

Министерство образования и науки, молодежи и спорта Украины
Государственное высшее учебное заведение
"Национальный горный университет"

С.Ф. Власов, А.А. Сидельников

**ПРОСТРАНСТВЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ПРИ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

Монография

Днепропетровск
НГУ
2012

УДК 622.831.312
ББК 33.31 : 33.14
В 58

Рекомендовано Вченою радою Державного вищого навчального закладу "Національний гірничий університет" (протокол № 3 від 27 березня 2012 року)

Рецензенти:

І.О. Садовенко, доктор технічних наук, професор (Державний ВНЗ "Національний гірничий університет");

М.С. Четверик, доктор технічних наук, професор (Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України)

Власов, С.Ф.

В 58 Пространственное моделирование геомеханических процессов при подземной разработке месторождений [Текст]: моногр. / С.Ф. Власов, А.А. Сидельников. – Д.: Национальный горный университет, 2012. – 223 с.

ISBN 978-966-350-348-6

В монографіі пропонується рішення важливої для угледобуваючої галузі задачі по обґрунтуванню технологічних параметрів роботи виємочних столбів на базі результатів моделювання поетапного переміщення очисного забоя в просторовій геомеханічній моделі виємочного участка, розташованого в слоистому трансверсально-ізотропному масиві горних порід.

Монографія призначена для співробітників науково-дослідницьких і проектних інститутів, а також для широкого кола спеціалістів, зацікавлених питаннями підвищення ефективності розробки вугільних родовищ довгими лавами з урахуванням закономірностей зміни напружено-деформованого стану навколо очисного забоя.

УДК 622.831.312
ББК 33.31 : 33.14

ISBN 978-966-350-348-6

© С.Ф. Власов, О.А. Сидельников, 2012
© Державний ВНЗ "Національний гірничий університет", 2012

СОДЕРЖАНИЕ

	ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1	АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ В ГОРНОМ МАССИВЕ, НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧИСТНЫХ РАБОТ.....	8
1.1.	Анализ современных представлений и степени изученности влияния геомеханических процессов в горном массиве на параметры технологии очистных работ.....	9
1.2.	Методики расчета параметров НДС массива горных пород вокруг очистных выработок.....	44
1.3.	Общие закономерности проявления горного давления в очистных выработках.....	50
1.4.	Анализ опыта исследования проявлений горного давления вокруг движущегося очистного забоя.....	57
1.5.	Постановка задачи исследования.....	65
1.6.	Структурно-логическая схема выполненных исследований.....	69
ГЛАВА 2	ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПОРОД ВОКРУГ ОЧИСТНЫХ ВЫРАБОТОК.....	72
2.1.	Обоснование метода исследования горного давления.....	73
2.2.	Обоснование применения математического аппарата.....	75
2.3.	Обоснование применения программного комплекса на базе метода конечных элементов.....	81
2.4.	Обоснование параметров модели.....	85
2.4.1.	Геометрические параметры.....	85

2.4.2.	Физико-механические характеристики горных пород, вмещающих угольный пласт.....	88
2.4.3.	Параметры моделирования крепи очистных и подготовительных выработок.....	98
2.4.4.	Учет трещиноватости массива.....	100
2.5.	Методика проведения шахтных экспериментов.....	103
2.5.1.	Объем и методика шахтных исследований.....	103
2.5.2.	Способы и средства шахтных исследований.....	105
ГЛАВА 3	КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ В МАССИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД ВОКРУГ ОЧИСТНОЙ ВЫРАБОТКИ.....	108
3.1.	Методика моделирования.....	109
3.2.	Тестирование модели.....	115
3.3.	Результаты моделирования.....	123
3.3.1.	Механизм обрушения кровли при подвигании очистного забоя.....	123
3.3.2.	Определение величины конвергенции в лаве в зависимости от положения линии очистного забоя.....	128
3.3.3.	Распределение напряжений вокруг очистной выработки.....	137
3.3.4.	Определение величины конвергенции в подготовительной выработке в зависимости от положения линии очистного забоя.....	146
3.3.5.	Сравнение результатов моделирования, полученных с использованием различных видов моделей.....	156
ГЛАВА 4	ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОТРАБОТКИ ВЫЕМОЧНОГО СТОЛБА.....	161
4.1.	Обоснование методики определения рациональной длины лавы по фактору конвергенции на посадочном ряде стоек механизированной крепи.....	162

4.2. Методика определения рациональной скорости по- двигания очистного забоя по фактору устойчивости призабойного пространства лавы.....	171
4.3. Выбор рационального места остановки лавы.....	185
4.4. Рациональное использование ресурса механизированной крепи.....	188
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	190
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ....	193
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	209
Приложение А. Распределение зон предельного состояния горных пород по результатам моделирования.....	210
Приложение Б. Стратиграфическая колонка.....	221

ВВЕДЕНИЕ

Принятая на заседании Кабинета Министров Украины 19 сентября 2001 г. программа № 1205 "Українське вугілля" предусматривает значительное увеличение объемов добычи угля в Украине. В то же время "Енергетична стратегія України на період до 2030 року" от 15 марта 2006 г. № 145-р предусматривает весьма существенное реформирование угольной отрасли. На современном этапе реформирования угольной промышленности в Украине на стадии закрытия находится около 100 шахт, что предполагает увеличение объемов добычи на действующих предприятиях за счет использования и внедрения высокоэффективных технологий добычи угля. Передовые технологии добычи полезного ископаемого базируются на внедрении эффективных технологических схем и применении современной высокопродуктивной горнодобывающей техники. Основными мировыми тенденциями развития технологии механизированной добычи угля являются увеличение действующей длины очистных забоев при уменьшении количества работающих лав, минимизация затрат времени на осуществление одного цикла по добыче полезного ископаемого и полное использование ресурса очистного оборудования. Однако интенсификация технологии добычи угля определила широкий круг горнотехнических задач и проблем, связанных с негативными проявлениями горного давления в очистных забоях и подготовительных выработках, которые, в свою очередь, существенно снижают добычу угля, увеличивают себестоимость и значительно повышают уровень аварийности на производстве. В сложившихся экономических условиях функционирования горнодобывающие предприятия предъявляют все более жесткие требования к обоснованию технологических параметров выемочных участков и эффективных способов управления состоянием массива горных пород, что является неотъемлемой частью современного высокоэффективного производства.

Большой вклад в развитие теоретических и экспериментальных подходов к обоснованию технологических параметров очистной выемки с учетом закономерностей изменения напряженно-деформи-

рованного состояния массива горных пород внесли представители научных школ и направлений НГУ-ДГИ, ИГТМ НАН Украины, ДонНТУ, ДГТУ, ВНИМИ, СПГГИ и др. Однако большинство существующих методов и подходов к определению параметров отработки выемочных столбов оказываются неэффективными, а зачастую и неприемлемыми в условиях внедрения современных технологий и высокопроизводительной техники, которое к тому же происходит в постоянно усложняющихся горно-геологических условиях. Сложившаяся ситуация обуславливает необходимость разработки более совершенных методик, направленных на обоснование рациональных технологических параметров отработки выемочных столбов, которые в свою очередь должны базироваться на построении строгих расчетных схем и фундаментальных знаниях о геомеханических процессах, происходящих в массиве горных пород. Поэтому решение важной для угледобывающей отрасли задачи по обоснованию технологических параметров отработки выемочных столбов на базе результатов моделирования пошагового перемещения очистного забоя в пространственной геомеханической модели выемочного участка, расположенного в слоистом трансверсально-изотропном массиве горных пород – весьма своевременно и актуально.

Монография представляет собой обобщение накопленного опыта в области исследования закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния массива горных пород вокруг движущегося очистного забоя. Она является логическим продолжением научного направления, которое активно развивается на кафедре подземной разработки месторождений Государственного ВУЗ "Национальный горный университет".

Авторы выражают искреннюю благодарность доктору технических наук, профессору Садовенко Ивану Александровичу за оказанную помощь и поддержку в проведении исследований и написании данной монографии.

ГЛАВА 1

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ В ГОРНОМ МАССИВЕ, НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧИСТНЫХ РАБОТ

Эта глава посвящена анализу теоретических предпосылок исследования влияния напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород на параметры технологии ведения очистных работ, который позволит обозначить круг нерешенных задач и выделить направление исследовательской работы в данной области.

В п. 1.1 выполнен анализ степени изученности и рассмотрены современные представления о влиянии геомеханических процессов, происходящих в массиве горных пород, на технологические параметры очистных работ. Выполнен критический анализ основных гипотез горного давления, которые используются для расчета НДС массива вокруг очистных выработок на современном этапе развития горной науки. Приведены общие известные закономерности распределения напряженно-деформированного состояния массива горных пород вокруг очистных выработок в зависимости от горно-геологических условий и физико-механических свойств пород, вмещающих разрабатываемый пласт угля. Изложены широко применяемые методики расчета параметров НДС горного массива в зоне влияния очистных работ, указаны области их эффективного применения, а также основные недостатки, которые снижают практическую ценность получаемых результатов.

В п. 1.2 на основании обобщения результатов критического анализа, сделанного в п. 1.1, выполнено обоснование выбора направления исследований, поставлена цель и сформулированы задачи, которые необходимо решить в исследовательской работе.

В п. 1.3 приведена общая расширенная структурно-логическая схема проведения исследований, дана краткая характеристика и описание каждого этапа исследовательской работы.

1.1. Анализ современных представлений и степени изученности влияния геомеханических процессов в горном массиве на параметры технологии очистных работ

Зона влияния геомеханических процессов, происходящих в литосфере при разработке угольного месторождения, охватывает значительный объем вмещающих угольный пласт пород и, как правило, достигает земной поверхности. Именно эта область литосферы участвует в формировании напряжений, деформаций, перемещений и разрушений в массиве горных пород. Закономерности формирования напряженно-деформированного состояния в массиве горных пород определяются глубиной залегания пластов, литологией месторождения, физико-механическими характеристиками пород, а также параметрами технологии разработки месторождения (схемой отработки, способами и средствами охраны выработок, скоростью извлечения полезного ископаемого и т.д.).

Большой вклад в развитие теоретических и экспериментальных подходов к обоснованию технологических параметров очистной выемки с учетом закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния массива горных пород внесли ученые В.И. Бондаренко, А.А. Борисов, В.И. Бузило, А.Ф. Булат, С.Ф. Власов, А.Н. Динник, М.П. Зборщик, А.И. Зильберман, М.А. Иофис, И.А. Кияшко, И.А. Ковалевская, О.В. Колоколов, Г.Н. Кузнецов, А.М. Кузьменко, В.Ю. Куклин, Я.Э. Некрасовский, В.Г. Перепелица, М.М. Протодяконов, К.В. Руппенейт, А.В. Савостьянов, А.И. Садовенко, Е.А. Сдвижкова, С.И. Скипочка, В.Д. Слесарев, Б.М. Усаченко, Ю.М. Халимендик, П.М. Цимбаревич, В.Г. Черватюк, М.С. Четверик, А.Н. Шашенко, О. Якоби и др.

Анализ всех гипотез горного давления, предлагавшихся для очистных выработок пологих пластов, представляет весьма сложную задачу и вряд ли целесообразен. Достаточно ограничиться рассмотрением основных гипотез, получивших широкое распространение (табл. 1).

Таблица 1.1

Области эффективного применения основных гипотез горного давления

№ п/п	Название гипотезы	Авторы, последователи	Год	Область эффективного применения
1	2	3	4	5
1	Гипотеза свода естественного равновесия	В. Ритгер [155] М.М. Протоdjяконов [88] В. Хаак [152]	1879 1908 1928	Массив однородных связанных пород, для которых выполняется условие $\sigma = \frac{1}{3}\gamma l$, где σ – предел прочности породы на разрыв, Па; γ – удельный вес породы, Н/м ³ , l – пролет выработки, м
2	Гипотеза ступенчатого сдвига	П.М. Цимбаревич [134 – 135]	1951	Сплошной однородный массив слабых рыхлых пород, слагающих покрывающую толщу
3	Гипотеза предварительной трещиноватости	А. Лабасс [63 – 64]	1951	Слоистый массив горных пород, состоящий из совокупности пластов различной жесткости, работающих в стадии упруго-пластичного деформирования
4	Гипотеза волны давления	Г. Вебер [161] Г. Шпаккелер [148, 159]	1916 1928	Массив горных пород, обладающих явно выраженными вязкопластическими свойствами

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5
5	Гипотеза гидростатического давления	А. Гейм [153] Л.Д. Шевяков [145 – 146]	1878 1956	Массив горных пород, расположенных на большой глубине и подверженных высокому давлению и температуре, что является причиной их перехода в пластическое состояние
6	Гипотеза сыпучей среды	Ф. Ван-Итерсон [20] Р. Зольдендрат	1948 1951	Массив весьма трещиноватых или несвязных горных пород, которые подчиняются законам сыпучих сред
7	Гипотеза радиальных смещений	К.В. Руппенейт [93]	1957	Массив горных пород, подчиняющийся законам упруго-пластичных сред
8	Гипотеза шарнирных блоков	Г.Н. Кузнецов [48, 56 – 57]	1947	Массив горных пород, разбитый системами трещин на отдельные блоки, которые находятся в кинематической связи между собой
9	Гипотеза напряженного состояния горных пород	А.Н. Динник [35 – 36]	1938	Массив горных пород, подчиняющийся законам теории упругости твердого изотропного тела

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5
10	Гипотеза балок	А. Шульц [157] И. Шпаре Т. Фринд [151] А. Эккард [150] В.Д. Слесарев [109 – 111] А.В. Савостьянов [97 – 99]	1867 1867 1929 1913 1935 1980	Массив твердых слоистых слаботрещиноватых горных пород или пород, разбитых системами регулярных параллельных трещин с относитель- но небольшим расстоянием между трещинами и подчиняющихся в упругой стадии деформирова- ния законам строительной механики
11	Гипотеза плит	В.Д. Слесарев [112] А.А. Борисов [13, 16]	1948 1960	Массив твердых слоистых слаботрещиноватых горных пород, имеющих достаточно близкую аналогю с работой тонких плит на упругом ос- новании

Возникновение и развитие каждой из предложенных гипотез горного давления напрямую связано с решением конкретных практических задач, которые возникали на том или ином этапе развития горной науки и горнодобывающей промышленности в целом. Этим и обуславливается такое многообразие выдвинутых предположений и подходов к решению поставленных проблем и задач. Главной целью каждой гипотезы является разработка и описание адекватной модели поведения углепородного массива при ведении горных работ с применением необходимых и достаточных допущений, позволяющих реализовать тот или иной имеющийся в наличии математический аппарат. Поэтому одни гипотезы больше основываются на визуальных наблюдениях, эмпирических зависимостях и умозрительных заключениях, другие, в свою очередь, используют строгие аналитические и численные выкладки для описания физических процессов, происходящих в массиве горных пород при добыче полезного ископаемого. Каждая из рассмотренных гипотез горного давления имеет ряд своих достоинств и недостатков, а также свою область эффективного применения.

На основании решений задач геомеханики, полученных в рамках той или иной гипотезы, исследователями выполнялось обоснование оптимальных и рациональных параметров технологии разработки угольных месторождений и отработки выемочных столбов для конкретно взятых горно-геологических условий. Как правило, решение задачи заключалось в определении напряженно-деформированного состояния горных пород в характерных сечениях как по длине лавы, так и по длине выемочного столба. Исходя из полученных закономерностей, разрабатывались рекомендации по определению параметров технологии для рассматриваемых горно-геологических и горно-технических условий.

Гипотеза свода естественного равновесия

Сущность гипотезы свода в ее современном толковании состоит в следующем. Над выработкой, проведенной в толще любых горных пород (за исключением пlyingунов) на любой глубине, образуется свод

давления, который воспринимает на себя вес вышележащей толщи пород, разгружая крепь выработки. Максимальная нагрузка на крепь определяется весом пород внутри свода, называемого ядром свода или сводом давления. Действие всего веса толщи пород до поверхности передается пятами разгружающего свода на массивы горных пород по бокам выработки. В свою очередь, породы боков выработки подобно штампам действуют на породы почвы, выжимая их внутрь выработки. Представление о своде приемлемо лишь в случаях, допускающих замену объемной задачи плоской; в общем случае следует говорить об образовании над выработкой купола [15].

Одна из первых гипотез свода была предложена профессором рижского политехникума В. Риттером в 1879 г. [155].

Гипотеза свода применительно к лавам пологих пластов получила свое дальнейшее развитие в работах М. Файоля и М.М. Протодьяконова [88], который впервые предложил для данных условий расчет давлений на призабойную крепь.

М.М. Протодьяконов рассматривал сечение, перпендикулярное забою, и полагал, что образующийся над призабойным пространством разгружающий свод опирается на угольный пласт и на обрушенные породы или закладку; он также считал, что полоса угля впереди забоя раздавливается на некоторую ширину. Ширину раздавливаемой полосы угля впереди очистного забоя М.М. Протодьяконов предлагал определять из выражения

$$S = 0,26 \cos \alpha \sqrt{\frac{aH}{f}},$$

где H – глубина ведения горных работ, м;

a – полупролет свода, м;

f – коэффициент крепости пород кровли по М.М. Протодьяконову;

α – угол залегания пласта, град.

Вывод формулы для определения величины S базируется на произвольных допущениях; сколько-нибудь точное определение ве-

личины пролета свода $2a$ вообще не представляется возможным. Нагрузка на крепь по предлагаемым формулам не зависит от глубины залегания и жесткости крепи, что не соответствует действительности [15].

Попытка дальнейшего уточнения основных положений гипотезы свода была предпринята В. Хааком [152]. В отличие от представлений М. Файоля и М.М. Протодьяконова, В. Хаак распространяет границу ядра свода, освобожденного от напряжений, в породы почвы и предположительно описывает характер распределения напряжений под передней и задней пятнами свода (рис. 1.1).

