьма неустойчивого.

Алевролит серого, реже темно-серого цвета; горизонтально слоистый или с неясновыраженной слоистостью; характерно наличие слюдистого или угли-

---

стого материала по плоскостям отдельных слоев, а также отпечатков растительности, иногда комковатой текстуры с включением сидеритовых конкреций, малой или средней крепости, от среднеустойчивого до неустойчивого.

Песчаник серого или светло-серого цвета кварцево-полевошпатовый, на кварцевом либо глинистом цементе, слюдистый, иногда переслоенный алевролитом; в основном мелкозернистый, реже – среднезернистый и тонкозернистый, слоистый; средней крепости и крепкий, от среднеустойчивого до устойчивого.

Необходимо отметить, что в пределах изучаемой площади, в связи с большой сетью горных выработок, многократной подработкой и надработкой пластов и наличием крупных тектонических нарушений, значительно развита сеть мелких тектонических нарушений и тектонических зон, что отрицательно сказывается на устойчивости пород при ведении очистных и подготовительных работ, способствует образованию вывалов; согласно работе [65] параметры вывалов, в большинстве случаев, составляют: длина 2...15 м, ширина 1...6 м, высота 1...5 м; и преждевременной деформации крепи.

Исходным материалом для выполнения аналитических и лабораторных исследований, разработки конструктивных и технологических решений по повышению работоспособности средств крепления должны были стать результаты шахтных исследований состояния выработок.

В качестве объекта исследований детально рассмотрению были подвергнуты капитальные наклонные выработки.

Для получения первичной информации о состоянии объекта было выполнено обследование ряда выработок.

Предварительно был собран материал о состоянии выработок на шахте за 2008...2012 гг. (табл. 2.5). Для анализа выбраны, в основном, уклоны и ходки – наклонные выработки, имеющие одинаковые условия проведения (площадь поперечного сечения, тип крепи, угол наклона и мощность пласта, глубина расположения и т.д.) и испытывающие влияние очистных работ в различной степени.

Таблица 2.5

## Состояние выработок шахты “Алмазная”

Наименование выработок	Длина, м	Протяженность выработок с неудовлетворительным состоянием									
		2008		2009		2010		2011		2012	
		м	%	м	%	м	%	м	%	м	%
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Сев. ходок ЮПУ пл.І <sub>3</sub>	1250	147	11,7	149	11,9	143	11,4	151	12,1	161	12,9
Юж. ходок ЮПУ пл.І <sub>3</sub>	1350	161	11,9	164	12,1	158	11,7	163	12,1	173	12,8
Юж. пан. уклон гор. 550 м пл.І <sub>3</sub>	1400	164	11,7	162	11,6	162	11,6	167	11,9	176	12,6
Груз. ходок гор.107 м пл.І <sub>3</sub>	2260	268	11,8	266	11,8	264	11,7	271	12,0	276	12,2
Люд. ходок гор.107 м пл.І <sub>3</sub>	2280	271	11,9	276	12,1	269	11,8	274	12,0	279	12,2
Конв. магистраль по пл.І <sub>2</sub> <sup>1</sup>	1210	132	10,9	137	11,3	134	11,1	142	11,7	145	12,0
Уклон с гор.107 м на гор.310 м	1890	213	11,2	226	11,9	219	11,6	223	11,8	229	12,1
Сев. маг. отк. штрек гор. 107 м по пл.І <sub>3</sub>	1700	189	11,1	192	11,3	186	10,9	188	11,1	194	11,4
Юж. ходок пл. m <sub>5</sub> <sup>1B</sup>	2070	257	12,4	263	12,7	258	12,5	253	12,2	264	12,8

Продолжение табл.2.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Сев. ходок пл. $m_5^{1B}$	2070	244	11,8	259	12,5	236	11,4	253	12,2	263	12,7
Отк. квар- шлаг на пл. $m_5^{1B}$	1075	128	11,9	124	11,5	122	11,3	127	11,8	134	12,4

С целью определения характерных видов разрушения и деформаций элементов крепей и их объемов было проведено визуальное обследование протяженных выработок. Исследование включало в себя всесторонний многоэтапный анализ результатов.

На первом этапе проводился анализ горно-геологических условий расположения выработок и данных по объемам ремонтных работ за последние годы.

На втором этапе проводилось визуальное обследование состояния выработок, в процессе которого определялись:

1. Абсолютные значения объемов деформаций и разрушений элементов крепей и участков выработки.
2. Наиболее характерные виды разрушений и деформаций элементов крепей.
3. Показатель устойчивости выработок по формуле:

$$W = 1 - \frac{N_p}{N_o}, \quad (2.1)$$

где  $N_o$ ,  $N_p$  – соответственно общее количество арок крепи на участке и количество разрушенных арок.

Детальному визуальному обследованию подверглись наклонные выработки. Обследование выполнялось путем осмотра крепи, фиксирования и под-

---

счета арок крепи, потерявших устойчивость, группирование видов разрушения крепи. Общая протяженность обследованных участков составила 2520 м.

В качестве критерия потери устойчивости крепью считалось: разрыв соединительных хомутов, необратимые пластические деформации элементов арок (стоек и верхняков), разрыв профиля стойки в месте соединения его с верхняком и другие виды разрушений. Результаты обследования приведены в табл. 2.6.

## **2.5. Анализ результатов шахтных исследований**

Анализируя данные о состоянии горных выработок и результаты выполненных визуальных обследований наклонных выработок можно отметить следующее.

Значительная часть выработок шахты “Алмазная” закреплена арочной металлической крепью с железобетонной или деревянной затяжкой. Бетонной крепью закреплены только некоторые выработки околоствольного двора.

Большая часть выработок находится в неудовлетворительном состоянии, отмечаются существенные деформации, как почвы, так и кровли, что отвлекает значительные людские ресурсы, мешает ритмичной работе шахты, ухудшает проветривание и транспортирование.

Данные горно-геологических условий разработки и свойств вмещающих пород показывают, что исследуемые выработки находятся в достаточно сложных условиях эксплуатации. Средние и большие глубины ведения работ, слабые вмещающие породы, наличие развитой сети мелких тектонических нарушений и тектонических зон отрицательно сказывается на состоянии выработок. К этому следует добавить влияние очистных работ, что существенно увеличивает сложность поддержания выработок в эксплуатационном состоянии.

При сравнении показателей состояния выработок, обращает на себя внимание тот факт, что протяженность участков с неудовлетворительным состоянием у ходков почти во всех случаях больше, чем у уклонов.

Таблица 2.6

Результаты визуального обследования наклонных выработок шахты  
“Алмазная”

№№ пикетов	Длина участка, м.	Кол-во арок на участке, шт.	Кол-во арок, потерявших устойчивость, шт.	Основные виды разрушений	Примечание
1	2	3	4	5	6
Южный ходок ЮПУ гор. 550 м. пл. $l_3$ , крепь СВП-27 шаг установки 0,5 м					
1...8	160	320	286	Вывалы породы, разрыв соединительных хомутов, деформации элементов арок	Участок находится в районе сопряжения с корен. штреком. Разрушение выработки всестороннее
8...16	160	Участок перекреплен			
16...19	60	120	120	Участок полностью задавлен. Высота выработки не превышает 1,8 м. Деформации арок, разрыв хомутов. Проскальзывание в замках с обеих сторон 1...1,5 м	Давление всестороннее
19...20	20	Участок перекреплен			
20...24	80	160	155	Участок полностью разрушен	Давление всестороннее
24...26	40	80	45	Значительное уменьшение высоты выработки. Деформации верхняков	Преобладающее давление справа

Продолжение табл.2.6

1	2	3	4	5	6
26...29	60	120	40	Состояние выработки улучшилось. Деформации верхняков	Давление практически симметричное
29...35	120	240	185	Деформации верхняков	Незначительное преобладание давления справа
35...37	40	Участок перекреплен, шаг установки крепи 0,3 м			
37...41	80	160	160	Участок полностью разрушен. Высота выработки не более 1,7 м	Преобладающее давление справа
41...47	120	240	167	Проскальзывание в замках с обеих сторон 1...1,2 м. Деформация верхняков	То же. Незначительный наклон арок влево
Итого	940	1934	1158		
Северный ходок ЮПУ гор. 550 м. пл. $l_3$ , крепь СВП-27 шаг установки 0,5 м					
38...40	40	80	53	Значительное уменьшение высоты выработки. Деформации верхняков	Преобладающее давление слева
40...43	60	120	120	Участок полностью разрушен. Высота выработки не более 1,8 м	То же. Незначительный наклон арок вправо
43...48	100	200	134	Деформации элементов арок, сильное поднятие почвы	
48...52	80	Участок перекреплен			
52...55	60	120	84	Проскальзывание в замках с обеих сторон до 1,3 м. Деформация верхняков	Преобладающее давление слева

Продолжение табл.2.6

1	2	3	4	5	6
55...58	60	120	77	Пластические деформации верхняков, сделана под-рывка 0,5 м	Давление практически симметричное
Итого	400	800	486		
Южный панельный уклон гор. 550 пл. $l_3$ , крепь СВП-27 шаг установки 0,5 м					
30...33	60	120	56	Проскальзывание в замках с обеих сторон до 1 м. Де-формация верхняков	Давление практически симметричное
33...37	80	160	67	Деформации элементов арок	То же
37...38	20	40	17	Значительное уменьшение высоты выработки	То же
38...41	60	120	87	Разрушение ж/б затяжки	То же
41...45	80	160	95	Разрыв соединительных хо-мутов	То же
45...47	40		Участок перекреплен		
47...50	60	120	72	Пластические деформации верхняков	То же
50...54	80	160	108	Разрушение ж/б затяжки. Разрыв	То же
Итого	480	960	502		
Грузовой ходок гор. 107 м пл. $l_3$ , крепь СВП-27 шаг установки 0,5 м					
55...62	140	280	85	Пластические деформации верхняков крепи	Преобладаю-щее давление слева
62...74	240	480	253	Проскальзывание элемен-тов арок в замках	То же

Продолжение табл.2.6

1	2	3	4	5	6
74...88	280	560	268	Разрыв соединительных хомутов	То же
88...94	120	240	129	То же, сделана подрывка 0,3 м	То же
94...95	20	40	34	Пластические деформации левых стоек, разрушение ж/б затяжки	То же
95...96	20	40	22	Пластические деформации верхняков	То же, наклон крепи вправо
96...108	240	480	390	Большие проскальзывания элементов арок в замках (1...1,5 м). Разрыв соединительных хомутов	Преобладающее давление слева, незначительный наклон крепи вправо
Итого	1060	2120	1181		
Всего	2520	5814	3327		

Между тем, параметры условий проведения ходков и уклонов, входящих в один комплекс, как правило, одинаковы (площадь поперечного сечения, тип крепи, параметры пласта и вмещающих пород, глубина заложения и т.д.). Более плохое состояние ходков можно объяснить различной степенью влияния очистных работ, что хорошо видно из представленной схемы (рис. 2.5). Очистные работы, проводимые по пласту, несмотря на оставленный предохранительный целик 50...120 м, все же оказывают влияние на комплекс наклонных выработок. При этом ходок, находящийся на меньшем расстоянии от границы одного из охранных целиков, подвержен большему влиянию с его стороны. Уклоны, напротив, располагаются на одинаковом расстоянии от обеих границ предохра-

нительных целиков и попадают в зону меньшего и симметричного влияния со стороны очистных работ.

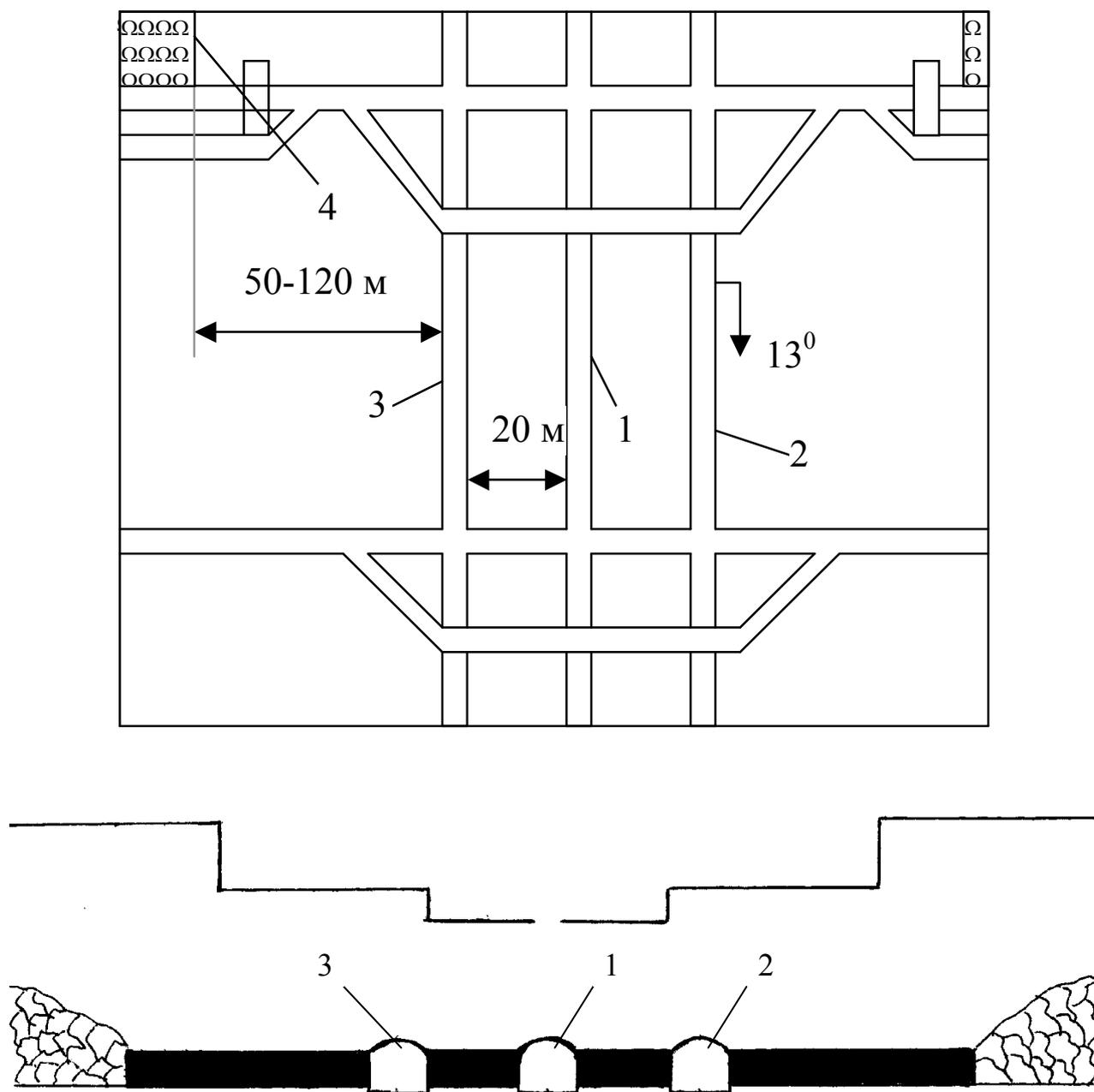


Рис. 2.5. Схема подготовки пл.  $l_3$  в уклонной части (вторая ступень) шахтного поля: 1 – южный панельный уклон; 2 – северный ходок; 3 – южный ходок; 4 – граница охранного целика

Детальному визуальному обследованию были подвергнуты участки выработок общей протяженностью 2520 м. Из общего числа обследованных арок

---

крепи (5814 шт.) устойчивость потеряли (3327 шт.). Основными причинами потери устойчивости арок является: прогиб верхняков, изгиб ножек, разрывы профиля ножек в местах соединения их с верхняком, разрыв соединительных хомутов и др.

Следует отметить, что имеется ряд участков со значительным уменьшением поперечного сечения выработки, произошедшим как из-за нарушения крепи, так из-за пучения пород почвы.

Имеют место также значительные проскальзывания в местах соединения верхняков и стоек друг относительно друга. Величина нахлеста превышает, зачастую, 1...1,5 м в каждом замковом соединении. Такие участки требуют немедленного перекрепления.

Изучая характер деформирования арок можно отметить, что в большинстве случаев потеря устойчивости сопровождается прогибом верхняков и разрывом соединительных хомутов, но для ходков характерно также небольшой наклон арок в ту или иную сторону.

Выполненные расчеты, в соответствии с формулой (2.1), показывают, что показатель устойчивости для обследованных участков колеблется в пределах  $W = 0,401 \dots 0,478$ .

Таким образом, анализ деятельности ООО “ДТЭК Добропольеуголь” за последние годы показывает, что после многолетнего снижения добычи полезного ископаемого, наметилась тенденция к росту производства: увеличение объемов добычи угля и сооружения выработок, повышение производительности труда. Сооружение и поддержание подземных горных выработок шахт ООО “ДТЭК Добропольеуголь” осуществляется в очень тяжелых условиях при этом вмещающие горные породы, обладающие низкой прочностью, слабой устойчивостью, теряющие свою прочность при насыщении их водой, склонные к пучению, а также наличие ряда геологических нарушений, в полной мере отражаются на состоянии протяженных горных выработок шахт. Крепление выработок типовыми арочными крепями не обеспечивает достаточную их устойчивость. Средний показатель устойчивости наклонных выработок составляет  $W_{cp} = 0,43$ .

---

Показатель устойчивости для ходков немного ниже, чем для уклонов. Успешное преодоление трудностей снабжения шахт металлокрепью и решение вопроса обеспечения устойчивости капитальных и подготовительных горных выработок может быть достигнуто при применении новых технологий прохождения выработок и использовании более эффективных и металлосберегающих видов крепи, одним из которых является анкерная крепь.

---

## ГЛАВА 3

# ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОРОДНОГО МАССИВА В ОКРЕСТНОСТИ ВЫРАБОТКИ, ЗАКРЕПЛЕННОЙ АНКЕРНОЙ КРЕПЬЮ

### 3.1. Общие сведения о моделировании

Одним из методов исследования сложно структурных объектов является моделирование в лабораторных условиях различных физических процессов. Методы моделирования достаточно широко используются во многих отраслях науки и техники. Применительно к механике подземных сооружений эти методы позволяют выяснить основные качественные элементы механизма процессов сдвижения, деформации и разрушения горных пород при ведении очистных и подготовительных работ.

Цель моделирования заключается в воспроизведении и изучении на модели физического процесса, подобного происходящему в натуральных условиях. Метод моделирования позволяет на уменьшенных или увеличенных по отношению к действительности моделях проводить детальные качественные и количественные исследования изучаемого процесса.

В механике горных пород, изучающей, как правило, объекты весьма больших размеров, применяют моделирование второго рода, т.е. с уменьшением абсолютных размеров объектов. Массив горных пород является весьма сложной средой, в различных частях которого при ведении горных работ одновременно происходят процессы деформирования различного характера: упругое деформирование, необратимые пластические деформации, смещения и разрушение пород с разрывом сплошности. Поэтому теоретические расчеты деформирования горных пород, прочности и устойчивости горных выработок и различных сооружений в породных массивах часто представляют собой труднорешаемую задачу. Натурные исследования отличаются значительной трудоемкостью, высокой стоимостью, требуют довольно длительного периода времени. Кроме того, в натуральных условиях обычно весьма ограничены возмож-

---

ности варьирования параметрами системы, технологией и последовательностью ведения горных работ, тогда как при моделировании можно проследить влияние основных параметров в самых широких пределах.

Таким образом, моделирование открывает такие возможности изучения процессов механики горных пород, которые не дают ни аналитические методы, ни наблюдения и измерения в натуральных условиях.

В то же время на моделях невозможно воспроизвести все детали моделируемых объектов. Поэтому моделирование позволяет вести изучение процессов с определенной степенью упрощения и схематизации натуральных объектов, что существенно облегчает интерпретацию результатов шахтных наблюдений и измерений, позволяя с большей степенью обобщения проследить и уточнить механизм процессов и максимально полно изучить влияние на эти процессы действующих факторов.

Обычно при решении задач механики горных пород методами моделирования испытанию подвергают серию моделей различных масштабов, используя при этом наиболее эффективный для решения конкретной задачи метод.

На сегодняшний день, учитывая сложность механических процессов, происходящих в толще пород при проведении выработки, методы моделирования продолжают оставаться необходимым звеном исследований.

Наиболее удобным для исследования проявлений горного давления является метод моделирования на эквивалентных материалах, предложенный Кузнецовым Г.Н. в 1936 г. [66].

Весьма ценным методом, позволяющим получать важные относительные количественные характеристики неоднородных напряженных состояний элементов сложных механических систем, является также оптический метод исследования напряженного состояния вокруг подземных выработок, начало которому было положено Левинсоном-Лессингом Ф. [67].

При одновременном действии сил тяжести и упругости механическому подобию удовлетворяет метод центробежного моделирования, разработанный и практически развитый Покровским Г.И. [68, 69] и др.

---

Среди других методов моделирования заслуживают внимания электроаналоговые, т.е. электрическое моделирование физических полей, а также различные комбинированные методы, например, сочетающие принцип метода эквивалентных материалов и принцип центробежного моделирования и др.

### **3.2. Теоретические основы моделирования методом эквивалентных материалов**

Наиболее освоенным и широко распространенным в настоящее время является уже отмечавшийся выше метод моделирования на эквивалентных материалах. Его применяют для изучения проявлений горного давления в очистных и подготовительных выработках при разработке месторождений полезных ископаемых и в подземных капитальных выработках; пучения пород, сдвижения массивов и других физических процессов, происходящих в массиве в связи с проведением в нем горных работ.

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.

Метод подробно описан в работах Кузнецова Г.Н. [66], Ильштейна А.М. [70], Шашенко А.Н.[71], рекомендации которых были использованы при выполнении настоящих исследований.

Сущность моделирования методом эквивалентных материалов [66, 72] заключается в замене естественных горных пород природы такими искусственными материалами в модели, основные показатели физико-механических свойств, которых удовлетворяют требованиям общих положений теории механического подобия и обеспечивают достижение близкой аналогии в проявлениях деформаций, разрушений и смещений пород, происходящих в натуре и в модели под воздействием сил тяжести самих материалов, слагающих модель, и соответствующих пригрузок.

---

Метод эквивалентных материалов основан на теории механического подобия Ньютона, который предполагает геометрическое, кинематическое и динамическое подобие.

Геометрическое подобие

$$\frac{l'_n}{l'_m} = \frac{l''_n}{l''_m} = \dots = \frac{l^i_n}{l^i_m} = C_l,$$

где  $l'_n, l'_m$  – линейные размеры модели и области в натуре.

Кинематическое подобие

$$\frac{\tau'_n}{\tau'_m} = \frac{\tau''_n}{\tau''_m} = \dots = \frac{\tau^i_n}{\tau^i_m} = C_\tau,$$

где  $\tau'_n, \tau'_m$  – промежуток времени в натуре и модели.

Динамическое подобие

$$\frac{m'_n}{m'_m} = \frac{m''_n}{m''_m} = \dots = \frac{m^i_n}{m^i_m} = C_m,$$

где  $m'_n, m'_m$  – масса частицы в натуре и модели.

При условии удовлетворения всех критериев подобия для эквивалентных материалов и обеспечении геометрического подобия природы и модели совпадение механических процессов может быть обеспечено при подобии граничных условий.

Модель достаточно полно отражает НДС массива в натуре. Соблюдение же граничных условий по торцам модели не представляется возможным, однако, в силу известного принципа Сен-Венана, можно утверждать, что роль торцов становится заведомо малой на расстояниях от них, равных высоте модели. Поэтому при обработке моделей замеры величин смещений кровли и давления на крепь являются достоверными только на ее средней части.

Моделирование на эквивалентных материалах позволяет с большой степенью детальности проследить механизм процессов в толще пород при движении забоя выработки, особенно процессов деформирования пород с разрывом сплошности, что обычно исключено при других методах моделирования. Вследствие этого метод эквивалентных материалов является наиболее дейст-

---

венным, благодаря чему он получил широкое применение при решении различных задач механики горных пород.

### **3.3. Выбор, методика приготовления и определения физико-механических свойств эквивалентного материала**

Выбор эквивалентного материала является одним из основных вопросов при решении конкретной задачи методом моделирования. Широкий диапазон физико-механических свойств горных пород весьма трудно воспроизвести на каком-либо одном типе эквивалентных материалов.

Поэтому подбор и испытания эквивалентных материалов для изготовления моделей были направлены в сторону изыскания удобообрабатываемых смесей, которые не обладали бы длительными сроками схватывания и твердения, а по своим физико-механическим свойствам обеспечивали подобие с горными породами. При этом безразмерные константы – коэффициент Пуассона и угол трения численно совпадали бы в эквивалентном материале и натуральных горных породах.

Помимо этого, принятый к испытанию конкретный эквивалентный материал должен, прежде всего, соответствовать общим требованиям:

- количественного подобия физико-механических характеристик материалов модели и природы;
- качественного соответствия характера деформирования и разрушения материалов модели и природы;
- технологического характера, обуславливающего возможность быстрого и качественного изготовления эквивалентных материалов;
- структурной прочностной и деформационной однородности эквивалентных материалов по всему объему модели;
- стабильности, т.е. неизменности во времени свойств готового материала и их независимости от условий окружающей среды.

Компоненты эквивалентных материалов должны быть доступными и дешевыми.

---

Исходными инертными материалами для моделирования могут служить кварцевый или речной песок, молотая слюда (мика), тальк, мел, глина и др. Кроме того, в некоторых случаях применяются дробь, чугунная стружка, резиновая крошка, древесные опилки. В качестве цементирующих веществ в основном используются гипс, цемент, клей силикатный, парафин, канифоль, технический вазелин.

Все применяемые связующие вещества разделяются на четыре группы:

1. Углеводороды нефтяного происхождения, обладающие пластичными или упругопластическими свойствами;
2. Неорганические вещества, являющиеся хрупкими;
3. Синтетические полимеры, имеющие хрупкие или упругопластические свойства;
4. Смолы естественного происхождения, относящиеся к хрупким веществам.

В качестве эквивалентного материала была принята песчано-парафинографитовая смесь с добавлением технического вазелина [73, 74].

Положительные качества такой смеси:

1. Однородность изготавливаемых слоев в модели по всей длине;
2. Удобство укатки слоев в модели, благодаря высоким пластическим свойствам смеси в горячем состоянии;
3. Готовность модели к испытанию сразу же после ее остывания, т.е. через 2...3 ч после укатки последнего слоя;
4. Неизменность и независимость от влияния влажности механических свойств материалов модели при любой продолжительности испытаний;
5. Удобство обработки и подготовки образцов к пробным испытаниям механических свойств;
6. Возможность повторного использования материала после испытаний в модели.

Наряду с этим они обладают недостатками:

---

– несколько занижены соотношения между пределами прочности на сжатие и пределами прочности на изгиб и растяжение;

– занижены значения модулей упругости;

– несколько завышены пластические свойства.

Приготовление эквивалентного материала выполнялось следующим образом.

Речной кварцевый песок тщательно просеивается и промывается для ликвидации посторонних примесей. Затем он рассыпается тонким слоем (1...2 см) на металлическом листе и в условиях лаборатории производится его сушка в течение 5 дней. Каждые сутки песок несколько раз перемешивают с целью равномерного просыхания.

Сухой песок смешивают с соответствующим количеством измельченного парафина, порошкообразного графита и солидола. Полученную смесь тщательно перемешивают, укладывают в металлическую емкость с плотной крышкой и помещают в водяную баню, где смесь прогревается в течение 2...3 часов. За это время ее следует 3...5 раз дополнительно перемешать с целью равномерного прогрева.

Так как с помощью вышеуказанной смеси полного подобия всех физико-механических характеристик эквивалентного материала и горных пород природы достигнуть трудно, то допускаем сокращение числа соблюдаемых условий подобия. В качестве определяющих характеристик прочности используем совокупность значений временного сопротивления пород на сжатие  $R_{сж}$  и растяжение  $R_p$ .

Для соблюдения условий подобия выполняем следующие равенства:

– для внешних сил:

$$P_m = \frac{\gamma_m l_m^3}{\gamma_n l_n^3} P_n, \quad (3.1)$$

где  $\gamma_n, \gamma_m$  – объемный вес материала природы и модели;

– для процессов разрушения:

$$R_{сж.м} = \frac{l_m \gamma_m}{l_n \gamma_n} R_{сж.н} ;$$

$$R_{р.м} = \frac{l_m \gamma_m}{l_n \gamma_n} R_{р.н} .$$

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

$$E_m = \frac{\gamma_m l_m}{\gamma_n l_n} E_n ;$$

$$\mu_m = \mu_n ,$$

где  $E$  – модуль упругости;

$\mu$  – коэффициент Пуассона.

Для соблюдения подобия механических процессов в массиве горных пород в области пластических деформаций во всем диапазоне напряжений от начальных до разрушающих, без учета влияния времени, выполняем следующее условие:

$$\frac{\varepsilon_{п.м}}{(\varepsilon_y + \varepsilon_n)_m} = \frac{\varepsilon_{п.н}}{(\varepsilon_y + \varepsilon_n)_n} .$$

При этом

$$(\varepsilon_y + \varepsilon_n) = f(\sigma),$$

где  $\varepsilon_n$  и  $\varepsilon_y$  – пластическая и упругая относительные деформации.

Определение предела прочности при сжатии, модуля упругости и коэффициента Пуассона производили на цилиндрических образцах сечением 21,1 см<sup>2</sup> и высотой 74 мм (рис. 3.1) с помощью малогабаритного пресса (рис. 3.2), изготовленного в лаборатории моделирования и конструкционных материалов кафедры строительных геотехнологий и конструкций Национального горного университета. Указанный прибор позволяет регистрировать нагрузку и соответствующие ей деформации на образцах.

Цилиндрические образцы изготовляли в металлических разъемных гильзах. Стандартное уплотнение материала осуществляли с помощью лабораторного копра. После уплотнения и остывания образец вынимали из формы и под-

---

вергали испытанию. Объемный вес определялся обычным методом [75]: путем измерения объема точной навески материала в мерном стеклянном цилиндре. Уплотнялся материал постукиванием в течение 5 минут. Методика проведения испытаний подробно описана в работах [74, 76, 77].

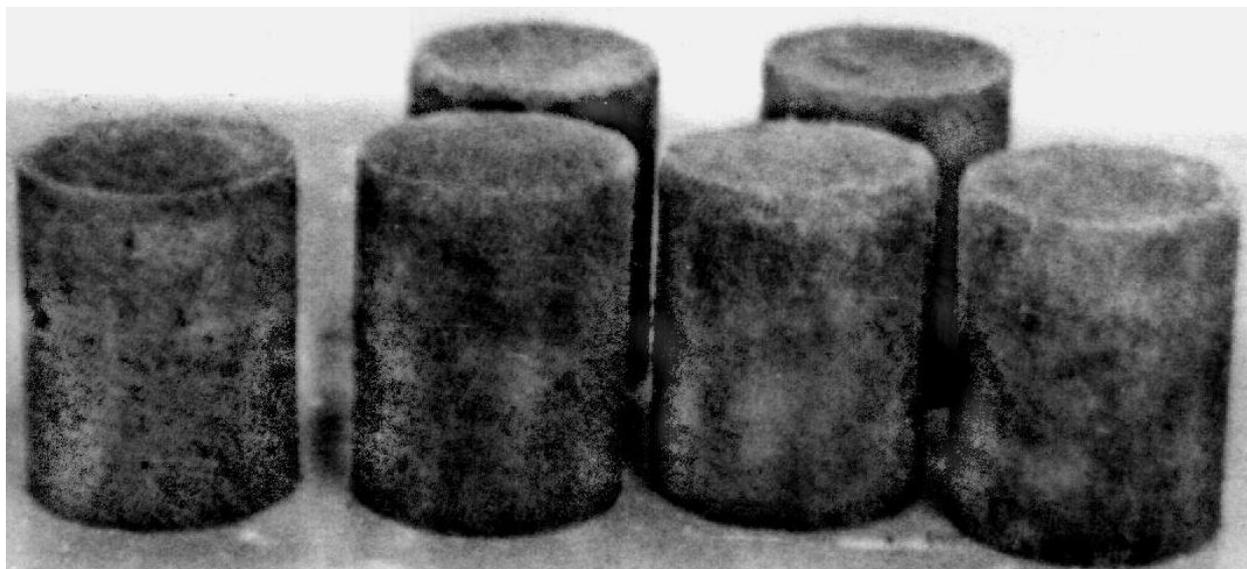


Рис. 3.1. Общий вид образцов из эквивалентного материала до начала испытаний

В ходе исследований было испытано 10 различных составов эквивалентного материала. Для каждого состава было проведено 6 серий испытаний. В результате определены 4 состава, которые по своим физико-механическим параметрам наиболее полно воспроизводят свойства горных пород шахт ООО “ДТЭК Добропольеуголь” (табл. 2.2). В дальнейших лабораторных исследованиях будут применяться следующие смеси: состав №1 (песок – 95,9%, парафин – 2,9%, графит – 0,7%, солидол – 0,5% по массе) соответствует аргиллитам, состав №2 (94,8%:4%:0,7%:0,5%) – алевролитам, состав №3 (92,3%:6,4%:0,8%:0,5%) – песчаникам, состав №4 (86,6%:12%:0,9%:0,5%) – известнякам.