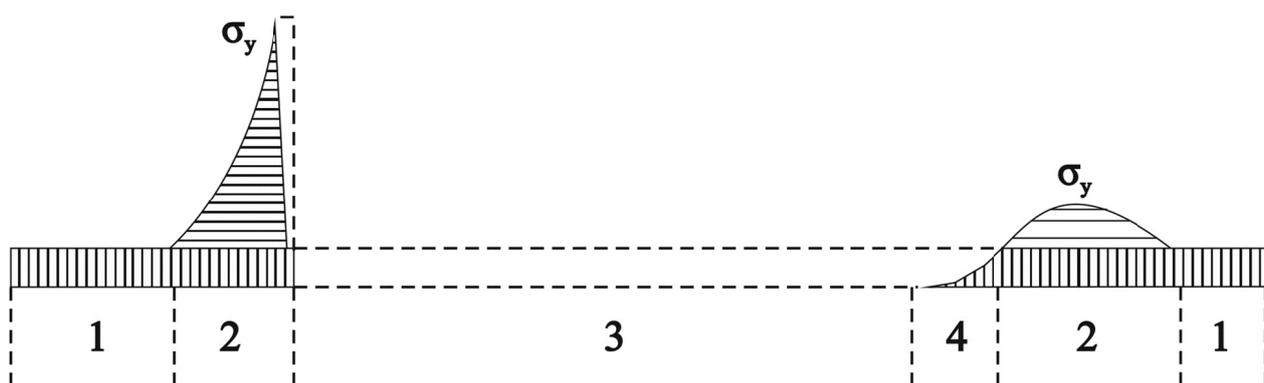
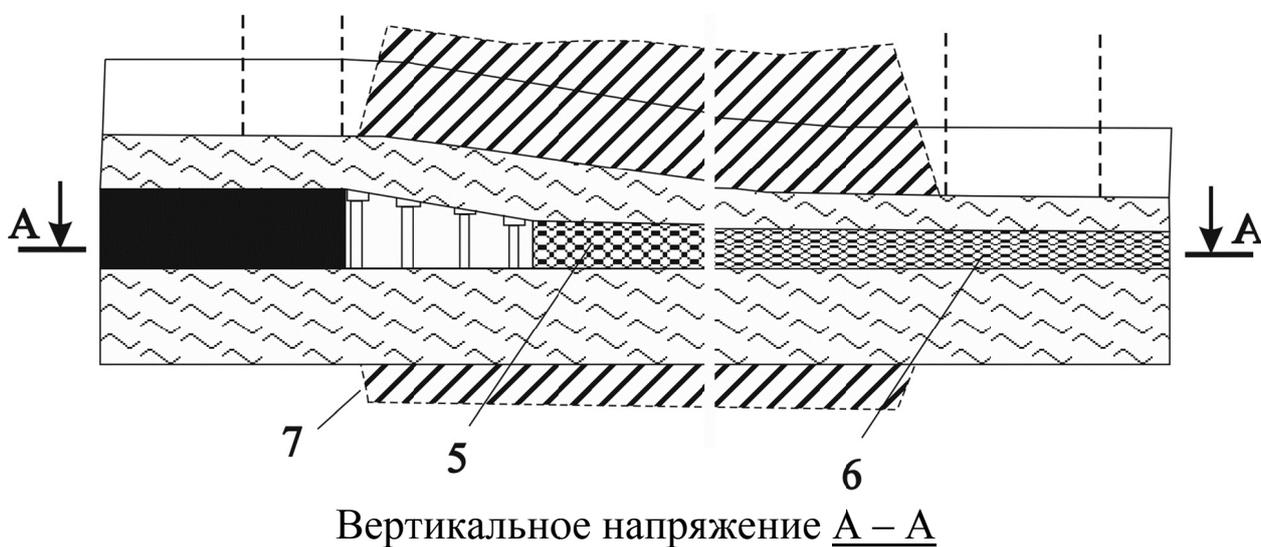


Рис. 1.1. Свод давления над очистной выработкой по В. Хааку:
 1 – область естественного напряженного состояния; 2 – области концентрации напряжений; 3 – область разгрузки от давления; 4 – область начальной нагрузки на закладку; 5 – рыхлая закладка; 6 – уплотнившаяся закладка; 7 – границы свода давления.

Несколько отличные представления о существовании гипотезы свода приведены в работах Г. Шпаккелера [148]. Он полагает, что помимо большого свода над призабойным пространством образуется малый свод, который разгружает призабойную крепь даже в том случае, когда большой свод, перекрывающий все выработанное пространство, разрушается при выходе его вершины на земную поверхность.

Наиболее полное изложение качественной стороны гипотезы свода дано Ф. Шпрутом [159] (рис. 1.2).

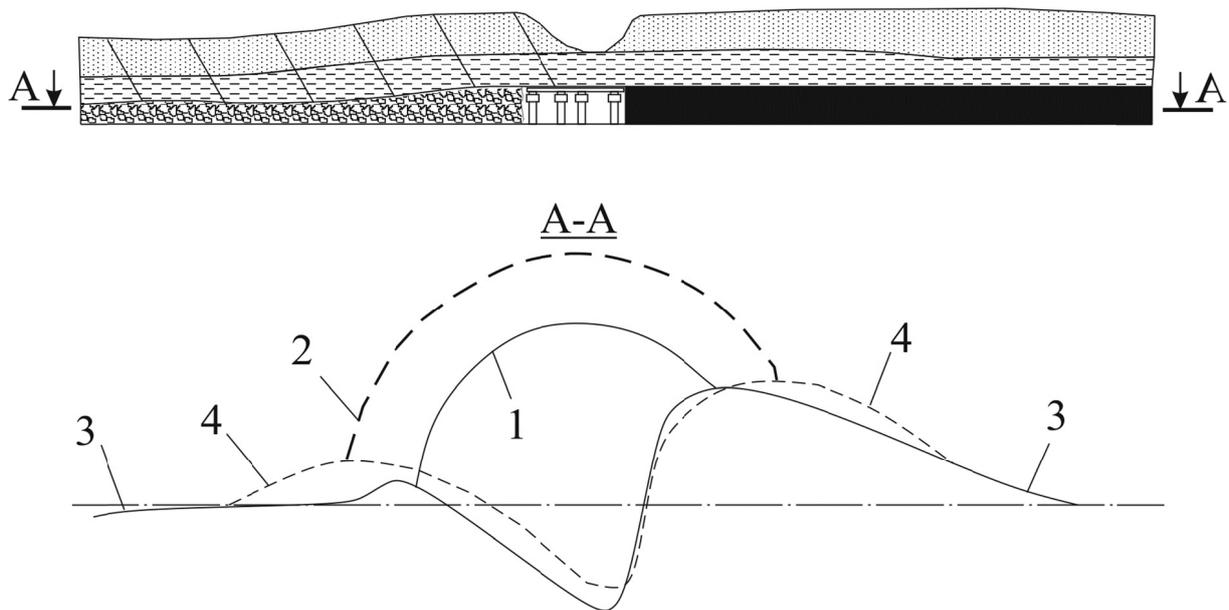


Рис. 1.2. Своды давления над очистной выработкой при разработке:
 1 – с полной закладкой;
 2 – с обрушением;
 3 и 4 – нормальное давление при разработке соответственно с полной закладкой и обрушением по линии А-А.

Точка зрения Ф. Шпрута [159] на формирование сводообразных зон сводится к следующему:

- максимальные опорные напряжения в массиве угля и в закладке выработанного пространства расположены на одинаковом расстоянии в 15 м от границы рабочего пространства;
- при разработке с обрушением зоны пониженных напряжений; пород выше, чем при разработке с закладкой, пролет между точками максимальных опорных напряжений больше, а отжим угля меньше;

- величины элементов свода и горного давления зависят от физико-механических свойств вышележащих пород;
- величина нагрузки на опоры непостоянна и зависит от периодических изломов кровли при ее оседании, от подвижки угля и пород в сторону выработанного пространства и жесткости крепи;
- трещинообразование начинается в зоне максимального опорного давления, в 15 м от линии забоя.

Гипотеза свода применительно к очистным работам рассматривалась многими другими авторами (Дж. Спендингом, Л. Уокером и др.), но в их интерпретации она не отличается принципиально от изложенных выше представлений.

Несмотря на наличие ряда произвольных, не доказанных положений, сторонники гипотезы свода считают ее приемлемой для любых выработок, проводимых в любых породах, независимо от их свойств и строения, а также от глубины работ [15]. За многие десятилетия гипотеза свода снискала многочисленных сторонников; до последнего времени ею пользуются при строительстве и проектировании метрополитенов и других подземных сооружений.

Данная гипотеза еще не в состоянии объяснить механизм образования свода и влияние многих факторов на его форму, размеры и устойчивость кровли. Образование свода – это только одно из многих проявлений горных пород [67].

Таким образом, гипотеза свода в большей части базируется на предположениях и допущениях, порой совершенно необоснованных.

Даже ее сторонники высказываются за необходимость одновременного использования гипотезы плит, а точнее говоря, гипотезы балок, так как в действительности все исследователи рассматривают плоскую задачу [15].

Гипотеза свода и методы ее математической интерпретации систематически подвергались резкой критике со стороны многих крупных ученых: А.Н. Динника [35], Д.С. Ростовцева [90 – 91], В.Д. Слесарева [110] и др.

Гипотеза ступенчатого сдвижения П.М. Цимбаревича

Основные положения гипотезы П.М. Цимбаревича сводятся к следующему [134 – 135]:

1. Горное давление на очистную выработку определяется массой g косоугольных призм высотой H_0 , сдвигающихся при каждой посадке кровли после очередного цикла работ (рис. 1.3).
2. Горная выработка устойчива, если деформация крепи не выходит за определенные пределы.
3. Величину несущей способности крепи можно определять по ее максимальной прочности, обеспечивающей гарантийное равновесие и предотвращение стихийного обрушения пород в забое.

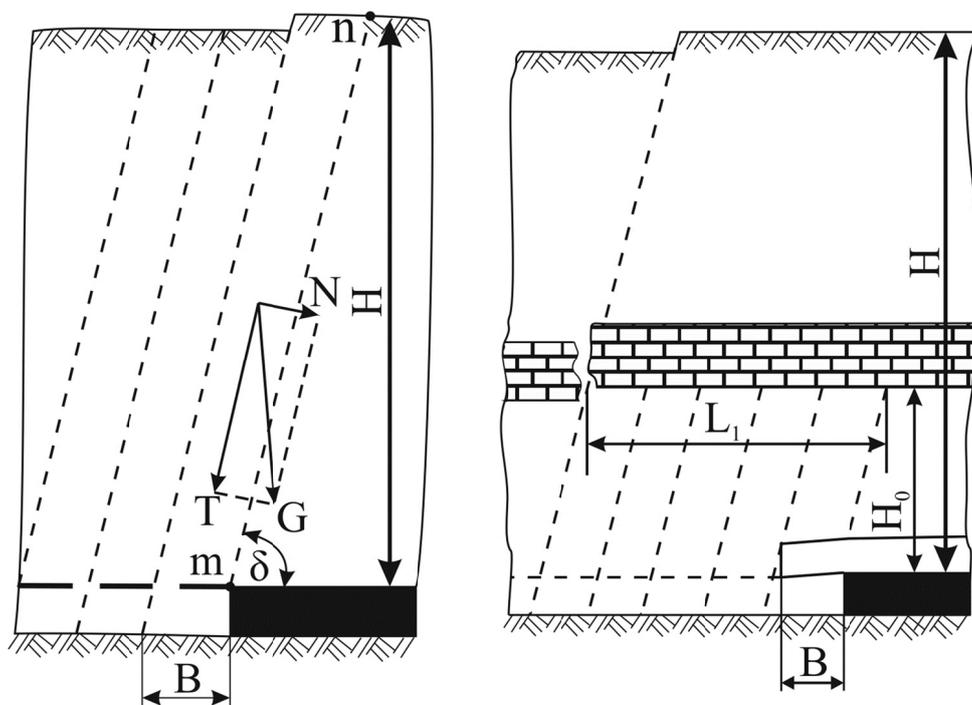


Рис. 1.3. Схема к расчету горного давления на очистную выработку по П.М. Цимбаревичу:

a – для однородных пород;

б – для пород, включающих пласт твердого пропластка.

4. Величина горного давления определяется косвенно измерением деформации крепи с последующим пересчетом на давление пород, вызвавшее деформацию.
5. Так как горные породы не однородны, то применение к ним теории упругости нельзя считать оправданным.

6. Разрушение породы при данном напряженном состоянии определяется количеством энергии, поглощенной телом (энергетическая гипотеза), которое в каждом отдельном случае находится опытным путем.

Эта гипотеза не получила широкого развития и оказалась неприемлемой для решения задач по управлению горным давлением, так как теория упругости со многими неизвестными параметрами, характеризующими физико-механические свойства пород, и упрощенными схемами приводила к абсурдным результатам [67].

Гипотеза предварительной трещиноватости пород А. Лабасса

Работы А. Лабасса [63 – 64] базируются на гипотезе Р. Феннера, согласно которой вокруг подготовительных и очистных выработок образуются три зоны напряжений (рис. 1.4):

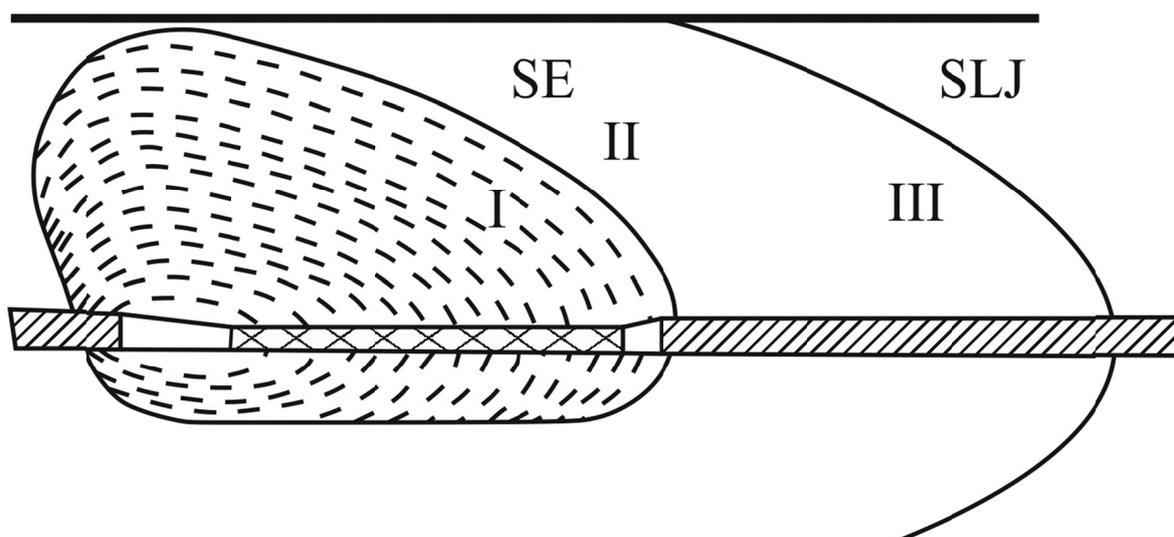


Рис. 1.4. Зоны напряжений вокруг забоя очистной выработки по А. Лабассу:

- I – область пониженных напряжений;
- II – область концентрации напряжений;
- III – область естественного состояния.

I – зона пониженных напряжений, где ослабленные породы смещены и, следовательно, сильно подвержены деформациям; это так называемая "зона Тромпетера" или зона слабого давления; напряжения в этой зоне очень невелики;

II – зона повышенных напряжений в виде огибающей поверхности *SE*; здесь разность главных напряжений достигает максимума, и следовательно, здесь происходят разрывы пород;

III – зона, в которой напряжения не вызывают разрушения пород и в которой естественная псевдопластичность допускает деформации в больших масштабах; эта зона ограничена поверхностью влияния *SLI*, которая определяет пределы сферы влияния выработки.

А. Лабасс рассматривал очистной забой, как штрек, ось которого перемещается параллельно самой себе. Распределение зон в этом случае показано на рис. 1.4 [15].

А. Лабасс утверждал, что впереди забоя возникает предварительная трещиноватость, причиной которой является изгиб слоев пород кровли (рис. 1.5).

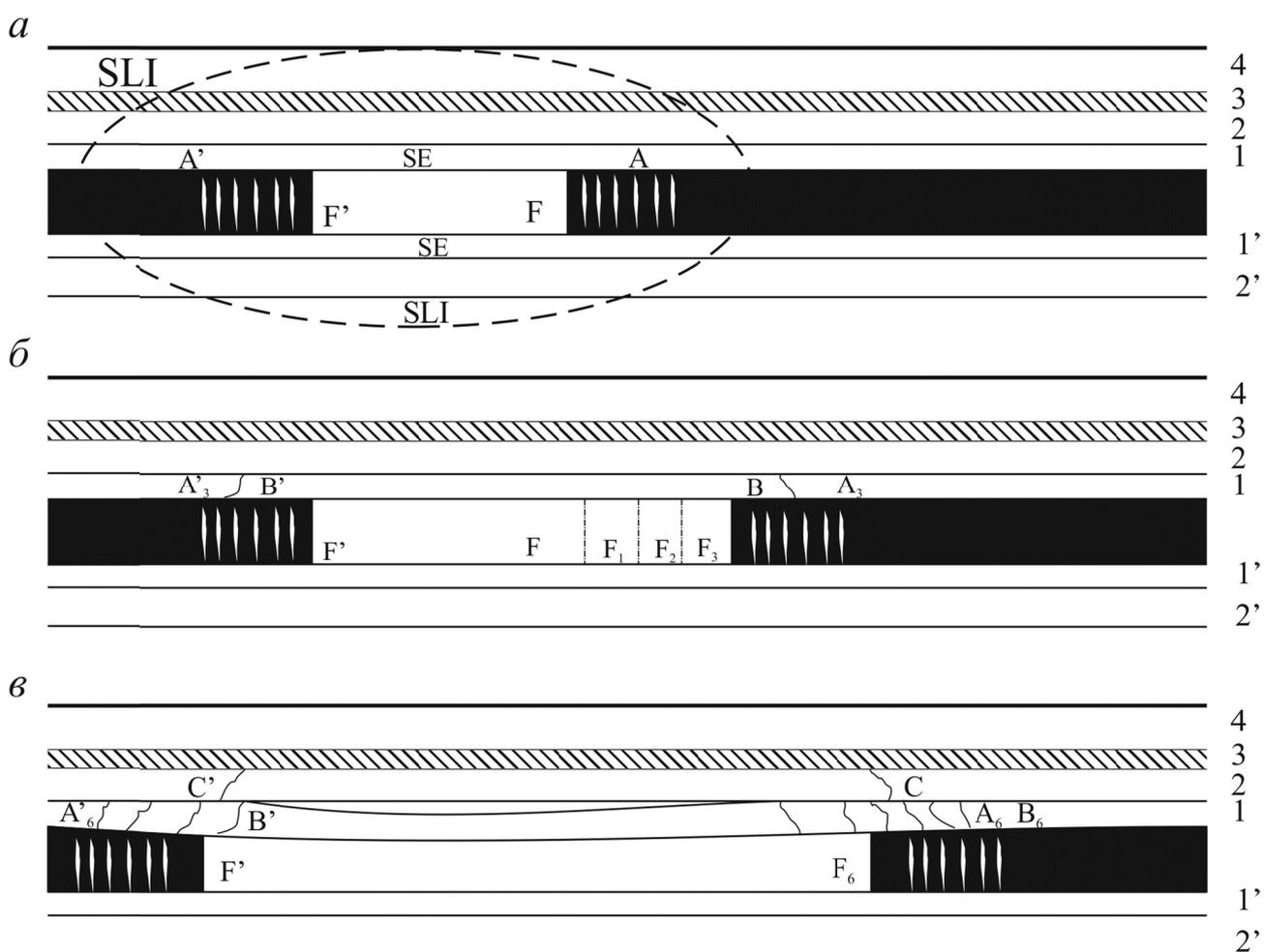


Рис. 1.5. Схема образования "предварительной" трещиноватости по А. Лабассу

Подвигание забоя приводит к образованию все новых трещин и в слое № 1, и в вышележащих слоях. Это растрескивание не зависит от глубины залегания и может распространяться до земной поверхности.

А. Лабасс считал, что опорные давления впереди и позади очистного забоя вызваны не сводом, а слоями, которые действуют подобно консольным балкам. Расчетная схема Лабасса для определения нагрузок на стойки призабойной крепи приведена на рис. 1.6 [15].

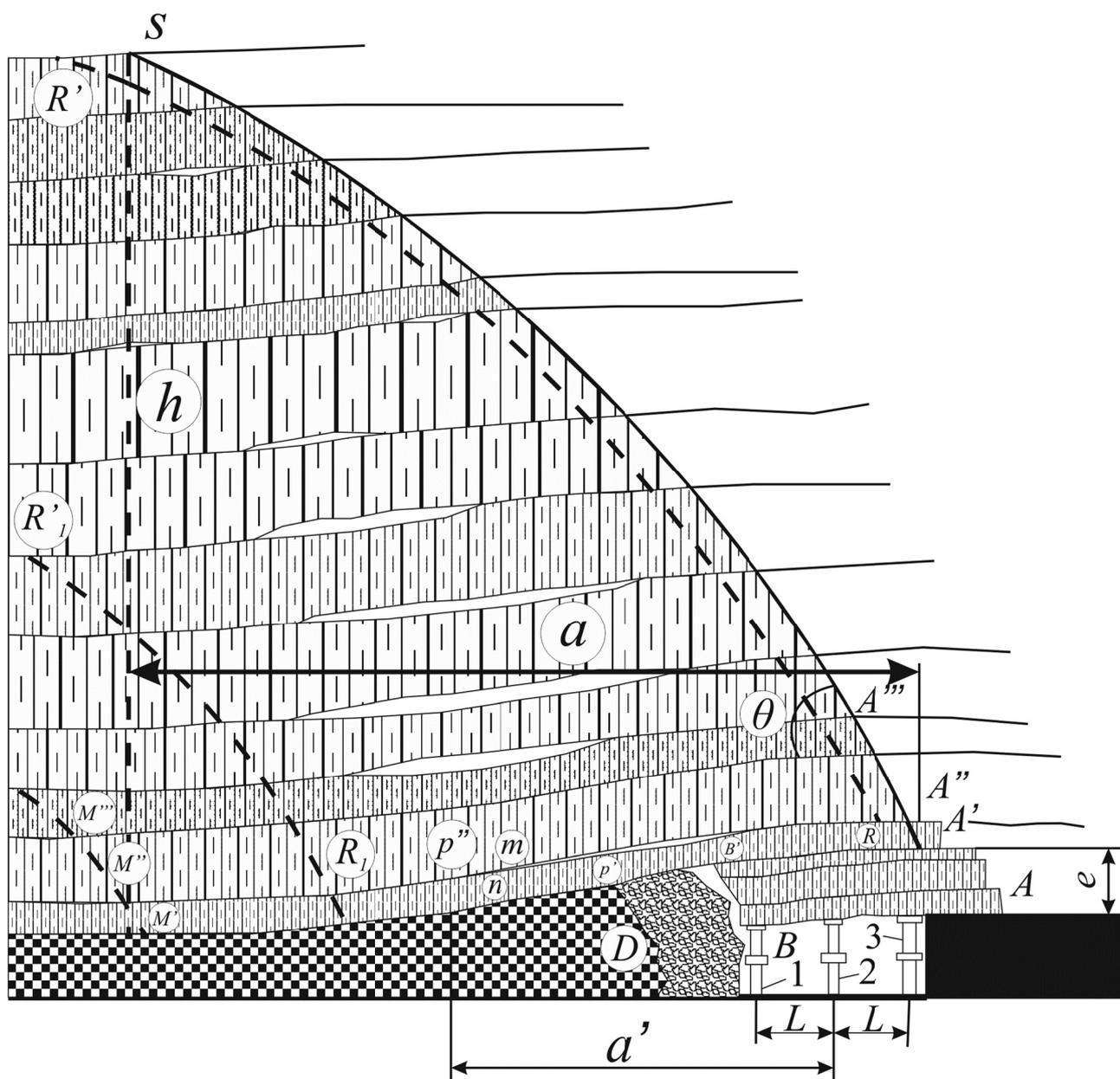


Рис. 1.6. Расчетная схема А. Лабасса к определению нагрузок на стойки призабойной крепи

А. Лабасс предполагал [63], что опорное давление передается на угольный пласт и стойки призабойной крепи. Определяется оно весом пород в объеме треугольника $A'M'S$ (рис. 1.6).

Расчетная схема А. Лабасса построена не на результатах шахтных или лабораторных исследований, а на произвольных представлениях, допущениях и предположениях [15].

Представление об образовании вокруг горизонтальной выработки нескольких зон не ново, оно высказывалось еще В. Тромпетером. Эти вопросы получили развитие в работах Р. Феннера. Указывалось, что решение рассматриваемой задачи возможно только для идеальной среды, обладающей постоянством свойств, однородностью строения и однородностью первоначального напряженного состояния; необходимо также, чтобы в такой среде свойства изотропности и закон Гука оставались справедливыми за пределами текучести, что в действительности можно допустить лишь приближенно. Р. Феннер высказывал предположение о возможности такого допущения, ничем его не доказывая, и строил на нем математическую интерпретацию. А. Лабасс же, ссылаясь на Р. Феннера, считал эти положения математически и физически доказанными. Шахтные и лабораторные исследования показывают, что вопрос о состоянии горных пород вокруг выработки нельзя рассматривать без учета свойств пород, глубины их залегания и времени существования выработки. Отождествление очистного забоя со штреком, продольная ось которого перемещается параллельно самой себе, как и механический перенос на очистной забой представлений Р. Феннера совершенно неправомерны. При очистных работах происходят процессы деформаций и разрушений пород, отличающиеся не только масштабом, но и характером возникновения, развития и накопления деформаций горных пород, а также спецификой совместной работы системы порода – крепь [13].

Вследствие этих обстоятельств данная гипотеза не отражает физической сущности рассматриваемого явления.

Гипотеза волны давления

Идею "волны давления" высказал Г. Вебер [161] в 1914 г. исходя из наблюдений волнового давления пород как следствия их прогиба. Г. Вебер установил не одну, а две волны: подвижную, возникающую при очистных работах, перемещающуюся вслед за забоем, и неподвижную (стоячую), образующуюся вдоль забоя во время остановки его подвигания.

Теоретиком волнового давления пород считается Г. Шпаккелер [148]. Свою точку зрения о волновом давлении пород Г. Шпаккелер обосновывает наблюдениями волнообразного сжатия и вспучивания угольного пласта при косонаправленном переменном давлении пород (рис. 1.7).

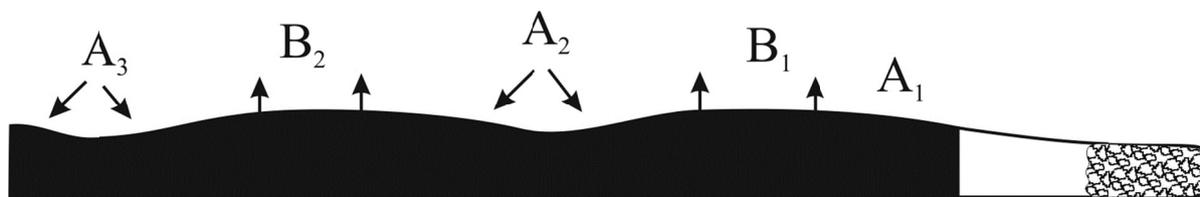


Рис. 1.7. "Волна давления" по Г. Шпаккелеру

Основные положения гипотезы Г. Шпаккелера [148]:

- породы в горном массиве неоднородны: из-за разнообразия горных условий исследования не поддаются обобщению, хотя явления природы подчиняются одним и тем же законам;
- натурные условия можно воспроизвести в лаборатории только приближенно, так как одни и те же породы в массиве имеют другие свойства, чем в образцах;
- давление пород в шахте видеть нельзя, но можно наблюдать силу и направление его воздействия измерениями с помощью различных приборов, а также направление сдвижения пород как следствие качественного проявления горного давления.

Маркшейдерскими измерениями Немчик подтвердил наблюдаемое Г. Вебером волновое давление впереди очистного забоя и представил его в виде синусоиды с равными длинами волн и затухающими в глубине массива амплитудами максимальных возмущений (рис. 1.8).

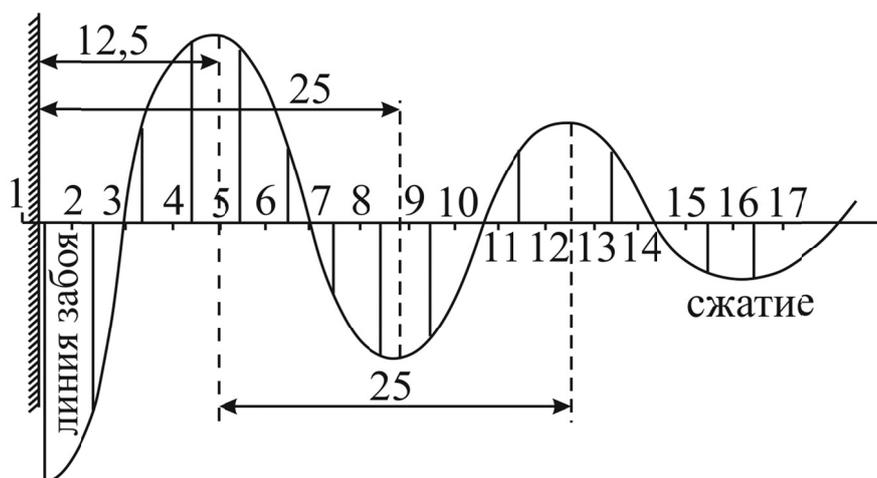


Рис. 1.8. Волна давления по Немчику

Сторонником гипотезы волны давления является А. Гартнер, который рассматривал волну давления как необходимое условие улучшения отжима угля в забое.

Не смотря на то, что Немчиком и зарегистрировано проявление давления пород в виде синусоидальной микроволны, однако трудно согласиться с постоянством длины волны и равномерным затуханием ее амплитуд, так как источником таких волн является обрушение пород с силой, часто непостоянной для каждого цикла повторяющихся работ.

Что касается "стоячих волн" по Г. Веберу, то совсем непонятны ни причина их возникновения и затухания, ни физические признаки, обусловившие название "стоячие волны".

Несмотря на установленные факты волнообразного опускания пород, гипотеза еще не в состоянии решать задачи, выдвигаемые практикой [67].

Гипотеза гидростатического давления

Гипотеза гидростатического давления принадлежит А. Гейму [153]. По его утверждению давление внутри массива горных пород действует по всем направлениям, с тем лишь отличием от гидростатического давления, что давящий столб пород при сдвигении должен преодолеть силы сцепления. Л.Д. Шевяков [145 – 146] развил точку зрения А. Гейма и дополнительно обосновал его идеи.

Небезынтересны общие взгляды Л.Д. Шевякова [145] на проб-

лему горного давления и пути ее разрешения:

- напряжения пород в нетронутом массиве измерить нельзя;
- давление и сдвигение пород при индивидуальных крепях можно объяснить гипотезой консольной балки;
- напряжения в породах, полученные моделированием и математическими расчетами, дают лишь некоторое представление и несопоставимы с натурными;
- исследование процесса горного давления и деформации пород на моделях из эквивалентных материалов сильно искажают реальную действительность;
- оптический метод и математические расчеты исходят из изотропности массива и пропорциональности деформаций напряжениям, но эти предположения справедливы лишь до некоторой степени;
- задачи механики горных пород отличны от задач и расчетов строительных конструкций;
- в аналитических расчетах методами механики сплошной среды нельзя учесть трещиноватость, поэтому они бесперспективны;
- прочность пород в образцах и коэффициенты физико-механических свойств, установленные в лаборатории, нельзя перенести в натурные условия.

Положения акад. Л.Д. Шевякова представляются логичными, но, вместе с тем, нельзя не обратить внимание и на его некоторую непоследовательность в определении направления поисков. Признавая гипотезу гидростатического давления пород на крепь в условиях пластического состояния пород, он в то же время был сторонником гипотез консольной балки и сводов над очистной выработкой. Кроме того, отвергая всякие методы решения задач на основе теории упругости, Л.Д. Шевяков допускает возможность расчета критических самонагрузок в нависших породах над очистным забоем методами сопротивления материалов по закону Гука, уподобляя их консольной балке. К этому следует добавить и то, что в очистных забоях с глубиной работ до 1000 м пластического состояния пород в явном виде практически не наблюдается, поэтому гипотеза гидростатического давления в данном случае сомнительна [67].

Гипотеза сыпучей среды

Суть гипотезы состоит в том, что слои угля и породы вследствие их смещения в направлении выработанного пространства разрушаются и образуют массу обломков и кусков, равновесие которых устанавливается согласно законам распределения напряжений в несвязных материалах, имеющих определенный угол внутреннего трения, хотя отдельные блоки могут быть и очень большими. Основным параметром, характеризующим физико-механические свойства пород, Ф. Ван-Итерсон считал угол внутреннего трения, равный углу естественного откоса обломков. С помощью этого параметра, исходя из нормального опорного давления пород на угольный пласт, устанавливается давление пород на крепь. В этом смысле взгляды сторонников гипотезы сыпучей среды Ф. Ван-Итерсона [20] и Т. Зольденрата в отношении доминирующей роли трещин при формировании горного давления в лавах совпадают со взглядами А. Лабасса. Но если А. Лабасс категорически отрицает возможность применения методов статики сыпучей среды для решения задач взаимодействия крепи с окружающими породами, то Ф. Ван-Итерсон все свои теоретические рассуждения и выкладки основывал на известных решениях задач механики грунтов.

Так, например, рассматривая задачу определения нагрузки на жесткую индивидуальную крепь лавы в случае закладки выработанного пространства, Ф. Ван-Итерсон использовал известное решение Прандтля о давлении штампа на основание, представленное сыпучей средой. Предельное напряженное состояние такой среды описывается следующим уравнением

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \sin \rho (\sigma_1 + \sigma_2),$$

где σ_1 и σ_2 – главные наибольшее и наименьшее напряжения, Па;

ρ – угол внутреннего трения, град.

На рис. 1.9 показана сетка линий скольжения, построенная при $\rho = 50^\circ$, в предположении, что нагрузка на угольный пласт P_1 – опорное давление – распределена равномерно.

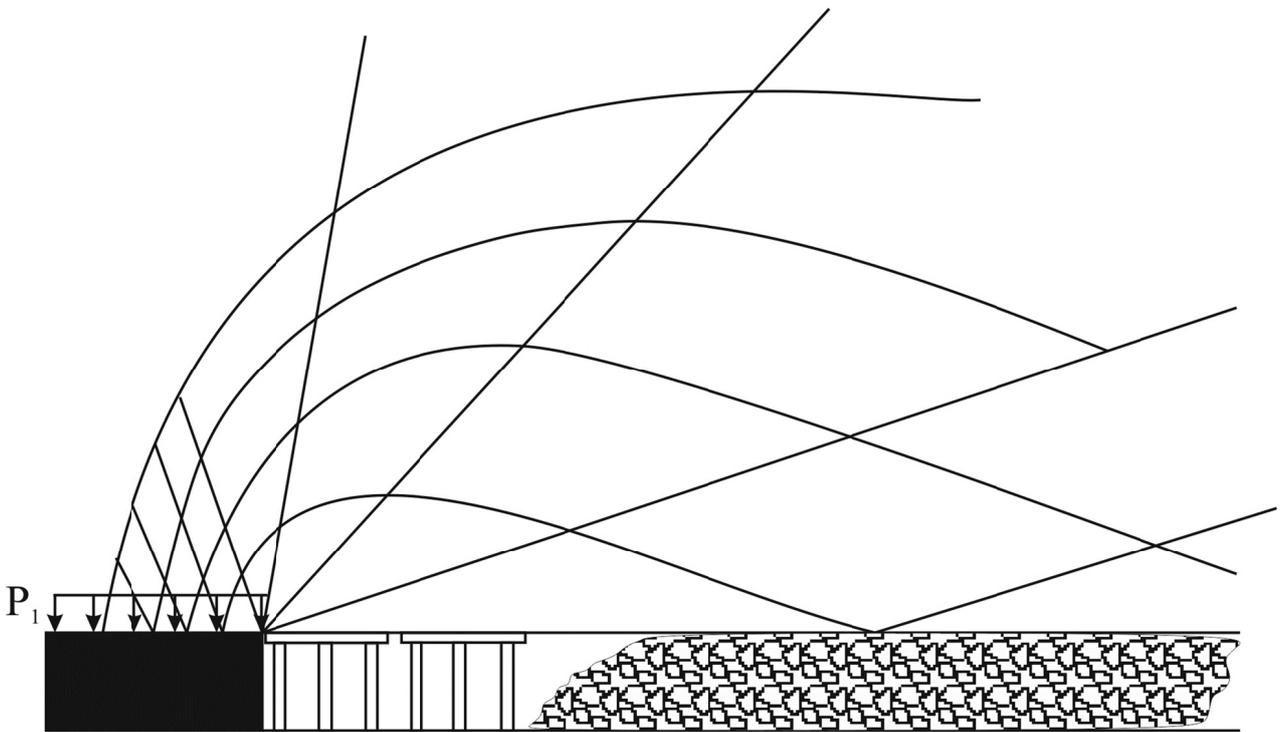


Рис. 1.9. Схема к определению давления на крепь по гипотезе сыпучей среды Ф. Ван-Итерсона

При этом нагрузка на 1 м^2 поддерживаемого пространства P_2 определяется по формуле:

$$P_2 = P_1 \frac{1 - \sin \rho}{1 + \sin \rho} \exp(-\pi \operatorname{tg} \rho).$$

Поскольку опорное давление на угольный пласт предполагается распределенным равномерно, что не соответствует действительности, то и предлагаемые зависимости носят скорее иллюстративный характер, чем практический.

Для определения нагрузки на податливую стоечную крепь лавы Ф. Ван-Итерсон использовал расчетную схему, приведенную на рис. 1.10.

При этом кровля очистной выработки является некоторой цилиндрической поверхностью с радиусом r_b , за которой находится сыпучая среда, ограниченная внешней цилиндрической поверхностью с радиусом r_n , к которой приложена внешняя нагрузка P_n .

Гипотеза радиальных смещений

Гипотеза радиального сдвижения пород была предложена К.В. Руппенейтом [93] в 1957 году и базировалась на представлении о сдвигении пород по дуге условного радиуса (рис. 1.11).