Результаты испытаний приведены в табл. 3.1...3.4. Графики деформирования эквивалентного материала приведены на рис. 3.3.

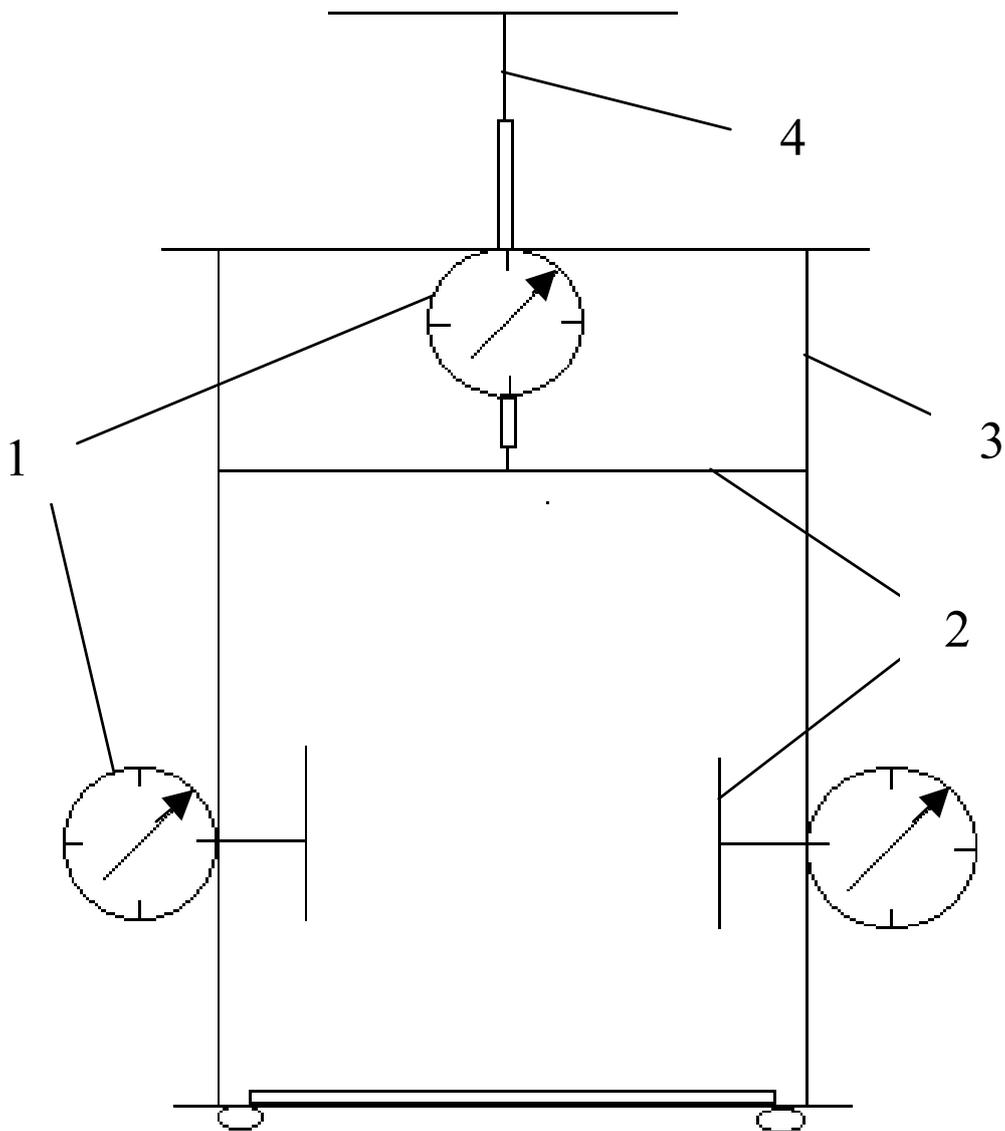


Рис. 3.2. Принципиальная схема малогабаритного прессы: 1– индикаторы часового типа (модель ИЧ 10 МН); 2– рабочие пластины; 3– корпус; 4– шток

Таблица 3.1

Основные физико-механические параметры эквивалентного материала  
состав №1

Характеристика материала	Натуры	Модели
1. Предел прочности на одноосное сжатие, МПа	30	0,2...0,22
2. Модуль упругости, МПа	$0,8 \cdot 10^4$	$0,0115 \cdot 10^4$
3. Объемная масса, т/м <sup>3</sup>	2,5	1,6...2,0
4. Коэффициент Пуассона	0,23	0,23

Таблица 3.2

Основные физико-механические параметры эквивалентного материала  
состав №2

Характеристика материала	Натуры	Модели
1. Предел прочности на одноосное сжатие, МПа	40	0,23...0,28
2. Модуль упругости, МПа	$0,9 \cdot 10^4$	$0,013 \cdot 10^4$
3. Объемная масса, т/м <sup>3</sup>	2,5	1,6...2,0
4. Коэффициент Пуассона	0,23	0,23

Таблица 3.3

Основные физико-механические параметры эквивалентного материала  
состав №3

Характеристика материала	Натуры	Модели
1. Предел прочности на одноосное сжатие, МПа	65	0,42...0,46
2. Модуль упругости, МПа	$1,5 \cdot 10^4$	$0,0207 \cdot 10^4$
3. Объемная масса, т/м <sup>3</sup>	2,6	1,6...2,0
4. Коэффициент Пуассона	0,21	0,21

Таблица 3.4

Основные физико-механические параметры эквивалентного материала  
состав №4

Характеристика материала	Натуры	Модели
1. Предел прочности на одноосное сжатие, МПа	100	0,6...0,7
2. Модуль упругости, МПа	$3,22 \cdot 10^4$	$0,0421 \cdot 10^4$
3. Объемная масса, т/м <sup>3</sup>	2,6	1,6...2,0
4. Коэффициент Пуассона	0,21	0,21

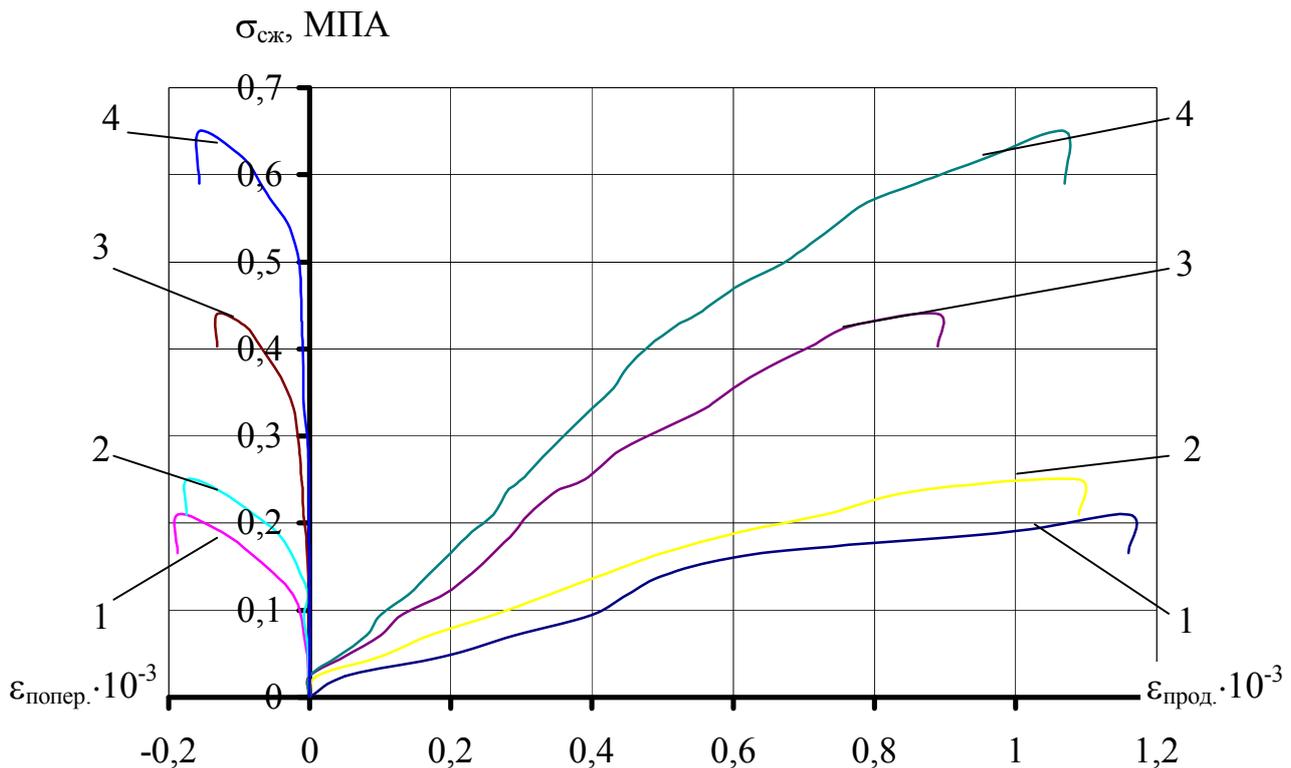


Рис. 3.3. Зависимости деформаций эквивалентного материала от напряжений при различных составах смеси (средние значения): 1 – состав №1; 2 – состав №2; 3 – состав №3; 4 – состав №4

### 3.4. Методика формирования моделей и их нагружения

Для выполнения работ по моделированию изготовлен специальный стенд (рис. 3.4), представляющий собой плоскую камеру с передней стенкой из оргстекла и систему рычажных домкратов. Масштаб моделирования принят 1:50. Внутренняя поверхность рабочей камеры стенда перед формированием модели тщательно протирается графитовым порошком для уменьшения сил трения на контакте “эквивалентный материал – стекло”. Затем привинчивается передняя крышка стенда, изготовленная из прозрачного оргстекла толщиной 30 мм. К верхней кромке крышки крепятся ребра жесткости для предотвращения выпучивания оргстекла.

Формируется модель слоями толщиной 5...10 мм. Для создания “монолитности” исследуемой модели закатка эквивалентного материала производится следующим образом: после укатки первого слоя поверхность его разграбли-

---

вается, чтобы создать шероховатость для лучшей связи с последующим слоем, и сразу же закатывается новый слой, образующий общий монолитный слой с предыдущим. Уплотнение каждого слоя происходит вследствие статического приложения груза массой 20 кг.



Рис. 3.4. Специальный стенд для плоского моделирования на эквивалентных материалах

После того, как модель породного массива сформирована, сверху прикладывается нагрузка интенсивностью 0,65 кН. В таком состоянии модель выдерживается в течение одного часа. Затем нагрузка снимается, убирается передняя стенка стенда. Далее на поверхность модели наносится с помощью шнура и мела прямоугольная мерная сетка с размерами ячейки 2x2 см в центре модели “проходится” выработка. Высота и ширина ее составляла, в пересчете на натуру, 3,5 и 5 м соответственно. После этого в выработке устанавливали различное количество анкеров с геометрическими параметрами: длина анкера 20...70 мм, диаметр 0,5 мм, опорная плита 4x4 мм с соответствующими размерами в натуре 1,0...3,5 м, 25 мм, 200x200 мм. Силовые характеристики прибо-

---

ров, имитирующие работу анкерной крепи в модели, удовлетворяют условию (3.1).

При испытаниях была принята технология установки анкеров, близкая к натурной, то есть скважина под анкер пробуривалась на модели после ее изготовления, в скважину шприцем вводили раствор, воспроизводящий действие закрепляющего раствора, а далее вставляли стержень, имитирующий анкер. В качестве раствора, закрепляющего анкер в скважине, использовали силикатный клей, который был подобран таким образом, что усилие выдергивания анкера в модели соответствовало в пересчете по масштабу модели усилию выдергивания в натуре и составляло 180...240 грамм. Степень скрепления эквивалентного материала и усилие выдергивания определялись на блоках, вырезанных из основной модели.

Затем на стенде закрепляется передняя стенка из оргстекла, ребра жесткости и с помощью рычажных домкратов моделируемый массив загружается. Нагрузка задается с интервалом в 5 кг. Возникающие при этом деформации мерной сетки регистрируются фотоаппаратом, установленным в одном положении на время всего эксперимента. Качественная картина поведения массива строилась на основании изучения изменений фиксированного квадрата мерной сетки на фотоснимках.

### **3.5. Проведение экспериментов и анализ полученных результатов**

Целью первого этапа моделирования было определение достаточной плотности установки анкеров для выработок с поперечным сечением  $13,7 \text{ м}^2$ . Исследования выполнялись на моделях из эквивалентных материалов для однородной среды. В качестве эквивалентного материала была принята песчано-парафино-графитовая смесь с добавлением солидола в соотношении 96,8:2:0,7:0,5. Такой состав наиболее полно соответствует слабым породам в реальных условиях [71].

Для исследования определены 6 основных ситуаций размещения анкерной крепи в выработке. Минимально необходимое количество испытаний одного варианта определялось по формуле:

$$n = t_{\alpha}^2 \left( \frac{\eta}{q} \right)^2, \quad (3.2)$$

где  $t_{\alpha}$  – коэффициент Стьюдента, принимаемый по соответствующей таблице [78];  $\eta$  – коэффициент вариации, %;  $q$  – допустимое отклонение, %.

Допустимое отклонение было принято 10% (вероятность – 0,9), тогда  $t_{\alpha}=1,64$ . По формуле (3.2) достаточное количество испытаний для каждого варианта составит:

$$n = 1,64^2 \left( \frac{0,1}{0,1} \right)^2 = 2,69.$$

Таким образом, учитывая довольно высокую однородность эквивалентного материала, испытания каждого из рассматриваемых вариантов должно было производиться не менее чем 3 раза. Фактически, с учетом отладки процесса моделирования и числа продублированных вариантов, было испытано 18 моделей.

Графики зависимостей смещений кровли и почвы от различных факторов приведены на рис. 3.5...3.7.

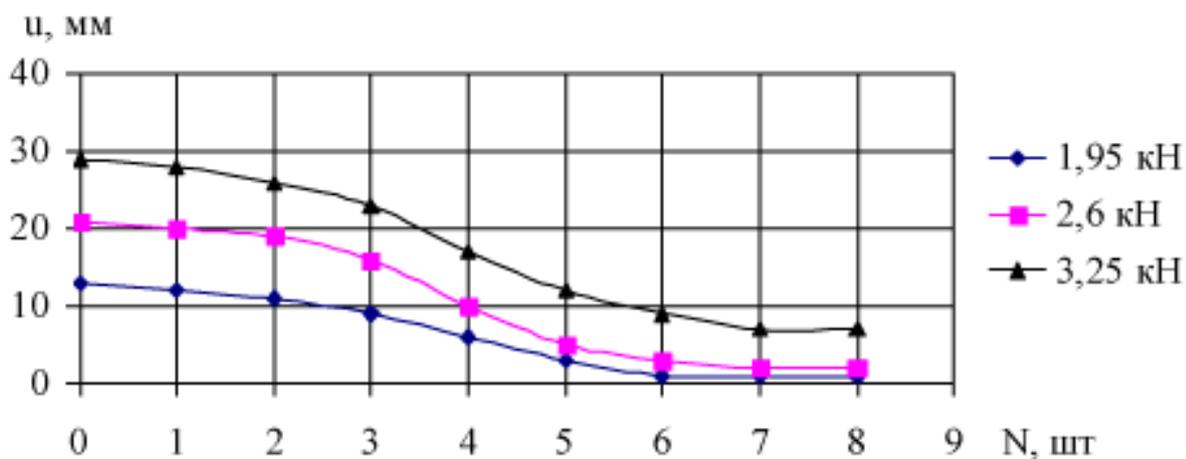


Рис. 3.5. Зависимость смещения кровли выработки от количества установленных анкеров при различных нагрузках

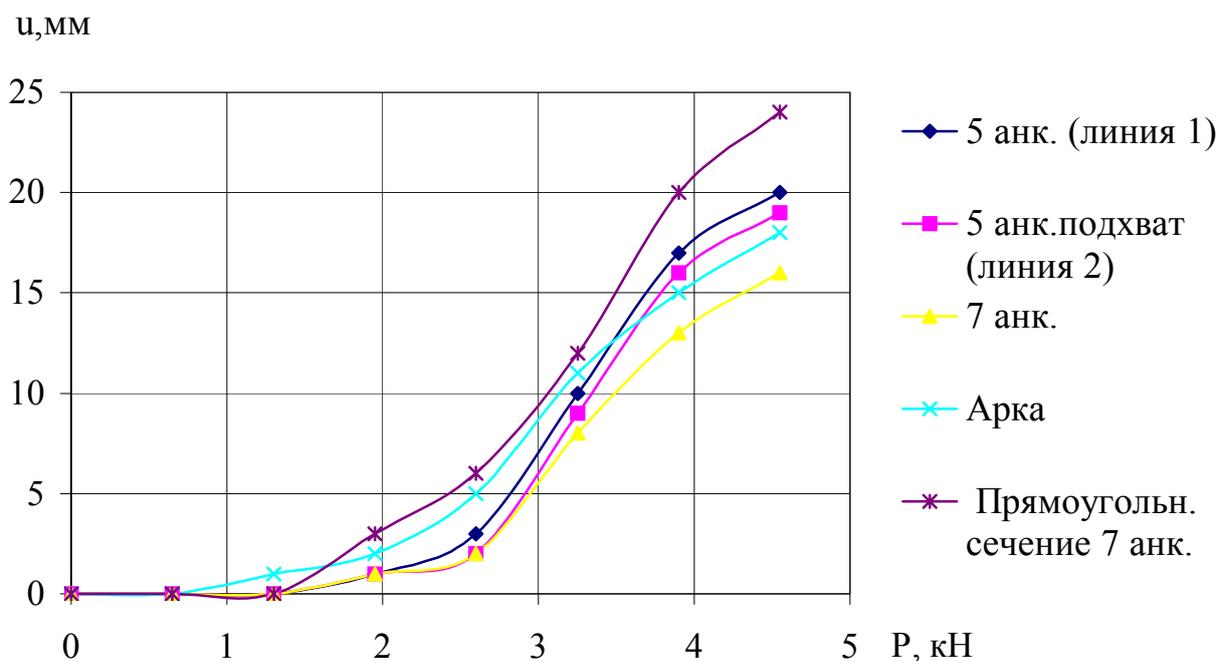


Рис. 3.6. Зависимость смещения кровли выработки от величины нагружения при различных видах крепи и формах поперечного сечения

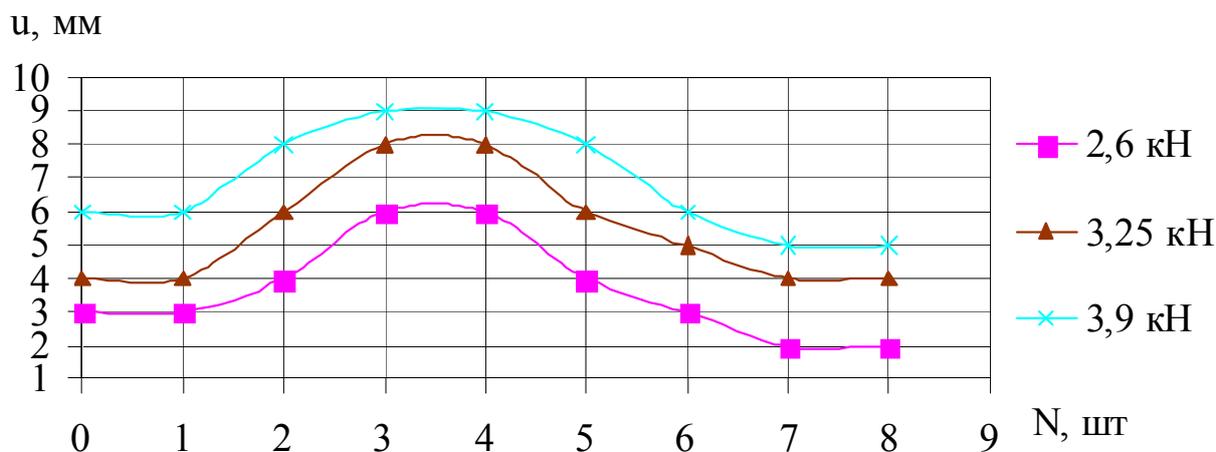


Рис. 3.7. Зависимость смещения почвы выработки от количества установленных анкеров при различных нагрузках

Анализ результатов моделирования позволил сделать следующие выводы:

- достаточная плотность установки анкеров находится в пределах 0,55...0,8 на 1 м<sup>2</sup> (рис. 3.5), дальнейшее увеличение количества анкеров существенно не влияет на процессы происходящие в массиве;

---

– величина смещений кровли выработки при креплении анкерной крепью (7 анк.) меньше, чем при арочной крепи (рис. 3.6);

– при креплении анкерной крепью важную роль играют вид и конструкция поддерживающих элементов – подхватов и межрядных ограждений, так при установке подхватов опускания кровли уменьшаются (рис. 3.6, линии 1 и 2);

– наибольшее проявление пучения в выработке наблюдается, когда закреплена только кровля (3...4 анкера), при незакрепленной выработке и установке анкеров в стенках величина поднятия почвы уменьшается (рис. 3.7);

– при креплении выработки прямоугольного поперечного сечения анкерной крепью деформации почвы незначительные;

– на всех моделях, за исключением незакрепленной выработки и с установкой 1 анкера в кровле, наблюдалось резкое поднятие почвы на глубину до 20 мм при нагружении 2,6...3,25 кН.

На втором этапе моделировалась слоистая среда, которая воспроизводила горно-геологические условия пласта  $l_3$  (рис. 2.1) шахты “Алмазная” ООО “ДТЭК Добропольеуголь”. Целью второго этапа было определение рациональной длины анкеров и плотности их установки в выработках с поперечным сечением в свету  $13,7 \text{ м}^2$ , при неоднородном породном массиве, а также изучение поведения приконтурного массива горной выработки, закрепленной анкерной крепью. Исследования проводились для наклонных выработок.

В качестве эквивалентного материала были взяты смеси, определенные в п. 3.3, а изготовление модели и подготовка к испытаниям выполнялись так же, как и в п. 3.4, но при закладке эквивалентного материала слои с различными физико-механическими свойствами, укатывались отдельно друг от друга с интервалом не менее 15 минут и разделялись тонким слоем мела, что также способствовало лучшему визуальному восприятию неоднородности массива.

Для исследования было определено 14 основных ситуаций размещения анкерной крепи в выработке. С учетом отладки процесса моделирования и чис-

ла продублированных в соответствии с формулой (3.2) вариантов, испытано 42 модели.

По результатам исследования построены зависимости изменения поперечного сечения выработки от количества анкеров рис. 3.8 и их длины рис. 3.9.

Общий вид моделей при начальной и конечной нагрузках приведен на рис. 3.10...3.14.

Количественная оценка величины деформаций массива производится путем измерения длины диагонали фиксированного квадрата мерной сетки в начале  $l_{i-1}$  (рис. 3.15, а) и конце  $l_i$  (рис. 3.15, б)  $i$ -го этапа нагружения. Исходные квадраты выделяются в кровле и боках выработки.

Графическая зависимость, отражающая характер деформирования породного массива в окрестности выработки, строится в системе координат “ $\varepsilon$ – $P$ ”, где  $\varepsilon = \frac{l_i - l_{i-1}}{l_{i-1}}$ ,  $P$  – нагрузка на конце рычага нагружающего устройства: величина, пропорциональная напряжениям, действующим в моделируемом массиве.

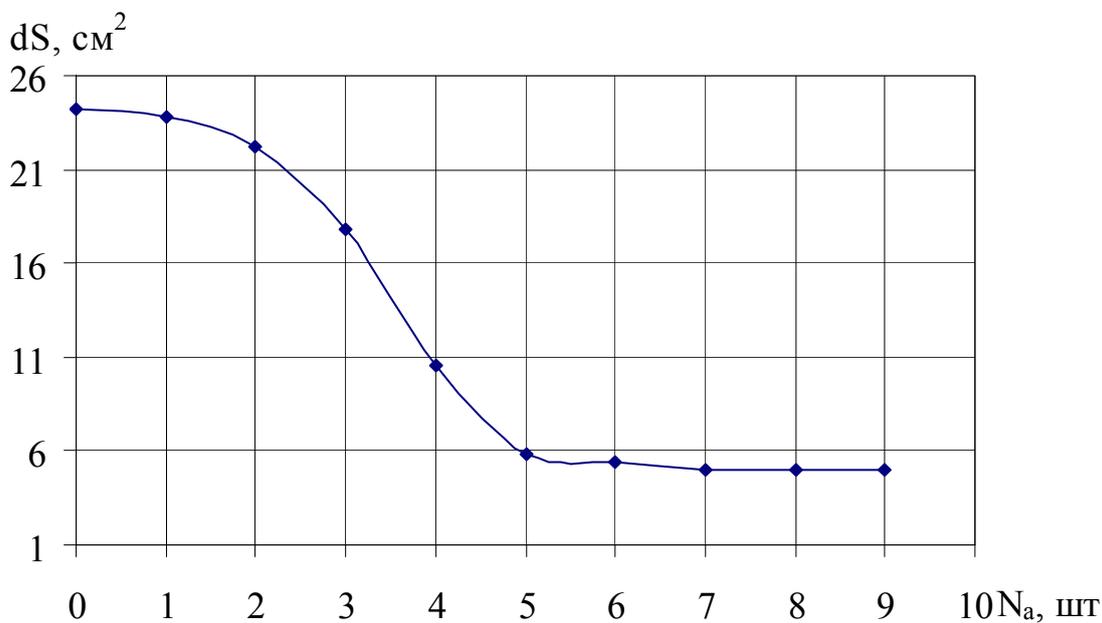


Рис. 3.8. Изменение площади поперечного сечения выработки в зависимости от количества установленных анкеров

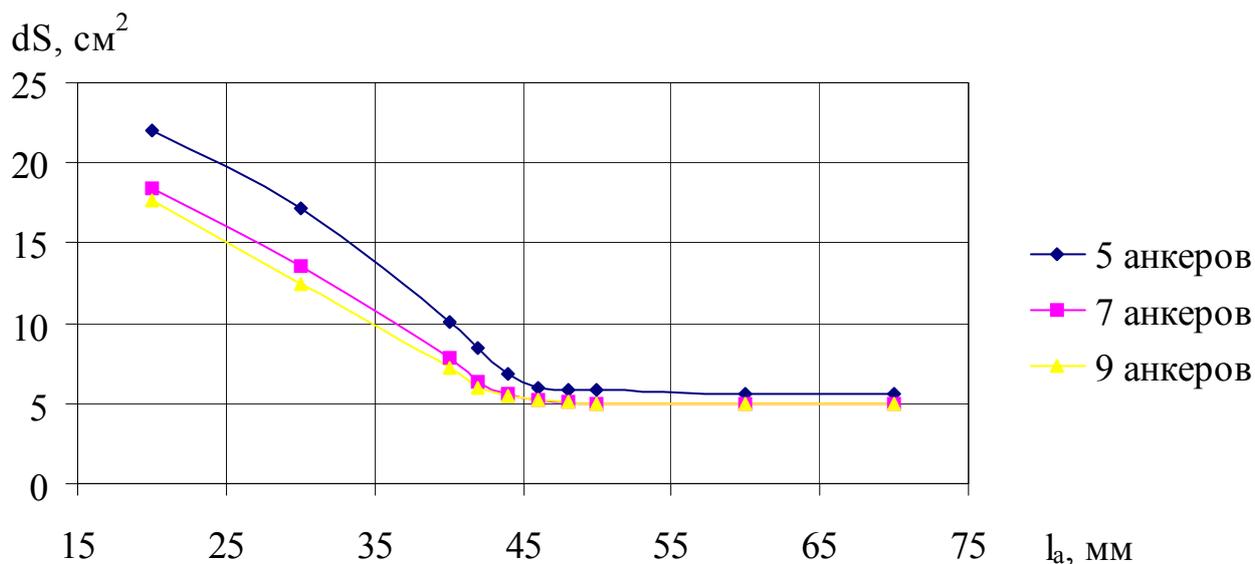


Рис. 3.9. Изменение площади поперечного сечения выработки в зависимости от длины анкера

На рис. 3.16...3.19 показаны характеры деформирования приконтурного массива в кровле и боках выработки арочного сечения (незакрепленной, закрепленной анкерной и арочной крепью) в зависимости от величины внешней нагрузки.

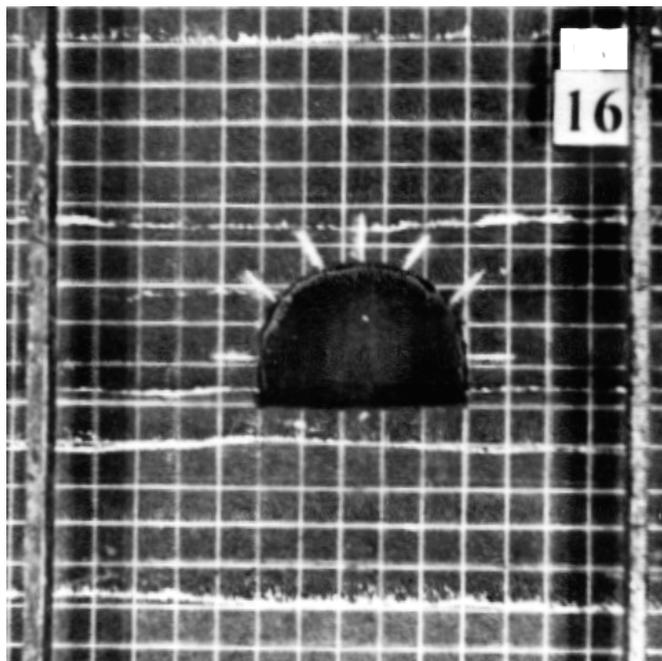
Анализ результатов моделирования позволил сделать следующие выводы:

- достаточная плотность установки анкеров находится в пределах 0,83...1,0 на 1 м<sup>2</sup> (рис. 3.8), дальнейшее увеличение количества анкеров существенно не влияет на процессы, происходящие в массиве, а только увеличивает расход металла и время возведения крепи;

- рациональная длина анкера находится в пределах 44...50 мм (2,2...2,5 м) (рис. 3.9), что подтверждается натурными экспериментами;

- при длине анкера 20 мм (1 м) вокруг выработки образуется трещина, практически повторяющая контур выработки (рис. 3.11, б), на глубине 15...25 мм (0,75...1,25 м);

a)



б)

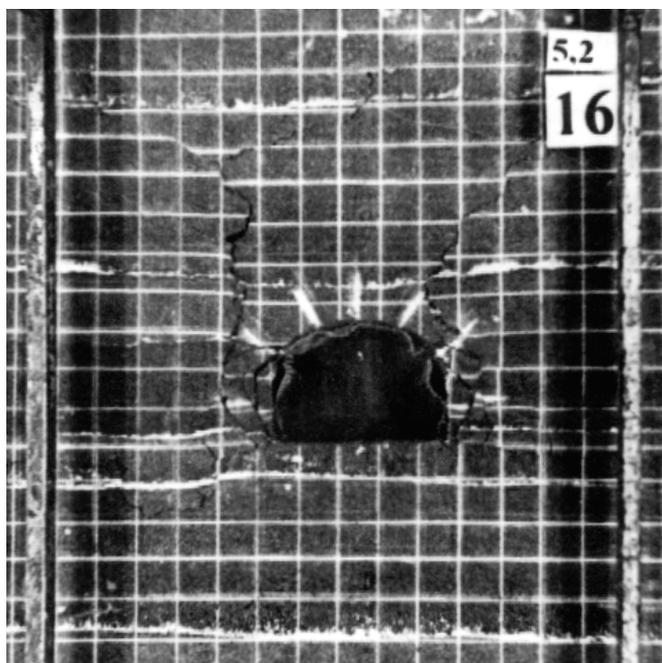
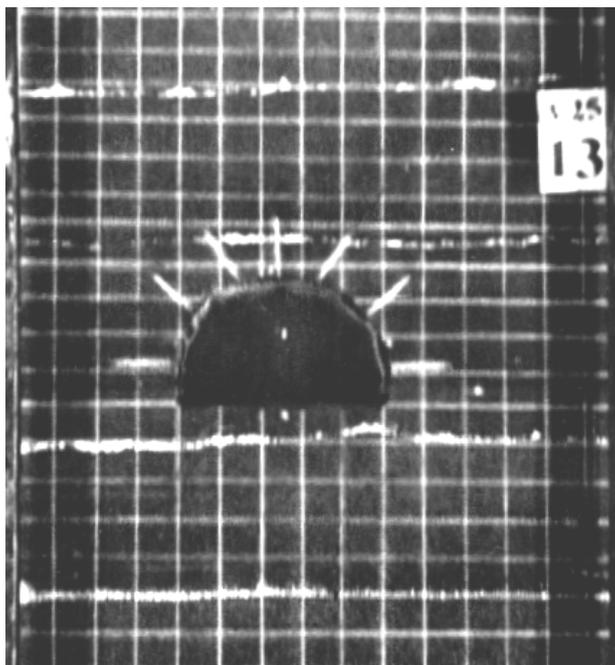


Рис. 3.10. Начало (а) и конец (б) нагружения модели при количестве анкеров 7 шт и их длине 20 мм (1 м)

a)



б)

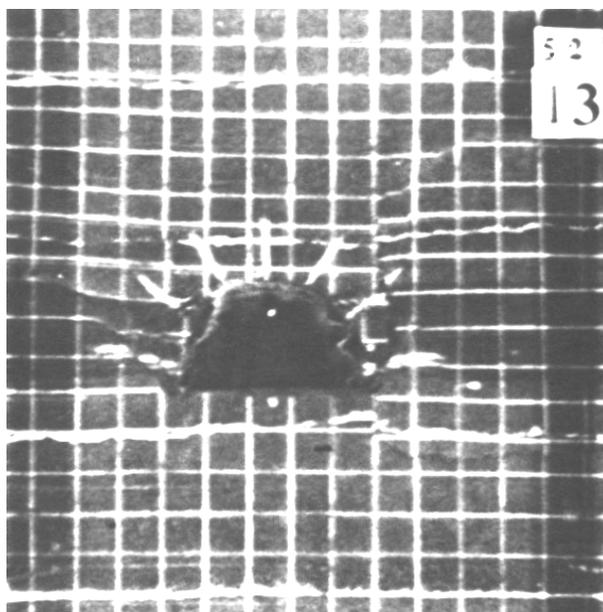
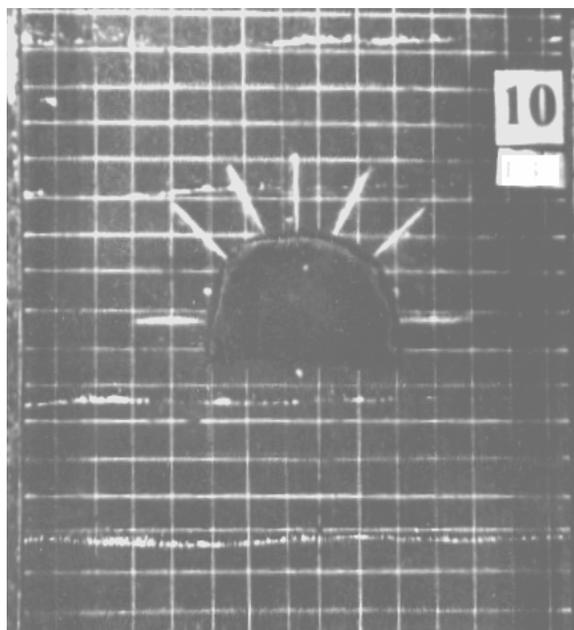


Рис. 3.11. Начало (а) и конец (б) нагружения модели при количестве анкеров 7 шт и их длине 30 мм (1,5 м)

a)



б)

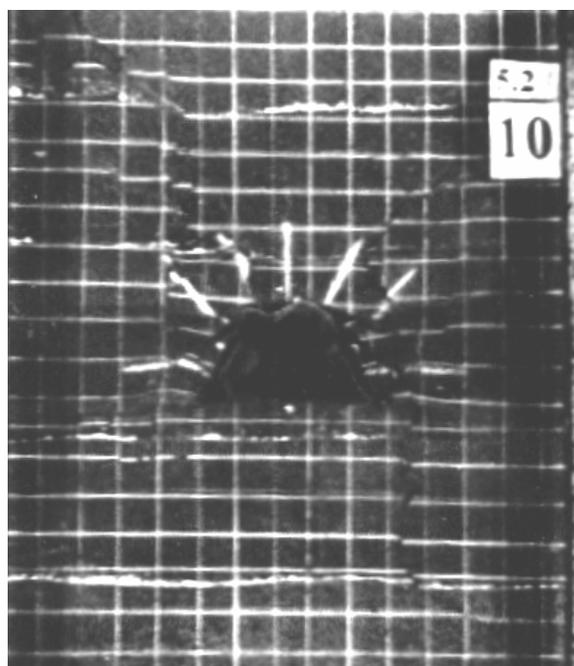
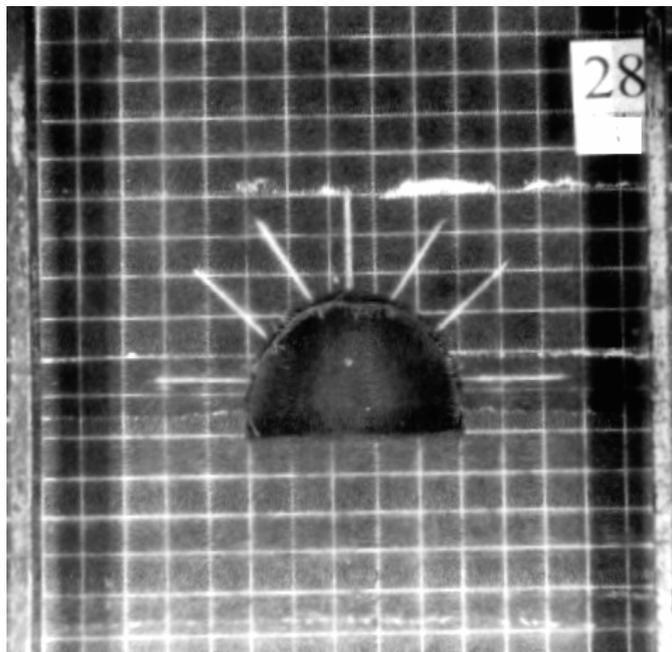


Рис. 3.12. Начало (а) и конец (б) нагружения модели при количестве анкеров 7 шт и их длине 40 мм (2 м)

a)



б)

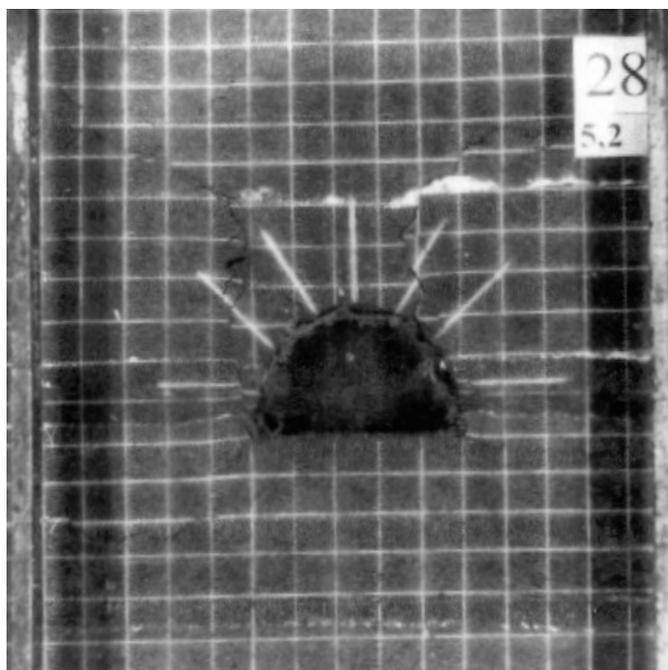
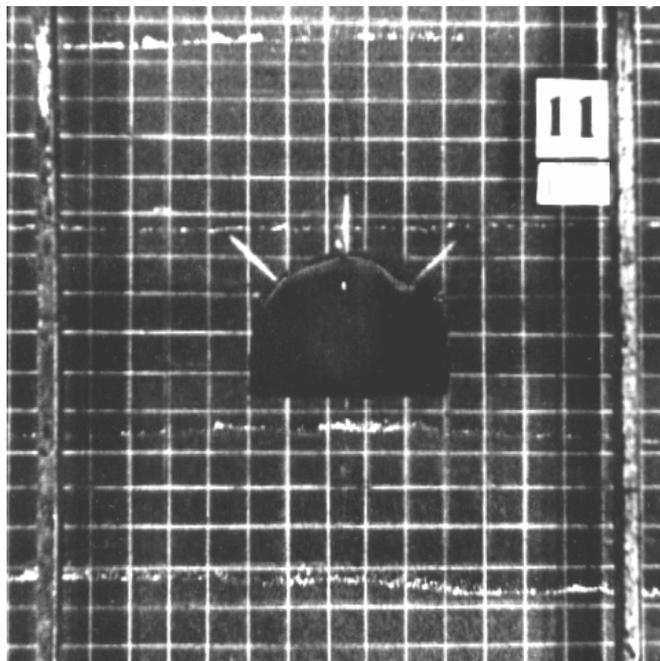


Рис. 3.13. Начало (а) и конец (б) нагружения модели при количестве анкеров 7 шт и их длине 50 мм (2,5 м)

a)



б)

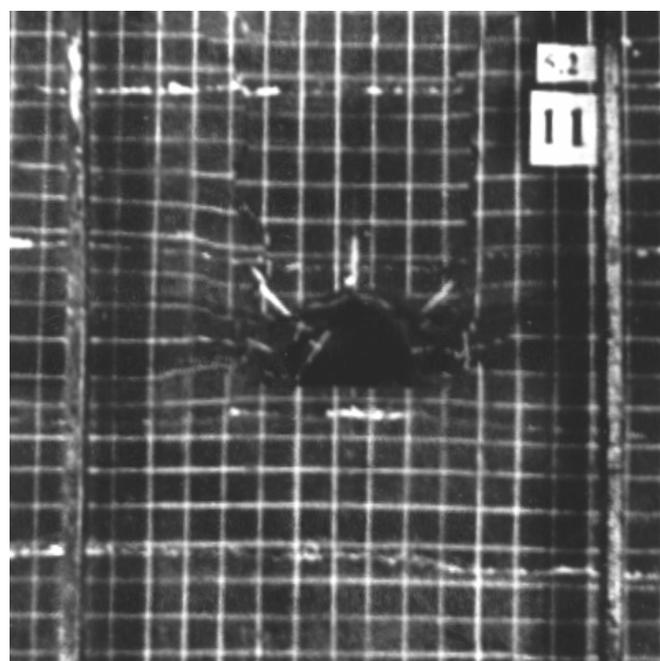
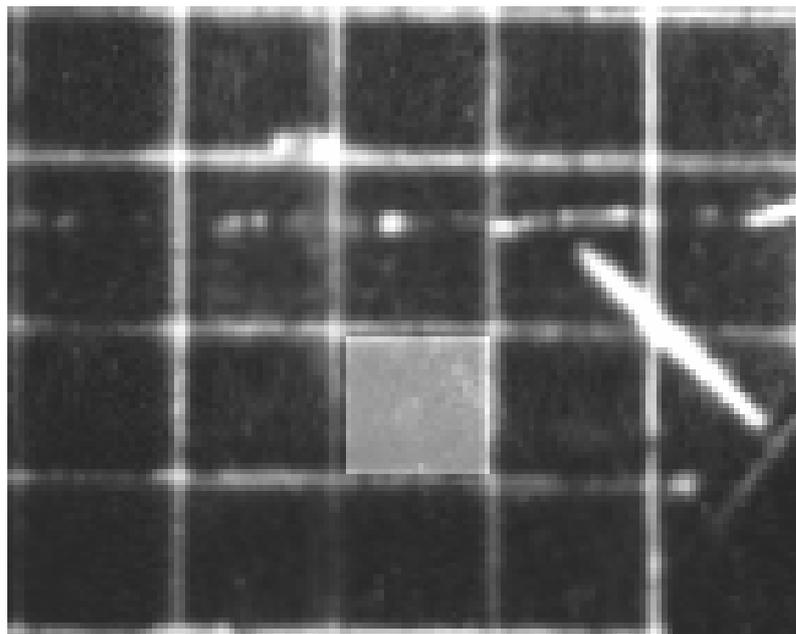


Рис. 3.14. Начало (а) и конец (б) нагружения модели при количестве анкеров 3 шт и их длине 30 мм (1,5 м)

---

a)



б)

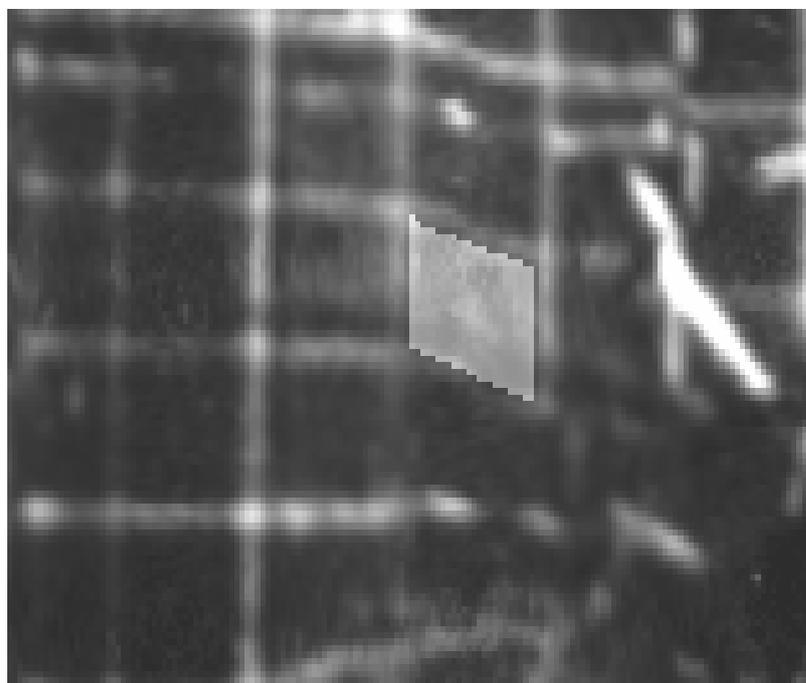


Рис. 3.15. Квадрат мерной сетки в начале (а) и конце (б) нагружения

---

– при длине анкера менее 40 мм (2 м) появляются трещины вокруг выработки на расстоянии, превышающем длину анкера, а также образуются плоскости скольжения, направленные от почвы выработки в глубь массива под углами  $45...60^0$  (рис. 3.12, б; 3.13, б; 3.14, б), что приводит к резкому снижению несущей способности крепи;

– уменьшение длины анкера приводит к увеличению зоны отжима в боках выработки, максимальная зона наблюдается при  $l_a = 20$  мм (1 м);

– на всех моделях, при креплении выработки, в кровле над ней образовывались трещины, формирующие блок в виде перевернутой трапеции; при  $l_a = 20$  мм (1 м) трещина появлялась при нагрузке 4,55 кН, при  $l_a = 30...70$  мм (1,5...3,5 м) – 3,9 кН;

– в случае незакрепленной выработки трещина в кровле не образовывалась, но при определенных нагрузках непосредственная кровля обрушалась (рис. 3.16), а основная сильно прогибалась, оставаясь неразрушенной;

– независимо от вида крепи характер разрушений приконтурного массива протекает приблизительно одинаково, подобно тому, как это происходит в случае незакрепленной выработки;

– при достижении нагрузки  $P = 4,55$  кН на моделях с анкерной крепью (рис. 3.17, 3.18) наблюдается снижение интенсивности роста деформаций в боках выработки.

С целью установления параметров предельного состояния выработок, зависящих от вида установленной крепи, модели после окончания основного этапа исследований дополнительно нагружали и определяли давление, соответствующее моменту появления вывалов со стороны кровли и боков выработки. В результате проведенных дополнительных испытаний было установлено, что незакрепленная выработка разрушалась при  $\gamma H / R_{сж} = 1,04$ , закрепленная:

арочной крепью  $\gamma H / R_{сж} = 1,33$ , анкерной  $N_a = 7$  шт  $l_a = 2,5$  м –  $\gamma H / R_{сж} = 1,53$  и анкерной

$N_a = 7$  шт  $l_a = 1$  м –  $\gamma H / R_{сж} = 1,38$ .

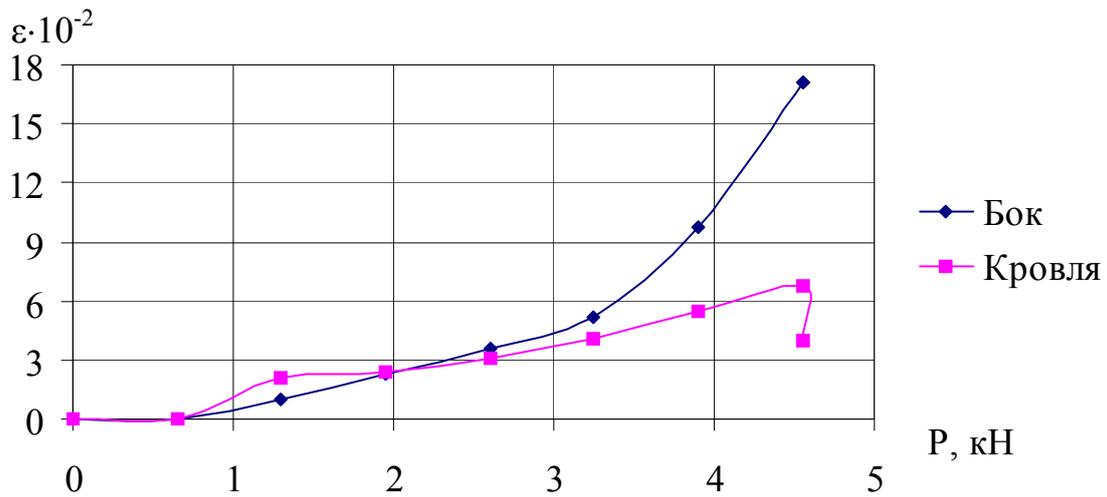


Рис. 3.16. Характер деформирования приконтурного массива модели с незакрепленной выработкой

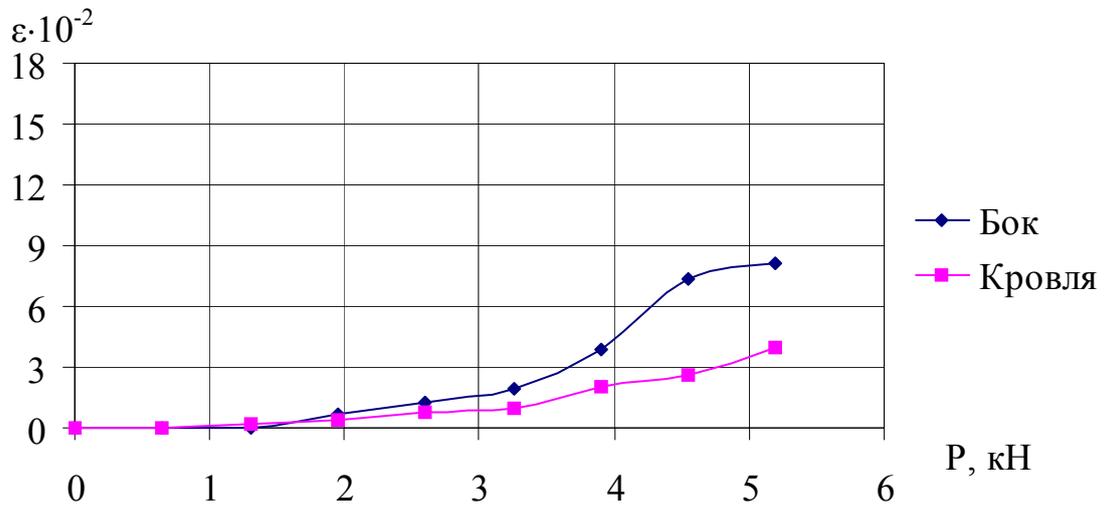


Рис. 3.17. Характер деформирования приконтурного массива модели с анкерной крепью ( $N_a = 7$  шт,  $l_a = 50$  мм (2,5 м))

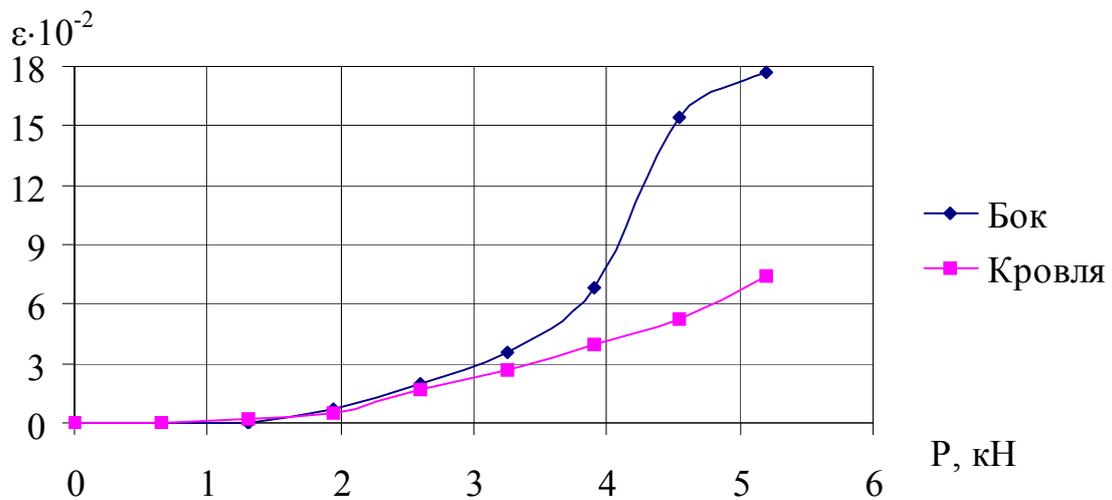


Рис. 3.18. Характер деформирования приконтурного массива модели с анкерной крепью ( $N_a = 7$  шт,  $l_a = 20$  мм (1 м))

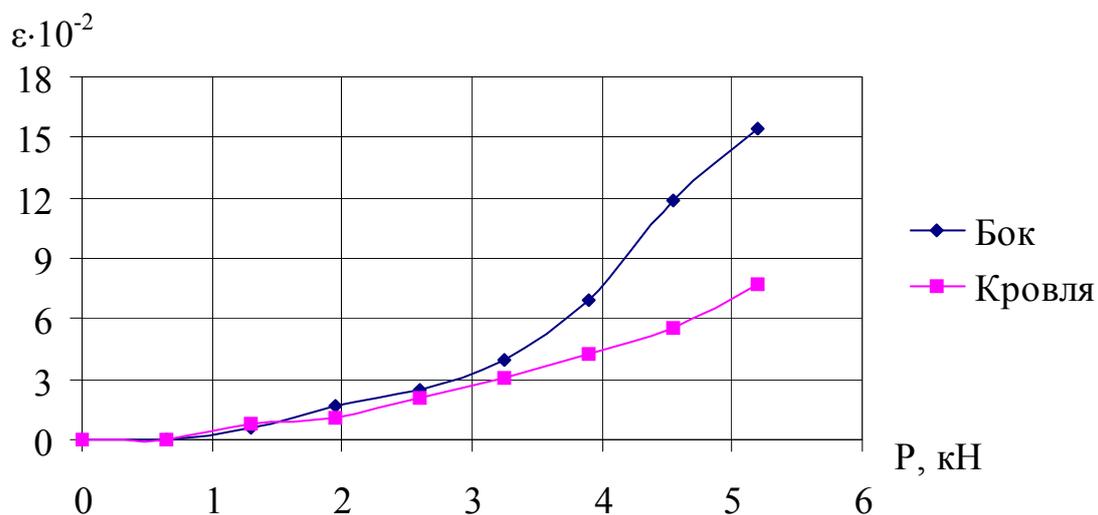


Рис. 3.19. Характер деформирования приконтурного массива модели с арочной крепью

Таким образом, в результате проведенных лабораторных испытаний по подбору эквивалентных материалов были выбраны оптимальные составы для изготовления неоднородных моделей, по своим свойствам наиболее полно отвечающие горно-геологическим условиям шахт ООО «ДТЭК Добропольеуголь». При моделировании на однородных моделях определена достаточная плотность установки анкерной крепи, находящаяся в пределах  $0,55 \dots 0,8$  ш/м<sup>2</sup>, и доказано, что установка подхватов существенно уменьшает опускание кровли. При исследовании неоднородных моделей, воспроизводящих горно-геологические условия шахты «Алмазная» ООО «ДТЭК Добропольеуголь», установлено, что достаточная плотность установки анкерной крепи находится в пределах  $0,83 \dots 1,0$  ш/м<sup>2</sup>, а рациональная длина анкера –  $2,2 \dots 2,5$  м.

---

## ГЛАВА 4

# АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОРОДНОГО МАССИВА В ОКРЕСТНОСТИ ВЫРАБОТКИ С АНКЕРНОЙ КРЕПЬЮ

Для решения задач, поставленных в данной работе, помимо экспериментальных методов исследования использовались и аналитические методы. Они обладают наибольшей общностью при описании механических процессов в породных массивах и конструкциях, так как свободны от влияния частных факторов, отражающих специфику горнотехнической ситуации. Аналитические методы позволили исследовать механические процессы в более широком диапазоне, т.е. дали возможность не только качественно, но и количественно прогнозировать проявление горного давления.

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.

### 4.1. Выбор метода исследований

К настоящему времени в отечественной и зарубежной технической литературе опубликовано большое число работ [63, 79-86], посвященных определению основных параметров анкерной крепи. Однако все эти исследования не привели к созданию общепризнанной теории анкерной крепи и разработке адекватного расчета ее основных параметров.

Во многих случаях авторы методов расчета анкерной крепи при выборе расчетной схемы прибегают к различным допущениям, что неизбежно ведет к схематизации сложного явления взаимодействия анкерной крепи с массивом горных пород. Большинство существующих расчетных методов анкерной крепи исходит из предположений, объясняющих работу анкерной крепи подвешива-

---

нием слабых пород к более прочным породам (предложения проф. Семевского В.Н., Махно Е.Я. и др.) или из предположения о формировании над выработкой “породного свода” (Гвоздев, Зотов и др.).

Третья группа методов рассматривает работу анкеров в упругопластической среде (Топалкаров А.Т., Руппенейт К.В., Широков А.П., Сажин В.С.).

Последняя группа наиболее правильно объясняет процесс взаимодействия крепи с массивом горных пород. Согласно этим гипотезам, вокруг выработки образуется область неупругих деформаций, развитие которой происходит в условиях совместной работы породы и крепи.

В этой связи выполним краткий обзор существующих методов исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) породного массива с целью выбора наиболее эффективного из них для оценки НДС массива вокруг выработок, закрепленных анкерной крепью.

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.

Обычно для сокращения объема вычислений исследователи прибегают к упрощению расчетной схемы путем введения различных допущений, что позволяет упростить исследования, однако, в то же время значительно удаляет получаемые результаты от реальных.

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.

В литературе можно найти достаточно представительные обзоры работ, связанных с применением классических механических моделей к задачам геомеханики [87-89 и др.].

---

Впервые в качестве механической модели массива горных пород была использована упругая сплошная среда в работах Леона А., Динника А.Н., Савина Г.Н., Лехницкого С.Г. и др. [90, 91 и др.]. Впоследствии эти допущения были использованы при разработке модели взаимодействия породного массива с крепью выработки. Так, Савин Г.Н., используя упругую модель для изучения взаимодействия пород с крепью выработок, 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, 93], 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. [94]. 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 [95-98]. Например, в работах Миренкова В.Е. [99-101] выработка представляется разрезом в пространстве и строится аналитическое решение. Исследуемый массив представлялся однородной изотропной средой.

Исследованию поведения трансверсально-изотропного пространственного массива с цилиндрической полостью посвящены работы Конопелько Е.В. и Богана Ю.А. [102, 103]. Предполагается, что модуль Юнга среды в плоскости изотропии значительно выше модуля сдвига в плоскостях, ортогональных плоскости изотропии.

В работах Ткаченко В.Ф., Подильчука Ю.Н. [104, 105] и Алимжанова М.Т., Гордона В.И. [106-108] используется решение задачи теории упругости для сжатого сфероида. Бакланова Г.И. [109], Кулиев Г.Г. и Махмудов Э.С. [110] исследуют устойчивость горных выработок в рамках трехмерной линеаризованной теории упругости [111].

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. [112] 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. Исследования поведения приконтурного массива как упруго-вязко-пластического с неограниченной ползучестью и способностью к релаксации посвящены работы [113, 114].

Статистические методы дают возможность получить качественно новые результаты и объяснить некоторые явления и толкования, которые в рамках детерминистического подхода затруднены.

Основы статистических методов решения подобных задач применительно к твердым деформируемым телам изложены в монографии [115]. Решения некоторых статистических задач механики горных пород приводятся в работах [116, 117].

Для исследования механических процессов породных массивов, где существуют области в ненарушенном линейно-деформируемом состоянии и области предельного равновесия пород, следует решать смешанные упругопластические задачи.

На рис. 4.1, 4.2 показаны вид эпюр напряжений, действующих вокруг выработки в случае упругого и упругопластического массива.

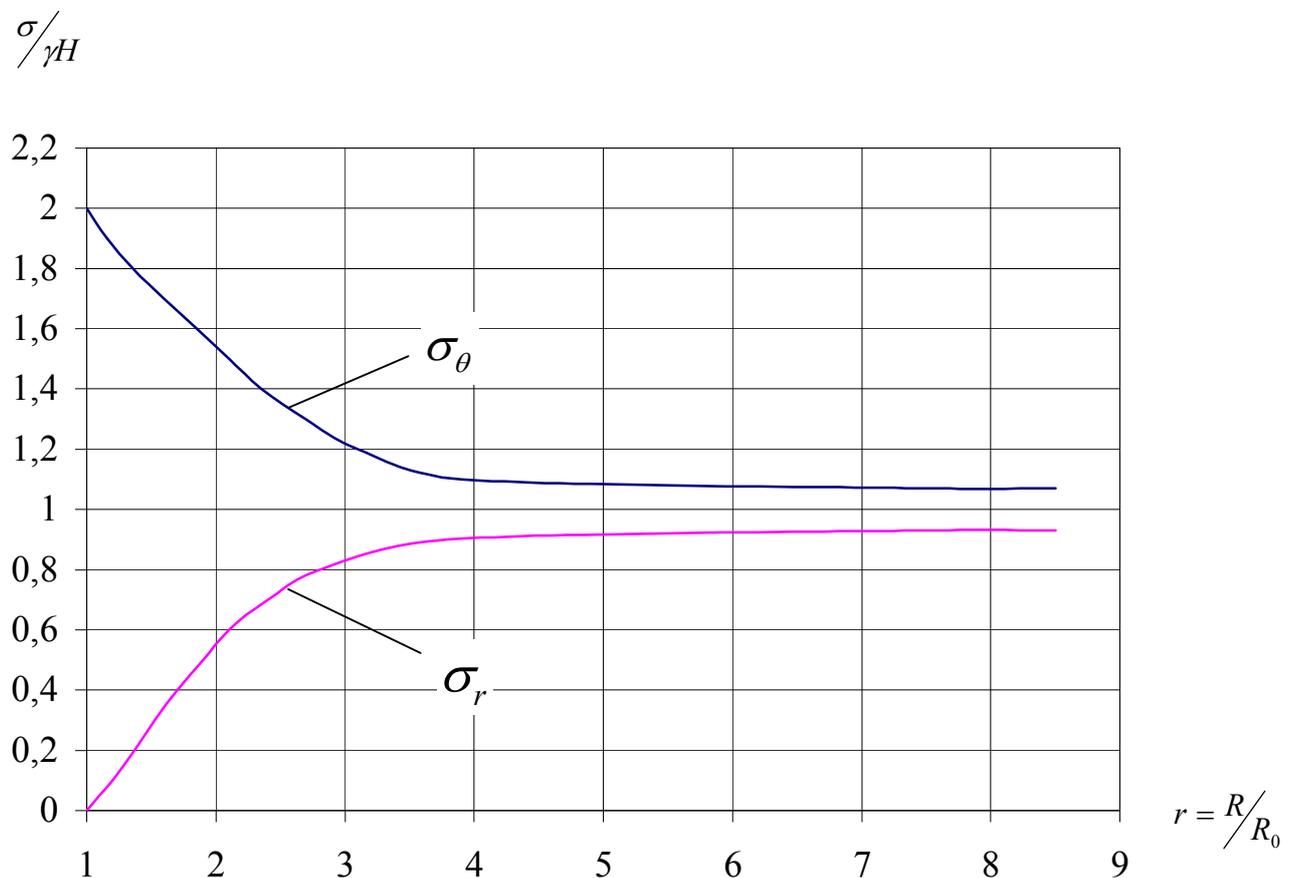


Рис. 4.1. Распределение напряжений вокруг выработки в упругом массиве

Анализ графиков показывает, что образование области пластических деформаций приводит к снижению уровня напряжений у контура выработки по

сравнению с решением упругой задачи. Максимум напряжений перемещается вглубь массива к границе раздела упругой и неупругой областей.