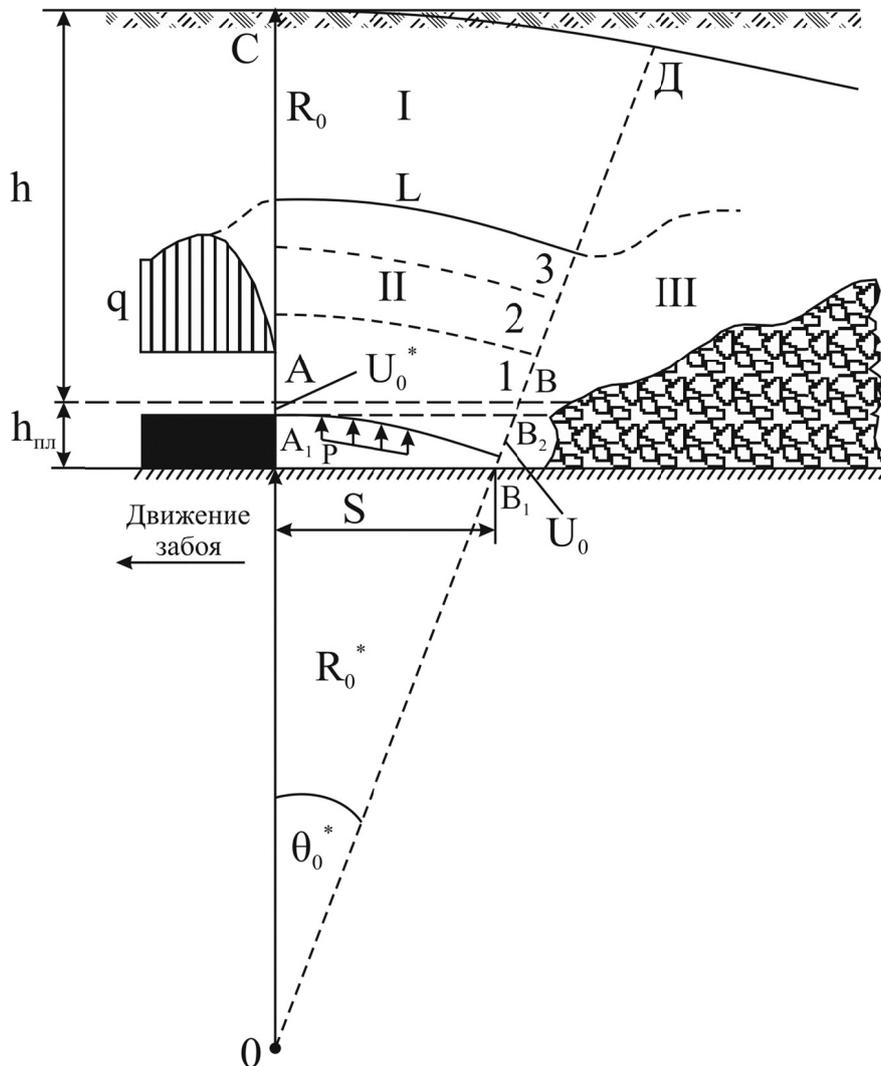


Рис. 1.11. Расчетная схема к решению задачи К.В. Руппенейта:
 I – зона упругих деформаций; II – зона неупругих деформаций;
 III – зона обрушенных пород.

Решение поставленной автором задачи основывалось на следующих предпосылках:

- впереди забоя и в завале имеются зоны опорного давления, максимум которого располагается на некотором расстоянии от границы очистного пространства. В зонах происходит образование трещин, что способствует обрушению пород кровли;

- над рабочим пространством по мере подвигания забоя образуется область полуразрушенных пород, переходящая выше в область упругих деформаций (рис. 1.12).
- отдельные слои или группы слоев могут работать как балки с различными опорными условиями.
- крепь может работать в двух основных режимах: заданной нагрузки и заданной деформации.

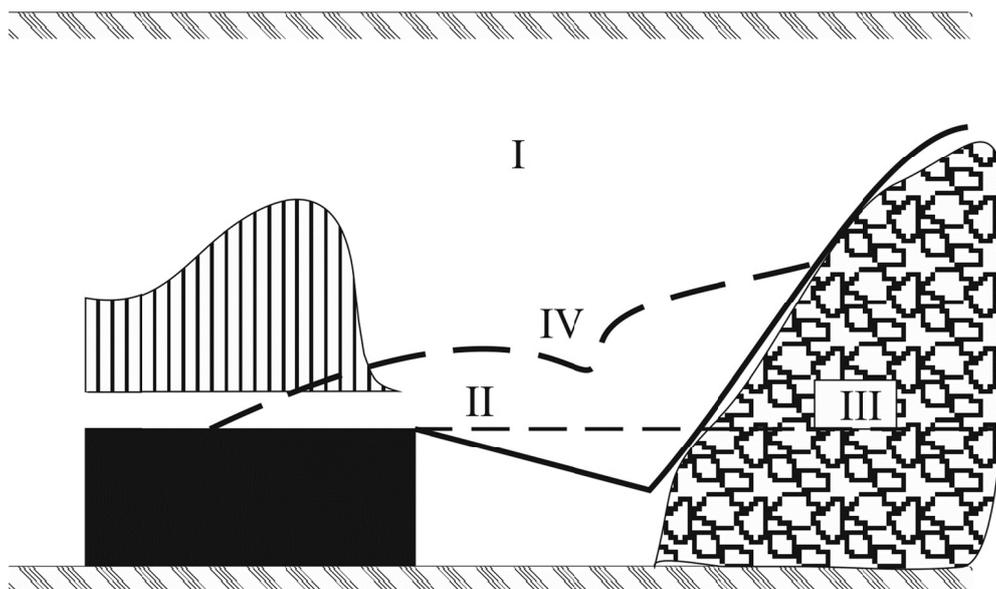


Рис. 1.12. Схематический разрез породной толщи, ослабленной очистной выработкой, по К.В. Руппенейту:

- I – область ненарушенных пород;
- II – частично разрушенной породы;
- III – область полностью разрушенной породы;
- IV – граница раздела областей I и II.

По мнению К.В. Руппенейта, зная смещения кровли и механическую характеристику крепи, можно определить давление на крепь на различных расстояниях от плоскости забоя. Следовательно, при известной характеристике крепей задача сводится к определению величины смещения кровли над последним рядом (со стороны обрушенных пород) стоек. Далее, касаясь поисков путей определения истинных величин деформации пород и горного давления в очистных забоях, К.В. Руппенейт допускал возможность в большинстве случаев не

учитывать анизотропию, слоистость и трещиноватость пород. По его мнению, учитывать трещиноватость очень сложно, к тому же даже очень развитая трещиноватость не имеет существенного значения, так как и сыпучая среда может рассматриваться (в некоторых случаях) упругой, характеризуемой модулем пропорциональности и коэффициентом Пуассона.

Исходя из этих принципиальных положений, К.В. Руппенейт разработал восемь расчетных схем к определению величин смещения кровли для различных условий залегания пород [67].

Однако, несмотря на достаточно строгое математическое построение расчетных схем, практического применения они не получили по причинам, которые довольно подробно осветил А.А. Борисов в работе [13]:

1. В реальных условиях значительная часть упругих и неупругих деформаций проходит до момента возведения крепи, поэтому приложение радиальных давлений крепи по контуру выработки в момент приложения основного поля напряжений неправомерно.
2. Разбитые трещинами частично раздробленные породы в предполагаемой области "неупругих деформаций" недопустимо рассматривать как сплошную среду.
3. Не учитывается влияние забоя данной выработки.
4. Не учитывается характеристика жесткости крепи.
5. По оси абсцисс вблизи выработки действует опорное давление, которое не является равномерно распределенным, как это принято в данной гипотезе.
6. Реальные процессы разрушений пород вблизи контура выработки делают неправомерным принятую методику определения давления на крепь и т.д.

В целом данная гипотеза неприемлема, расчеты по приведенным формулам дают результаты, далекие от действительности.

Гипотеза шарнирных блоков

Гипотеза блочного разрушения Г.Н. Кузнецова [48, 56 – 57] была предложена в результате обобщения большого количества натур-

ных и лабораторных исследований. Ее особенность в том, что из массива многослойных пород выделяются две зоны: беспорядочного обрушения (с разрывом связи пород) и упорядоченного сдвижения вышележащих слоев пород (без разрыва связи) с образованием многозвенной шарнирной системы без выпадения отдельных блоков. Картина обрушения пород, полученная на модели из эквивалентных материалов, представлена на рис. 1.13.

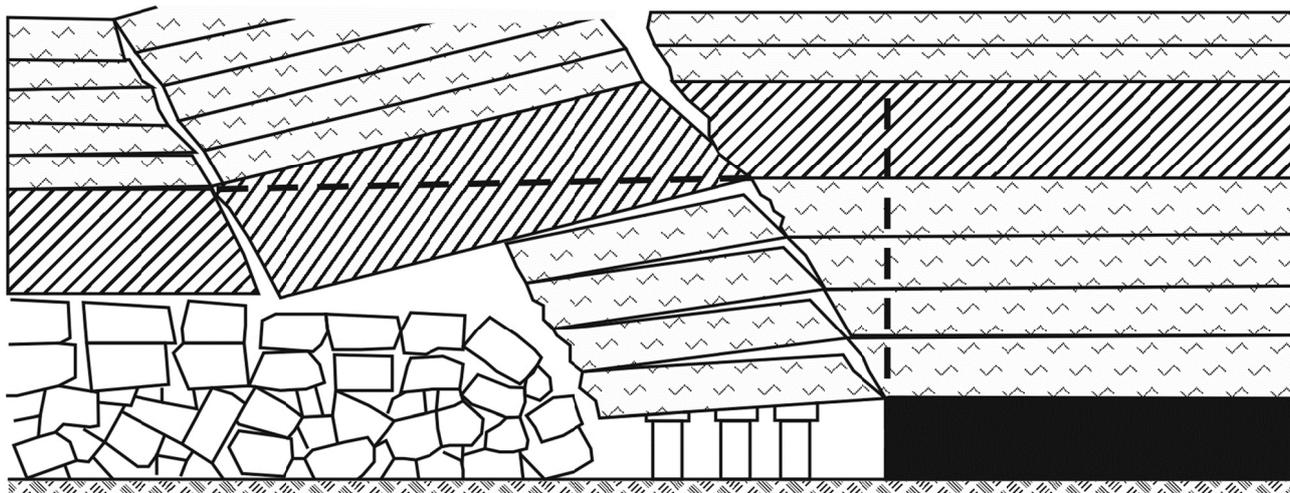


Рис. 1.13. Обрушение непосредственной и основной кровли по Г.Н. Кузнецову

Г.Н. Кузнецов считал, что ввиду такого блочного строения породного массива, применение методов механики сплошной среды для исследования взаимодействия крепи с боковыми породами в лавах пологих пластов недопустимо. Решение задачи должно основываться на изучении кинематики взаимодействующих блоков или групп блоков между собой и с крепью очистной выработки [142, 144].

Основные положения гипотезы:

- управлять кровлей лучше, когда пласты пород залегают в восходящем порядке по крепости;
- величина пролета кровли до первого обрушения в 3 – 4 раза превышает величину пролета при установившемся обрушении;
- смещение кровли происходит как поворот недеформирующегося блока вокруг некоторого условного шарнира;

- кинематическая картина процесса позволяет построить расчетные схемы, отражающие взаимодействия боковых пород и крепи;
- в очистном забое более близко к реальным условиям, чем соответствующие схемы, базирующиеся только на положениях механики сплошной среды;
- даются расчетные формулы кинематики сдвижения и взаимодействия блоков с численными примерами вычислений.

Предложенная гипотеза логична, однако ее обоснование вызывает некоторые сомнения по той причине, что все размышления и выводы построены на результатах моделирования, которые сами по себе еще не отражают действительных процессов обрушения пород в шахтных условиях [67].

В шахтных условиях обрушения пород происходят не только в виде блоков, консолей, плит, но и в виде плавного опускания, без разрыва сплошности (этого рассматриваемая гипотеза не объясняет) [67]. Расчетные формулы содержат много данных, получение которых крайне затруднительно, а порой и вовсе не представляется возможным [142, 144]. Несмотря на это, гипотеза приемлема для построения принципиальных расчетных схем горного давления. Данная гипотеза получила свое дальнейшее развитие в работах М.С. Четверика и Е.В. Андрощук [109].

Гипотеза напряженного состояния горных пород

Задача о концентрации напряжений у вырезов в упругой среде изучалась с конца XIX в. многими учеными (Г. Кирш, Г.В. Колосов, К.Е. Инглис, Н.И. Мусхелишвили [74 – 75] и др.). Использование ее для горных выработок было впервые предложено А.Н. Динником [35 – 36] в 1925 – 1938 гг. Он считал, что толщу горных пород в вертикальном сечении можно уподобить бесконечной упругой полуплоскости, а выработку круглого сечения – круглому вырезу в ней.

Расчетная схема приведена на рис. 1.14. Вертикальное напряжение в центре выработки до ее проведения $\sigma_z = \gamma H$.

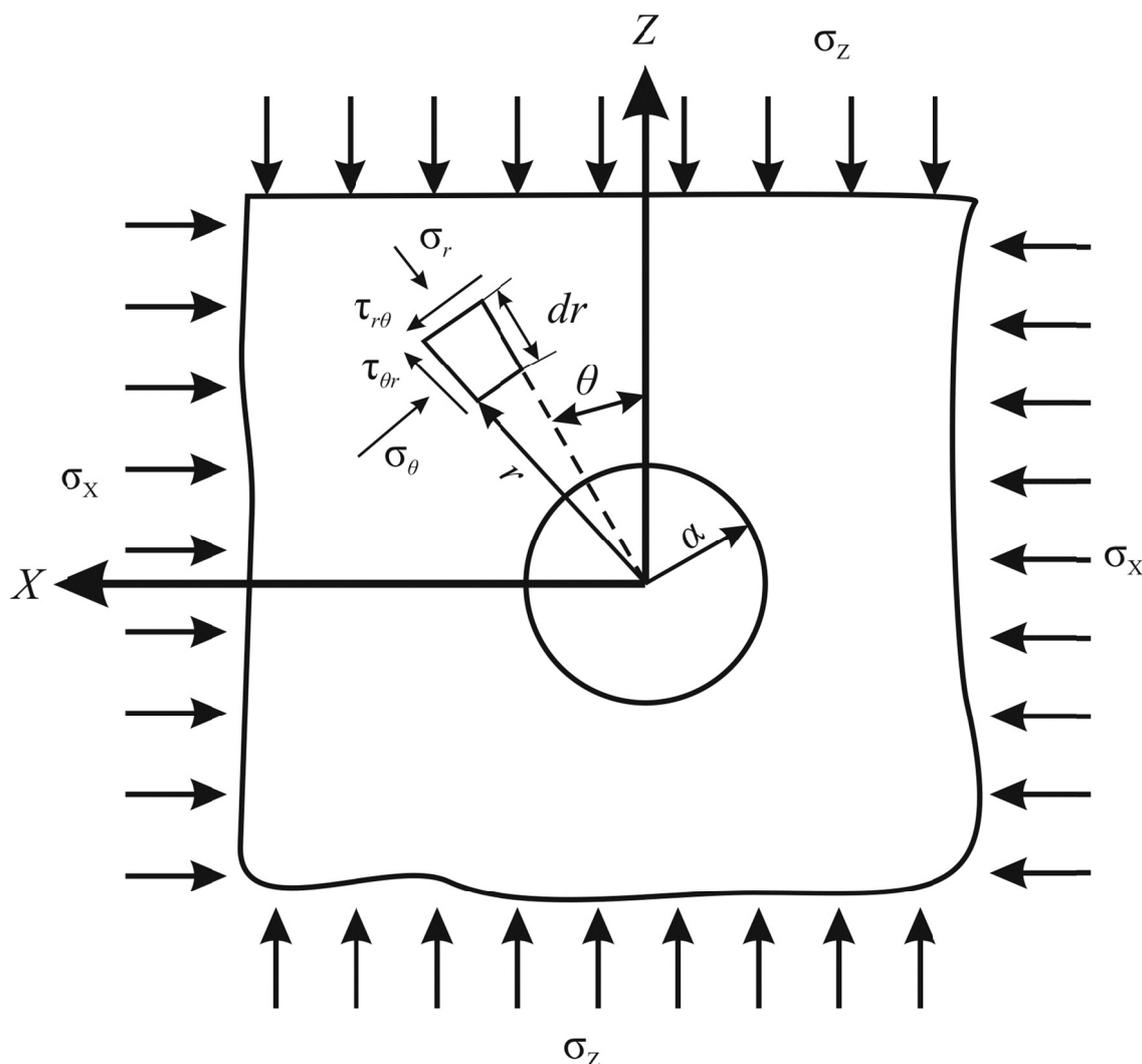


Рис. 1.14. Расчетная схема к определению напряжений в упругих однородных породах

Для плоской задачи, в соответствии с законом Гука, относительная деформация в горизонтальном направлении

$$\varepsilon_x = \frac{\mu\sigma_z}{E} + \frac{\mu\sigma_x}{E} - \frac{\sigma_x}{E}.$$

Точное решение для компонентов напряжений с учетом собственного веса материала полуплоскости было получено А.Н. Динником и др. [35].

Характер распределения напряжений у выреза приведен на рис. 1.15 (цифрами показаны коэффициенты концентрации напряжений).

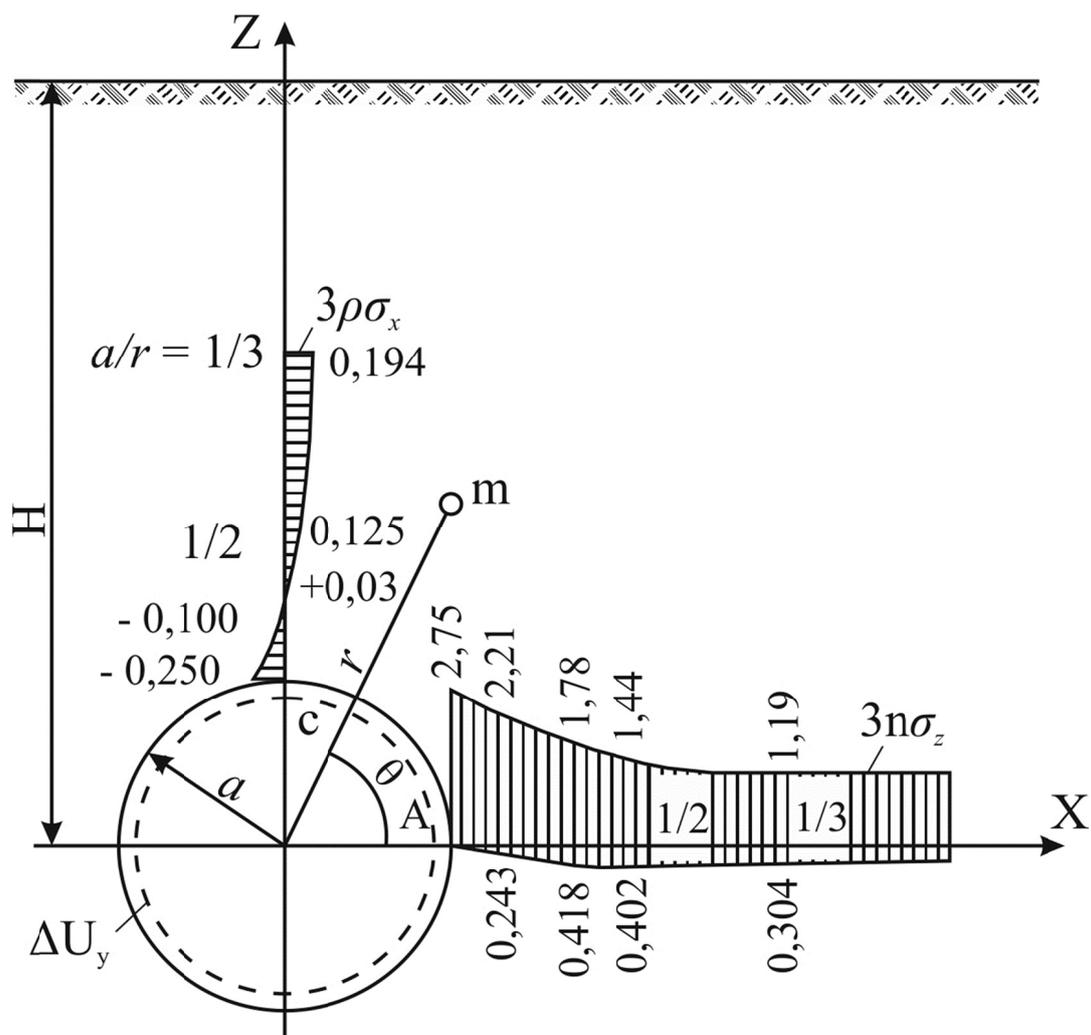


Рис. 1.15. Характер распределения напряжений в породах у выработки круглого сечения по А.Н. Диннику

Условия отсутствия разрушения выразятся неравенством $\sigma_{нч-\infty} > \sigma_k$. Это неравенство более точно определяет и условие допустимого применения теории упругости к твердым однородным горным породам [13].