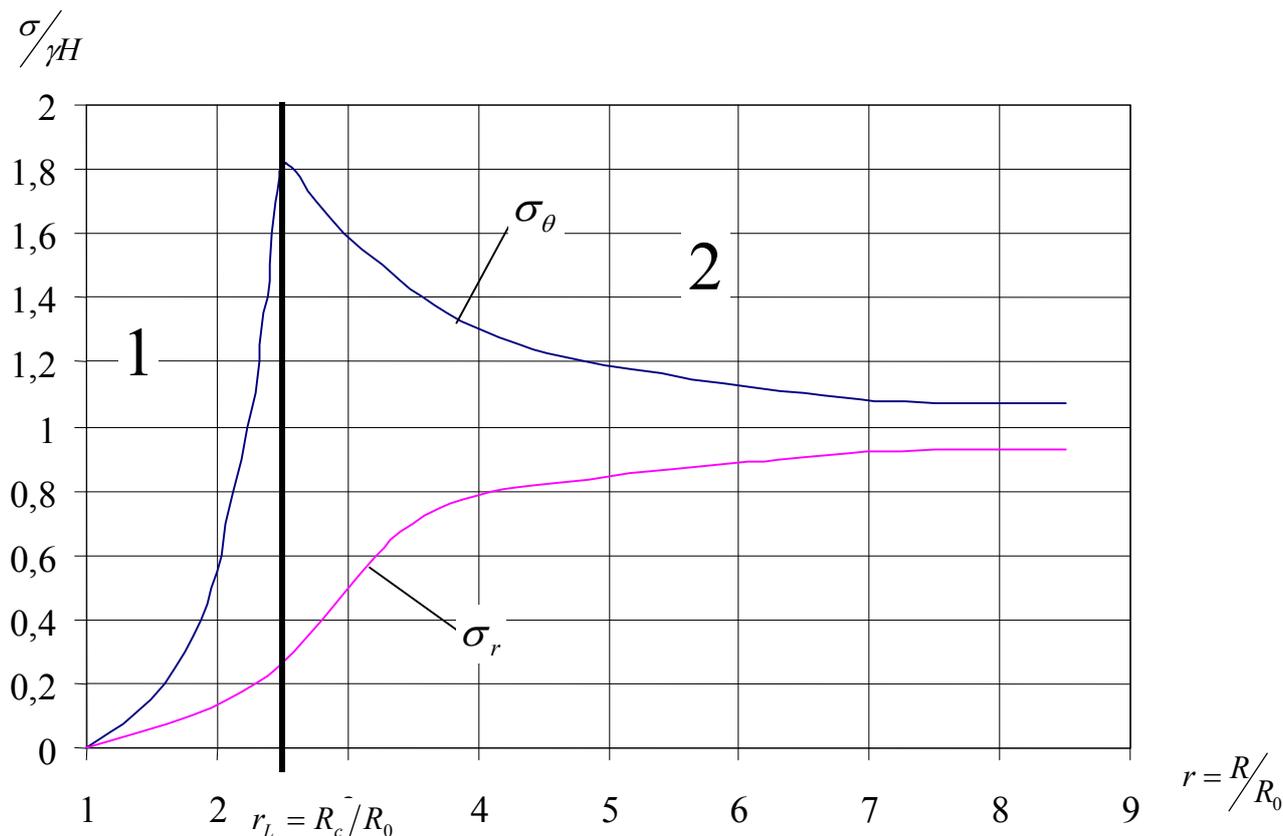


Рис. 4.2. Распределение напряжений вокруг выработки при образовании зоны неупругих деформаций: 1 – пластическая область породного массива; 2 – упругая область породного массива

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 трансверсально-изотропная среда и 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 [118]. Однако в этой работе рассматривается только однородный массив.

Использование метода конечных разностей в явной форме для решения задач геомеханики выполнено Синелайром Т.С. и др. [119], а метод собственных деформаций описан Такато С. и др. [120]. Эверлинг Г. [121] 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. Однако при такой густоте сеток можно получить лишь весьма приближенную качественную картину распределения напряжений, уменьшение же размеров элементов значительно увеличивает время расчета и занимает более значительный объем памяти в ЭВМ.

Надаши Н. и др. предложен усовершенствованный метод расчета НДС с помощью пространственной решетки [122]. 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.

---

Основные положения метода граничных элементов (МГЭ) изложены в [123]. Этот метод используется в работах Векслера Ю.А., Колоколова С.Б., Жданкина Н.А. [124, 125], Петухова И.М., Зубкова В.В. [126], Новиковой Л.В. [127], Сдвижковой Е.А. и др. [128 и др.].

Теоретические аспекты метода конечных элементов (МКЭ) сформулированы в работах Розина Л.А. [129, 130], Зенкевича О. [131], Сегерлинда Л. [132], Стренга Г. и Фикса Дж. [133], Деклу Ж. [134], а применение его к решению задач механики горных пород подробно описано в работах Амусина Б.З., Фадеева А.Б. [135, 136], Ержанова Ж.С. и Каримбаева Т.Д. [137]. Обширный перечень работ, в которых используются идеи МКЭ, содержится в работе [138].

Следует отметить, что никаких ограничений относительно неоднородности горного массива по деформационным свойствам не накладываается. Пользуясь аппаратом МКЭ можно моделировать слоистую среду, трещиноватость, анизотропию свойств пород, явления фильтрации. Имеются практически неограниченные возможности построения “улучшенных” элементов. В частности, для моделирования сцепления слоев на контактах используются специальные «контактные» элементы [135]. Разработаны специальные приемы для моделирования взаимодействия крепи выработки с окружающим массивом [139]. Совершенно очевидно, что сколько угодно сложный вырез в полуплоскости, а также конечное число таких вырезов, не являются препятствием к применению метода. Так, получение решения о распределении напряжений в целиках и потолочинах при камерной системе разработки не представляет сложности. Моделирование обрушенных пород также легко осуществимо в рамках метода. Следует только обосновано выбрать условные «упругие» характеристики обрушенных неуплотненных пород на основе дополнительных исследований.

Аппарат МКЭ применим не только к решению двумерных (плоских) задач теории упругости. Пространственная область массива также может быть аппроксимирована конечными элементами, но уже не треугольными, а, например, тетраэдрическими. Естественно, математический аппарат метода и его реализация на ЭВМ при этом существенно усложняется. Поэтому решения для

---

трехмерных областей, полученные на настоящий момент, весьма немногочисленны.

Отметим также возможность получения МКЭ решений в нелинейной постановке, т.е. в предположении, что среда деформируется неупруго, допускает пластические деформации или хрупкое разрушение. Используя вычислительные возможности метода, нелинейное решение получают как последовательность упругих решений.

В результате приведенного анализа применяемых методов исследования НДС горного массива можно сделать вывод о целесообразности применения для расчета напряженного состояния массива в окрестности выработки с анкерной крепью метода конечных элементов.

## **4.2. Обоснование расчетной схемы и выполнение расчетов**

### **4.2.1. Выбор способа решения задачи.**

Закономерности деформирования крепи горных выработок, изложенные в работе [140], в значительной мере отражают изменение их состояния по мере ведения горных работ. Однако более полное представление о взаимодействии системы “крепь-породный массив” можно получить, только рассмотрев НДС породного массива в окрестности выработки.

Математическая модель, моделирующая состояние породы в окрестности местных нарушений сплошности (будь то естественные или искусственные причины), должна отображать основные явления, возникающие вследствие возникновения концентрации напряжений и возможного сопутствующего изменения физико-механических свойств окружающего материала. 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 рассмотрение ряда таких задач имеется, в частности, в основополагающих работах [141, 142]. Значительные дополнения можно найти в работе [143].

С другой стороны, при решении практических проблем весьма эффективными оказываются итерационные процедуры. Формулируются некоторые исходные условия, для которых производится решение задачи. Затем производится проверка полученного решения на соответствие необходимым критериям. В нашем 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.

Сформулируем данную проблему более конкретно. Пусть существует некоторая мера напряжений (эквивалентные напряжения), которую обозначим через  $\sigma_e$ . При одноосном нагружении вдоль оси 1 ( $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ ) эффективные напряжения численно равны напряжению  $\sigma_1$ . 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  $\sigma_e = R_c$ .

В нашем случае при достижении предельного значения  $R_c$  в некоторых точках области, прилежащей к зоне нарушения сплошности, начинается процесс разрыхления горной породы. Экспериментально и теоретически показано [141], 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  $\sigma_1 = E_{11}\varepsilon_1$ , где  $E_{11}$  – модуль упругости в данном направлении. По достижении предела разрушения  $\sigma_c$ , имеет место переход на ниспадающий участок диаграммы « $\sigma_1 - \varepsilon_1$ » ( $\varepsilon_1 > \sigma_1/E_{11}$ ) рис. 4.3. На этом участке с ростом деформаций напряжение постепенно уменьшается вплоть до некоторого предела  $\sigma_r$  (предельного остаточного напряжения). Обычно данный предел весьма мал ( $\sigma_r \ll R_c$ ) и с достаточной степенью точности может быть принят равным нулю [144].

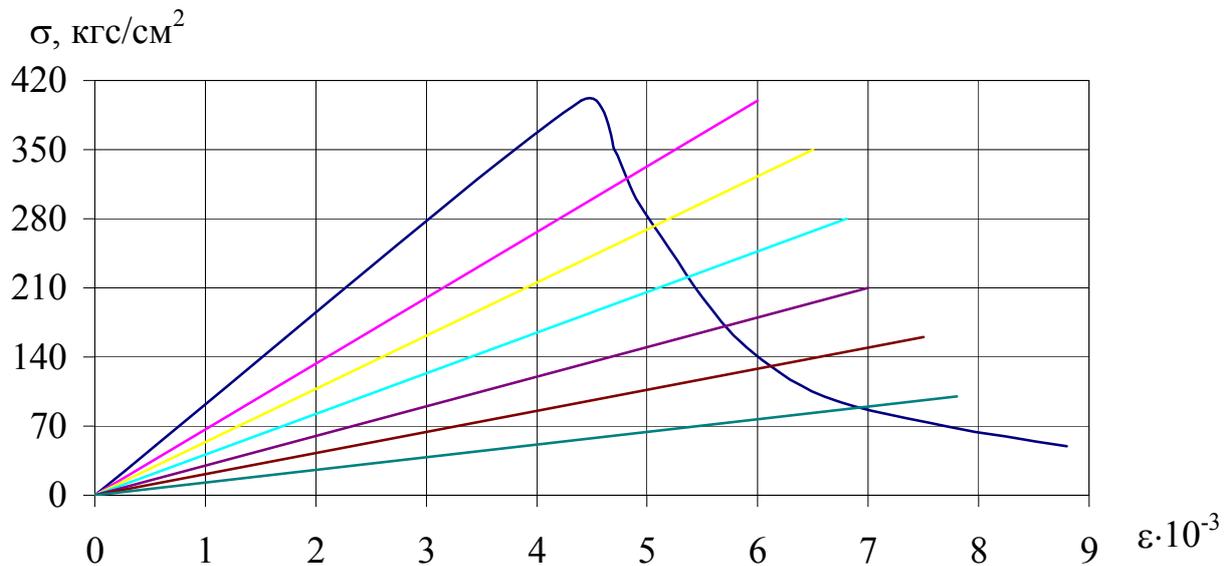


Рис. 4.3. Диаграмма «напряжения-деформации»

Также экспериментально установлено [144], что коэффициент Пуассона  $\mu$ , который на участке упругого нагружения для большинства горных пород имеет значение от 0,16 до 0,35, на ниспадающем участке диаграммы «напряже-

ния-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  $\Omega_0$  с границей  $\Gamma_0$  – выработка, окруженная “бесконечным” массивом, закон деформации которого на некотором расстоянии от нее подчиняется закону Гука. Наличие полости приводит к возникновению зоны концентрации напряжений, а также (внутри последней) зоны разрыхления материала  $\Omega_c$ , определяемой границей  $\Gamma_c$ . На этой границе имеет место соотношение  $\sigma_e = R_c$ . Вне этой границы механический отклик материала по-прежнему задается законом Гука, а в ее пределах – некоторыми соотношениями, описывающими свойства материала на ниспадающем участке полной диаграммы деформирования.

Наличие этого участка, вообще говоря, свидетельствует о диссипации энергии (всегда проявляющейся в процессах необратимых изменений, в том числе и разрушения). Это, как известно, следует из второго закона термодинамики [145]. Деформация при наличии диссипации (рассеяния) энергии заведомо является неупругой. Однако в первом приближении можно принять, что горная порода подчиняется закону нелинейной упругой деформации, так что в любой текущий момент времени имеем:

$$\begin{aligned}\sigma &= L_e : \mathbf{e}, & \varepsilon_e < \varepsilon_c; \\ \sigma &= L_s : \mathbf{e}, & \varepsilon_e > \varepsilon_c.\end{aligned}$$

где  $\sigma$  – тензор напряжений,  $\mathbf{e}$  – тензор деформаций,  $L_e$  – тензор упругих жесткостей Гука,  $L_s$  – тензор секущих жесткостей на втором (ниспадающем) участке диаграммы,  $(:)$  – операция матричной свертки по двум индексам:  $L : \mathbf{e} = L_{ijkl} e_{lk}$ .

Предел  $\varepsilon_c$  определяется из опытов на сжатие. Таким образом, в любой данный момент времени соотношение  $\sigma$ – $\varepsilon$  задается соответствующим участком диа-

---

граммы “напряжения-деформации”, а предельное напряжение  $R_c$  (верхнее значение  $\sigma_c$ ) находится 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  $\varepsilon_v$ , которые обеспечивают перемещения контура выработки.

В общем виде относительное объемное разрыхление:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_r + \varepsilon_\theta, \quad (4.1)$$

где  $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta$  – соответственно радиальные и тангенциальные деформации.

Соотношения Коши:

$$\varepsilon_r = dU/dr, \quad \varepsilon_\theta = U/r, \quad (4.2)$$

Подставив выражения (4.2) в (4.1) получим:

$$\varepsilon_v = dU/dr + U/r, \quad (4.3)$$

Управление состоянием приконтурного массива состоит в уменьшении величины  $\varepsilon_v$ . Соответствующие опыты по “жесткому” деформированию горных пород в условиях объемного сжатия, выполненные, в частности, под руководством А.Н. Ставрогина [146], показали, что максимальная величина объемного разрыхления очень чувствительна к наличию бокового давления. Это обстоятельство отражено на рис. 4.4. Причем, чем ниже прочность пород, тем сильнее сказывается эффект подпора. В выработках роль бокового давления для приконтурного массива играет отпор крепи –  $P_0$  (в нашем случае – анкерная крепь). Анализ графиков, приведенных на рис. 4.4, показывает, что они достаточно хорошо описываются параболической зависимостью следующего вида:

$$\varepsilon_v(P_0) = aP_0^2 + bP_0 + \varepsilon_v,$$

где  $a, b$  – размерные коэффициенты, характеризующие особенности запредельного деформирования горных пород в условиях объемного сжатия.

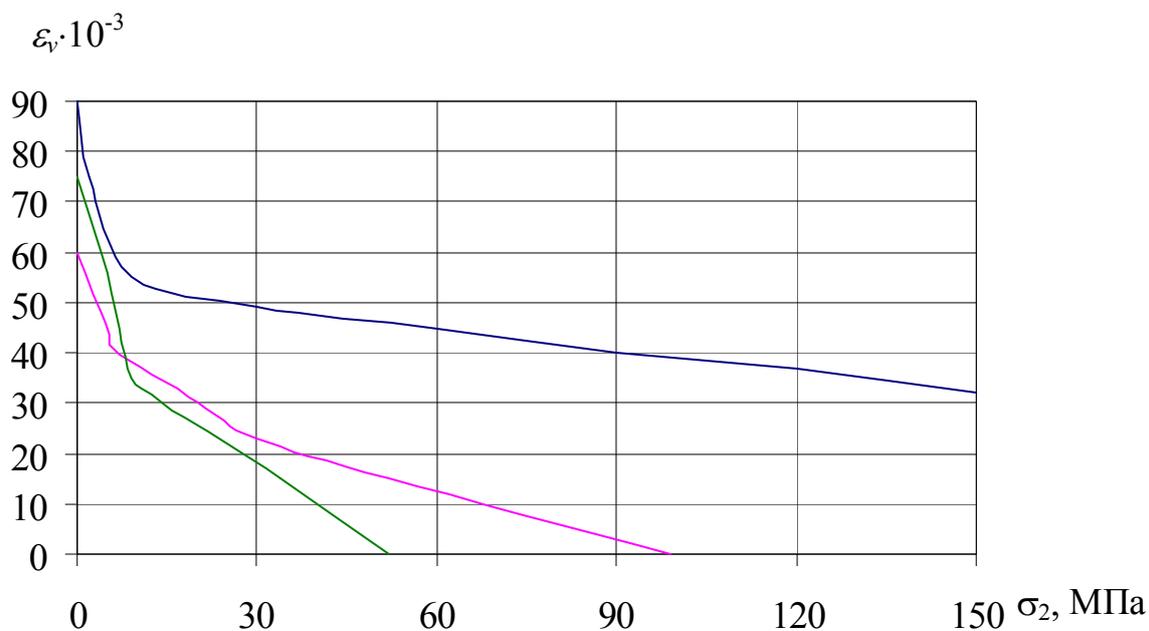


Рис. 4.4. Влияние бокового подпора на величину относительного объемного разрыхления

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  $\Omega$  разбивается на множество подобластей (элементов)  $\Omega^k$ . Внутри каждого элемента перемещения аппроксимируются некоторыми функциями, порядок которых зависит от числа узлов в элементе. Например, в плоском 4-х узловом элементе перемещения задаются линейной функцией, а в плоском 8-ми узловом элементе – квадратичной. Для каждого элемента можно сформулировать локальную матрицу жесткости, связывающую перемещения и нагрузки в его узлах. Элементы стыкуются по узлам. Это позволяет, в конечном итоге, сформулировать глобальную матрицу жесткости и глобальный вектор нагрузок для всей исследуемой области. При этом жесткость в каждом узле является суммой локальных жесткостей тех элементов, которым данный узел принадлежит.

В настоящее время существует множество пакетов прикладных программ (ППП), позволяющих реализовать МКЭ. Они отличаются авторскими подходами, удобством пользования и всегда включают в себя предпроцессор, служа-

ший для подготовки исходных данных, программу на основе МКЭ для численного решения граничных задач механики и физики и постпроцессор, используемый для визуализации полученных результатов. Одним из наиболее удачных пакетов для оценки НДС в окрестности выработок является программный продукт *ПП(СГМ)*, разработанный на кафедре строительства и геомеханики.

Процедура решения реализована в виде последовательности итераций. На первом этапе предполагается, что окружающий выработку массив является полностью упругим. Задаются его физико-механические параметры: модуль упругости  $E = 9 \cdot 10^4$  кгс/см<sup>2</sup>, коэффициент Пуассона  $\mu = 0,23$ , предел прочности на сжатие  $R_c = 400$  кгс/см<sup>2</sup>, предел прочности на растяжение  $R_p = 40$  кгс/см<sup>2</sup>, объемный вес  $\gamma = 2,6 \cdot 10^{-3}$  кгс/см<sup>3</sup>. Затем с использованием пакета *ПП(СГМ)* 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  $\sigma_e = R_c$ . В работе [144] предложено соотношение, в котором учитывается максимальное и минимальное главные напряжения. Для эквивалентного напряжения при этом получено следующее выражение:

$$\sigma_e = \frac{(1 - \psi)(\sigma_1 + \sigma_3) + \sqrt{((1 - \psi)^2(\sigma_1 + \sigma_3)^2 + 4\psi(\sigma_1 - \sigma_3)^2)}}{2\psi} \quad (4.4)$$

где  $\psi = R_p/R_c$  – величина отношения предела прочности на растяжение к пределу прочности на сжатие;  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  – главные значения тензора напряжений.

После того, как первое приближение к геометрическим параметрам области разрыхления найдено, необходимо изменить исходные параметры задачи для последующего решения на второй итерации. С этой целью формируется командный файл для *ПП(СГМ)*. Специальная программа, сканирует базу данных *ПП(СГМ)* и определяет зону разрыхления (т.е. те элементы, для которых на данном этапе решения получено  $\sigma_e > R_c$ ). Для этих элементов видоизменяются свойства материала. Именно, вместо закона Гука для соотношений связи “на-

---

пряжения-деформации” задается ниспадающий участок диаграммы рис 4.3, на котором напряжения достигают своего предельного значения.

После этого процедура решения повторяется. Взяв за основу полученные в первом решении упругой задачи деформации  $\{\varepsilon\}$ , по уравнению  $\{\sigma\}=f(\{\varepsilon\})$  определяется соответствующая величина напряжений нелинейного элемента. Если разница напряжений превышает некоторую заранее заданную величину, соответствующую необходимой точности решения, совершается второй шаг итерации. Вновь решается линейная упругая задача, но при составлении матрицы упругих свойств вместо модуля  $E_0$ , вводится секущий модуль  $E_1$  (рис. 4.3). При необходимости изменяется и коэффициент Пуассона. 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 различных элементов изменяются по-разному, в зависимости от уровня их нагружения.

Для данной и последующих итераций используется не линейный статический, а нелинейный модуль *ПП(СГМ)*. С использованием вышеупомянутого командного файла видоизменяется база данных *ПП(СГМ)* и производится новое решение задачи, в процессе которого опять определяются элементы  $\Omega^k$ , для которых выполняется условие  $\sigma_e > R_c$ ; в них задается ниспадающий участок диаграммы деформирования и т.п. Когда на некоторой итерации не возникает более новый (дополнительный) набор элементов, в которых эффективные напряжения превышают предел прочности на сжатие, процесс определения зоны разрушения считается законченным.

Напряженно-деформированное состояние нелинейной среды может существенно зависеть от последовательности приложения заданной конечной нагрузки. Поэтому гарантией получения правильного решения является введение в расчет соответствующей последовательности нагружения.

Первоначально к области прикладывается лишь некоторая часть (инкремент) расчетной нагрузки. Решается соответствующая линейная задача и опре-

---

деляется напряженно-деформированное состояние. Напряжения в элементах и перемещения узлов запоминаются. Затем прикладывается следующий инкремент нагрузки и определяется соответствующее ему НДС. Напряжения в элементах и узловые перемещения суммируются. Если приращения нагрузок достаточно малы, то в пределах каждого приращения отклонение характеристик среды от линейной аппроксимации также мало. В данной работе принято 10 шагов нагружения.

С целью верификации поставленной проблемы была решена следующая задача. 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.

На рис. 4.5 в результате работы постпроцессора *ПП(СГМ)* показана визуализация конечных результатов, полученных на основании вышеизложенной процедуры численных расчетов. Различными цветами обозначены зоны напряжений, определяемые картой цветов. Область, где диаграмма деформирования задается ее ниспадающей ветвью, показана на рис. 4.5 синим цветом. Эта область является зоной разрыхления. В соответствии с решением задачи, ее радиус  $r_1$ , отнесенный к радиусу выработки  $r_0$ , равен  $r_1/r_0 = 2,8$ . Сходимость была достигнута на второй итерации.

В работе [147] получено трансцендентное уравнение для случая концентрации напряжений вокруг круглой выработки в условиях плоского напряженного состояния (рассматривается бесконечная плоско-деформированная невесомая пластина). Из него можно найти критическое значение отношения  $r_1/r_0$ . Оно составляет  $r_1/r_0 = 2,68$ . Таким образом, можно отметить достаточно удовлетворительное совпадение теоретических и численных результатов.

Теперь, на основании полученных результатов, исследуется НДС горной породы в окрестности капитальной наклонной выработки арочной формы с се-

чением  $S_{св}=13,7 \text{ м}^2$ , пройденной: I задача – в однородном породном массиве, II задача – в неоднородном породном массиве. Расчетная схема приведена на рис. 4.6.

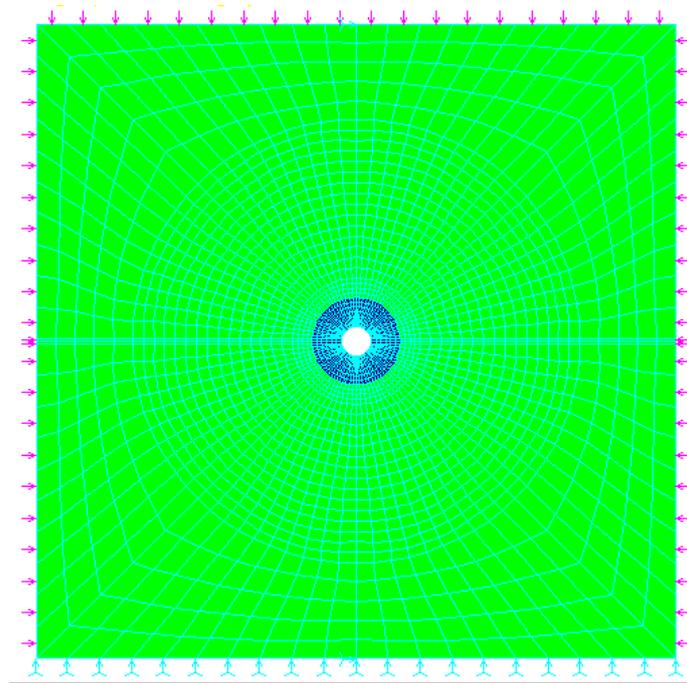


Рис. 4.5. Пробная задача: определение области неупругих деформаций в окрестности одиночной круглой выработки

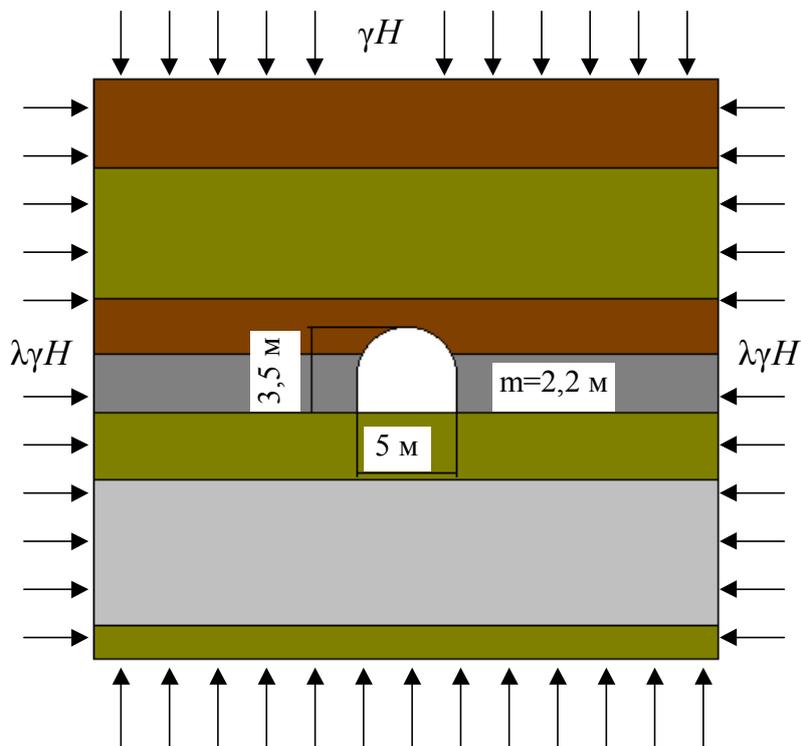


Рис. 4.6. Расчетная схема рассматриваемой задачи

На рис. 4.6 приведены исходные геометрические параметры выработки, а также угольного пласта в ее окрестности. Данный рисунок фактически определяет граничную задачу, которая служит для нахождения зоны разрыхления.

#### 4.2.2. Исследование НДС горных пород в окрестности капитальной наклонной выработки арочной формы, пройденной в однородном породном массиве, и закрепленной анкерной крепью.

Рассчитаем случай, когда выработка существует без крепи; при этом найдем перемещения во всей области прилегающего к ней горного массива, в том числе на контуре, изменения площади поперечного сечения выработки, напряжения и деформации. Физико-механические параметры породного массива задаются теми же, как и в пробной задаче.

Конечно-элементная реализация расчетной схемы (без подкрепляющих элементов) дана на рис. 4.7. Выработка с линейными размерами: ширина – 5 м, высота – 3,5 м, помещена в центр массива с размерами 100×100 м.

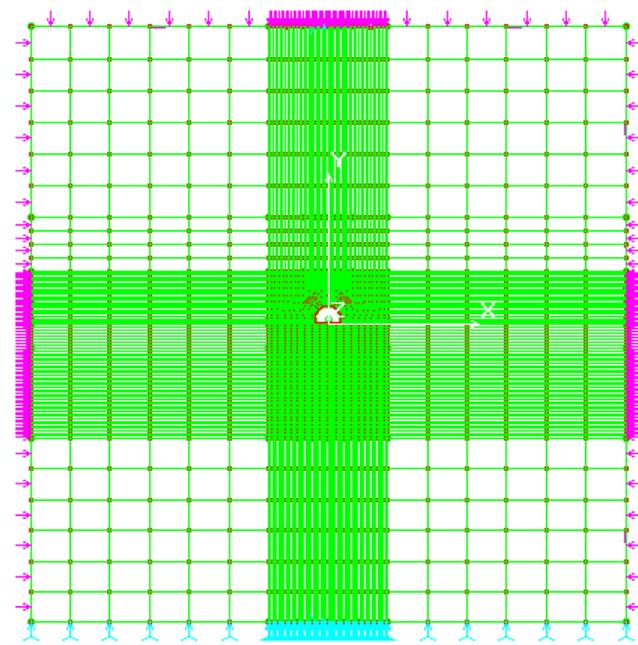


Рис. 4.7. Конечно-элементная реализация расчетной схемы

Как видно из рис. 4.7, для разбиения области применяются линейные четырехугольные плоские элементы. Чтобы дать представление о характере КЭ-разбиения в окрестности выработки, ниже приводится рис. 4.8, на котором вы-

---

шеописанная картина дается в увеличенном виде. Как и выше, зеленый цвет соответствует здесь окружающей породе (точнее, элементам, на которые она разбита). Белый цвет соответствует пустоте (т.е. выработке). Тонкими линиями показаны детали КЭ-разбиения.

Итак, первоначально существует одна группа КЭ. В ходе расчетов принято, что выработка расположена на глубине 800 м, соответствующей горному давлению (принятому гидростатическим), примерно,  $208 \text{ кгс/см}^2$ .

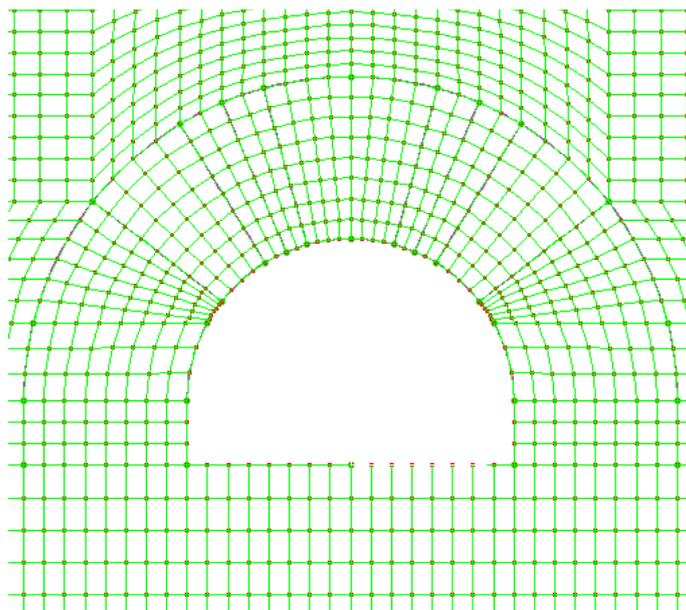


Рис. 4.8. Детальная картина разбиения на элементы

При описанных выше условиях производится решение задачи в рамках линейной упругости и определяются те элементы породы, в которых выполняется условие  $\sigma_e > R_c$ , как это было описано выше. По нашим представлениям порода в этой области подвергается разрыхлению (рис. 4.9). Из 6312 КЭ в указанное состояние на данном этапе перешло 640. Эти элементы сформировали новую, вторую группу. Они характеризуются нелинейными механическими свойствами, а именно, при достижении некоторого критического значения процесс деформирования переходит на ниспадающий участок диаграммы, а коэффициент Пуассона становится равным 0,5. После этого для новой конфигурации произведено решение задачи нелинейной теории упругости. На этой, второй итерации, во вторую группу перешло лишь 6 элементов, которые дополнили ее,

---

и т.д. Всего понадобилось 2 итераций. После этого было вновь произведено третье по счету решение нелинейной задачи, и сканирование базы данных не выявило более элементов, для которых выполняется условие  $\sigma_e > R_c$  – процесс сошелся.

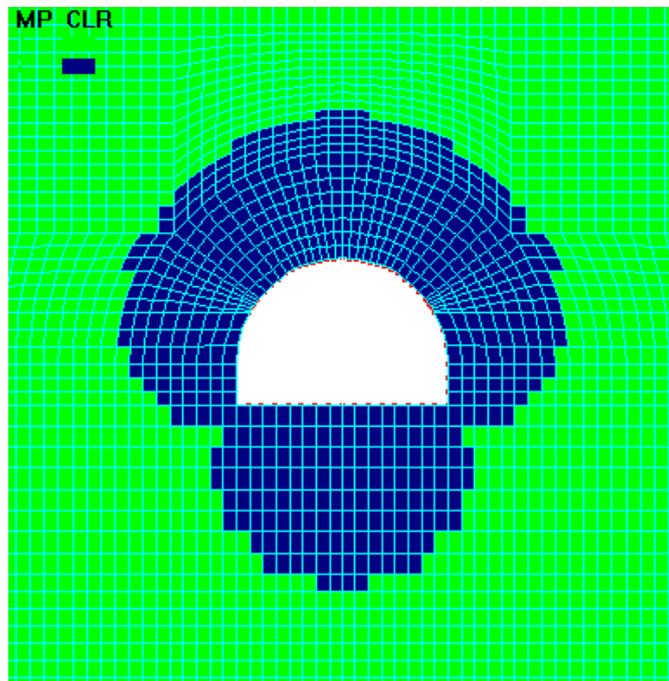


Рис. 4.9. Прилегающая к выработке зона разрыхления

На рис. 4.9 прилегающая к выработке зона разрыхления показана синим цветом. Поскольку критерий разрыхления определен для конечного элемента в целом, ее границы совпадают с границами соответствующих элементов. Ввиду некоторой грубости разбиения вдали от выработки границы зоны недостаточно гладкие. Тем не менее, рис. 4.9 дает представление об общей форме и размерах области разрыхления. Относительный радиус зоны разрыхления  $r_1/r_0$  равен 2,4, что совпадает с результатами полученными в работе [61].

На рис. 4.10 указана неоднородность зон полных перемещений различного уровня в окрестности выработки. Эти перемещения достигают достаточно большой величины на верхнем своде выработки. Уровни перемещений (в сантиметрах) даются на цветной шкале справа.

Представляет интерес картина распределения величины  $\sigma_e/R_c$  в окрестности выработки, построенная в соответствии с выражением (4.4) и приведенная на рис. 4.11.

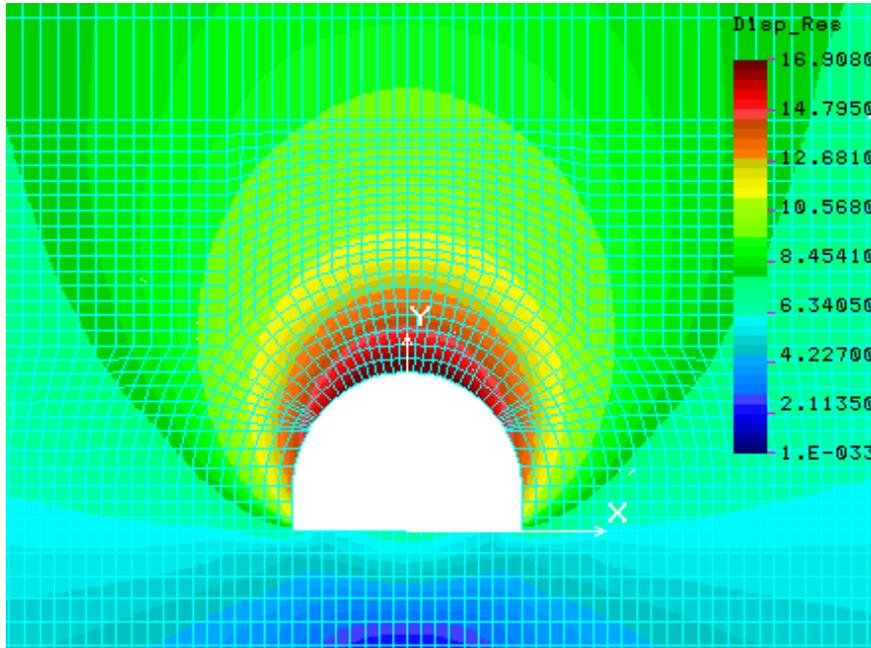


Рис. 4.10. Картина распределения полных перемещений для задачи без подкрепляющих элементов

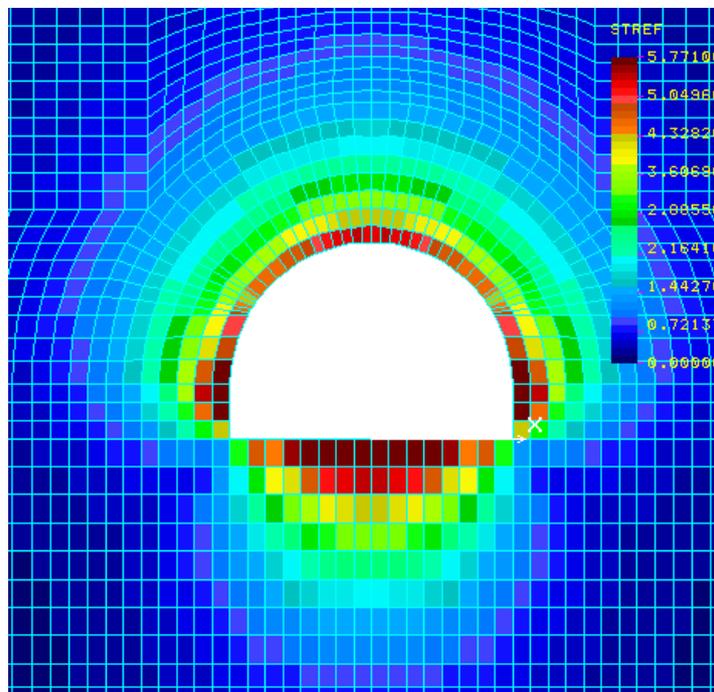


Рис. 4.11. Картина распределения величины  $\sigma_e/R_c$  в окрестности выработки

Величина отношения в некотором избранном узле на своде выработки, в котором позднее разместится нижний конец анкера, составляет (после третьей итерации) 5,333.

Помимо этого была решена задача об определении НДС горного массива и зоны разрыхления в окрестности выработки при наличии анкеров. Исследования проводились в два этапа: 1 – изучалось влияние количества анкеров ( $N_a = 1 \dots 9$  шт) и 2 – их длина ( $l_a = 0,5 \dots 3$  м). Наличие анкера в породной среде моделировалось таким образом. Сначала решалась упругопластическая задача для выработки арочной формы без крепи. Для этого случая устанавливались радиальные перемещения вокруг выработки. Далее радиальные перемещения на расстоянии, которое равняется длине анкера –  $U_a$ , принималось постоянным по всей его длине до контура выработки, то есть до точки установки анкера. Анкер, т.е. стержень определенной длины и радиусом 2,4 см задавался линейным стержневым элементом ПП(СГМ) рис. 4.12 (анкера представлены красными линиями). Модуль упругости и коэффициент Пуассона материала стержня приняты соответственно  $E = 2 \cdot 10^6$  кгс/мм<sup>2</sup> и  $\nu = 0,35$ .

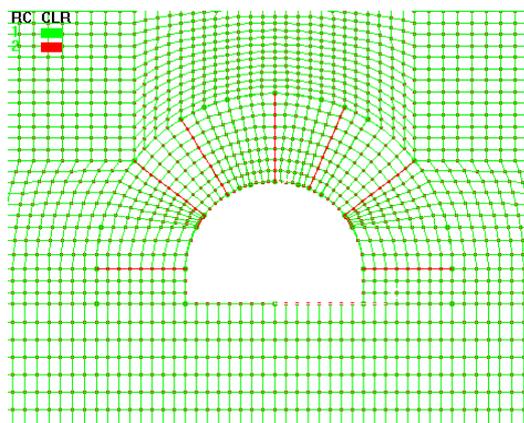


Рис. 4.12. Детальная картина разбиения на элементы с учетом анкеров

Теперь к исходной группе плоских четырехугольных элементов (порода) добавляется вторая, в которую входят подкрепляющие линейные элементы (анкера). В процессе решения задачи выделяется третья группа плоских четырехугольных элементов, для которой соотношения связи между напряжениями и

деформациями нелинейны. Набор таких элементов, как уже сказано выше, определяет искомую зону разрыхления (рис. 4.13, 4.14, 4.15).

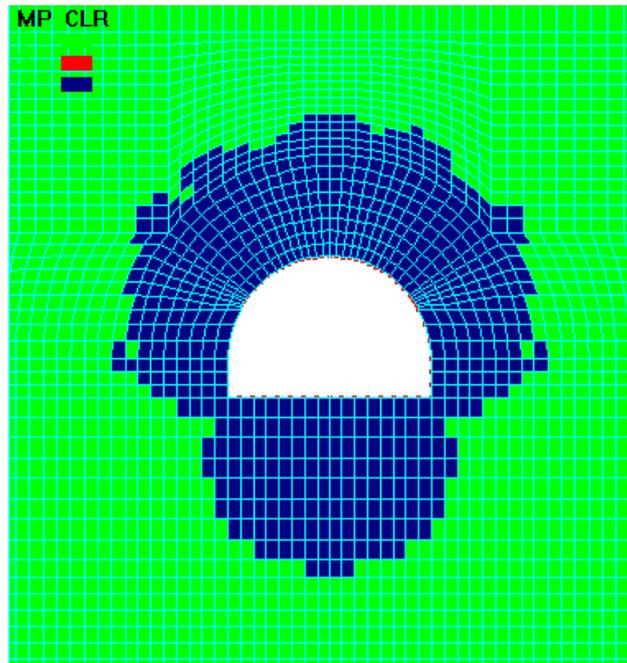


Рис. 4.13. Прилегающая к выработке зона разрыхления при 7 анкерах длиной 2,5 м

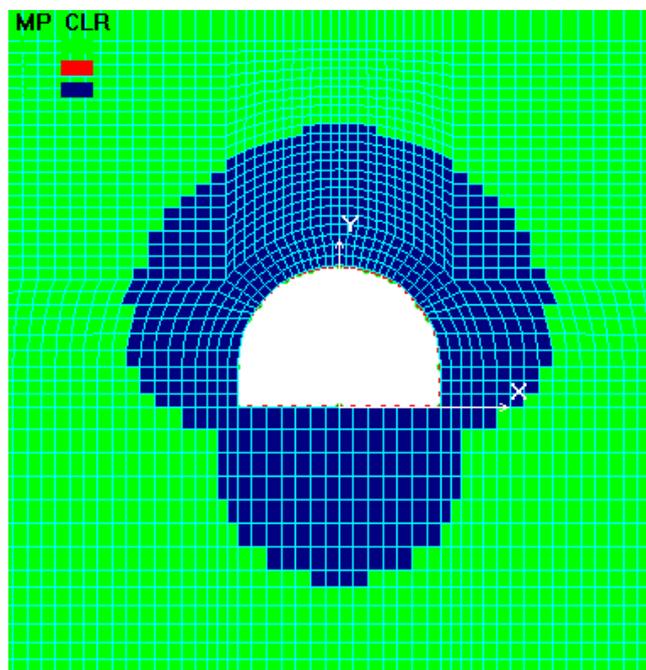


Рис. 4.14. Прилегающая к выработке зона разрыхления при 7 анкерах длиной 1,0 м

На первой итерации (линейное решение) в соответствии с критерием  $\sigma_e > R_c$  в новое состояние перешло 628 КЭ из 6312 элементов, слагающих окру-

---

жающую горную породу. На второй итерации (нелинейное решение) таковых оказалось только 7 и т.д. Процесс достиг сходимости на 3-й итерации. Относительный радиус зоны разрыхления  $r/r_0$  равен 2,4, что совпадает с результатами полученными в работе [61].

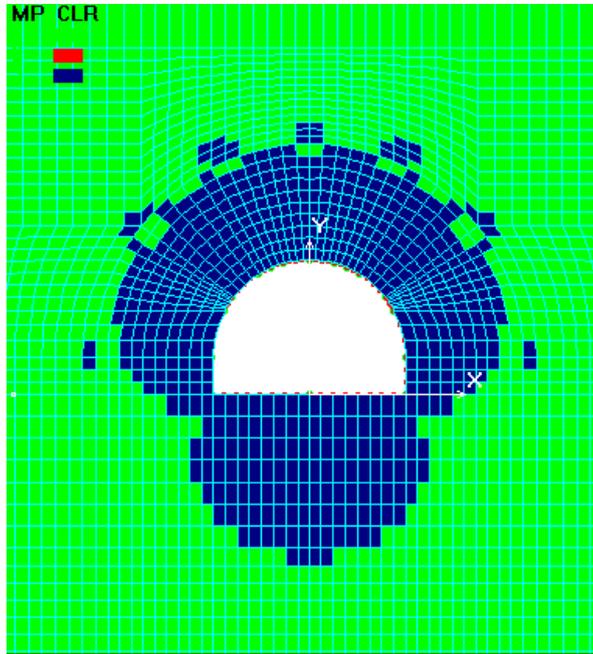


Рис. 4.15. Прилегающая к выработке зона разрыхления при 7 анкерах длиной 3,0 м

На рис. 4.16 дана картина распределения полных перемещений для задачи с семью анкерами длиной 2,5 м.

На рис. 4.17 (аналогичном рис. 4.11) дана картина распределения величины  $\sigma_e/R_c$  в окрестности выработки.

Величина отношения  $\sigma_e/R_c$  в том же узле, как и выше, на своде выработки составляет (после третьей итерации) 2,81.

Для нахождения площадей поперечного сечения выработок разработана специальная программа, которая сканирует базу данных *ПП(СГМ)* и определяет искомые величины. Результаты расчетов приведены на рис. 4.18...4.20.

Анализ результатов показывает следующее.

Радиус зоны разрыхления для всех решенных задач практически одинаков (рис. 4.9, 4.13, 4.14, 4.15) и величина отношения  $r/r_0 = 2,4$ .

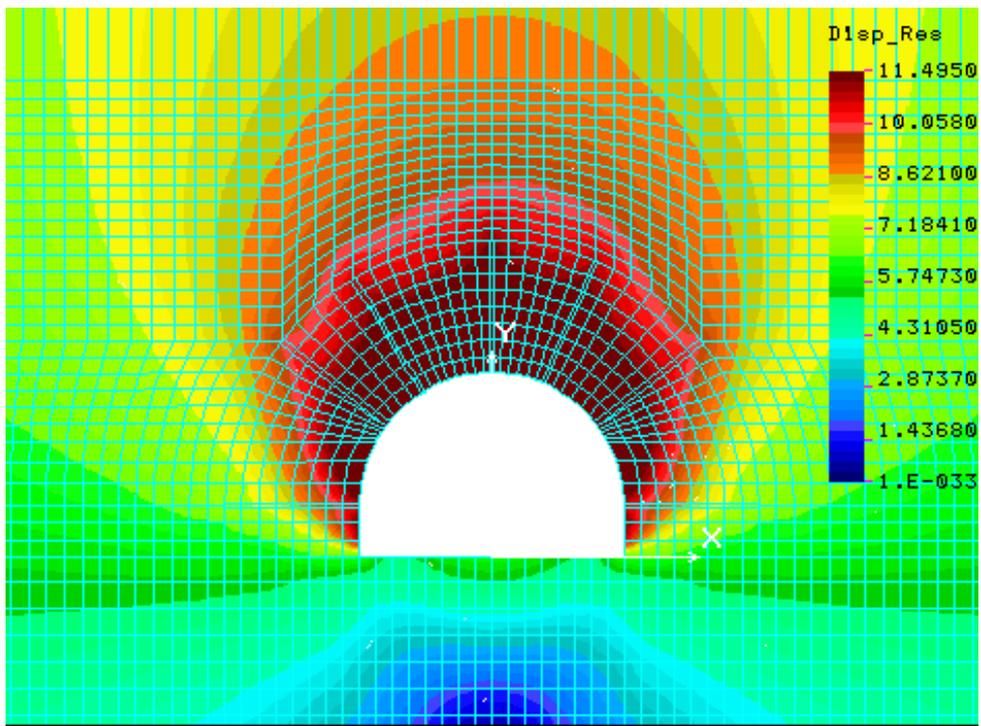


Рис. 4.16. Картина распределения полных перемещений для задачи с 7 анкерами

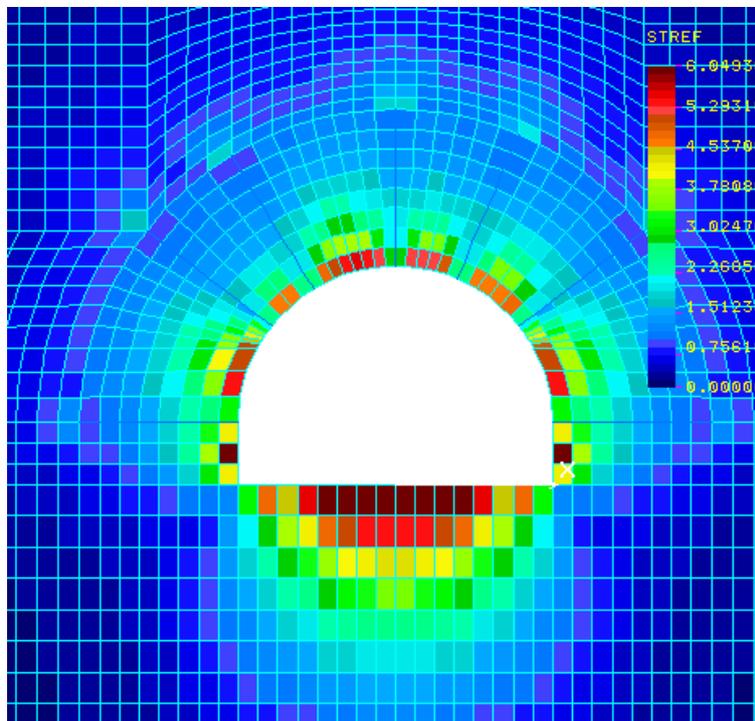


Рис. 4.17. Картина распределения величины  $\sigma_e/R_c$  в окрестности выработки при установке 7 анкеров

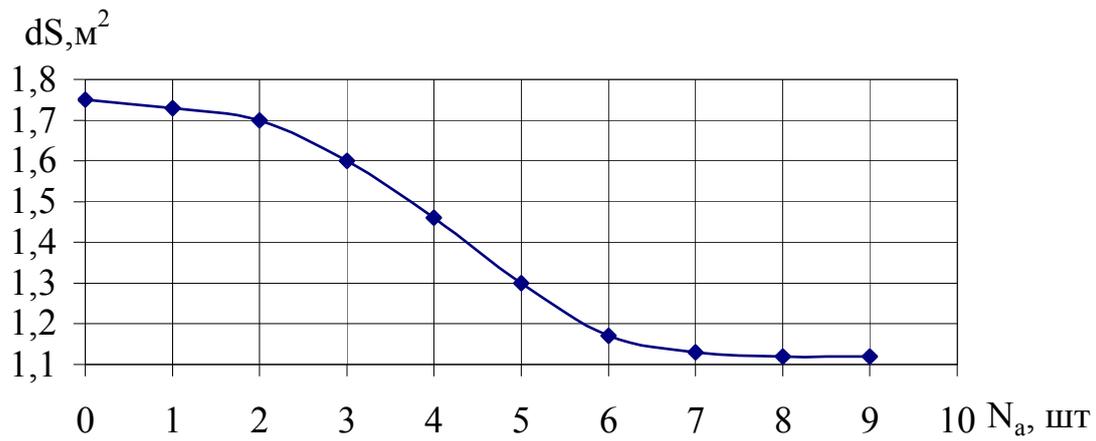


Рис. 4.18. Изменение поперечного сечения выработки в зависимости от количества анкеров

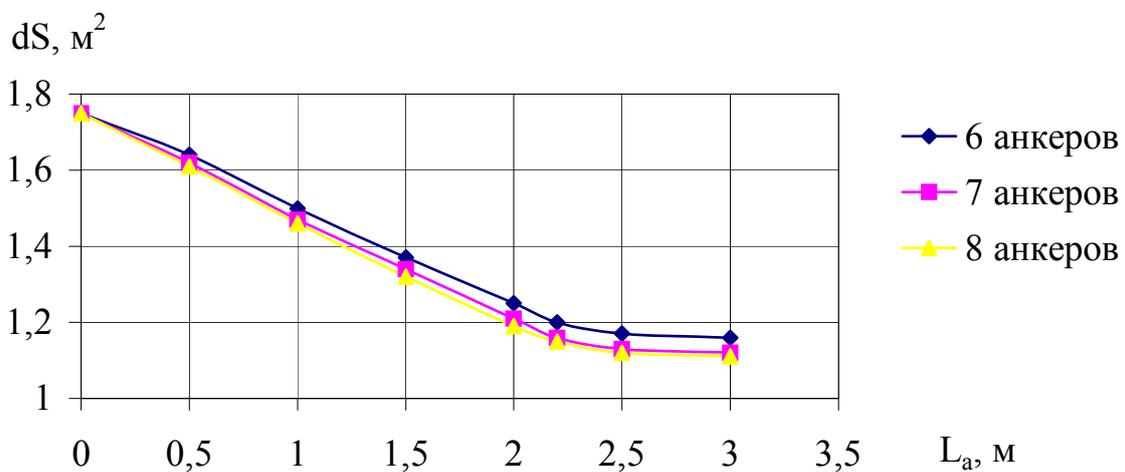


Рис. 4.19. Изменение поперечного сечения выработки в зависимости от длины анкера

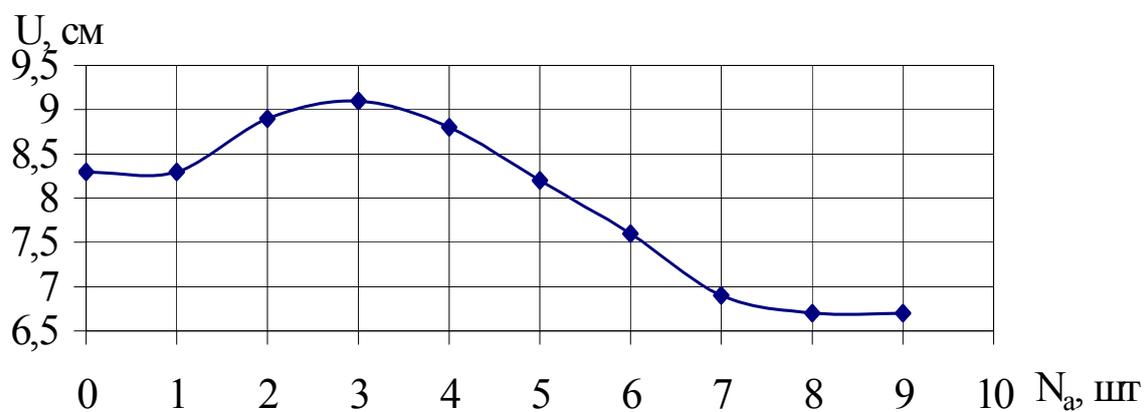


Рис. 4.20. Поднятие почвы выработки в зависимости от количества анкеров

---

На рис. 4.11 и 4.17 отчетливо видны зоны концентрации напряжений в основаниях боковых стенок и почвах выработок. По мере удаления от них уровень напряжений становится значительно ниже. Величина отношения  $\sigma_e/R_c$  в некотором избранном узле на своде выработки, для задачи без подкрепляющих элементов составляет 5,333, для задачи с анкерной крепью – 2,81, что в 1,9 раза меньше. На концах анкеров, в массиве, наблюдается незначительная концентрация напряжений (рис. 4.17), что приводит к изменению очертания зоны разрыхления (рис. 4.13, 4.15).

Как видно из рис. 4.16, после нескольких нелинейных решений максимальные результирующие перемещения в 1,47 раза ниже, чем на рис. 4.10.

Вертикальные перемещения замка свода выработки уменьшаются от 16,9 см до 9,1 см при изменении количества анкеров (0...9 анк.) и от 16,9 см до 9,2 см при изменении длины анкера (0...3 м) ( $N_a = 7$  анк.).

Достаточная плотность установки анкеров находится в пределах 0,8...1,0 анк/м<sup>2</sup> (рис. 4.18).

Рациональная длина анкера находится в пределах 2,3...2,5 м (рис.4.19).

При установке анкеров в боках выработки наблюдается незначительное уменьшение поднятия почвы (рис. 4.20), но при укреплении только кровли имеет место увеличение пучения, что совпадает с лабораторными результатами.

Таким образом, при проведении выработки в однородном породном массиве и установке анкерной крепи с параметрами: плотность анкерования 0,8...1,0 анк/м<sup>2</sup>, длина анкеров 2,3...2,5 м, весьма значительно снижается уровень напряжений и перемещений на своде выработки и в почве, что приводит к повышению ее устойчивости.

### **4.2.3. Исследование НДС горных пород в окрестности капитальной наклонной выработки арочной формы, пройденной в неоднородном породном массиве, и закрепленной анкерной крепью.**

Как для однородного массива, так и для неоднородного рассчитаем случай, когда выработка существует без крепи; при этом найдем перемещения во

всей области прилегающего к ней горного массива, в том числе на контуре, изменения площади поперечного сечения выработки, напряжения и деформации.

Конечно-элементная реализация расчетной схемы (без подкрепляющих элементов) дана на рис. 4.21.

Как видно из рис. 4.21, для разбиения области применяются те же линейные четырехугольные плоские элементы. Поскольку исследуется неоднородный массив, то область  $\Omega$  разбивается на слои (приближенные горно-геологические условия залегания пласта  $l_3$ ). Желтый цвет соответствует аргиллитам, зеленый цвет – алевролитам, темно-зеленый – песчаникам, темно-красный – углю. Белый цвет соответствует пустоте (т.е. выработке). Тонкими линиями показаны детали КЭ-разбиения. Задаются физико-механические параметры табл. 4.1.

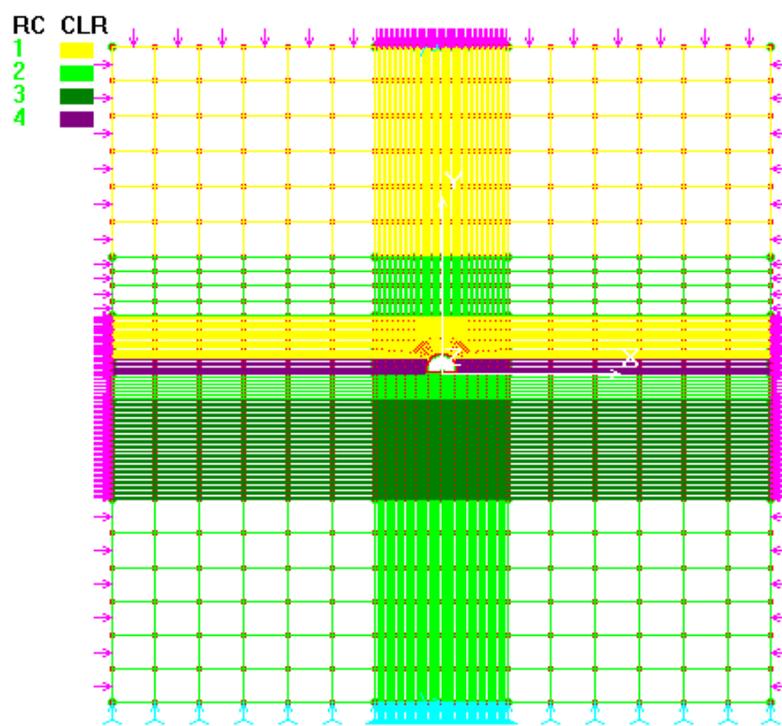


Рис. 4.21. Конечно-элементная реализация расчетной схемы

Первоначально существуют четыре группы КЭ. В ходе расчетов принято то же горное давление, что и для однородного массива.

Производится решение задачи в рамках линейной упругости и определяются те элементы породы, в которых выполняется условие  $\sigma_e > R_c$ , как это было

описано выше. Из 6312 КЭ в указанное состояние на данном этапе перешло 771. Эти элементы сформировали новые группы 5, 6, 8 (рис. 4.22 номера групп и их цвет слева вверху). Они характеризуются нелинейными механическими свойствами.

Таблица 4.1

Физико-механические параметры горных пород, необходимые для расчета

Наименование параметра	Аргиллит	Алевролит	Песчаник	Уголь
Модуль упругости, кгс/см <sup>2</sup>	$8 \cdot 10^4$	$9 \cdot 10^4$	$1,5 \cdot 10^4$	$5,4 \cdot 10^4$
Коэффициент Пуассона	0,23	0,23	0,21	0,16
Прочность на сжатие, кгс/см <sup>2</sup>	300	400	650	150
Прочность на растяжение, кгс/см <sup>2</sup>	30	40	65	15
Объемный вес, кгс/см <sup>3</sup>	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$1,35 \cdot 10^{-3}$

После этого для новой конфигурации произведено решение задачи нелинейной теории упругости. На этой, второй итерации, в группы 5, 6, 8 перешло лишь 12 элементов и т.д. Всего понадобилось 3 итерации. После этого было вновь произведено четвертое по счету решение нелинейной задачи, и сканирование базы данных не выявило более элементов, для которых выполняется условие  $\sigma_e > R_c$  – процесс сошелся.

На рис. 4.22 прилегающая к выработке зона разрыхления показана синим цветом. Относительный радиус зоны разрыхления  $r_i/r_0$  равен 2,48.

На рис. 4.23 указана неоднородность зон полных перемещений различного уровня в окрестности выработки.