Окончательная формула, рекомендуемая А.Н. Динником [36] для расчета бокового давления, имеет вид

$$\sigma = \frac{\mu}{1 - \mu} qH,$$

где μ – коэффициент Пуассона;

q – удельный вес пород, Н/м³;

H – глубина заложения выработки, м.

Указанный подход в свое время был рассмотрен М.М. Протодьяконовым, Д.С. Ростовцевым, И.П. Бухеником и В.Д. Слесаревым [109 – 110], указавшими на невозможность его использования для анизотропной среды, какой является массив горных пород.

Расчеты горного давления, как указывает А.Н. Динник, можно производить методами теории упругости, но с поправками на анизотропию пород. Для учета этих поправок соответствующей теории еще не создано [67].

Гипотеза балок

Сущность гипотезы консольной балки, предложенной независимо И. Шпарре и А. Шульцем [157] в 1867 году, состоит в том, что слои над выработанным и поддерживаемым пространством рассматриваются как балки, заделанные одним концом в целик. Другие концы балок могут иметь опору (крепь, закладка) или не иметь ее. В кровле отработываемого пласта, состоящей из нескольких породных слоев, образуется совокупность таких налегающих друг на друга и взаимодействующих между собой консолей (рис 1.16 и 1.17).

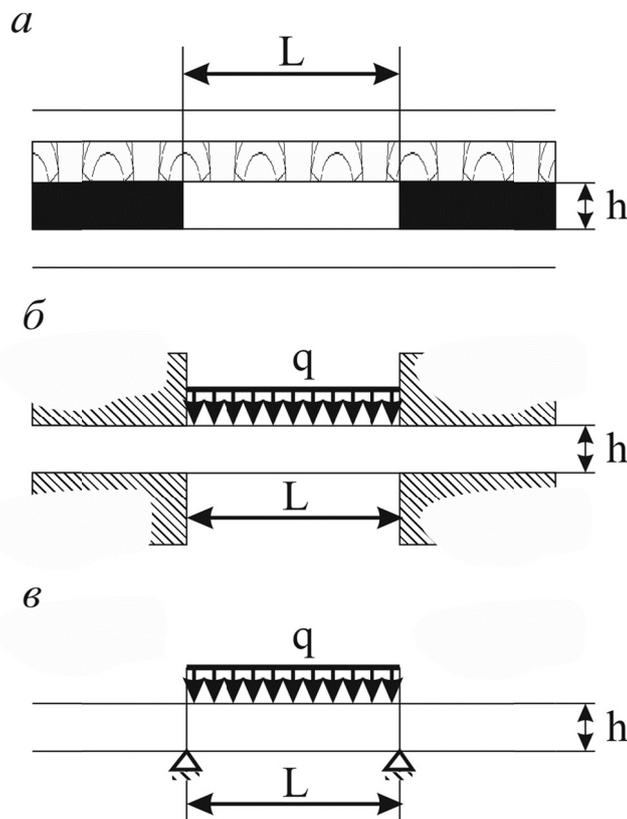


Рис. 1.16. Схема состояния непосредственной кровли перед первым обрушением (гипотеза балок):

a – фактическая,
 b – расчетная при наличии защемлений на опорах,
 $в$ – при наличии трещин вблизи опор.

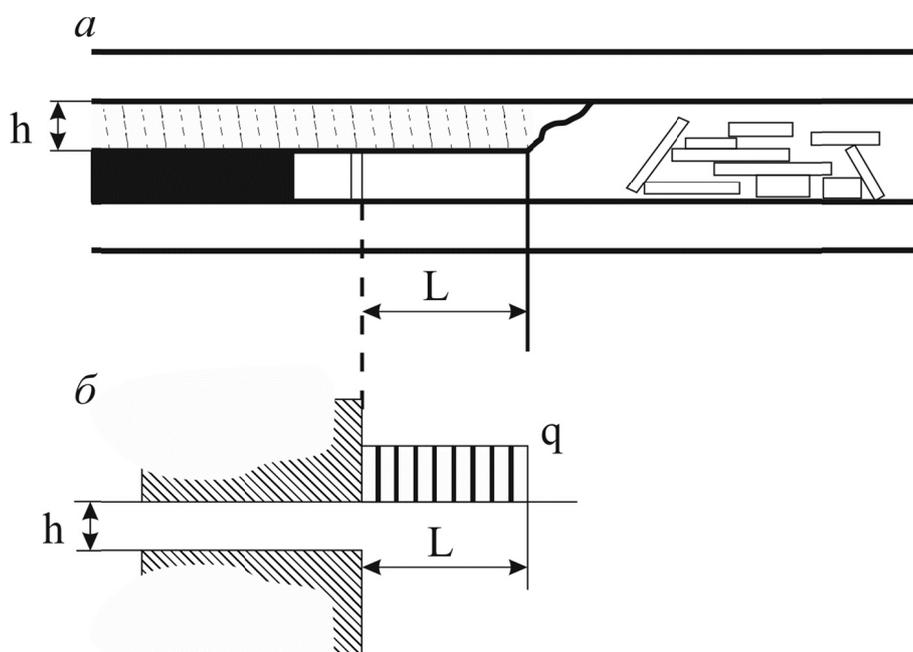


Рис. 1.17. Схема состояния непосредственной кровли при установившемся движении (гипотеза балок):

a – фактическая,
 b – расчетная.

Дальнейшее развитие гипотеза балок получила в работах Д.В. Филлипса [154], П.В. Бакки, Т.Ф. Фринда [151], А. Эккарда [150], В.Д. Слесарева [109 – 111], А.В. Савостьянова [97 – 99], Г.Н. Кузнецова [48] и др.

Наибольшее свое развитие гипотеза балок получила в трудах проф. В.Д. Слесарева.

В.Д. Слесарев для решения поставленной задачи считал, что эквивалентными в отношении значений напряжений и деформаций в наиболее опасных сечениях будут плита и балка (из одного и того же материала и при прочих равных условиях), если их гидравлические радиусы равны между собой. Под гидравлическим радиусом применительно к задаче о предельных обнажениях кровли В.Д. Слесарев понимал отношение площади обнажения кровли к ее периметру; при

этом он считал, что гидравлический радиус является показателем условий работы кровли лишь в первом приближении.

Такая интерпретация значения граничных условий по контуру обнажения кровли имеет под собой почву, так как отношение площади обнажения к ее периметру показывает, какая часть веса пород приходится на единицу периметра. Естественно, что при прочих равных условиях кровля будет тем более устойчива, чем меньший вес будет приходиться на единицу периметра ее обнажения.

Выражение В.Д. Слесарева для эквивалентного пролета может быть переписано в виде

$$l_э = \frac{n}{n+1} b,$$

где $n = a/b$ – отношение длин сторон обнажения кровли.

Таким образом, вместо решения объемной задачи о состоянии кровли для выработки длиной a и шириной b предлагается решать плоскую задачу для фиктивной выработки с пролетом, равным $l_э$.

Для количественной оценки предельных состояний кровли В.Д. Слесарев разработал приближенный метод расчета на основе известных в строительной механике: а) способа "кривой давлений", б) теории внецентренного сжатия, в) способа оценки глубины трещин [15]. Однако несмотря на это, он особо подчеркивал, что его методы являются лишь "приближенными методами инженерных расчетов".

Расчетная схема В.Д. Слесарева представлена на рис. 1.18.

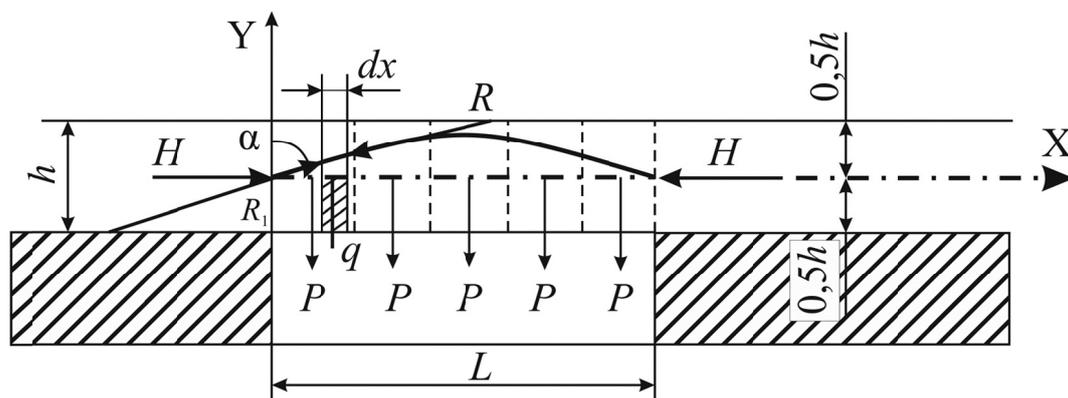


Рис. 1.18. Расчетная схема В.Д. Слесарева

В.Д. Слесарев является первым исследователем в области механики горных пород, который четко указал, что рассматриваемая задача о предельно допустимых обнажениях кровли является пространственной и, что обнажение кровли аналогично плите, свободно опертой или защемленной. Из-за сложностей, связанных с решением пространственной задачи, он искал приближенные простые пути замены расчета плиты расчетом эквивалентной балки, что принято в теории плит, хотя и не всегда правомерно.

В рамках этой же гипотезы, базируясь на фундаментальных законах сопротивления материалов и строительной механики, с учетом слоистости пород кровли, угла залегания и особенностей технологии ведения горных работ решение задачи по определению шага генерального и установившегося обрушения было предложено профессором кафедры подземной разработки ДГИ-НГУ А.В. Савостьяновым [42, 58 – 59, 97 – 99]. Также им на основе гипотезы балок была решена задача по определению величины зоны расслоения горных пород кровли над очистной выработкой.

Критику гипотезы балок дали проф. Д.С. Ростовцев [90 – 91] и проф. А.А. Борисов [15]. Они указывали, что гипотеза балок для расчетов давления кровли недопустима по следующим соображениям:

1. Кровля состоит не из одного, а из многих слоев различной крепости.
2. Слои имеют связи по плоскостям напластования.
3. Горные породы неоднородны, анизотропны, при деформировании не всегда подчиняются закону Гука.
4. В углах выработанного пространства имеются зависания кровли, что говорит о более близкой аналогии работы кровли с плитой, и т.д.

Гипотеза плит

Гипотеза плит является дальнейшим развитием гипотезы балок. Предположения о том, что кровля, сложенная слоистыми породами, работает подобно плите, высказывали Д.С. Ростовцев, В.Д. Слесарев, А.А. Борисов, Ф.А. Белаенко, К. Кегеля, К. Штокке, Г. Герман и др.

Проф. В.Д. Слесарев впервые четко сформулировал представление о кровле как о плите и дал приближенный метод замены плиты эквивалентной ей балкой. Далее это направление с успехом развил проф. А.А. Борисов, который в своей работе [18] лабораторными исследованиями доказал, что кровля, сложенная твердыми слоистыми породами как нетрещиноватыми, так и трещиноватыми, работает подобно пачкам плит. Это также подтверждается и многочисленными шахтными отечественными и зарубежными исследованиями. Задачу о расчете плиты выгодно свести к расчету балки ввиду большой простоты расчетного метода. Такая замена допустима только при условии эквивалентности напряжений и деформаций. Имеется серьезное различие в деформируемости плит и балок: материал балки находится в плосконапряженном состоянии и имеет возможность свободно деформироваться в направлении, перпендикулярном к плоскости изгиба, а материал кровли (плиты) находится в плоскодеформированном состоянии и не имеет возможности деформироваться в указанном направлении, поэтому в общем случае замена плиты балкой в целях расчета неправомерна.

В теории плит [21, 54, 103] показано, что заменить плиту можно эквивалентной балкой-полоской, мысленно вырезанной двумя параллельными между собой плоскостями, ориентированными в плоскости изгиба, но при этом в расчетах надо ввести приведенный модуль упругости

$$E_{np} = \frac{E}{1 - \mu^2}.$$

Кроме того, эквивалентность напряжений в опасных сечениях и деформаций допустима только при соблюдении неравенства

$$\frac{Z}{l} > 3,$$

где Z – длина выработки м;

l – пролет выработки, м.

Это условие можно не соблюдать лишь в тех случаях, когда кровля рассечена трещинами поперечного направления, имеющими достаточную частоту.

Основные положения гипотезы А.А. Борисова согласно [13] и [15] заключаются в следующем:

- непосредственной кровлей очистного забоя является пласт, слой или пачка пластов пород, шаг обрушения которых в несколько раз меньше шага обрушения основной кровли. Основной кровлей считается первый мощный слой более крепкой породы, мощность которого примерно в 20 раз превышает мощность разрабатываемого пласта;
- непосредственная кровля работает во взаимодействии с основной кровлей, угольным пластом, крепью и почвой пласта;
- деформации и разрушение пород непосредственной кровли имеют четко выраженную стадийность;
- до первичного обрушения кровли, по мере отхода забоя от разрезной печки, у кровли формируется прогиб с асимметричным положением стрелы прогиба; при установившемся шаге обрушения кровля обрушается по линии забоя с зависанием по углам у штреков, центр прогиба перемещается за забоем;
- радиусы изгиба пластов (и, следовательно, величины пролетов) возрастают от угольного пласта в восходящем направлении;
- угол наклона поверхности обрушения к горизонту колеблется в пределах $65 - 85^\circ$, углы обрушения отдельных пластов различны и зависят от их мощности (рис. 1.19).

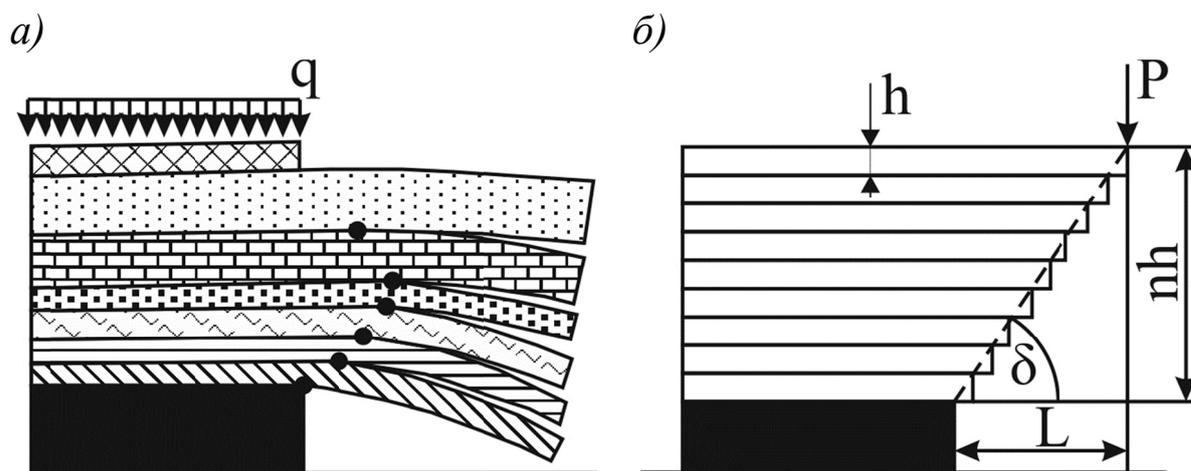


Рис. 1.19. Схемы обрушения по А.А. Борисову:

- а) иллюстрирующая изменение мест заделки консолей слоев пород;
 б) к определению угла обрушения кровли.

Несмотря на то, что А.А. Борисов в своих работах получил эпюру распределения опорного горного давления на основе теории тонких плит и провел ряд успешных экспериментов по определению закономерностей обрушения горных пород на объемных моделях из эквивалентных материалов, которые показали высокую степень схожести с теоретическими расчетами, эта гипотеза имеет ряд принципиальных недостатков.

1. Замена пластины балкой-полоской допустима лишь при $a/b > 3$ (a и b – длины сторон), в случаях, когда $a/b < 3$, подобная замена недопустима, причем погрешность в определении максимальных напряжений может достигать 70 % для свободно опертой пластины и 60 % для защемленной [15, 21].
2. Упрощения, принятые в расчетных схемах, приводят к рассмотрению отдельно взятого слоя без учета его взаимодействия со всеми остальными породными слоями. Построение эффективного решения аналитическими методами теории упругости для многослойной среды чрезвычайно громоздко и математически сложно.
3. Расчеты производятся для однородных изотропных горных пород, при решении поставленных задач анизотропия массива никак не учитывается.

Возникновение и развитие каждой из предложенных гипотез горного давления напрямую связано с решением конкретных практических задач, которые возникали на том или ином этапе развития горной науки и горнодобывающей промышленности в целом. Этим и обуславливается такое многообразие выдвинутых предположений и подходов к решению поставленных проблем. Главной целью каждой гипотезы является разработка и описание адекватной модели поведения углепородного массива при ведении горных работ с применением необходимых и достаточных допущений, позволяющих реализовать тот или иной имеющийся в наличии математический аппарат. Поэтому одни гипотезы больше основываются на визуальных наблюдениях, эмпирических зависимостях и умозрительных заключениях, другие, в свою очередь, используют строгие аналитические и численные выкладки для описания физических процессов, происходящих в массиве горных пород при добыче полезного ископаемого. Каждая из рассмотренных гипотез горного давления имеет ряд своих достоинств и недостатков, а также свою область эффективного применения.

По мнению авторов, наиболее универсальной, обоснованной и отвечающей действительности является гипотеза плит на упругом основании, предложенная в современном представлении В.Д. Слесаревым и получившая дальнейшее развитие в работах А.А. Борисова. В подтверждение состоятельности гипотезы А.А. Борисова следует отметить, что некоторые из независимо предложенных гипотез горного давления являются частными случаями гипотезы консольных плит на упругом основании.

Несмотря на многообразие и сложность горно-геологических условий и разнообразие технологических схем выемки угля в лавах, многолетние натурные наблюдения и теоретические исследования сущности физического процесса перераспределения напряженно-деформированного состояния в ослабленном выработками массиве горных пород позволили установить некоторые общие закономерности и характер распределения НДС вокруг очистных забоев.

1.2. Методики расчета параметров НДС массива горных пород вокруг очистных выработок

Закономерности проявления горного давления зависят от многих факторов: систем разработки и ее параметров, способов управления кровлей, поддержания штреков и др.

В общем случае все методики расчета напряженно-деформированного состояния можно разделить на численные и аналитические.

Применение той или иной методики расчета НДС массива горных пород обусловлено множеством факторов, среди которых в качестве основных можно выделить следующие:

- горно-геологические особенности строения массива;
- геометрические параметры рассматриваемой выработки;
- физико-механические свойства вмещающих пород;
- уровень автоматизации расчетных процессов;
- необходимая точность получаемого результата и др.