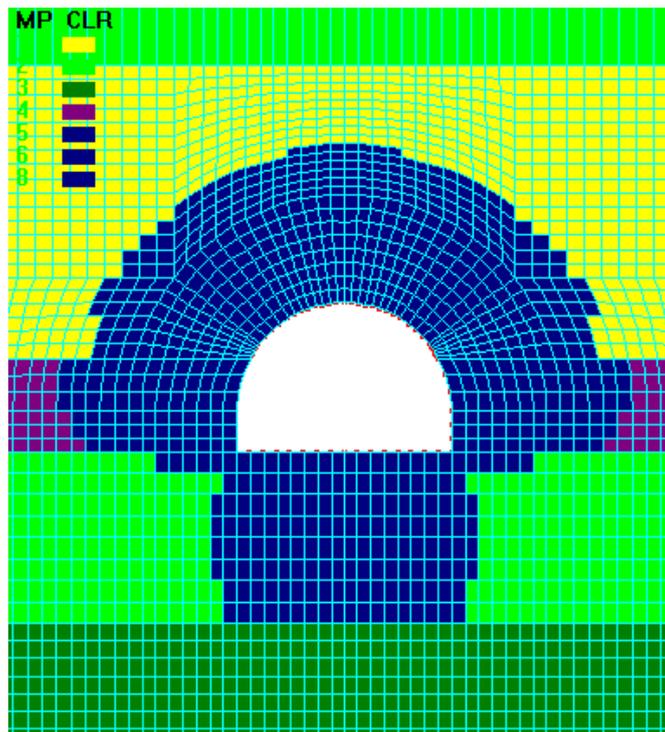


Рис. 4.22. Прилегающая к выработке зона разрыхления

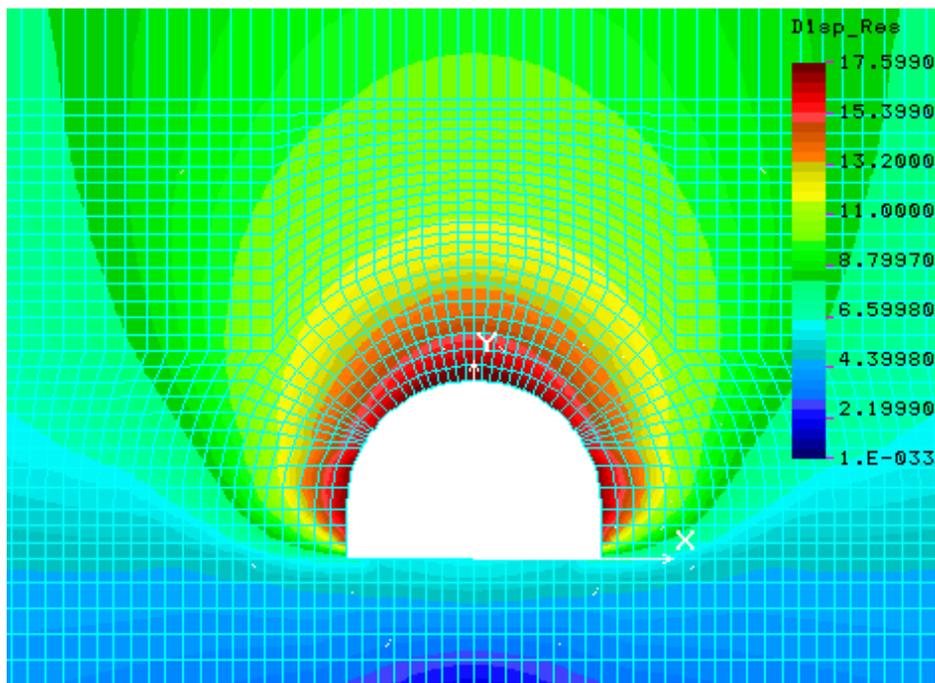


Рис. 4.23. Картина распределения полных перемещений для задачи без подкрепляющих элементов

Эти перемещения достигают достаточно большой величины на верхнем своде выработки и в основаниях боковых стенок. Уровни перемещений (в сантиметрах) даются на цветной шкале справа.

Представляет интерес картина распределения величины  $\sigma_e/R_c$  в окрестности выработки, построенная в соответствии с выражением (4.4) и приведенная на рис. 4.24.

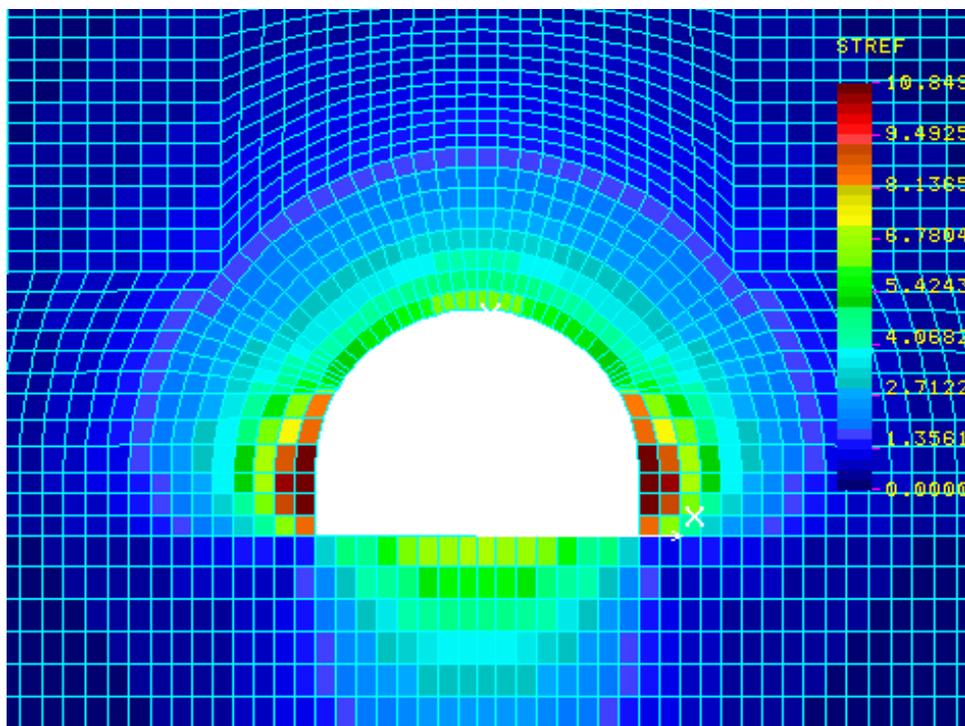


Рис. 4.24. Картина распределения величины  $\sigma_e/R_c$  в окрестности выработки

Величина отношения в некотором избранном узле на своде выработки составляет (после четвертой итерации) 6,11.

Помимо этого, была решена задача об определении НДС горного массива и зоны разрыхления в окрестности выработки при наличии анкеров.

Постановка задачи и последовательность ее выполнения были, как и для однородного массива. Анкер, т.е. стержень определенной длины и радиусом 2,4 см моделировался линейным стержневым элементом рис. 4.25 (анкера представлен красными линиями).

Модуль упругости и коэффициент Пуассона материала стержня приняты соответственно  $E = 2 \cdot 10^6$  кгс/мм<sup>2</sup> и  $\nu = 0,35$ . Теперь к исходным четырем группам плоских четырехугольных элементов (порода, уголь) добавляется пятая, в которую входят подкрепляющие линейные элементы (анкера). В процессе решения задачи выделяются новые группы (6, 7, 9) плоских четырехугольных

элементов, для которых соотношения связи между напряжениями и деформациями нелинейны. Набор таких элементов, как уже сказано выше, определяет искомую зону разрыхления (рис. 4.26, 4.27, 4.28).

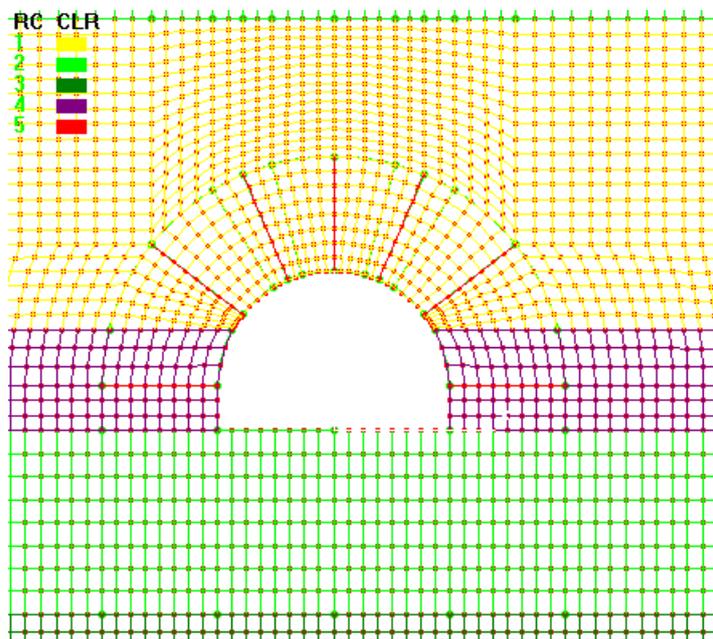


Рис. 4.25. Детальная картина разбиения на элементы с учетом анкеров

На первой итерации (линейное решение) в соответствии с критерием  $\sigma_e > R_c$  в новое состояние перешло 770 КЭ из 6312 элементов, слагающих окружающую горную породу и уголь. На второй итерации (нелинейное решение) таковых оказалось только 11 и т.д. Процесс достиг сходимости на 4-й итерации. Относительный радиус зоны разрыхления  $r_1/r_0$  равен 2,48.

На рис. 4.29 дана картина распределения полных перемещений для задачи с семью анкерами длиной 2,5 м.

Представляет интерес картина распределения величины  $\sigma_e/R_c$  в окрестности выработки, построенная в соответствии с выражением (4.4) и приведенная на рис. 4.30.

Нахождение площадей поперечного сечения выработок выполняется, как и в задаче с однородной средой, а результаты приведены на рис. 4.31 и 4.32.

Анализ результатов показывает следующее.

Сопоставление рис. 4.22, 4.26, 4.27, 4.28 показывает, что области разрыхления практически одинаковы и отношение радиусов  $r_i/r_0$  приблизительно равно 2,48.

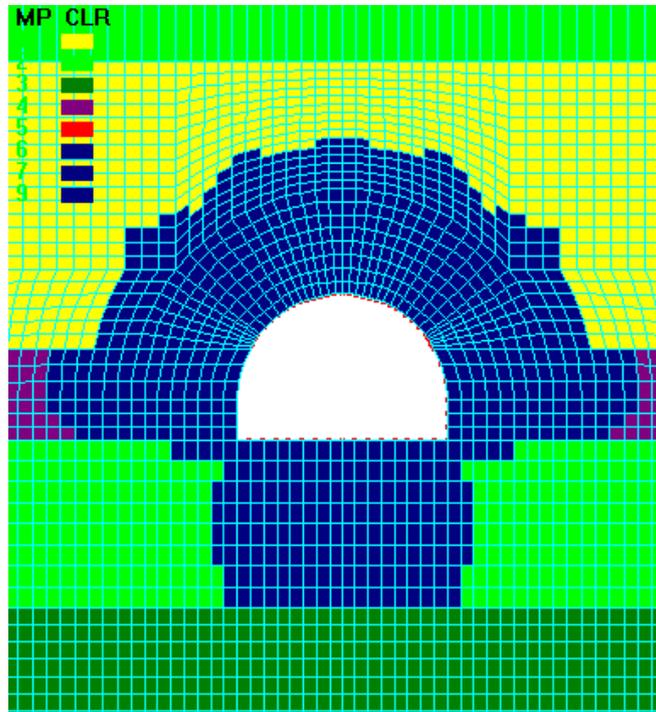


Рис. 4.26. Прилегающая к выработке зона разрыхления при 7 анкерах длиной 2,5 м

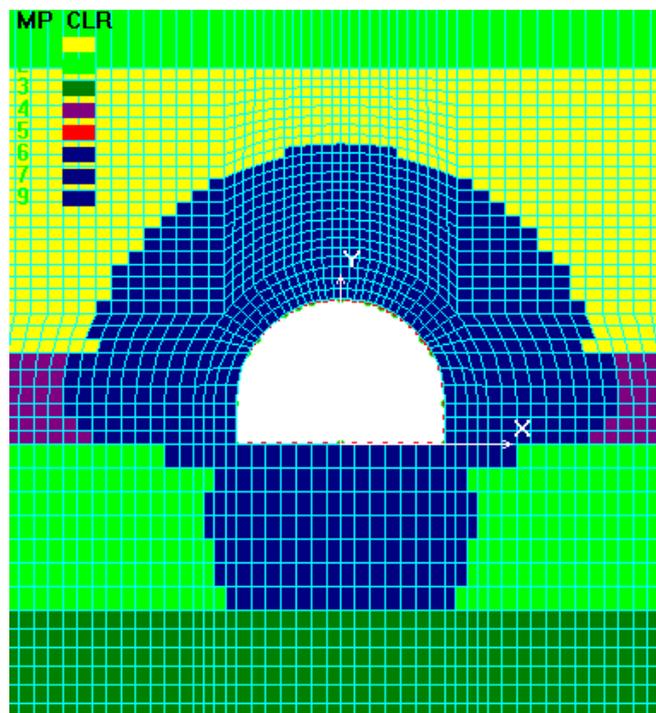


Рис. 4.27. Прилегающая к выработке зона разрыхления при 7 анкерах длиной 1,0 м

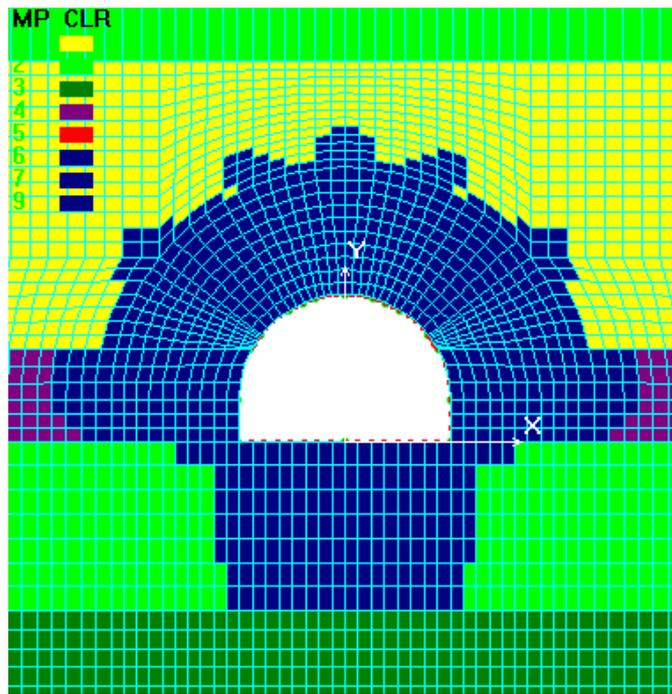


Рис. 4.28. Прилегающая к выработке зона разрыхления при 7 анкерах длиной 3,0 м

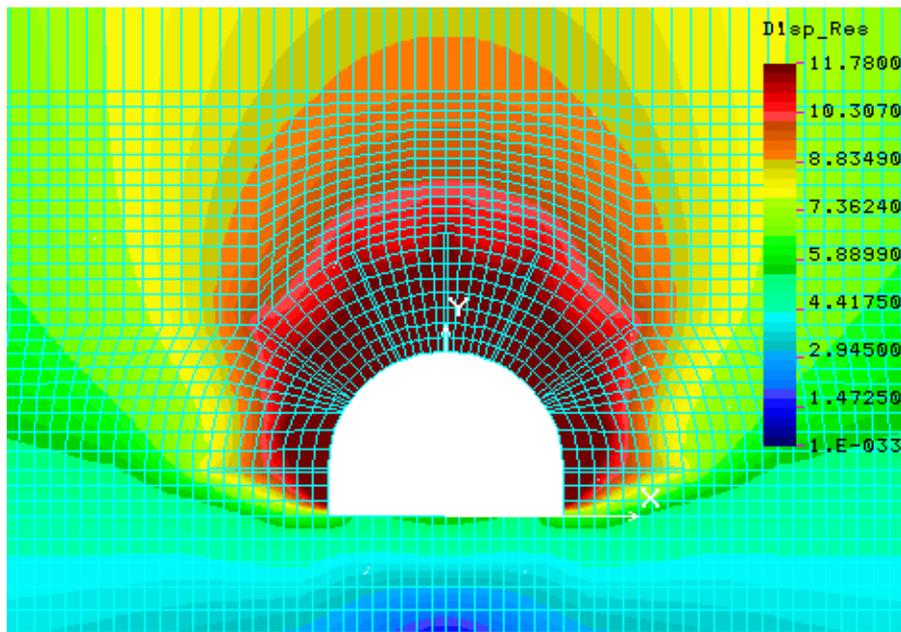


Рис. 4.29. Картина распределения полных перемещений для задачи с 7 анкерами

На рис. 4.24, 4.30 отчетливо видны зоны концентрации напряжений в боках выработки, это связано с наличием угольного пласта, который имеет значительно меньший предел прочности на сжатие по сравнению с породой. По мере удаления от зон концентраций уровень напряжений становится значительно

ниже. Область повышенных напряжений имеет меньшие размеры при наличии подкрепления в виде анкеров. В местах установки анкеров наблюдается значительное уменьшение напряжений. Величина  $\sigma_e/R_c$  составляет для задачи без подкрепляющих элементов 6,11, для задачи с анкерной крепью 3,17, что в 1,93 раза меньше, чем при отсутствии анкерного крепления. На концах анкеров, в массиве, наблюдается незначительная концентрация напряжений (рис. 4.30), что приводит к изменению очертания зоны разрыхления (рис. 4.26, 4.28).

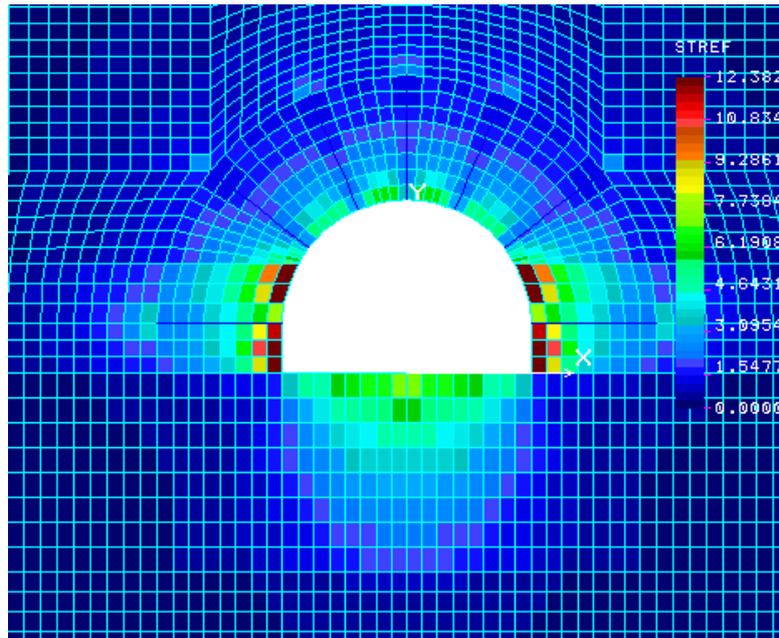


Рис. 4.30. Картина распределения величины  $\sigma_e/R_c$  в окрестности выработки при установке 7 анкеров

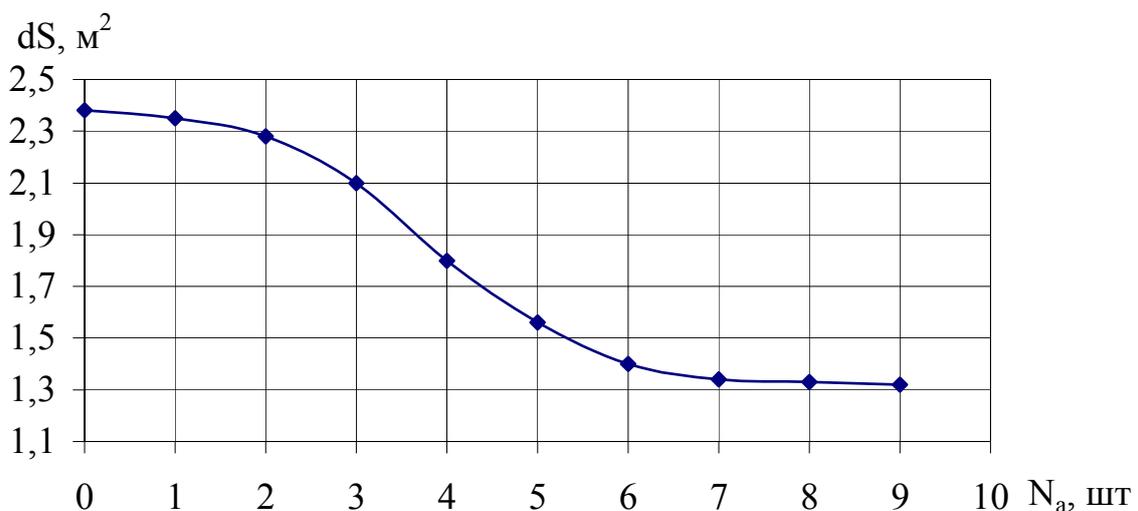


Рис. 4.31. Изменение поперечного сечения выработки в зависимости от количества анкеров

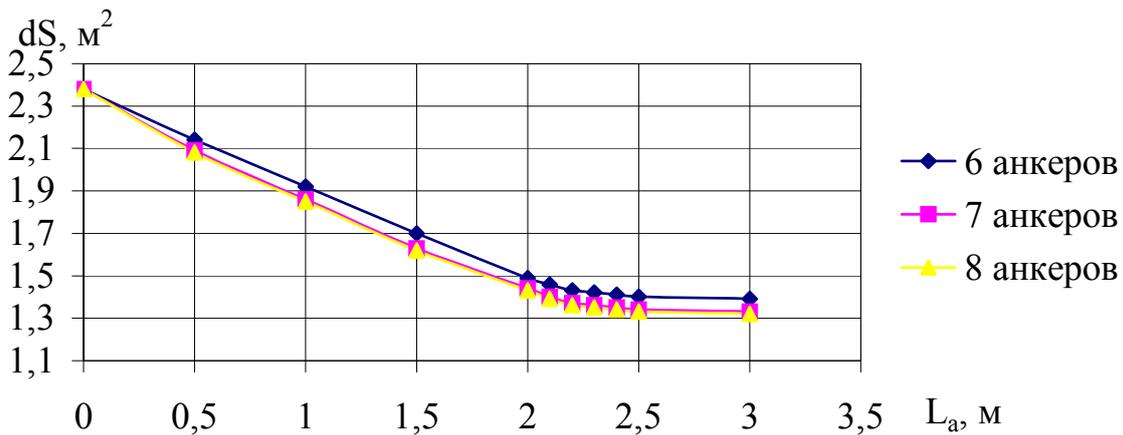


Рис. 4.32. Изменение поперечного сечения выработки в зависимости от длины анкера

Как видно из рис. 4.29, после нескольких нелинейных решений максимальные результирующие перемещения в 1,49 раза ниже, чем на рис. 4.23.

Вертикальные перемещения замка свода выработки уменьшаются от 17,6 см до 9,6 см при изменении количества анкеров (0...9 анк.) и от 17,6 см до 9,7 см при изменении длины анкера (0...3 м) ( $N_a = 7$  анк.).

Достаточная плотность установки анкеров находится в пределах 0,8...1,2 анк/м<sup>2</sup> (рис. 4.31).

Рациональная длина анкера находится в пределах 2,2...2,5 м (рис.4.32).

Таким образом, при проведении выработки в неоднородном породном массиве и установке анкерной крепи с параметрами: плотность анкерования 0,8...1,2 анк/м<sup>2</sup>, длина анкеров 2,2...2,5 м, также весьма значительно снижается уровень напряжений и перемещений на своде выработки, что приводит к повышению ее устойчивости.

Таким образом, внешние размеры области разрыхления в окрестности выработки, пройденной в однородном или в неоднородном породном массиве, практически не зависят от количества и длины установленных анкеров, а определяются прочностными характеристиками горных пород и глубиной заложения выработки, что соответствует выводам, полученным ранее в работе [144]. Внутренний размер области неупругих деформаций (разрыхления) существен-

---

но зависит от числа и длины анкеров: максимальные результирующие перемещения уменьшаются в 1,47 и 1,49 раза, а опускание замка свода выработки – на 45,6 и 44,9 % при установке анкеров для однородного и неоднородного породного массива соответственно. Достаточная плотность установки анкеров находится в пределах 0,8...1,0 анк/м<sup>2</sup> и 0,8...1,2 анк/м<sup>2</sup>, а рациональная длина – 2,3...2,5 м и 2,2...2,5 м, для однородного и неоднородного породного массива соответственно.

---

## ГЛАВА 5

### ШАХТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЯВЛЕНИЯ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ В ВЫРАБОТКАХ, ЗАКРЕПЛЕННЫХ АНКЕРНОЙ КРЕПЬЮ

#### 5.1. Общие требования к анкерной крепи

Эффективность применения анкерной крепи в выработках зависит от выполнения ряда требований, которые установлены на основе анализа многолетних исследований характера деформирования окружающего выработку массива.

1. При проведении выработки вокруг нее образовывается зона разрушений. Наиболее чувствительными являются породы приконтурной зоны в пределах 1...1,5 м от контура выработки. При увеличении глубины разработки – величина зоны разрушений значительно возрастает. В связи с этим, закрепление анкера должно производиться либо за зоной активных расслоений, либо с условием, при котором существует возможность предотвратить разупрочнение и разрыхление приконтурных пород, или нарушенные породы приконтурной зоны будут сохранять максимально возможную остаточную несущую способность.

2. Большие смещения контура выработки будут вызывать значительные напряжения в хвостовике и стержне анкера. Ввиду этого, анкер должен иметь некоторую податливость.

3. При проектировании крепи необходимо учитывать усилия выдергивания (несущую способность) анкера.

Несущая способность анкеров, по результатам различных исследований [37, 149], порой различается на порядок. Это связано с тем, что несущая способность анкера зависит от множества факторов, основными из которых являются конструкция замка, прочность пород, качество выполнения работ и другие.

4. Для предупреждения разрушения анкера, он должен работать в режиме постоянного сопротивления, величина которого меньше усилия выдергивания.

---

5. Установка анкеров должна выполняться до начала развития разрушения, что позволит сохранить остаточную прочность на уровне до 40% прочности ненарушенных пород.

Анкерная крепь, применявшаяся до последнего времени в угольных шахтах, обладает ограниченной податливостью, соответствующей 10...15% начальной длины анкеров. Поэтому ее использовали только там, где ожидаются относительно небольшие деформации породного массива.

Между тем опыт применения анкерной крепи в других отраслях горной промышленности, а также результаты многочисленных исследований показывают, что анкерная крепь может обеспечить устойчивость выработок при больших деформациях приконтурного массива, если только анкера будут способны воспринимать столь значительные деформации.

## **5.2. Горно-геологические условия экспериментального участка**

Для проведения шахтных исследований был выбран экспериментальный участок в наклонной выработке, которая проводится по пласту  $l_3$  сложного строения, состоящего из 5 пачек угля с породными прослойками общей мощностью 2,2 м. Угольный пласт залегает под углом  $11...13^0$ . Уголь пласта черный полублестящий полосчатый, средней крепости. Стратиграфическая колонка пласта  $l_3$  представлена на рис. 2.1.

Физико-механические свойства вмещающих пород определены по результатам испытаний керновых проб из скважины №11280.

Кровля пласта  $l_3$  состоит из пачек аргиллита (серый, не слоистый, слабо-слоистый) и алевролита (серый, слоистый горизонтально слоистый, с линзами глиносидерита) различной крепости и устойчивости. В кровле залегает: устойчивая пачка аргиллита с коэффициентом крепости 5,42 и мощностью 0,8...1,0 м; пачка более слабого аргиллита мощностью 0,8...1,0 м с коэффициентом крепости 2,51; аргиллит мощностью до 1,5 м с коэффициентом крепости 5,28; углистый прослой мощностью до 0,05 м; аргиллит мощностью свыше

---

1,5 м с коэффициентом крепости 4,67; алевролит мощностью 2,34 м с коэффициентом крепости 6,32.

Средневзвешенная прочность на сжатие пород кровли выработки с учетом всех слоев мощностью более 0,1 м на расстоянии до 7,0 м от контура составляет  $R = 52,7$  МПа.

Расчетное сопротивление сжатию  $R_{сж}$  кровли выработки с учетом всех слоев мощностью более 0,1 м на расстоянии до 7,0 м от контура составляет:

$$R_{сж} = R \cdot k ,$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий нарушенность массива горных пород, 0,8.

$$R_{сж} = 52,7 \cdot 0,8 = 42,1 \text{ МПа.}$$

Категория устойчивости пород кровли выработки – II, состояние устойчивости пород – среднеустойчивое.

Почва пласта  $l_3$  состоит: аргиллит (темно-серый, комковатого сложения) мощностью 0,45...1,25 м с коэффициентом крепости 2,2, алевролит (серый, слюдистый, комковатый) мощностью 2,4...4,0 м с коэффициентом крепости 4,6 и песчаник (мелкозернистый, тонкозернистый, кварцевый, трещиноватый) мощностью 8,35...19,95 м с коэффициентом крепости 5,8.

Встречи геологических нарушений, изменений гипсометрии пласта, нарушений структуры пласта и массива приконтурных пород по трассе выработки не наблюдалось.

### **5.3. Выбор вида анкерной крепи, ее конструкции и параметров**

Как отмечалось в п. 1.3 сейчас около 70% анкеров используются совместно с быстротвердеющими синтетическими заполнителями. Из них 90% – с закреплением по всей длине анкера, остальные 10% – с “точечным” закреплением.

Сталеполимерная анкерная крепь отличается от других видов анкерной крепи использованием, для закрепления армирующей штанги в породе, высокопрочных быстротвердеющих составов на основе смол органического и мине-

---

рального происхождения. Сталеполимерные анкеры способны практически мгновенно после установки вступать в активную работу с массивом и обеспечивать высокую несущую способность даже в трещиноватых весьма обводненных породах [10].

Устанавливать сталеполимерные анкеры возможно инъекционным способом и патронированным методом.

В первом случае сталеполимерные анкеры устанавливают следующим образом: в скважину под избыточным давлением вводят связующий состав, а затем размещают в ней армирующий стержень.

Патронированный метод включает введение в скважину связующего состава в специальных ампулах и вращением армирующего стержня при подаче в скважину для разрушения оболочек ампул и смешивания компонентов связующего состава. Этот метод устраняет мокрые процессы, связанные с приготовлением в забое связующего состава и его нагнетания в шпур, повышает надежность технологических процессов, сокращает почти вдвое трудозатраты на крепление.

Явные преимущества сталеполимерных анкеров перед прочими конструкциями явились причиной к тому, что на экспериментальном участке использовалась именно они.

Сталеполимерная анкерная крепь (рис. 5.1) состоит из металлической штанги 1, шайбы 2, гайки 3, уплотнительной резиновой манжеты 4 и ампул с быстротвердеющей смесью 5. Штанги изготовлены из стали периодического профиля. На одном конце штанга имеет резьбу, а на другом – срез в виде ласточкиного хвоста.

Анкерная штанга характеризуется следующими прочностными параметрами: прочность на разрыв 265 кН, прочность на разрыв по резьбе 250 кН. Такие показатели прочности анкерной штанги соответствуют требованиям КД 12.01.01.501-98 к анкерам обычной несущей способности. Длина штанг для крепления кровли выработки составляет 2,5 м, диаметр – 24 мм; для крепления боков выработки применялись трубчатые анкера из стеклопластика.

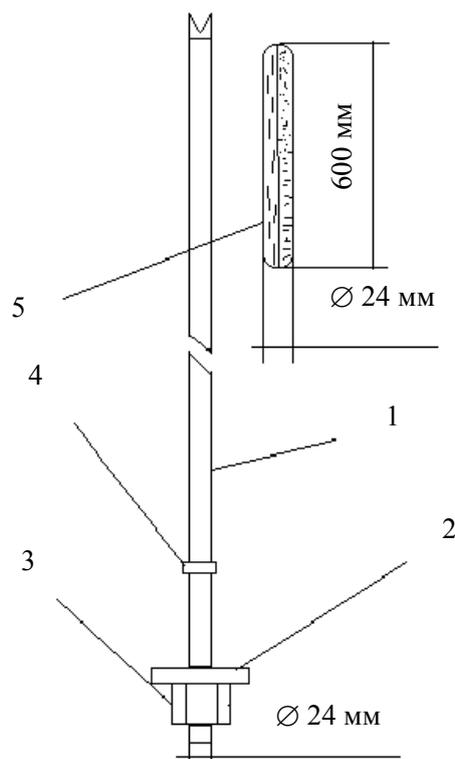


Рис. 5.1. Конструкция сталеполимерного анкера, используемого на экспериментальном участке

Каждый анкер закрепляется по всей длине двумя ампулами с параметрами 24×600 мм. Ампула представляет собой двухсекционную трубку из полимерной пленки. Одна секция заполнена полиэфирной смолой с наполнителями, вторая – отвердителем.

#### **5.4. Технология выполнения работ при проведении выработок с анкерной крепью**

Проведение выработки ведется комплексной суточной бригадой. Режим работы забоя 4-х сменный – три смены рабочие и одна ремонтно-подготовительная. В ремонтно-подготовительную смену производится ремонт машин и механизмов, ревизия и ремонт электроаппаратуры, наращивание конвейера, противопожарного и вентиляционного трубопроводов, зачистка и осланцевание выработки, настилка рельсового пути, доставка крепежных материалов и обо-

---

рудования. В рабочие смены ведется прохождение и крепление выработки. Работы при этом организуются по графику 3...5 циклов в смену.

Прохождение выработки ведется комбайном ГКП, который производит отбойку и погрузку горной массы. Отбитая горная масса комбайном грузится на скребковый конвейер СР-70. После выемки комбайном горной массы на 1,0 п.м. комбайн отгоняется от забоя на 2,5 м. Далее производится осмотр забоя, обираются нависшие и отслоившиеся куски породы и угля, и устанавливается временная крепь, представляющая собой подхват, закрепленный двумя стойками. Под прикрытием временной крепи через отверстия в подхвате производится бурение шпуров для установки анкерной крепи. В качестве бурильного механизма использовался перфоратор ПТ-54. Процесс установки сталеполимерных анкеров сводится к следующему: в шпур вводят 2 ампулы, затем в нем размещают армирующий стержень, который приводят во вращение с помощью ручного электросверла. Вращение армирующего стержня в шпуре производится в течение 30...45 с. За это время оболочка ампул, помещенных в шпуре, полностью разрушается, а компоненты связующего состава смешиваются. Для предотвращения вытекания связующего состава, при установке анкеров в пробуренных с наклоном вверх шпурах (более  $30^{\circ}$ ), на штангу надевается резиновая манжета. Через 1...4 мин на контурном конце армирующего стержня размещают опорные элементы, а натяжение анкера производится уже через 15...30 мин после окончания работ. Принятая схема установки анкеров показана на рис. 5.2. Затяжка кровли и боков выработки производится сплошную при помощи грузонесущих металлических сеток с ячейками не более  $100 \times 100$  мм.

Все параметры установки анкерной крепи могут изменяться в зависимости от типа породы, температуры и разности диаметров анкера и шпура.

При возведении анкерной крепи запрещается:

- производство работ по бурению шпуров без использования водопромывания;
- производство каких-либо работ и операций с комбайном;
- подъем и установка элементов крепи комбайном;

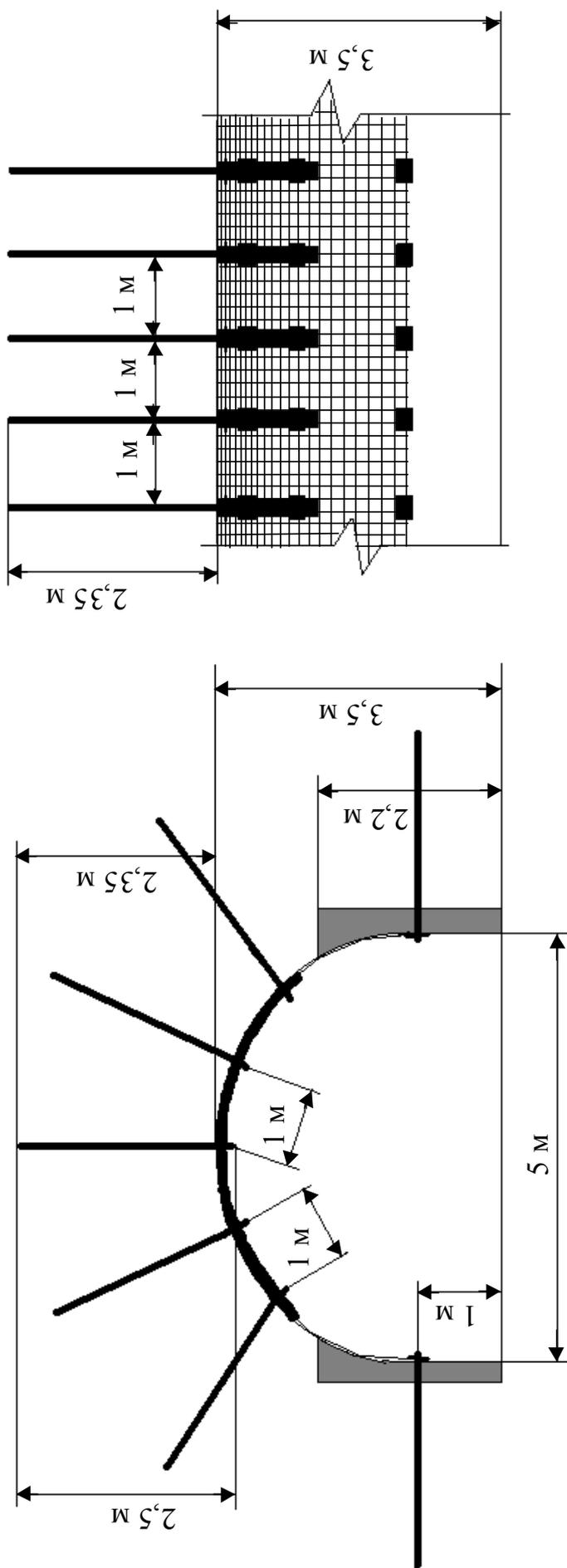


Рис. 5.2. Схема крепления капитальной наклонной выработки анкерами с металлической сеткой на экспериментальном участке

- 
- выполнение работ в незакрепленном пространстве забоя до осмотра и оборки;

а также должны выполняться следующие требования:

- разность диаметров анкера и отверстия должны находиться в пределах 4...7 мм;
- время вращения болта должно быть меньше периода схватывания застывающего полимера;
- анкер должен удерживаться неподвижно в течение необходимого времени и затем только натягиваться по необходимости;
- работы должны выполняться под защитой временной или постоянной крепи.

Отставание постоянной крепи от забоя допускается не более 1,3 м.

Проветривание забоя осуществляется вентилятором местного проветривания по вентиляционным прорезиненным трубам диаметром 800 мм (в призабойной части 600 мм). Контроль количества воздуха, поступающего в забой, осуществляется аппаратурой АПТВ.

Непрерывный автоматический контроль за содержанием метана в призабойном пространстве и в исходящей из забоя струе воздуха осуществляется аппаратурой автоматической газовой защиты АТ-3-1.

### **5.5. Система контроля безопасного состояния выработки с анкерной крепью**

В выработке с анкерной крепью необходимо производить регулярный контроль состояния приконтурной зоны выработки и анкеров. Контроль осуществляется при помощи индикаторов безопасного состояния выработок, сигнализирующих о развитии деформационных процессов и достижении предельно допустимых состояний массива горных пород и анкерных штанг.

При использовании индикаторов безопасного состояния выработок необходимо соблюдать следующие условия.

А. Плотность размещения индикаторов:

---

– 2 индикатора на один ряд анкеров для типичных условий в породах II категории устойчивости.

Б. Параметры индикаторов:

– значения критической величины деформации приконтурной зоны выработки – не более 25 мм;

– значения критической величины податливости анкерной штанги не более 25 мм.

В. Технологическое оборудование, которое навешивается на анкерную крепь при строительстве и эксплуатации выработки, не должно создавать динамических и статических нагрузок, превышающих 10 кН на 1 анкер в ряду.

Контроль за прочностью закрепления анкеров в шпурах производился переносным гидравлическим прибором ПКА-1. Контроль качества натяжения штанг анкерной крепи осуществлялся динамометрическим ключом механического действия КДМ-5. Измерение натяжения анкеров во времени производилось гидравлическим динамометром ДГА-1. Для определения абсолютной величины расслоения кровли использовался прибор ПРК-2м.

## **5.6. Визуальные и инструментальные наблюдения**

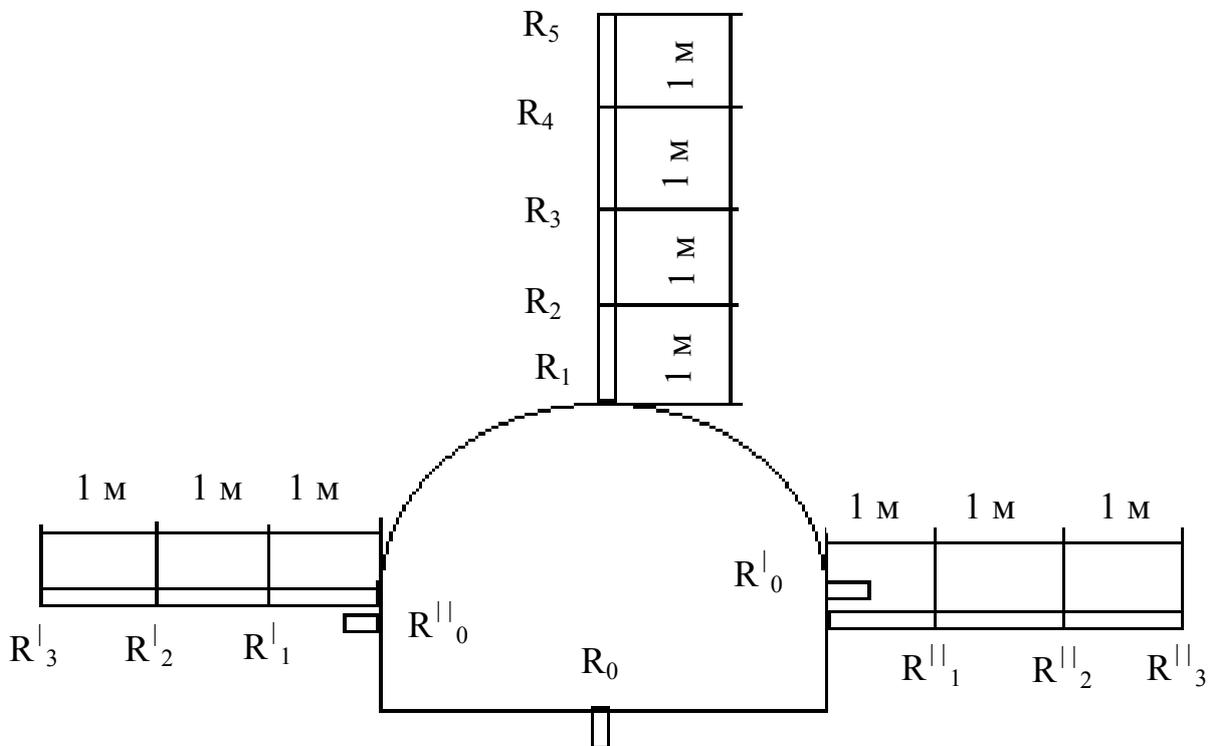
### **за экспериментальным участком**

Для исследований основных горно-геологических и горнотехнических факторов, определяющих работоспособность крепи и характер взаимодействия крепи с вмещающим массивом пород, в работе была принята методика ВНИМИ [150-152].

Для изучения смещений пород и крепи был принят один из наиболее опробованных методов – метод установки реперных замерных станций. Совокупный анализ результатов наблюдений по указанным станциям обеспечивает достоверную и весьма полную информацию о процессах деформирования пород и крепи [150].

Для проведения инструментальных наблюдений были оборудованы 6 реперных замерных станций, схематичное представление которых показано на рис. 5.3.

а)



б)

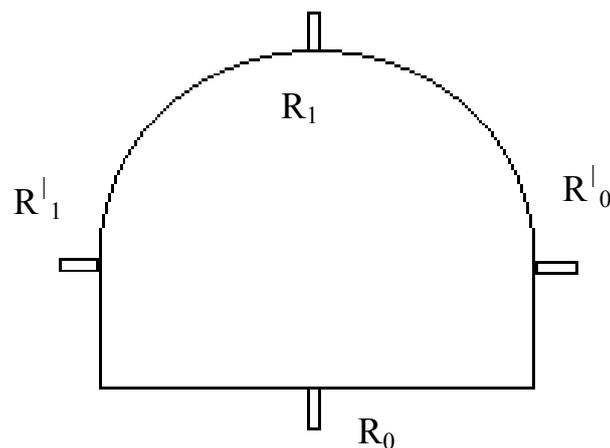


Рис. 5.3. Схема замерных станций для наблюдения за смещением пород кровли и боков выработки (а) глубинная и (б) контурная реперные станции

Для оборудования глубинных станций использовались репера трубчатого типа. Репер представляет собой отрезок трубы с прикрепленными к нему упру-

---

гими пластинчатыми пружинами, посредством которых он расклинивается в скважине, надежно раскрепляясь в ней. Такие репера отличаются надежностью и хорошо зарекомендовали себя при проведении инструментальных наблюдений в условиях Донецкого бассейна. Контурные репера располагали по периметру выработки: в кровле, боках и почве. Репера для замера смещений породного контура изготавливали из металлического стержня  $\varnothing 18...20$  мм,  $l = 0,5...0,6$  м.

Оценка работоспособности горных выработок осуществлялась постоянными маркшейдерскими наблюдениями за общим состоянием крепи и выработки в целом, а также за деформациями и сдвигами приконтурного слоя массива вмещающих пород и смещениями элементов крепи. Наблюдения проводились как на участках выработок с экспериментальной (исследуемой) крепью, так и на контрольных участках с проектной крепью.

При инструментальных маркшейдерских исследованиях фиксировалось время начала сдвижений и величина смещений элементов крепи и контура выработки во времени.

На основании этих исследований оценивали тенденцию поведения крепи во времени и влияние ее конструктивных элементов на работоспособность выработки, а также прогнозировалась во времени периодичность и необходимость ремонтов выработки.

Параллельно с производством инструментальных наблюдений производилось визуальное обследование выработок, состояния крепи и затяжки. Результаты наблюдений и измерений заносились в специальный журнал.

Поскольку методикой исследований предусматривались длительные инструментальные наблюдения, то была принята следующая частота замеров: в первые 20 суток – 1 раз в сутки, в период 20 суток...2 месяца – 1 раз в 5 дней, затем – раз в 20 дней.

Совокупный анализ данных замеров смещений породного массива, окружающего выработку, позволяют сделать следующие выводы.

Смещения породного контура проявляется не сразу после установки постоянной крепи, а через некоторый промежуток времени, который определяется, в первую очередь, устойчивостью вмещающего выработку массива пород и геометрическими параметрами выработки.

При проведении и поддержании выработок вне зоны влияния очистных работ со смещениями кровли, почвы или боков можно выделить два характерных периода: период интенсивных и период установившихся смещений контура вмещающих пород (рис. 5.4 и 5.5). Данные измерений показали, что продолжительность интенсивного периода смещений составляет 20...50 суток.

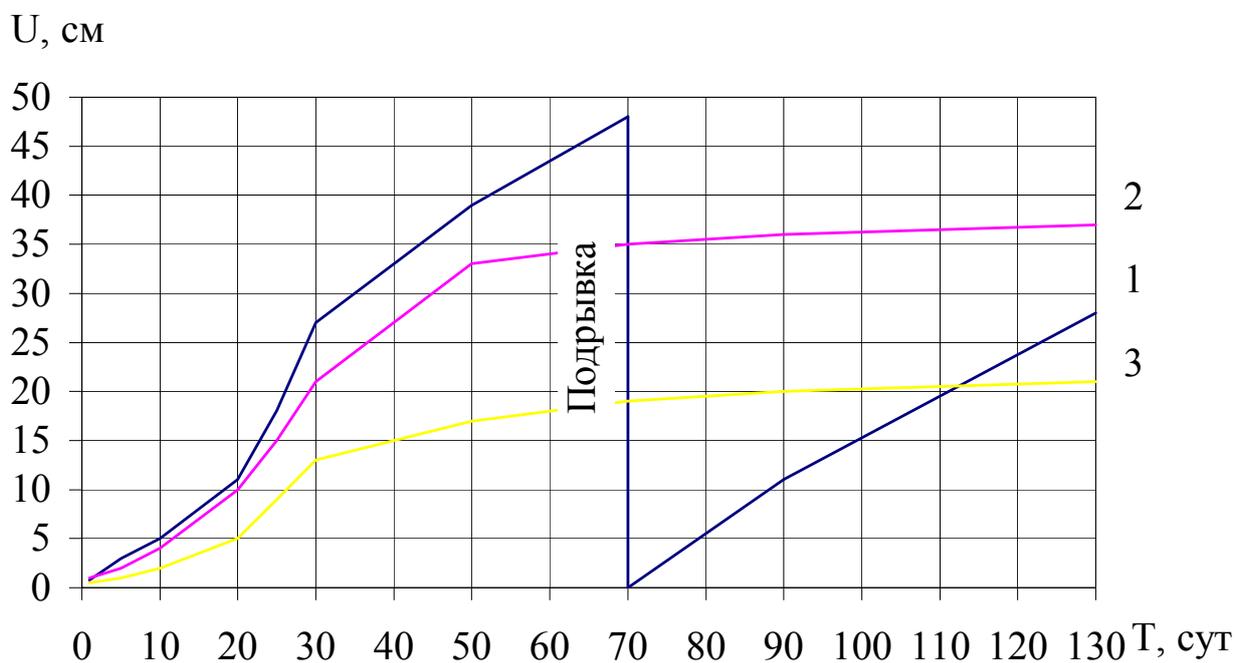


Рис. 5.4. Смещение почвы (1), кровли (2) и боков (3) выработки на контрольном участке

Скорости смещений контура вмещающих пород в интенсивном периоде формирования зоны нарушенных пород характеризуются большими величинами.

В сложных горно-геологических условиях ООО “ДТЭК Добропольеуголь” крепление выработки анкерной крепью обеспечивает резкое замедление процессов смещений пород кровли и значительное уменьшение величины смещений как на контуре выработки, так и в глубине массива (рис. 5.6 и 5.7). Такое

замедление процессов сближения элементов крепи и массива вмещающих пород наблюдается, в основном, в первые месяцы после производства работ.

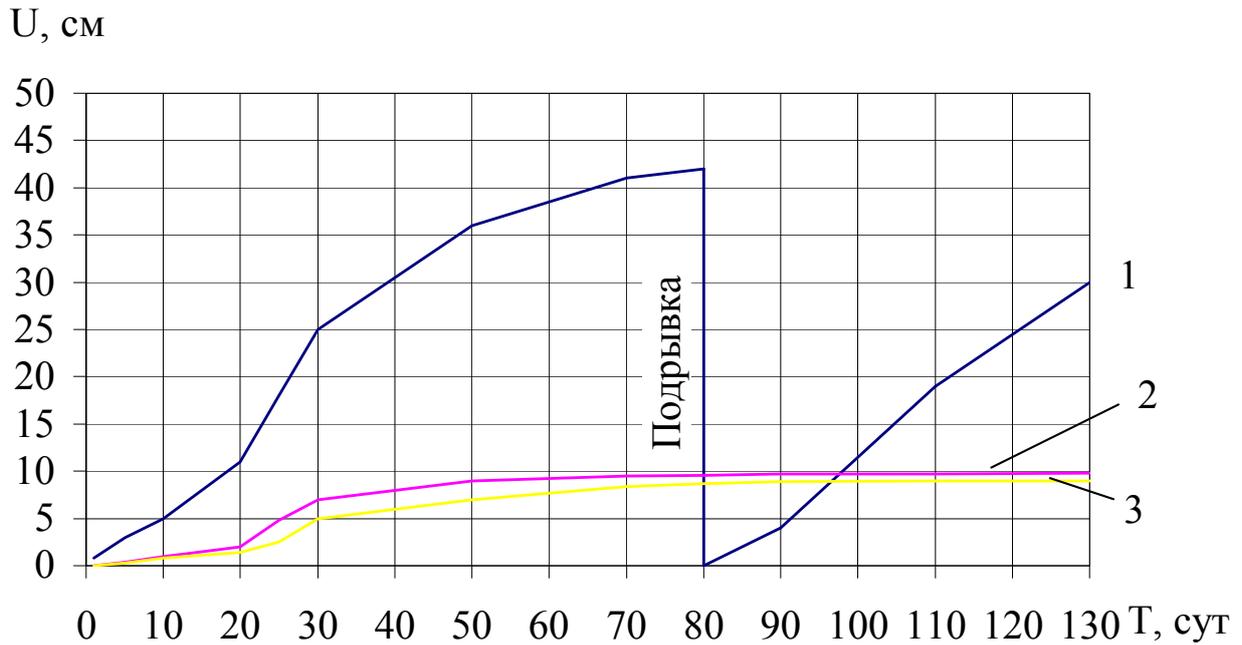


Рис. 5.5. Смещение почвы (1), кровли (2) и боков (3) выработки на экспериментальном участке

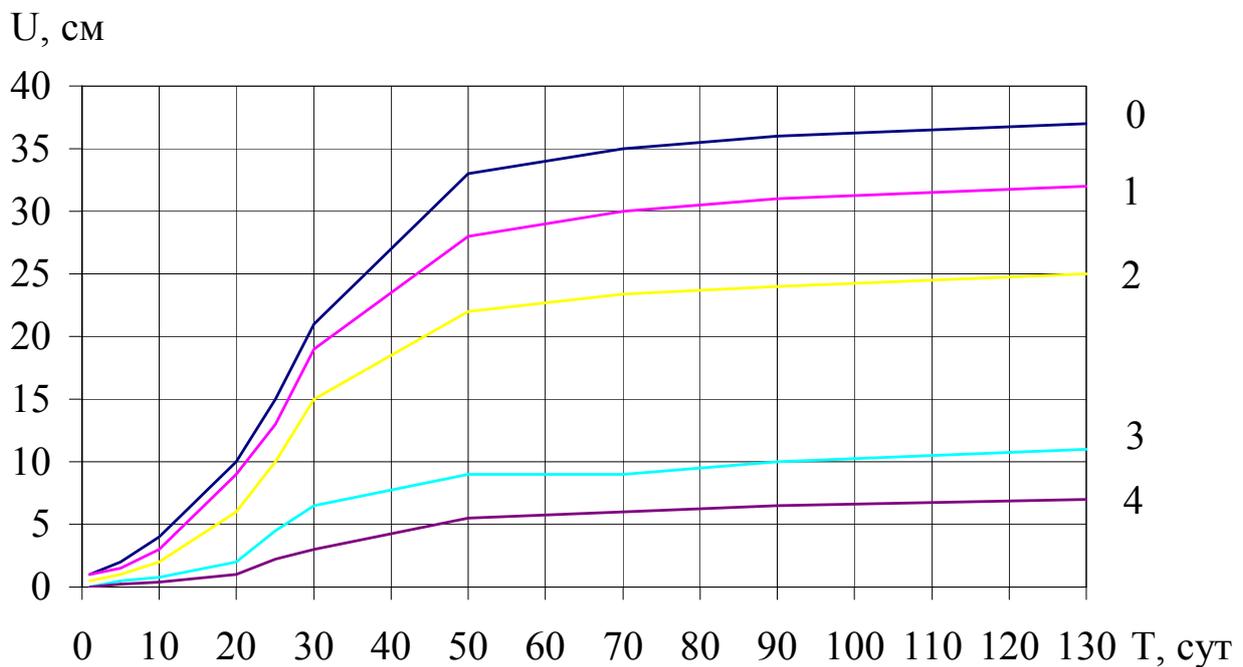


Рис. 5.6. Смещение пород кровли на контрольном участке:  
0, 1, 2, 3, 4 – глубина заложения реперов, м

Подрывка выдавленных пород почвы не обеспечивает устойчивого состояния выработки, а, наоборот, интенсифицирует процессы деформации крепи

и вмещающего выработку массива пород (рис. 5.4 и 5.5). После проведения нескольких (обычно двух-трех) подрывок выдавленных пород почвы, как правило, выработка требует перекрепления.

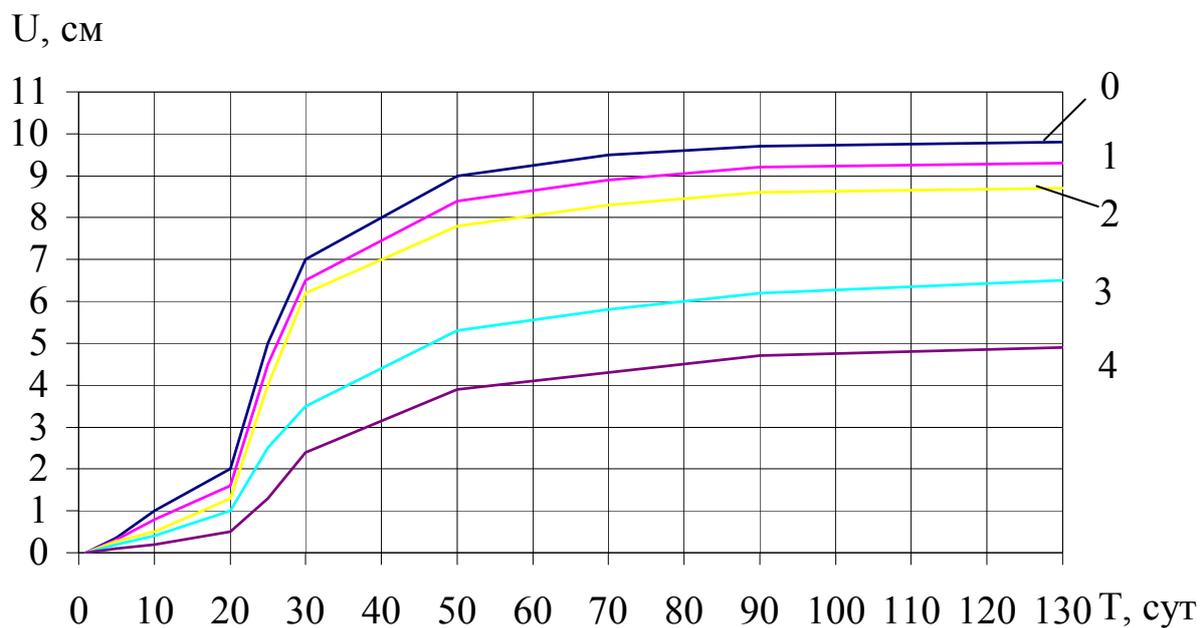


Рис. 5.7. Смещение пород кровли на экспериментальном участке:

0, 1, 2, 3, 4 – глубина заложения реперов, м

На завершающем этапе формирования зон деформирования пород глубина распространения разрушенных пород вглубь массива достигает следующих конечных величин: в кровле – 5,5 м, в боках – 3...3,5 м и в почве 1,5...2 м.

### 5.7. Определение экономической эффективности применения анкерной крепи

Анкерная крепь имеет большие экономические преимущества по сравнению с обычными видами крепи. Экономия в основном достигается за счет сокращения затрат на крепежные материалы, доставку и возведение крепи и за счет уменьшения затрат на выемку и транспортировку горной массы, получаемой при проведении выработок увеличенного сечения с рамной крепью, и возрастает с увеличением сечения выработки. Применение анкеров в сочетании с другими видами крепи также дает значительный экономический эффект. Ниже приводится методика определения сравнительной экономической эффективно-

---

сти применения анкерной крепи в горных выработках с учетом срока службы каждого вида крепи и срока службы выработки, рассчитываемой по прямым затратам в денежном выражении.

При этом учитываются затраты на: 1) крепь; 2) разгрузку крепи на шахтной поверхности; 3) доставку крепи с поверхности до подземного участка с учетом складских расходов; 4) бурение шпуров под анкеры; 5) возведение крепи с учетом установки временной крепи; 6) поддержание выработки; 7) выемку и транспортировку горной массы от прохождения излишнего сечения; 8) извлечение крепи.

Затраты на крепление выработок анкерной крепью сравниваются с затратами на крепление выработок с применением базового вида крепи, причем под базовым видом крепи понимается эталонный вид крепи, применяемый ранее. Затраты относятся на 1 м длины выработки. Суммарная экономическая эффективность применения анкерной крепи за весь срок службы 1 м выработки по сравнению с базовым видом крепи (с учетом коэффициента доплат) рассчитывается по формуле

$$\Delta \mathcal{E}_r = \Delta \mathcal{E}_1 + K_d \sum_{i=2}^8 \Delta \mathcal{E}_i,$$

где  $K_d$  – средний коэффициент доплат по угольному бассейну;

$\Delta \mathcal{E}_i$  – разница в различного рода затратах (1...8, перечислены выше), приходящаяся на 1 м длины выработки при базовой и анкерной крепи ( $i = 1, 2, \dots, 8$ ), грн.

Величина

$$\Delta \mathcal{E}_1 = (1 - K_{\bar{o}}) \lambda_{\bar{o}} S_{1\bar{o}} - (1 - K_a) \lambda_a S_{1a},$$

где  $K_{\bar{o}}, K_a$  – коэффициент повторного использования базовой и анкерной крепи (означает какая часть крепежного материала пригодна для повторного использования);

$S_{1\bar{o}}, S_{1a}$  – стоимость комплекта базовой и анкерной крепи на 1 м выработки, грн;

---

$\lambda_{\sigma}, \lambda_a$  – отношение срока службы выработки  $\tau$  к сроку службы базовой  $\tau_{\sigma}$  и анкерной  $\tau_a$  крепей.

Величины  $\lambda_{\sigma}$  и  $\lambda_a$  показывают, сколько раз за время службы выработки ее нужно закрепить крепью со сроком службы соответственно  $\tau_{\sigma}$  и  $\tau_a$  лет. Если срок службы крепи превышает срок службы выработки, то в расчетах величины  $\lambda_{\sigma}$  и  $\lambda_a$  принимаются равными единице.

Величина

$$\Delta \mathcal{E}_2 = S_{2\sigma} \lambda_{\sigma} - S_{2a} \lambda_a,$$

где  $S_{2\sigma}, S_{2a}$  – стоимость разгрузки комплекта базовой и анкерной крепи на шахтной поверхности, грн.

Величина

$$\Delta \mathcal{E}_3 = S_{3\sigma} \lambda_{\sigma} - S_{3a} \lambda_a,$$

где  $S_{3\sigma}, S_{3a}$  – стоимость доставки соответственно базовой и анкерной крепи на 1 м выработки с поверхности до подземного участка с учетом складских расходов, грн.

Величина

$$\Delta \mathcal{E}_4 = (n_{\sigma} - n_a) l_a C_4,$$

где  $n_{\sigma}, n_a$  – количество шпуров под анкеры на 1 м выработки соответственно при базовой и анкерной крепи;

$l_a$  – средняя глубина скважин, м;

$C_4$  – затраты на бурение 1 м шпура, грн.

Величина

$$\Delta \mathcal{E}_5 = S_{5\sigma} \lambda_{\sigma} - S_{5a} \lambda_a,$$

где  $S_{5\sigma}, S_{5a}$  – затраты на возведение соответственно базовой и анкерной крепи на 1 м выработки, грн.

Величина

$$\Delta \mathcal{E}_6 = (S_{6\sigma} - S_{6a}) \tau,$$

---

где  $S_{6\delta}, S_{6a}$  – годовые затраты на поддержание 1 м выработки, грн.

Величина

$$\Delta \mathcal{E}_7 = (S_{6\delta} - S_{6a}) C_7,$$

где  $S_{6\delta}, S_{6a}$  – площадь сечения выработки в проходке при соответственно базовой и анкерной крепи, м<sup>2</sup>;

$C_7$  – затраты на выемку, транспортировку и разгрузку 1 м<sup>3</sup> горной массы, грн.

Затраты на выемку 1 м<sup>3</sup> горной массы при комбайновой проходке состояются из затрат по статьям: стоимость электроэнергии, амортизационные отчисления на комбайн и оборудование, погрузка, транспортировка и разгрузка отбитой горной массы.

Величина

$$\Delta \mathcal{E}_8 = S_{8\delta} \lambda_{\delta} - S_{8a} \lambda_a,$$

где  $S_{8\delta}, S_{8a}$  – затраты на извлечение соответственно базовой и анкерной крепи на 1 м выработки, грн.