Преимущество аналитических методов заключается в возможности получения общего и точного решения поставленной задачи. Однако при этом они имеют узкую область эффективного применения. Аналитическими методами может быть получено адекватное решение для одиночных выработок круглого поперечного сечения, расположенных в однородном изотропном массиве, причем, как правило, в плоской постановке задачи. Учет анизотропии массива, трехмерной постановки происходящих процессов и сложного контура выработки приводит к значительному усложнению математического аппарата, а в некоторых случаях делает решение вообще невозможным. Методики расчетов, предложенные в работах [13 – 16, 30, 74 – 75, 87, 97 – 99, 109 – 112, 133 и др.], в основном выполнены для идеализированных схем и при переносе в натурные условия полученные результаты нуждаются в поправочных эмпирических коэффициентах, определение которых на практике весьма затруднительно.

В современной литературе известны методики аналитического расчета НДС вокруг очистной выработки, предложенные рядом авто-

ров: С.А. Христиановичем и Г.И. Баренблатом [133], В.Г. Гмошинским [30], А.Г. Протасени [87], А.В. Савостьяновым [46, 58 – 59, 97 – 99], В.Д. Слесаревым [109 – 112], А.А. Борисовым [13 – 16], А. Эккардом [150], Г. Шпаккелером [148], Д.В. Филлипсом [154], А. Уинстенли [119] и др.

Расчет опорного давления впереди лавы в сечении по простиранию, предложенный С.А. Христиановичем и Г.И. Баренблатом [133], дается на основе теории упругости. Рассматривается сплошная, однородная, изотропная, упругая полуплоскость, в которой на произвольной глубине выполнена горизонтальная прямоугольная щель с отношением пролета к ее высоте, равным 200. Предполагается, что такая полуплоскость является моделью срединной части толщи пород, выделенной двумя вертикальными плоскостями, перпендикулярными к очистному забою. Далее предполагается, что краевую зону длинного забоя можно представить в виде своеобразного клина, плотно подогнанного к краю выреза.

В решении В.Г. Гмошинского [30], как и в предыдущем, рассматривалась плоская осесимметричная задача, но дополнительно была предпринята попытка учесть раздавливание краевой зоны пласта. В результате им предложена кривая распределения опорного давления впереди длинного очистного забоя, которая состоит из двух ветвей: восходящей, в направлении от забоя к массиву и нисходящей.

Для нисходящей ветви принята формула А.Н. Динника

$$\sigma_z = \gamma H \left(1 - k e^{-\frac{2x}{l}} \right),$$

где k – коэффициент концентрации напряжений на кромке пласта;

γ – объемный вес пород, Н/м³.

Для восходящей ветви при неподвижном забое предлагается формула

$$\sigma_{yt} = c e^{\frac{fx}{h\xi}} + \left[\gamma H \left(1 - k e^{-\frac{2x}{l}} - c e^{\frac{fx}{h\xi}} \right) \right] e^{\frac{t}{T}},$$

где c – сцепление угля, Н/м²;

f – коэффициент трения угля по углю;

h – половина мощности пласта угля, м;

ξ – коэффициент бокового давления;

t – время, с;

T – реологический коэффициент, характеризующий время релаксации напряжений при разрушении угля, с.

Несколько иной подход к решению задачи по определению параметров опорного горного давления был рассмотрен в работах А.В. Савостьянова, В.Д. Слесарева и А.А. Борисова.

Обобщив теоретические представления об опорном давлении, был предложен инженерный подход к вопросам определения интенсивности опорного давления и его ширины на основе использования задачи Бруссинесека-Фламана.

В.Д. Слесарев и А.В. Савостьянов рассматривали непосредственную и основную кровлю пласта как полубесконечную балку на упругом основании, заделанную одним концом в массив горных пород и нагруженную на конце моментом M_0 . Далее решение поставленной задачи производилось на основе теории упругости. Решения предлагались для плоской задачи, которая рассматривалась в двух вариантах: в сечении по простиранию и в сечении по падению. Результаты и подробная методика расчета изложены в работах [42, 58 – 59, 97 – 99, 109 – 112].

А.А. Борисов предполагал, что непосредственная кровля зависит в виде плиты, два смежных края которой заделаны, а два других свободны. Ввиду большой сложности пространственной задачи предлагалось для приближенного решения разложить ее на две плоских. Решение задачи осуществлялось вариационным методом с применением принципа Лагранжа в форме В.З. Власова [14, 21].

В рамках теории плит на упругом основании в работах В.Ю. Куклина и С.И. Скипочки [60 – 62, 104 – 107] было получено аналитическое решение задачи о распределении напряжений в пласте и кровле для трансверсально-изотропного массива горных пород. Однако, как уже отмечалось выше, из-за сложности получения аналити-

ческого решения пространственной задачи, вычисления производились для эквивалентной балки-полоски с приведенным модулем упругости, которая выделялась в срединной части лавы перпендикулярно линии очистного забоя, что, по сути, дает возможность получить значения напряжений и перемещений только в рассматриваемом сечении. Перенос же этих результатов на другие участки лавы не является правомерным в силу принятых допущений. Стоит отметить, что в [61] для установления закономерности распределения напряжений по длине лавы в качестве основного принимался не аналитический расчет, а геофизический метод электрометрических измерений.

Для решения практических вопросов устойчивости призабойного пространства очистных выработок и управления горным давлением во многих случаях весьма эффективными оказываются численные методы механики сплошных сред, согласно которым приближенно аппроксимируются частные производные функция напряжений (функция Эри). Основным достоинством этих методов является универсальность, применимость для широкого класса случаев и относительная простота вычислений. Благодаря применению электронно-вычислительных машин, численные методы позволяют сравнительно быстро выполнить расчеты и при достаточной надежности исходных данных обеспечивают точность, необходимую для практического применения.

Для исследования напряженно-деформированного состояния массива горных пород непосредственно над очистной выработкой одним из первых был применен метод конечных разностей (метод сеток) [69]. Общий принцип метода состоит в том, что дифференциальное уравнение заменяют некоторым уравнением в конечных разностях, которое получают путем замены в нем производных и других дифференциальных операций их приближенными выражениями через разностные отношения или значения функций в отдельных точках по заранее выбранной сетке. К главным недостаткам этого метода, прежде всего, относятся сложность аппроксимации граничных условий, в частности при наличии угловых точек на контуре исследуемой области, а также относительно малая возможность учета неоднород-

ности массива пород, что имеет особо важное значение для очистных выработок, где необходимо рассматривать весьма значительные по размерам области массива горных пород.

По мнению ряда исследователей [14, 40] более перспективным является вариационно-разностный метод. Он основан на положениях строительной механики и базируется на энергетических принципах теории упругости.

В последнее время, благодаря своей универсальности и высокой точности, интенсивное развитие и широкое применение в практике расчетов напряженно-деформированного состояния массива горных пород получил метод конечных элементов (МКЭ). Этот численный метод основан на представлении области, напряженно-деформированное состояние которой необходимо определить, в виде совокупности плоских или пространственных элементов типа стержневых или рамных конструкций. При этом, в отличие от метода конечных разностей, соблюдается ясная физическая трактовка решаемых задач. Вместе с тем, необходимость определения свойств каждого элемента в отдельности дает возможность учитывать неоднородность свойств деформируемой области, а также рассчитывать области сколь угодно сложной конфигурации, в том числе и при условии учета большого количества различных граничных условий, без принципиальных изменений путей решения.

Математические модели на основе конечных элементов применялись для изучения распределения напряженно-деформированного состояния вокруг очистных выработок в работах О. Якоби [86]. Им также была предпринята попытка применить МКЭ для решения пространственных задач механики горных пород, однако в силу ограниченных возможностей ЭВМ решение пространственной задачи было получено только для крупных блоков, линейные размеры которых превышали 25 м, что отображало скорее качественную, а не количественную картину распределения НДС. К недостаткам как плоских, так и объемных моделей О. Якоби следует отнести и то, что модели строились только для изотропной среды без учета влияния крепления

выработок на распределение напряжений и деформаций в массиве горных пород.

В последнее время численные методы расчета НДС вокруг очистного забоя и прилегающих к нему выработок были успешно реализованы в диссертационных работах А.И. Коваля [53], И.В. Назимко [76], К.З. Склеповича [108], П.Е. Филимонова [124], В.В. Фомичева [127], В.Г. Черватюка [136] и др.

К основным недостаткам выше описанных методик расчета параметров НДС массива горных пород вокруг очистных выработок следует отнести то, что во всех (за исключением работ [127] и [136]) рассматривалась задача в плоской постановке для сплошной, однородной, изотропной среды. В работе [127] обоснование пространственной модели сдвижения горных пород вокруг выемочной выработки было выполнено без учета анизотропии горного массива и при условии допущения свободного проскальзывания породных слоев друг относительно друга на контакте поверхностей раздела, что не в полной мере соответствует физике происходящего процесса сдвижения. В работе [136] при объемной постановке задачи рассматривался идеализированный однородный массив с усредненными физико-механическими свойствами вмещающих угольный пласт горных пород. Такой подход к решению задач по определению НДС массива горных пород существенно сужает область эффективного применения предложенной методики расчета в силу неполного соответствия модели реальному состоянию горного массива.

Предложенные методики расчета НДС массива горных пород вокруг очистных выработок хоть и показывают неплохую сходимость результатов расчета и натурных измерений, все же, в силу вышеуказанных недостатков, нуждаются в дальнейшем развитии и уточнении, с целью повышения эффективности добычи угля из очистных забоев.

1.3. Общие закономерности проявления горного давления в очистных выработках

Закономерности проявления опорного давления зависят от многих факторов: систем разработки и ее параметров, способов управления кровлей, поддержания штреков и др.

В распределении опорного давления выделяется ряд пространственных зон, которые удобно рассматривать отдельно в плоскости пласта и в сечениях по простиранию и падению.

На рис. 1.20 показан пример распределения изолиний нормальных напряжений в плоскости пласта для некоторого момента времени. Характер распределения этих напряжений в вертикальной плоскости показан условно только для сечения вдоль забоя [13].

Общий характер распределения опорного давления в плоскости пласта приведен на рис. 1.21.

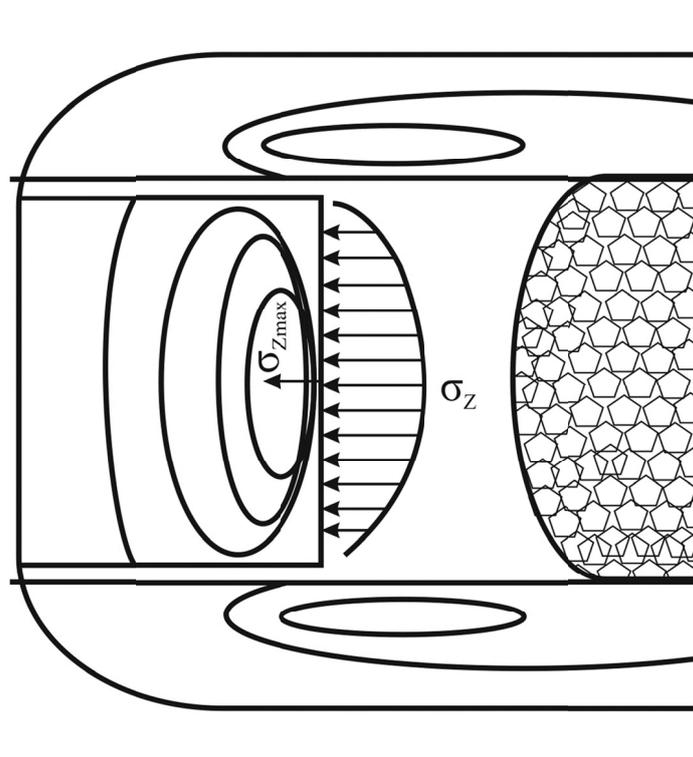


Рис. 1.20. Изолинии нормальных напряжений в плоскости пласта в зонах опорного горного давления по данным испытаний на объемных моделях

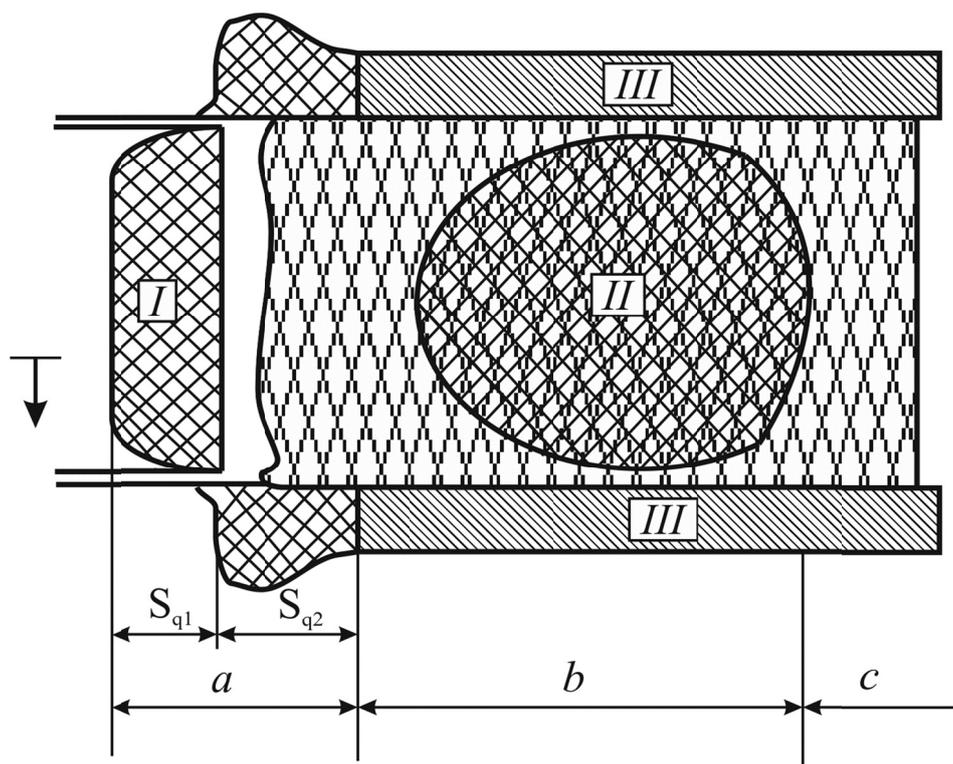


Рис. 1.21. Общий характер распределения опорного давления в плоскости полого пласта

По ориентировке относительно забоя в этой плоскости выделяются следующие зоны опорного давления: *I* – передняя, *II* – задняя, *III* – боковые (по падению и восстанию) [13].

Кроме того, по характеру изменений опорного давления необходимо выделять зоны: *a* – динамических проявлений опорного давления; *b* – затухания динамических проявлений опорного давления; *c* – статического или псевдостатического состояния опорного давления.

В зонах динамики S_{q1} и S_{q2} опорное давление меняет свою интенсивность, характер распределения и ширину охватываемой им зоны. Скорость этих изменений нестабильна, меняется. Опорные давления могут изменяться медленно, монотонно, но могут носить и мгновенный, ударный характер.

Для сравнения на рис. 1.22 представлен характер распределения опорного давления вдоль сторон опорного контура на основе теории тонких плит, из которого следует, что опорное давление распределяется вдоль сторон опорного контура неравномерно, достигая максимума при достаточном удалении от углов опорного контура [13].

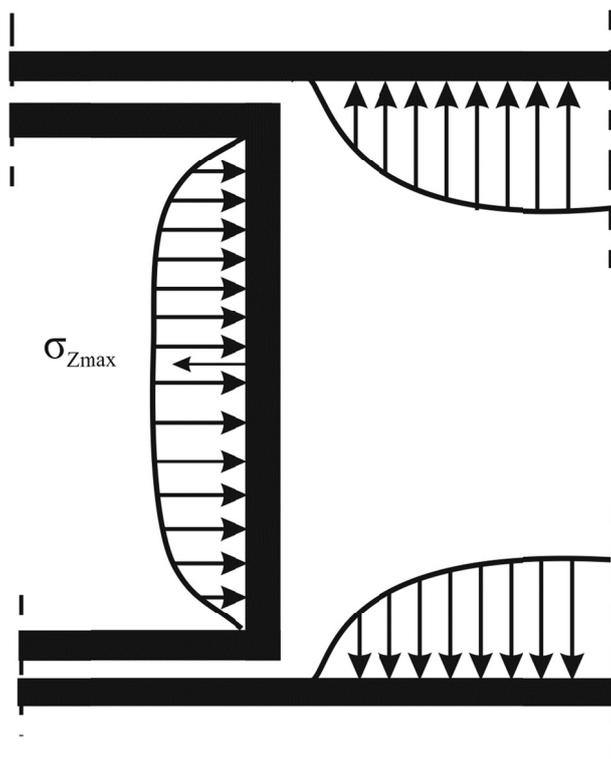


Рис. 1.22. Распределение опорного давления на основе теории тонких плит

Общий характер распределения опорного давления в сечениях по простиранию и падению показан на рис. 1.23. В этих сечениях четко выделяются зоны повышенных давлений, в которых соотношение $\sigma/\sigma_z \neq \text{const}$, но для которых характерно именно повышенное давление – $\sigma > \sigma_z$ [13].

Механизм образования опорного давления в передней зоне отличается от такового в боковых зонах. Действие опорного давления в передней зоне обусловлено динамикой завесаний пород покрывающей толщи на больших площадях вблизи забоя. В боковых зонах при достаточном их удалении от забоя этой динамики не существует [13].

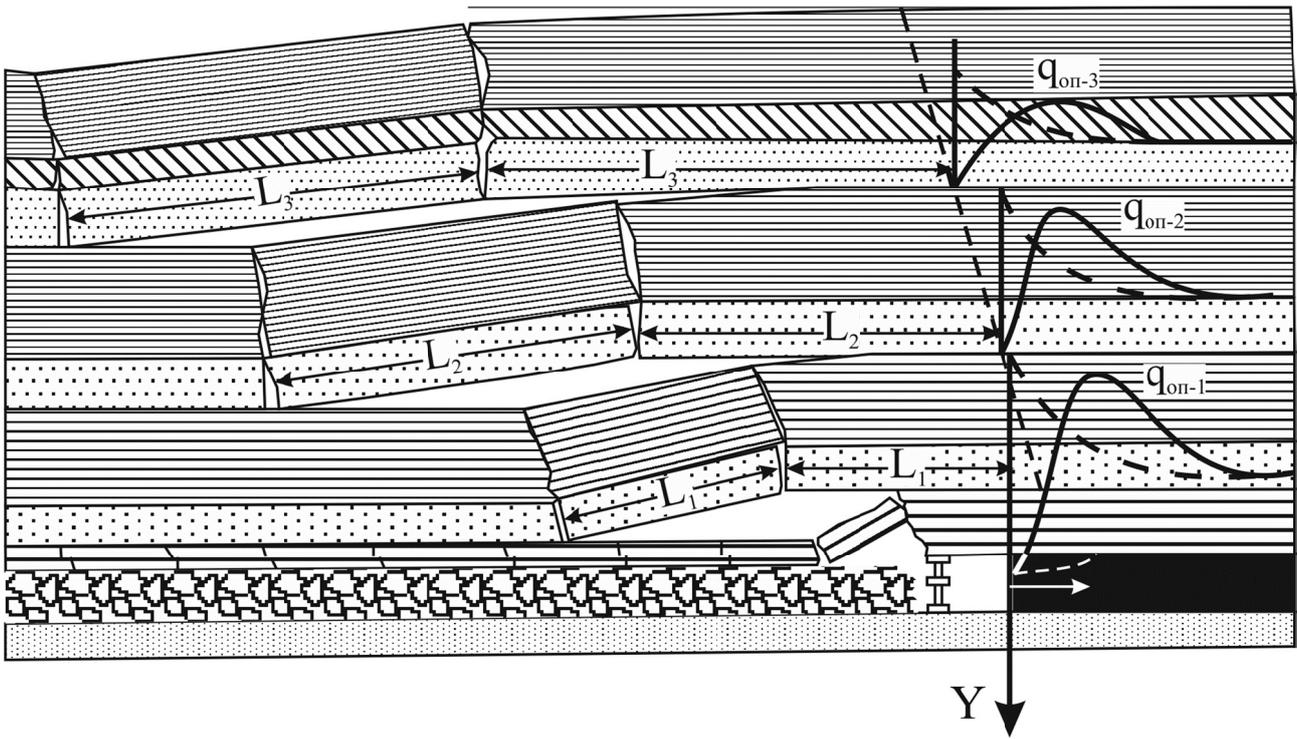


Рис. 1.23. Характер распределения опорного давления в среднем сечении впереди лавы (по простиранию)

Характер деформирования боковой зоны опорного давления показан на рис. 1.24.