Среднегодовая экономическая эффективность применения анкерной крепи на 1 м выработки

$$\Delta \bar{\mathcal{E}}_{\tau} = \frac{\Delta \mathcal{E}_{\tau}}{\tau},$$

Среднегодовая экономическая эффективность применения анкерной крепи по всей длине выработки по сравнению с применением базовой крепи

$$\Delta \bar{\mathcal{E}}_a = \Delta \bar{\mathcal{E}}_{\tau} L_a,$$

где  $L_a$  – протяженность выработки, м.

Общая экономическая эффективность применения анкерной крепи по всей длине выработки в течение всего ее срока службы

$$\mathcal{E}_a = \Delta \bar{\mathcal{E}}_a \tau = \Delta \mathcal{E}_{\tau} L_a = \Delta \mathcal{E}_1 L_a + K_{\delta} L_a \sum_{i=2}^8 \Delta \mathcal{E}_i,$$

---

Общий экономический эффект применения анкерной крепи в горных выработках складывается из общей экономической эффективности ее применения по всем заанкерованным выработкам, имеющихся на шахте.

Таким образом, шахтные наблюдения показали, что величина и скорость смещения пород кровли и почвы при анкерной крепи, значительно меньше, чем при арочной, коржение предотвратилось полностью. Параметры анкерной крепи: плотность 1 шт/м<sup>2</sup> и длина 2,2...2,5 м являются достаточными для поддержания капитальных наклонных выработок в условиях шахт ООО «ДТЭК Добропольеуголь» в эксплуатационном состоянии. При этом условия поддержания выработок с анкерной крепью лучше, чем с арочной.

---

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе установленных закономерностей взаимодействия анкерной крепи и приконтурного породного массива решена актуальная научно-техническая задача повышения устойчивости капитальных наклонных выработок вне зоны влияния очистного пространства.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем.

Выполнен анализ объемов применения различных видов крепи в Украине и за рубежом. Сделана оценка эффективности использования известных средств и способов повышения устойчивости выработок.

Выполнен анализ производственной деятельности шахт ООО “ДТЭК Добропольеуголь” и проведены обследования протяженных горных выработок.

Установлено, что в условиях шахт ООО “ДТЭК Добропольеуголь” возможна замена арочной крепи на анкерную в капитальных наклонных выработок при достаточной плотности установки анкеров около 1,0 шт/м<sup>2</sup> и рациональной длине – 2,2...2,5 м.

На основе аналитических исследований доказано, что размеры зоны разрушенных пород в окрестности выработки арочной формы, закрепленной анкерной крепью, не зависят от плотности анкерования и длины анкера, а определяются физико-механическими свойствами горных пород и параметрами начального поля напряжений. Смещения контура выработки в условиях “жесткого” деформирования приконтурного массива определяются величиной объемного разрыхления пород и нелинейно зависят от числа и длины анкеров, что позволит в зависимости от назначения выработки выбирать рациональные параметры анкерной крепи.

На основе установленных закономерностей и полученных на их основе технических решениях разработаны рекомендации по креплению анкерной крепью наклонных выработок в условиях шахт ООО “ДТЭК Добропольеуголь”.

---

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гринько Н.К. Повышение технического уровня угольной промышленности / Н.К. Гринько, Н.А. Архипов. – М.: Недра, 1991. – 222 с.
2. Доброгорский Н.А. Уголь вчера, сегодня, завтра / Н.А. Доброгорский Н.А., В.И. Бычков. – Днепропетровск: Січ, 1994. – 93 с.
3. Голицын М.В. Все об угле / М.В. Голицын, А.М. Голицын. – М.: Наука, 1989. – 192 с.
4. Архипов Н.А. Добыча угля и рациональное природопользование / Архипов Н.А., Ельчанинов Е.А., Горбачев Д.Т. – М.: Недра, 1987. – 285 с.
5. Козырев В.С. Metallургическая и угольная промышленность СНГ в 1997...1998 годах / В.С. Козырев, Б.А. Карманов, Н.Н. Бережная // Горный журнал. – 1999. – №7. – С. 7-9.
6. Бочкарева Н.Э. Угольная промышленность Украины: стратегия развития / Н.Э. Бочкарева // Уголь Украины. – 1997. – №12. – С. 18-21.
7. Красник В.Г. Программы перспективного развития угольной промышленности Украины / В.Г. Красник // Уголь Украины. – 2006. – № 12. – С. 6-8.
8. Концепція розвитку вугільної промисловості // Уголь Украины. – 2005. – № 9. – С. 3-4.
9. Радченко В.В. Состояние подготовительных работ на шахтах Украины и создание новой проходческой техники / В.В. Радченко, А.Г. Лаптев // Уголь Украины. – 1999. – №5. – С. 3-8.
10. Кошелев К.В. Поддержание сопряжений горных выработок / Кошелев К.В., Игнатович Н.В., Полтавец В.И. – К.: Техника, 1991. – 176 с.
11. Янко С.В. Основные направления технического развития шахт Украины / С.В. Янко // Уголь Украины. – 1993. – №1. – С. 8-11.
12. Кара В.В. Состояние и ремонт горных выработок на угольных шахтах Украинской ССР / В.В. Кара, И.Ю. Заславский, Г.Л. Зорин // Шахтное строительство. – 1988. – №6. – С. 22-25.

- 
13. Повышение устойчивости подготовительных выработок угольных шахт / И.Ю. Заславский, В.Ф. Компанец, А.Г. Файвишенко, В.М. Клещенко. – М.: Недра, 1991. – 235 с.
  14. Безремонтное содержание горных выработок при разработке тонких и средней мощности угольных пластов / Барановский В.И., Весков М.И., Графова А.Я. и др. – М.: ЦНИЭИуголь, 1973. – 40 с.
  15. Кошелев К.В. Поддержание, ремонт и восстановление горных выработок / К.В. Кошелев, А.Г. Томасов. – М.: Недра, 1985. – 215 с.
  16. Селезень А.П. Состояние подготовительных выработок и пути повышения их устойчивости / А.П. Селезень // Уголь Украины. – 1987. – №5. – С. 25-27.
  17. Косков И.Г. Основные направления совершенствования крепления горных выработок / И.Г. Косков // Шахтное строительство. – 1985. – №1. – С. 3-5.
  18. Заславский Ю.З. Новые виды крепи горных выработок / Ю.З. Заславский, Е.Б. Дружко. – М.: Недра, 1989. – 256 с.
  19. Заслов В.Я. Механизация крепления горных выработок / В.Я. Заслов. – М.: Недра, 1980. – 224 с.
  20. Кузнецов А.С. Снижение уровня ручного труда шахтеров в условиях рыночных отношений / А.С. Кузнецов // Уголь Украины. – 1991. – №1. – С. 2-6.
  21. Косков И.Г. Новые материалы и конструкции крепи горных выработок. / И.Г. Косков. – 2-е изд. перераб. и доп.– М.: Недра, 1987. – 196 с.
  22. Дубровский Е.М. Каменноугольная промышленность ФРГ / Е.М. Дубровский Е.М., К.О. Дистерло. – М.: Недра, 1964. – 132 с.
  23. Угольная промышленность Великобритании и Франции / Братченко Б.Ф., Андросова М.С., Архипова Н.А. и др. – М.: Недра, 1971. – 368 с.

- 
24. Горбачев Т.Ф. Применение анкерной крепи в подготовительных выработках / Горбачев Т.Ф., Штумпф Г.Г., Стрыгин Б.И. – Новосибирск.: Наука, 1972. – 296 с.
  25. О применении анкерных крепей и систем для поддержания выработок глубоких шахт / М.П. Зборщик, А.П. Ключев, Н.Н. Касьян, П.С. Дрипан // Уголь Украины. – 1999. – №10. – С. 24-27.
  26. Кошелев К.В. Охрана и ремонт горных выработок / Кошелев К.В., Петренко Ю.А., Новиков А.О. – М.: Недра, 1991. – 220 с.
  27. Широков А.П. Теория и практика применения анкерной крепи / А.П. Широков. – М.: Недра, 1981. – 381 с.
  28. Широков А.П. Повышение устойчивости горных пород / А.П. Широков, В.Ф. Горбунов. – Новосибирск.: Наука, 1983. – 168 с.
  29. Косков И.Г. Внедрение анкерной крепи – основной путь снижения издержек производства на шахтах / И.Г. Косков // Уголь Украины. – 1994. – №7. – С. 31-33.
  30. Чупрунов Г.Д. Проведение и крепление горных выработок / Г.Д. Чупрунов. – М.: ГОСГОРТЕХиздат, 1960. – 532 с.
  31. Мельников Н.И. Анкерная крепь / Н.И. Мельников. – М.: Недра, 1980. – 252 с.
  32. Технология закрепления анкеров минеральными заполнителями / В.Е. Ануфриев, В.В. Барковский, Ю.Д. Гараев, А.С. Майоров // Горный журнал, 1999. – №2. – С. 41-43.
  33. Юхимов Я.Ю. Новые типы анкерной крепи / Я.Ю. Юхимов, В.Г. Гальперин // Горный журнал. – 1982. – №8. – С. 58-60.
  34. Костогрыз В.И. Внедрение эффективных конструкций анкерных крепей в Кривбассе / В.И. Костогрыз // Горный журнал. – 1989. – №2. – С. 38-40.
  35. Временная технологическая инструкция по применению и установке трубчатых штанг взрывного закрепления. – Новокузнецк.: ВостНИГРИ, 1982. – 26 с.

- 
36. Рахутин В. Конструкция и параметры анкеро-пневматической крепи / В. Рахутин, В. Бузило, С. Швец // Подземное пространство мира. – 1996. – №4. – С. 42-43.
  37. Якоби О. Практика управления горным давлением / О. Якоби пер. с нем. – М.: Недра, 1987. – 566 с.
  38. Мельников Н.И. Использование анкерной крепи за рубежом / Н.И. Мельников, В.С. Трушин. – М.: ЦНИЭИуголь, 1969. – 98 с.
  39. Нильва Э.Э. Горно-подготовительные работы на угольных шахтах / Э.Э. Нильва, И.Э. Цейтин. – М.: Недра, 1981. – 280 с.
  40. Петер Ахиллес. Опыт проходки выработок прямоугольного сечения с анкерной крепью на выемочном участке 259 по пласту L(H1) на шахте “Августа Виктория” / Петер Ахиллес, Райнер Фирхаус, Франк Люттиг // Глюкауф. – 1998. – №2. – С. 24-42.
  41. Булич Ю.Ю. О несущей способности анкерных штанг / Ю.Ю. Булич, С.А. Головки // Уголь Украины. – №9. – 2000. – С. 26-27.
  42. Болгожин Ш.А-Г. Охрана, крепление и поддержание выработок на большой глубине / Ш.А-Г. Болгожин, Г.Д. Лезин. – Алма-Ата.: Наука, 1988. – 58 с.
  43. Крапкин М.С. Направление технического прогресса в угольной промышленности зарубежных стран: Обзор / М.С. Крапкин, С.И. Шумков. – М.: ЦНИЭИуголь, 1982. – 28 с.
  44. Милованов Д.И. Механизация работ при проведении подготовительных выработок на шахтах ФРГ: Обзор / Милованов Д.И., Белан Н.А., Тихоник П.С. – М.: ЦНИЭИуголь, 1982. – 28 с.
  45. Братченко Б.Ф. Угольная промышленность Австралии / Б.Ф. Братченко. – М.: Недра, 1977. – 96 с.
  46. Баур И. Дальнейшее развитие анкерной техники – удлиняющиеся анкеры / И. Баур, Ф. Бруне // Глюкауф. – 1984. – №13. – С. 18-21.
  47. Ройтер Э-У. Анкерная крепь в угольной промышленности США / Э-У. Ройтер, В. Хермюльхайм // Глюкауф. – 1985. – №9. – С. 23-27.

- 
48. Угольная промышленность Англии / [Ф.А. Баранов, П.М. Клорикьян, А.С. Ангонов, Р.Н. Морозов]. – М.: Углетехиздат, 1958. – 176 с.
  49. Bucky P.V. Theory of Roof Bolting / P.V. Bucky // Coal Mine Modernization. – 1950. – Vol.12, №7. – P. 34-37.
  50. Чукан Б.К. Комбинированная крепь для горных выработок глубоких шахт / Б.К. Чукан // Шахтное строительство. – 1956. – №6. – С. 8-9.
  51. Широков А.П. Исследование взаимодействия штанговой крепи с горными породами: автореф. дисс. на соискание науч. степени д-ра техн. наук: 311 / А.П. Широков. – Кемерово, 1969. – 59 с.
  52. Юрченко И.А. Энергетический подход к расчету штанговой крепи / И.А. Юрченко // ФТПРПИ. – 1970. – №1. – С. 27-32.
  53. Podgorzki W. Kotwienie uwarstwionego gorotwory w swetle badan amerykanskich / W. Podgorzki // Rudy i metale niezel. – 1968. – R.13, №8. – P. 23-27.
  54. Sen G.C. Roof bolt Failuref and Their prevention / G.C. Sen // The Mining Magazine. – 1959. – Vol.100, №5. – P. 13-16.
  55. Thomas E. Progress and Problems in Roof Support / E. Thomas // Coal Age. – 1956. – Vol.61, №8. – P. 34-38.
  56. Middendorf H. Ankerabau in Abbaustrechrn / H. Middendorf, O. Jacobi // Glückauf. – 1952. – №8. – P. 56-59.
  57. Борисов А.А. Новые методы расчетов параметров штанговой крепи / А.А. Борисов. – М.: Госгортехиздат, 1962. – 64 с.
  58. Чукан Б.К. Подбор паспорта штанговой крепи / Б.К. Чукан // Применение штангового крепления на рудниках СССР. – М., 1960. – С. 23-26.
  59. Югон А. Штанговое крепление горных пород / А. Югон, А. Кост. – М.: ГОСГОРТЕХиздат, 1962. – 204 с.
  60. Виноградов В.В. Геомеханика управления состоянием массива горных пород / В.В. Виноградов. – К.: Наукова думка, 1989. – 192 с.

- 
61. Булат А.Ф. Опорно-анкерное крепление горных выработок угольных шахт / А.Ф. Булат, В.В. Виноградов. – Днепропетровск.: Ин-т геотехнической механики НАН Украины, 2002. – 372 с.
  62. Козловский С.С. Исследование методом фотоупругости напряженного состояния скальных пород вокруг выработки при штанговом креплении. / С.С. Козловский // Внедрение штангового крепления в горной промышленности. – М., 1960. – С. 12-18.
  63. Сажин В.С. Упругопластическое распределение напряжений вокруг горных выработок различного очертания / В.С. Сажин. – М.: Наука, 1968. – 93 с.
  64. Иванчишин С.Я. Обоснование способов повышения несущей способности металлической арочной крепи выработок угольных шахт: дисс....канд. техн. наук: 05.15.04 / Иванчишин С.Я. – Днепропетровск, 1992. – 159 с.
  65. Раценко В.И. Обоснование способа повышения устойчивости выработок в условиях внезапного вывалообразования: дисс....канд. техн. наук: 05.15.04 / Раценко В.И. – Днепропетровск, 1998. – 146 с.
  66. Изучение проявлений горного давления на моделях / [Кузнецов Г.Н. и др.]. – М.: Углетехиздат, 1959. – 283 с.
  67. Левинсон-Лессинг Ф. К вопросу о давлении в тоннелях / Ф. Левинсон-Лессинг, А. Зайцев. – М.: ОНТИ, 1915. – 118 с.
  68. Покровский Г.И. Центробежное моделирование / Г.И. Покровский. – М.: ОНТИ, 1935. – 54 с.
  69. Покровский Г.И. Центробежное моделирование в горном деле / Г.И. Покровский Г.И., И.С. Федоров. – М.: Недра, 1969. – 247 с.
  70. Ильштейн А.М. Закономерности проявлений горного давления / А.М. Ильштейн. – М.: Углетехиздат, 1958. – 169 с.
  71. Шашенко А.Н. Устойчивость подземных выработок в неоднородном породном массиве: дисс....доктора техн. наук: 05.15.04, 05.15.11 / Шашенко А.Н. – Днепропетровск, 1988. – 507 с.

- 
72. Кузнецов Г.Н. Экспериментальные методы исследования вопросов горного давления / Г.Н. Кузнецов // Тр. совещания по управлению горным давлением – М., 1948. – С. 9-149.
  73. Козин А.М. Эквивалентные материалы для моделирования слабых пород / А.М. Козин. – М.: Углетехиздат, 1958. – 19 с.
  74. Козин А.М. Методическое руководство по подбору и испытанию эквивалентных материалов для моделирования / А.М. Козин, Е.П. Рутковская. – М.: ИГД им. А.А. Скочинского, 1974. – 40 с.
  75. Ломтадзе В.Д. Методы лабораторных исследований физико-механических свойств горных пород / В.Д. Ломтадзе. – Л.: Недра, 1972. – 312 с.
  76. Свойства горных пород и методы их определения / [Е.И. Ильницкая, Р.И. Тедер, Е.С. Ватолин, М.Ф. Кунтыш]. – М.: Недра, 1969. – 392 с.
  77. Насонов И.Д. Моделирование физических процессов в горном деле / И.Д. Насонов, В.И. Ресин. – М.: Изд. Академии горных наук, 1999. – 343 с.
  78. Гмурман В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике / В.Е. Гмурман. – М.: Высшая школа, 1975. – 333 с.
  79. Борисов А.А. Новые методы расчета штанговой крепи / А.А. Борисов. – М.: Госгортехиздат, 1962. – 63 с.
  80. Валенштейн Г.И. Аналитический расчет прочности закрепления замка клиновой штанги / Г.И. Валенштейн, Я.Г. Дик, К.К. Рахимжинова // Сб. науч. тр. КНИУИ. – Кемерово.: КНИУИ. – 1966. – вып. 21. С. 145-147.
  81. Махно Е.Я. К вопросу о расчете штанговой крепи / Е.Я. Махно // Уголь. – 1959. – №5. – С. 41-42.
  82. Стрыгин Б.И. Определение несущей способности клинощелевого замка анкерной крепи / Б.И. Стрыгин // Научные сообщения ИГД им. А.А. Скочинского. – Новосибирск.: ИГД. – 1963 – т. XX. С. 49-55.

- 
83. Тимофеев О.В. Методика расчета замков металлических клинощелевых штанг / О.В. Тимофеев // Записки Ленинградского горного института. – Л.: ЛГИ. – 1963. – т. XL, VIII, вып.1. С. 87-92.
  84. Чукан Б.К. О выборе распорного замка при штанговом креплении // Шахтное строительство / Б.К. Чукан. – 1959. – №7. – С. 24-27.
  85. Ковалевская И.А. Взаимодействие анкерной и комбинированной крепей с породным массивом и разработка методов расчета их рациональных параметров: дисс....канд. техн. наук: 05.15.02 / Ковалевская И.А. – Днепропетровск, 1994. – 190 с.
  86. Леонов А.А. Обоснование способа и параметров обеспечения надежности подготовительных выработок рамно-анкерной крепью: дисс....канд. техн. наук: 05.15.04 / Леонов А.А.. – Днепропетровск, 2000. – 256 с.
  87. Заславский Ю.З. Исследование проявлений горного давления в капитальных выработках глубоких шахт Донецкого бассейна / Ю.З. Заславский. – М.: Недра, 1966. – 180 с.
  88. Либерман Ю.М. Давление на крепь капитальных выработок / Ю.М. Либерман. – М.: Наука, 1969. – 119 с.
  89. Булычев Н.С., Амусин Б.З., Оловянный А.Г. Расчет крепи капитальных выработок / Булычев Н.С., Амусин Б.З., Оловянный А.Г. – М.: Недра, 1974. – 320 с.
  90. Динник А.Н. Устойчивость упругих систем / А.Н. Динник. – М.: ОНТИ, 1935. – 183 с.
  91. Лехницкий С.Г. Определение напряжений в трансверсально-изотропном массиве цилиндрической выработки типа квершлага / С.Г. Лехницкий // Горное давление, сдвигание горных пород и методика маркшейдерских работ. – Л.: ВНИМИ. – 1968. – сб. 68. С. 3-23.
  92. Родин И.В. Снимаемая нагрузка и горное давление // Исследования горного давления / И.В. Родин. – М.: Госгортехиздат – 1960. – С. 343-374.

- 
93. Родин И.В. К вопросу о решении задач гравитационного давления массива на крепи подземных выработок / И.В. Родин // Докл. АН СССР. – М.: Изд-во “АН СССР”. – 1951. – № 3. С. 421-424.
  94. Фотиева Н.Н. Расчет обделок тоннелей некругового поперечного сечения / Н.Н. Фотиева. – М.: Стройиздат, 1974. – 240 с.
  95. Лурье А.И. Пространственные задачи теории упругости / А.И. Лурье. – М.: Гостехиздат, 1955. – 492 с.
  96. Лурье А.И. Теория упругости / А.И. Лурье. – М.: Наука, 1970. – 939 с.
  97. Трехмерные задачи математической теории упругости и термоупругости / [Купарадзе В.Д., Гегелиа Т.Г., Башелейшвили М.О., Бурчуладзе Т.В.] – [2-ое перераб. и дополн.]. – М.: Наука, 1976. – 663 с.
  98. Александров А.Я. Пространственные задачи теории упругости / А.Я. Александров, Ю.И. Соловьев. – М.: Наука, 1978. – 464 с.
  99. Миренков В.Е. О некоторых соотношениях трехмерной задачи теории упругости / В.Е. Миренков // Вопросы горного давления. – Новосибирск, 1980. – № 38. С. 59-63.
  100. Миренков В.Е. Определение напряженно-деформированного состояния в пространстве с цилиндрической выработкой / В.Е. Миренков // Горное давление в капитальных и подготовительных выработках – Новосибирск, 1981. – С. 66-70.
  101. Миренков В.Е. О деформировании пространства с разрезами / В.Е. Миренков // Диагностика напряженного состояния породных массивов. – Новосибирск, 1980. – С. 14-20.
  102. Конопелько Е.В. Осесимметричная деформация многослойного упругоизотропного полупространства с цилиндрической выемкой подкрепленной жестким включением / Е.В. Конопелько // Проблемы механики подземных сооружений. – Л., 1978. – С. 100-103.
  103. Бочан Ю.А. О распределении напряжений в сильно анизотропном полупространстве с цилиндрической полостью / Ю.А. Бочан // ФТПРПИ. – 1982. – № 6. – С. 19-23.

- 
104. Подильчук Ю.Н. Пространственные задачи механики горных пород / Ю.Н. Подильчук. – К.: Наукова думка, 1983. – 160 с.
105. Подильчук Ю.Н., Ткаченко В.Ф. Напряжения в ненарушенных горизонтальных и наклонных пластах / Ю.Н. Подильчук // ФТПРПИ. – 1980. – № 5. – С. 23-31.
106. Алимажанов М.Т. Исследование устойчивости глубокой подземной полости сферической формы / М.Т. Алимажанов, В.И. Гордон // Устойчивость и крепление горных выработок. – Л., 1980. – № 6. – С. 29-31.
107. Алимажанов М.Т. Об устойчивости равновесия в задачах механики горных пород / М.Т. Алимажанов // Механика деформируемого твердого тела – Алма-Ата, 1982. – С. 33-45.
108. Алимажанов М.Т. Об устойчивости подземной полости сферической формы / М.Т. Алимажанов // Изв. ВУЗов. Горный журнал. – 1980. – № 7. – С. 6-8.
109. Бакланова Г.И. Пространственная задача об устойчивости горных пород выработок при упругопластических деформациях / Г.И. Бакланова // Прикладная механика. – 1980. – т.16, № 7. – С. 35-40.
110. Кулиев Г.Г., Махмудов Э.С. Устойчивость состояния упругого равновесия горного массива в окрестности вертикальной выработки эллиптического поперечного сечения / Г.Г. Кулиев, Э.С. Махмудов // Прикладная механика. – 1982. – т.18, № 6. – С. 81-85.
111. Гузь А.Н. Основы теории устойчивости горных выработок / А.Н. Гузь. – К.: Наукова думка, 1977. – 204 с.
112. Березанцев В.Г. Осесимметричная задача теории предельного равновесия / В.Г. Березанцев. – М.: Гостехиздат, 1952. – 120 с.
113. Димов И. Устойчивость единичных горизонтальных горных выработок с круглым поперечным сечением во времени: дисс.... канд. техн. наук: 05.313 / Димов И. – М., 1970. – 155 с.
114. Расчет крепи шахтных стволов / К.В. Руппенейт, Ю.М. Либерман, В.В. Матвиенко, Ю.А. Песляк. – М.: Изд-во “АН СССР”, 1962. – 124 с.

- 
115. Ломакин В.А. Статистические задачи механики твердых деформируемых тел / В.А. Ломакин. – М.: Наука, 1970. – 139 с.
  116. Баклашов И.В. Прочность незакрепленных горных выработок / И.В. Баклашов, К.В. Руппенейт. – М.: Недра, 1965. – 104 с.
  117. Шейнин В.И. Некоторые статистические задачи расчета подземных сооружений / В.И. Шейнин, К.В. Руппенейт. – М.: Недра, 1969. – 153 с.
  118. Цырульникова М.Н. Анализ результатов расчета объемного напряженного состояния пород кровли впереди забоев горных выработок / М.Н. Цырульникова // Научные сообщения ИГД им. А.А. Скочинского. – Новосибирск, 1982. – № 204. С. 50-52.
  119. Sinclair T.S.E. Hergete Applications of a computer model to the analysis of rock-backfill inter / T.S.E. Sinclair, J.N. Shillabeer // Appl-Rock Mech. Mining Proc. – 1978. – №2. – P. 45-51.
  120. Shimotani Takato. Исследование прочности мрамора при полиосном расположении эллиптических трещин с помощью метода собственных деформаций / Shimotani Takato, Yamatoni Siro, Yamaguchi Umetato // J. Mining and Met. Inst. Jap.– 1980. – 96, N 1110. – P. 529-534.
  121. Everling G. Ein Gebirga rockreehenmodellee als Planung ehilt / G. Everling, A.G. Meyer // Gluckaut – Forach – H.33. – 1972. – P. 81-88.
  122. 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 / Niehida Nadashi, Esaki Tetsuroki ura Tsuyoshi, Shilahara To Shire // Nuxon rjre Rfnucu. J. Mining and I met Jap. – 1980. – №96, P. 455-260.
  123. Бенерджи П. Методы граничных элементов в прикладных науках / П. Бенерджи, Р. Батеерфилд [пер. с англ.]. – М.: Мир, 1984. – 494 с.
  124. Векслер Ю.А. Решение пространственной задачи упругости для подготовительной выработки / Ю.А. Векслер, Н.А. Жданкин, С.Б. Колоколов // ФТПРПИ. – 1981. – № 4. – С. 15-23.

- 
125. Векслер Ю.А. Анализ объемного напряженно-деформированного состояния массива пород в окрестности забоя горной выработки / Ю.А. Векслер, Н.А. Жданкин, С.Б. Колоколов // Аналитические и численные исследования в механике горных пород. – Новосибирск, 1981. – С. 70-72.
  126. Петухов И.М. Напряженное состояние массива горных пород около очистных выработок произвольной формы в плане / И.М. Петухов, В.В. Зубков, И.А. Зубкова // ФТПРПИ. – 1982. – № 5. – С. 3-8.
  127. Новикова Л.В. Оценка влияния забоя выработки на напряженно-деформированное состояние крепи соседних выработок и окружающих пород / Л.В. Новикова, Н.П. Уланова, Абдулах Касем // Науковий вісник НГА України. – 1998. – №1. – С. 29-31.
  128. Сдвижкова Е.А. Численный анализ работы металлической рамной крепи в условиях случайного нагружения / Е.А. Сдвижкова // Горный информационный аналитический бюллетень. – 1997. – №4. – С. 163-166.
  129. Розин Л.А. Расчет гидротехнических сооружений на ЭЦВМ. Метод конечных элементов / Л.А. Розин. – Л.: Энергия, 1971. – 214 с.
  130. Розин Л.А. Метод конечных элементов в приложении к упругим системам / Л.А. Розин. – М.: Стройиздат, 1977. – 129 с.
  131. Зенкевич О. Метод конечных элементов в теории сооружений и в механике сплошных сред / О. Зенкевич, И. Чанг [пер. с англ.]. – М.: Недра, 1974. – 239 с.
  132. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд [пер. с англ.]. – М.: Мир, 1979. – 392с.
  133. Стренг Г. Теория метода конечных элементов / Г. Стренг, Дж. Фикс [пер. с англ.]. – М.: Мир, 1977. – 350 с.
  134. Деклу Ж. Метод конечных элементов / Ж. Деклу [пер. с фран.]. – М.: Мир, 1976. – 96 с.
  135. Амусин Б.З. Метод конечных элементов при решении задач горной геомеханики / Б.З. Амусин, А.Б. Фадеев. – М.: Недра, 1975. – 144 с.

- 
136. Амусин Б.З. Расчет взаимодействия крепи подземных выработок некругового очертания с неоднородным вязкоупругим массивом горных пород / Б.З. Амусин // ФТПРПИ. – 1979. – № 2. – С. 100-102.
137. Ержанов Ж.С. Метод конечных элементов в задачах механики горных пород / Ж.С. Ержанов, Т.Д. Каримбаев. – Алма-Ата.: Наука, 1975. – 238 с.
138. Амусин Б.З. Применение метода конечных элементов к задачам горной геомеханики / Б.З. Амусин, А.П. Троицкий, А.Б. Фадеев // Тезисы докладов к конференции по применению ЭВМ в строительной механике. – М., 1972. – С. 16-20.
139. Новикова Л.В. Распределение напряжений в массиве горных пород на участке сопряжения двух выработок / Л.В. Новикова, А.И. Калашников, В.С. Лесников // Изв. ВУЗов. Горный журнал. – 1984. – №2. – С. 25.
140. Панишко А.И. Обоснование параметров рамно-анкерной крепи подготовительных выработок в условиях шахт ГХК "Шахтерскантрацит": дисс....канд. техн. наук: 05.15.04 / Панишко А.И. – Днепропетровск, 2001. – 153 с.
141. Дюво Г. Неравенства в механике и физике / Г. Дюво, Ж.-Л. Лионс. – М.: Наука, 1980. – 384 с.
142. Гловински Р.Г. Численное исследование вариационных неравенств / Гловински Р.Г., Лионс Ж.-Л., Тремольер Р. – М.: Мир, 1979. – 576 с.
143. Ректорис К. Вариационные методы в математической физике и технике / К. Ректорис. – М.: Мир, 1985. – 592 с.
144. Шашенко А.Н. Методы теории вероятностей в геомеханике / Шашенко А.Н., Сургай Н.С., Парчевский Л.Я. – К.: Техніка, 1994. – 216 с.
145. Трусделл К. Первоначальный курс рациональной механики сплошных сред / К. Трусделл. – М.: Мир, 1975. – 592 с.

- 
146. Ставрогин А.Н. Прочность горных пород и устойчивость горных выработок на больших глубинах / А.Н. Ставрогин, А.Г. Протосеня. – М.: Недра, 1985. – 271 с.
  147. Шашенко А.Н. Упругопластическая задача для структурно-неоднородного массива, ослабленного круглой выработкой / А.Н. Шашенко // Прикладная механика. – 1989. – №6. – С. 48-54.
  148. Широков А.П. Расчет анкерной крепи для различных условий применения / Широков А.П., Лидер В.А., Писляков Б.Г. – М.: Недра, 1976. – 208 с.
  149. Глушко В.Т. Проявление горного давления в глубоких шахтах / В.Т. Глушко. – К.: Наукова думка, 1971. – 195 с.
  150. Методические указания по применению глубинных реперов для изучения напряженно-деформированного состояния массива горных пород. – Л.: ВНИМИ, 1983. – 96 с.
  151. Методические указания по исследованию горного давления на угольных и сланцевых шахтах. – Л.: ВНИМИ, 1973. – 102 с.
  152. Ардашев К.А. Методы и приборы для исследования проявлений горного давления / Ардашев К.А., Ахматов В.И., Катков Г.А. – М.: Недра, 1981. – 129 с.

**Наукове видання**

**Терещук Роман Миколайович**

**КРІПЛЕННЯ КАПІТАЛЬНИХ ПОХИЛИХ  
ВИРОБОК АНКЕРНИМ КРІПЛЕННЯМ**

**Монографія**  
(Російською мовою)

Видано за редакцією автора.

Підп. до друку 02.10.2013. Формат 30x42/4.  
Папір офсетний. Ризографія. Ум. друк. арк. 8,7.  
Обл.-вид. арк. 10,5. 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.

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