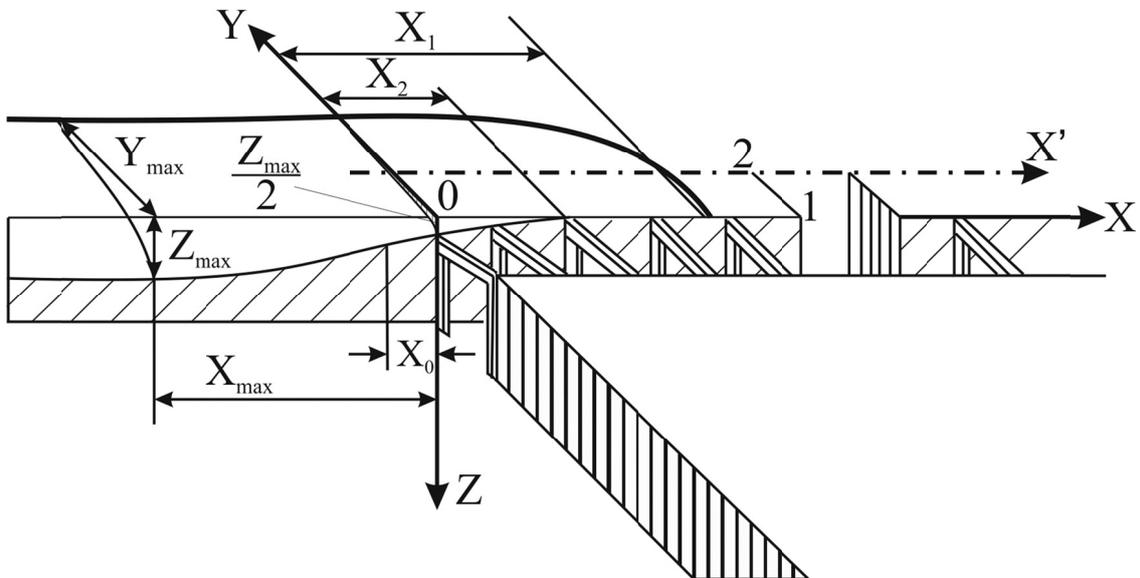


Рис. 1.24. Характер деформирования пласта в пределах боковой зоны опорного давления

В пределах самих зон опорного давления наблюдается известная дифференциация. Так, в передней зоне (рис. 1.25) выделяются следу-

ющие части: А – пониженных напряжений, сравнительно с γH , Б – повышенных напряжений; В – вторая подзона пониженных напряжений, Г – напряжений, близких к γH .

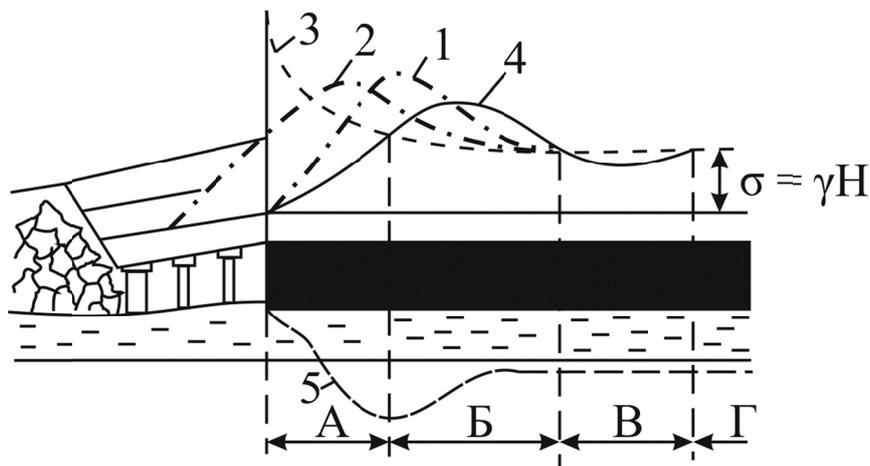


Рис. 1.25. Распределение опорного давления:

- 1 – по данным В.Д. Слесарева;
- 2 – по шахтным наблюдениям;
- 3 – по теории концентрации напряжений;
- 4 – по теории балок на упругом основании;
- 5 – опорное давление в почве пласта.

Вопрос о величинах деформаций и разрушениях краевых зон определяется соотношением интенсивности опорного давления, механических характеристик пласта, условиями на контактных поверхностях, а также продолжительностью действия нагрузки. Последняя определяется скоростью подвигания очистных работ. В свою очередь, интенсивность и характер распределения опорного давления зависит от характера разрушений и от степени деформирования краевой зоны.

По мнению А.А. Борисова [13, 15], краевые зоны представляют своеобразные штампы, через которые опорное давление передается в породы подстилающей толщи, повышая здесь вертикальную составляющую тензора напряжений. Поэтому под краевыми зонами образуются области повышенных напряжений, в которых напряжения рассеиваются и затухают на значительных удалениях от разрабатываемого пласта.

Подвигание очистного забоя вызывает перемещения и измене-

ния всех этих зон вблизи забоя, но на достаточном удалении от него остаются некоторые зоны, сохраняющие относительно стабильное состояние длительный период.

Конкретное распределение зон опорного давления зависит от ряда факторов: глубины работ, процессов деформаций и разрушений не только непосредственной и основной кровли, но и всей покрывающей толщи, физико-механических свойств пласта, пород почвы и др. Действие опорного давления приводит к сжатию краевой зоны и выдавливанию почвы.

Общий характер изменения эпюры опорного давления в зависимости от пролета представлен на рис. 1.26, кривые 1, 2, 3 соответствуют изменениям пролета $L_1 < L_2 < L_3$.

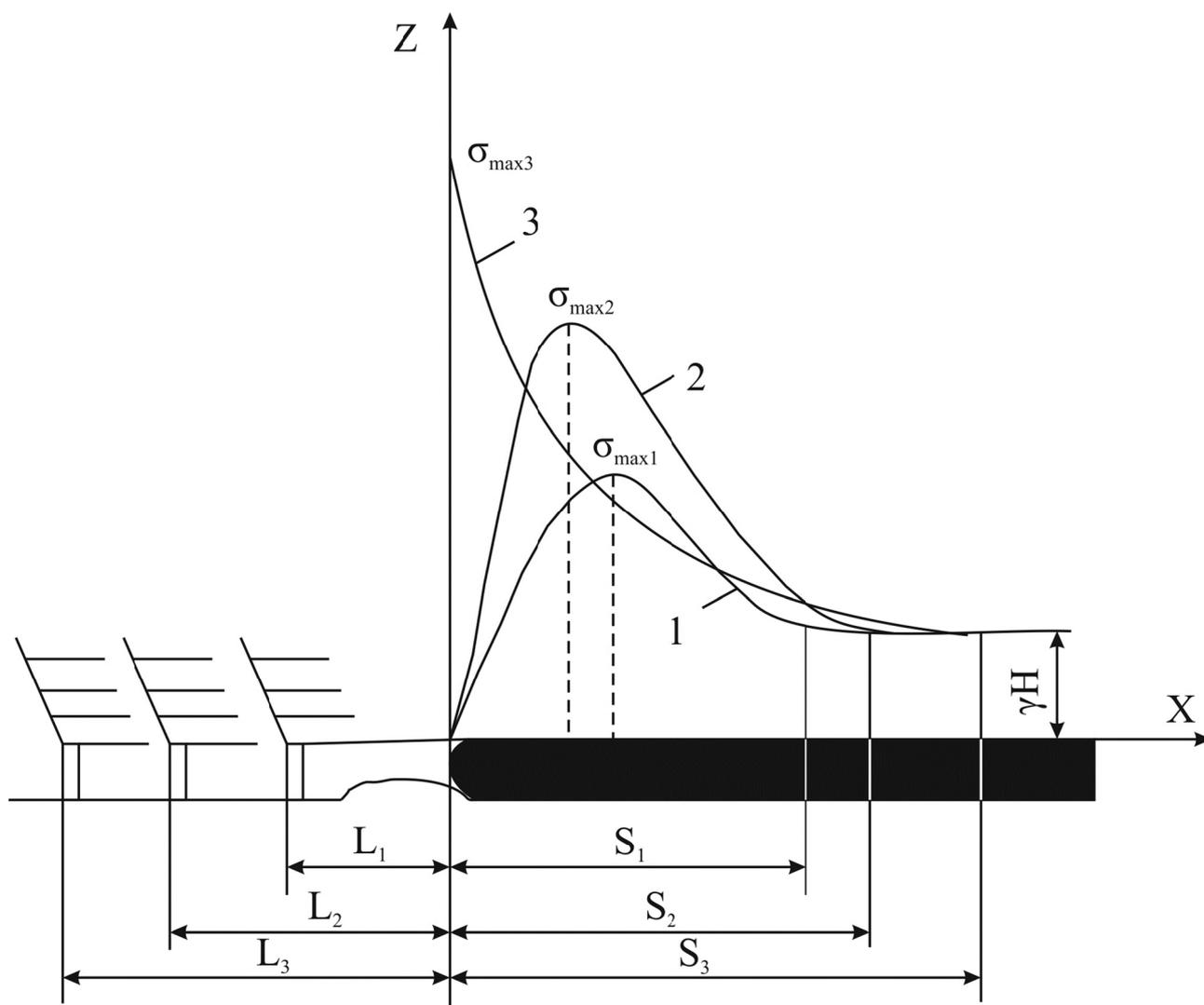


Рис. 1.26. Эпюры опорного давления впереди лавы в зависимости от пролета при отсутствии раздавливания краевой зоны

Из этого рисунка ясно, что по мере увеличения пролета выработки интенсивность опорного давления и, как правило, ширина его зоны возрастают, а его максимум все более приближается к забою (краю массива, целика) [13].

По мере подвигания забоя изменения величины максимума опорного давления и расстояния от него до забоя происходят в определенных пределах, как в периоды между посадками основной кровли, так и в периоды между полными оседаниями пород всей покрывающей толщи до поверхности, как представлено на рис. 1.26. Это объясняется нестабильностью механических характеристик покрывающей толщи пород и разрабатываемых пластов, их трещиноватостью, изменениями их мощностей и др.

Интенсивность и характер распределения опорного давления сильно меняются по мере деформирования краевой зоны во времени вследствие ползучести, а также особенно вследствие ее раздавливания.

Общий характер деформаций краевой зоны пласта, кровли и почвы и характер разрушений краевой зоны пласта представлены схематично, на рис. 1.27.

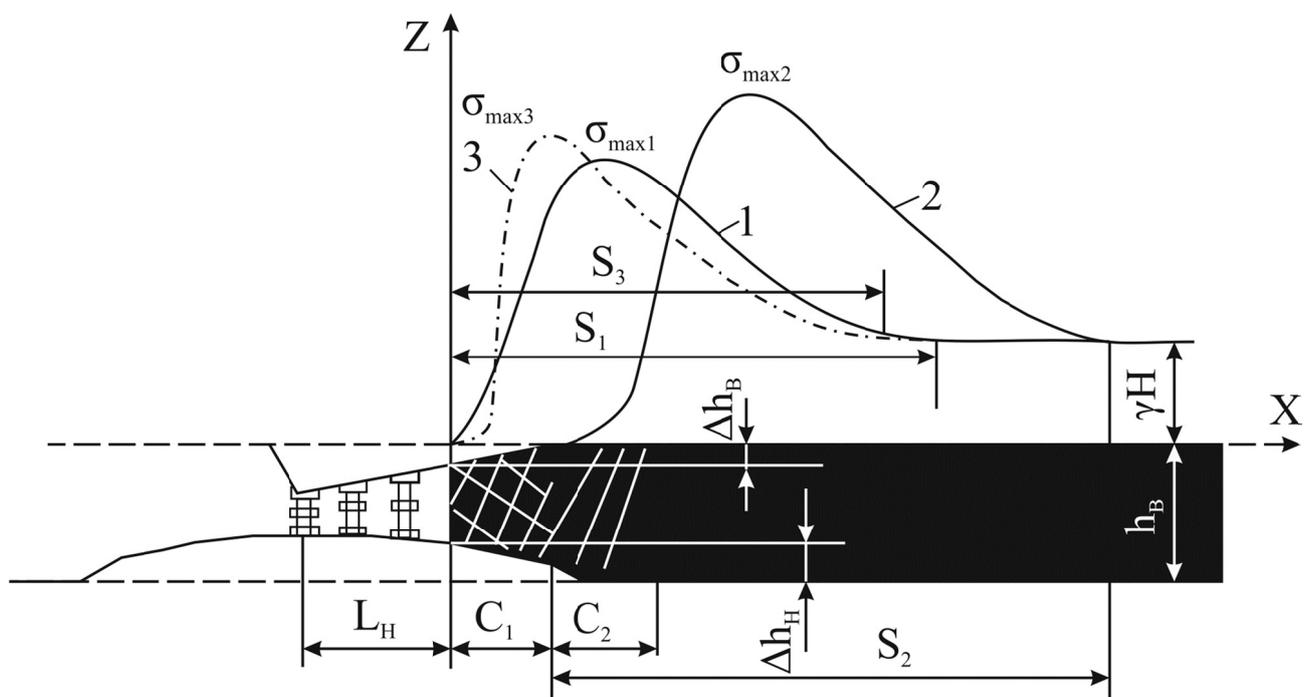


Рис. 1.27. Динамика опорного давления впереди лавы при раздавливании краевой части

При каждом сжатии краевой зоны пласта опорным давлением происходят мгновенные деформации, а во времени развиваются деформации ползучести. В зависимости от соотношения величины опорного давления и физико-механических характеристик пласта могут происходить уплотнения и разрушения краевой зоны, но в общем случае могут образоваться две зоны: C_1 – зона разрушения и C_2 – зона уплотнения [13].

Раздавливание краевой зоны приводит к соответствующему возрастанию пролета и, следовательно, к возрастанию интенсивности и ширины зоны опорного давления, при этом максимум опорного давления перемещается в направлении от забоя.

Если эпюра опорного давления до раздавливания краевой зоны имела вид кривой 1 (рис. 1.27), то после раздавливания краевой зоны она приобретает вид кривой 2. Когда раздавливания краевой зоны нет, а происходит лишь ее уплотнение, эпюра опорного давления может иметь вид кривой 3. Огромное влияние на интенсивность и характер распределения опорного давления имеет глубина разработки.

Следует отметить, что интенсивность деформирования и раздавливания краевой зоны соответствует эпюре распределения опорного давления вдоль забоя (см. рис. 1.20), т.е. она не постоянна по длине всей лавы и во многих случаях раздавливание краевой зоны происходит лишь в ее средней части [13].

1.4. Анализ опыта исследования проявлений горного давления вокруг движущегося очистного забоя

Параметры горного давления вокруг очистных выработок нестабильны, а по мере продвижения забоя изменяются в весьма широких пределах, т.е. имеется периодичность опорного давления, которая обусловлена изменением пролетов завесаний пород покрывающей толщи, деформациями и разрушениями краевой зоны очистного забоя и вмещающих пород (кровли и почвы), а также технологическими параметрами: способом подготовки, системой разработки, скоростью

подвигания очистных работ, шириной захвата комбайна, длиной лавы и др.

В связи с тем, что слои кровли обрушаются периодически, зона влияния очистного забоя на окружающие породы постоянно изменяется. При максимальном зависании всех слоев она наибольшая, после обрушения основной кровли – минимальная. Это объясняется тем, что зависание пород покрывающей толщи создают суммарный изгибающий момент $\sum_1^n M_i$, который в определенные периоды достигает абсолютного максимума. Доля влияния $\sum_1^n M_i$ на интенсивность опорного давления и характер его распределения, как правило, преобладает и может в несколько раз превосходить влияние литостатического давления. Так по данным исследований [13 – 16, 47, 97 – 99] пределы изменений максимальной интенсивности опорного давления составляют $q_{max} \geq (1,5 - 5)\gamma H$.

Ширина передней зоны опорного давления изменяется в пределах от 20 до 250 м, а расстояние от забоя до максимума опорного давления изменяется от 0 до 15 м и более. По некоторым данным, ширина боковой зоны опорного давления (по падению и восстанию) изменяется от 5 до 20 м.

Большое внимание периодическому характеру проявлений горного давления уделено в работе [82], где приводятся многочисленные и трудоемкие наблюдения за работой механизированных крепей. Авторы уделили большое внимание статистической обработке результатов наблюдений и доказали наличие закономерности появления периодических осадок при управлении кровлей полным обрушением.

На наличие периодических процессов в массивах горных пород при разработке пластовых месторождений также указывал И.Л. Черняк [137 – 140]. Им впервые для анализа периодичности применен гармонический анализ. Он рассматривает все характерные периодические процессы при отработке выемочного столба: технологические, геомеханические и горнодинамические.

Диссертационная работа по периодическим проявлениям горного давления с применением гармонического анализа, рассматривавшая влияние процесса отжима угольного пласта в очистных забоях на

технологии ведения выемочных работ, была выполнена А.В. Шкурко [147]. В работе исследован периодический характер отжима угольного пласта. Для разных горно-геологических условий проведены шахтные инструментальные наблюдения и их обработка с помощью гармонического анализа. Установлена периодичность и ее параметры, выявлена роль отдельных слоев пород кровли в формировании отжима угольного пласта и определены пути управления отжимом. Также большой объем натуральных исследований периодичности проявления горного давления в очистных забоях выполнен Ю.Б. Грядущим в работе [32].

Практически все работы, связанные с периодичностью проявления горного давления, базировались на статистической обработке и анализе большого количества данных, полученных в ходе проведения натуральных измерений и экспериментов. Именно поэтому полученные закономерности и зависимости являются справедливыми только для конкретно рассматриваемых горно-геологических и горнотехнических условий, для остальных же случаев они скорее носят качественный, чем количественный характер. На периодичность оказывают огромное влияние литологический тип горной породы, мощность слоя, анизотропия деформационных и прочностных свойств, последовательность и угол залегания пластов, а также параметры технологии, тип применяемого очистного оборудования и др. Даже в пределах одного месторождения эти параметры могут существенно изменяться. Периодическое изменение НДС массива горных пород влияет не только на состояние призабойной части угольного пласта, но и на величину конвергенции горных пород по длине лавы. Поэтому обоснование параметров технологии отработки выемочных столбов необходимо производить с учетом изменения параметров НДС по длине лавы в зависимости от положения очистного забоя по длине выемочного столба. На современном этапе развития горной науки практически отсутствуют подходы к математическому моделированию, которое позволяет выявлять и прогнозировать периодичность проявления горного давления в очистном забое.

Периодичность изменения НДС горного массива напрямую связана с шагом генерального и установившегося обрушения горных пород кровли в выработанное пространство лавы, что в свою очередь является важным технологическим параметром.

С использованием теории плит на упругом основании для слоистого трансверсально-изотропного массива горных пород на примере условий Западного Донбасса в работах [60 – 62, 104 – 107] были получены аналитические зависимости изменения величины зависящей консоли от глубины заложения горной выработки, скорости подвигания очистного забоя и реологических свойств горных пород. Однако решение задачи производилось в плоской постановке при помощи замены плиты эквивалентной балкой-полоской, что не освобождает предложенную методику расчета от вышеуказанных принципиальных недостатков, которые характерны для данного подхода к решению задач геомеханики.

На взаимосвязь между величиной шага обрушения пород кровли над выработанным пространством лавы и скоростью подвигания очистного забоя также указывалось в работах И.В. Назимко [76 – 79]. Решение задачи по определению закономерностей обрушения кровли производилось в плоской постановке с помощью различных методов моделирования. В качестве основного использовался метод компьютерного моделирования, который в свою очередь базировался на численном математическом методе дискретных элементов (МДЭ).

Обоснование величины шага генерального и установившегося обрушения кровли при ведении очистных работ методом пошагового компьютерного моделирования с использованием численного математического метода конечных элементов (МКЭ) также было выполнено в работах Н.В. Хозяйкиной [128 – 132].

К основным недостаткам результатов исследований И.В. Назимко и Н.В. Хозяйкиной на основе компьютерных моделей с использованием численных математических методов является то, что массив моделировался сплошным изотропным материалом с усредненными физико-механическими свойствами и рассматривалось только среднее сечение лавы, перпендикулярное линии очистного забоя, т.е. ре-

шалась задача плоской деформации, что в итоге несколько снижает практическую ценность полученных результатов.

Другим направлением исследования закономерностей обрушения пород кровли при отработке пологих угольных пластов является метод натуральных наблюдений. В отличие от математического, компьютерного и других видов моделирования его реализация связана с большими техническими трудностями, однако полученные результаты позволяют оценить достоверность значений и параметров, полученных с помощью той или иной модели.

На основании многолетних натуральных наблюдений независимо друг от друга были разработаны принципиальные схемы сдвижения горных пород над выработанным пространством лавы, так называемые схема ВНИМИ и схема ДПИ-ДонНТУ, которые были разработаны под руководством проф. Д.Н. Оглобина. В этих двух схемах нет принципиального различия, есть только разная степень видения, трактовки и детализации отдельных особенностей протекания геомеханических процессов. Это обусловлено сложностью и труднодоступностью познания тех или иных процессов в реальном горном массиве [43]. Согласно схеме ДонНТУ (рис. 1.28), в условиях Донбасса на пластах мощностью 0,9 – 1,0 м и более в подработанной толще, которая в основном представлена перемежающимися слоями пород, при отсутствии пород-мостов (мощных песчаников и известняков), высота зоны опускания горных пород с нарушением сплошности в средней части лавы по нормали к напластованию достигает (0,5 – 0,8) длины лавы.

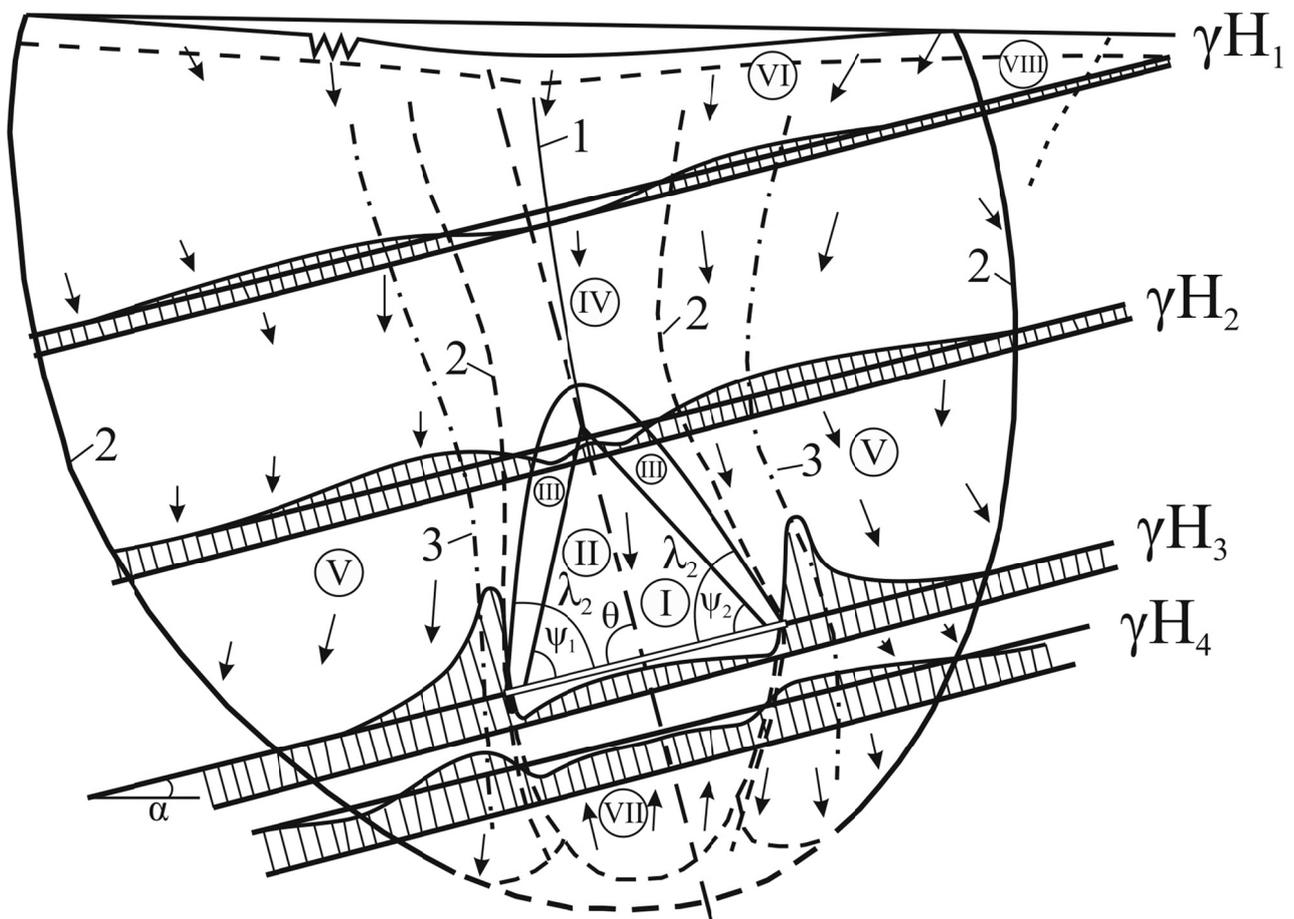


Рис. 1.28. Схема сдвижений вмещающей толщи горных пород на разрезе вкрест простирания пласта при выемке угля одиночной лавой (по данным исследований ДПИ-ДонНТУ):

- 1 – линия максимальных сдвижений пород;
- 2 – граница зоны опорного давления;
- 3 – линия максимальных давлений пород;
- θ – угол максимального оседания пород.

(название зон и их характеристики приведены в таблице к рис. 1.29)

По данным ВНИМИ (рис. 1.29) трещиноватость пород по нормали к напластованию (над средней частью лавы) распространяется в подработанную толщу на высоту примерно $(30 - 35)m$, где m – мощность пласта, м.

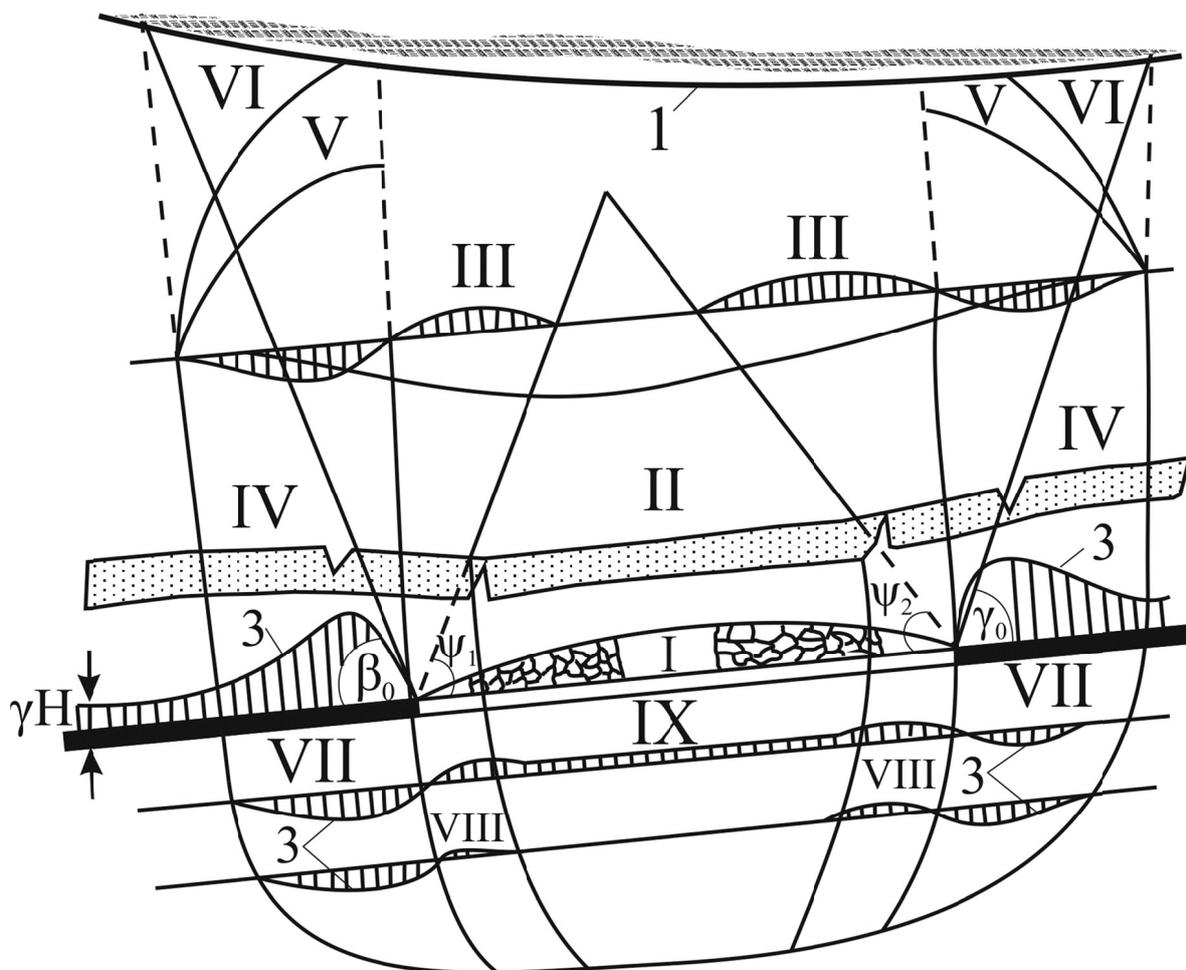


Рис. 1.29. Схема сдвижений вмещающей толщи горных пород на разрезе вкрест простирания пласта при выемке угля одиночной лавой (по данным ВНИМИ):

I	зона обрушений пород кровли пласта
II	зона полных сдвижений (прогиба слоев и нарушений их сплошности в виде трещин)
III	зона наибольшего плавного прогиба породных слоев без нарушения их сплошности
IV	зона опорного давления в кровле пласта (сжатие пород по нормали к напластованию)
V	зона малых знакопеременных деформаций
VI	зона сдвижений пород практически без деформаций по нормали к напластованию
VII	зона опорного давления в породах почвы пласта (сжатие пород)

VIII	зона неравномерных поднятий пород почвы
IX	зона равномерных поднятий пород или зона разгрузки
1	кривая оседания земной поверхности
2	эпюры нормальных напряжений в зоне опорного давления
3	графики деформаций пород по нормали к напластованию
β_0, γ_0	граничные углы сдвижений земной поверхности
ψ_1, ψ_2	углы полных сдвижений (обрушений) пород

В то же время согласно исследованиям [4, 48] зона опускания с нарушением сплошности пород распространяется на высоту до 12 – 15-кратной мощности пласта. Над выработанным пространством выше указанной высоты располагается зона плавного прогиба без нарушения сплошности. Расхождение в результатах объясняется разнообразием горно-геологических условий, в которых производились натурные эксперименты. Рядом исследователей отмечалось, что на величину зоны прогиба горных пород с нарушением сплошности влияют не только количество слоев, их мощность и физико-механические свойства, но и их расположение (по нормали к напластованию) относительно выработанного пространства. Порядок залегания пластов горных пород существенно влияет на распределение напряженно-деформированного состояния в массиве, нарушенном очистными выработками. Для учета последовательности расположения литологических разностей с различными прочностными свойствами в стратиграфической колонке методики расчета, базирующиеся на решении задач с использованием модели однородной изотропной среды в плоской постановке, предлагают различные варианты предварительного усреднения физико-механических свойств и определения средневзвешенной прочности горных пород, вмещающих пласт [17, 31 – 33, 44 – 45, 116, 121]. С практической точки зрения, такой подход позволяет несколько уточнить уже имеющиеся методики расчета, однако однозначно он полностью не снимает вопрос об учете слоистости и анизотропии в деформационных и прочностных свойствах горных пород, а главное, о влиянии последовательности залегания слоев в кровле и почве пласта на закономерности распределения

напряженно-деформированного состояния массива горных пород в зоне влияния очистных выработок.

Теоретические исследования, подтвержденные опытом многолетних натуральных наблюдений, позволили с высокой степенью достоверности качественно описать физические процессы, происходящие в массиве горных пород. В свою очередь, оценка количественных параметров опорного горного давления не имеет четко выраженных однозначных подходов. Этим, прежде всего, и объясняются значительные расхождения в геометрических и силовых параметрах опорного давления, полученных расчетным путем и в результате натурального эксперимента. Необходимо отметить, что это связано со сложным структурным строением массива горных пород, наличием тектонической составляющей общего поля напряжений, широким диапазоном изменения физико-механических свойств горных пород не только между, но и в пределах одной литологической разности и т.п.

В связи с этим в настоящее время при определении параметров НДС горного массива основная роль принадлежит натурному эксперименту, как наиболее достоверному. Для эффективного использования расчетных методов необходимо далее развивать и совершенствовать методики расчета НДС массива горных пород с учетом структурных особенностей реального горного массива и технологических параметров отработки выемочных столбов.

1.5. Постановка задачи исследования

Анализ предпосылок исследования показал, что в отечественной и зарубежной литературе накоплен достаточно большой объем материалов теоретических и экспериментальных исследований влияния геомеханических процессов, происходящих в массиве горных пород при разработке угольных месторождений, на технологические параметры отработки выемочных столбов. В своем большинстве существующие гипотезы горного давления качественно раскрывают суть физических процессов, происходящих в массиве горных пород, а вот методы расчета параметров зон опорного давления вокруг лавы, в

силу принятых упрощений и допущений, большой области влияния очистных работ, а также сложности применяемого математического аппарата не всегда дают объективные количественные характеристики, которые соответствуют действительности. Обзор современных подходов к моделированию геомеханических процессов, протекающих в массиве горных пород, позволил выделить основные принципиальные недостатки, которые в той или иной мере снижают практическую ценность полученных результатов и сужают область эффективного применения того или иного подхода (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Области эффективного применения основных геомеханических моделей

Учитываемые факторы	Борисов А.А.	Савостьянов А.В.	Куклин В.Ю.	Черватюк В.Г.	Хозяйкина Н.В.	Назимко И.В.	Предлагаемая модель
Вся толща горных пород, вмещающая угольный пласт	-	-	-	-	-	-	+
Слоистость горного массива	+	+	+	-	-	-	+
Анизотропия деформационных и прочностных свойств горных пород	-	-	+	-	-	-	+
Силовые параметры крепи подготовительной и очистной выработок	-	+	-	+	-	-	+
Пространственность происходящих в массиве процессов	-	-	-	+	-	-	+
Периодичность проявления горного давления в очистном забое	+	+	-	-	+	+	+

Исходя из данных табл. 1.2, среди основных принципиальных недостатков можно выделить:

1. Моделирование производится для плоской постановки задачи. Реальные процессы протекают в горном массиве, который имеет три измерения, а значит, горные породы находятся не в плоско-напряженном, а в плоскодеформированном состоянии.
2. Горный массив моделируют сплошной средой. Реальный горный массив представляет собой совокупность литологических разностей, которые находятся в постоянном взаимодействии между собой.
3. Отсутствие учета влияния крепи на распределение НДС вокруг выработок. Реальная крепь обладает определенными силовыми характеристиками и оказывает влияние на распределение зон повышенного и пониженного горного давления.
4. Моделирование производится для ограниченной части горного массива, который непосредственно примыкает к моделируемому объекту (горной выработке). В реальных условиях в формировании НДС участвует вся надугольная толща горных пород, которая вмещает отрабатываемый пласт.
5. Практически отсутствуют подходы к пространственному моделированию, которые обеспечивают выявление периодичности проявления горного давления в очистном забое. В натуральных условиях изменение параметров НДС носит периодичный характер и существенно влияет на процесс добычи полезного ископаемого.

Подавляющее большинство существующих методик определения технологических параметров отработки выемочных столбов оказываются неэффективными, а зачастую, и неприемлемыми в условиях внедрения в производство современных технологий и высокопроизводительной техники, которое к тому же происходит в постоянно усложняющихся горно-геологических условиях. Сложившаяся ситуация обуславливает необходимость разработки более совершенных

методик, направленных на обоснование рациональных технологических параметров отработки выемочных столбов, которые, в свою очередь, должны базироваться на построении строгих расчетных схем и фундаментальных знаниях о геомеханических процессах, протекающих в массиве горных пород [102].

Исходя из этого, целью работы является обоснование технологических параметров отработки выемочных столбов на основе результатов моделирования пошагового перемещения очистного забоя в пространственной геомеханической модели выемочного участка, с учетом влияния всей толщи слоистого трансверсально-изотропного массива горных пород, силовых характеристик крепи очистной и подготовительной выработок.

Осуществление поставленной цели было достигнуто путем комплексного решения следующих основных задач:

- выполнен анализ современных представлений и степени изученности влияния геомеханических процессов в горном массиве на параметры технологии очистных работ;
- обоснованы параметры пространственной компьютерной модели геомеханических процессов, происходящих в массиве горных пород вокруг очистных выработок;
- разработана методика моделирования пошагового перемещения очистного забоя в пространственной геомеханической модели выемочного участка с учетом влияния всей толщи слоистого трансверсально-изотропного массива горных пород, силовых характеристик крепи очистной и подготовительной выработок;
- установлены закономерности формирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород вокруг очистных выработок;
- обоснованы методики определения технологических параметров отработки выемочного столба с учетом геомеханических процессов протекающих в горном массиве.

1.6. Структурно-логическая схема выполненных исследований

Структурно-логическая схема исследований состояла из следующих основных блоков:

- проведение теоретических и экспериментальных исследований;
- определение путем сопоставления достоверности и сходимости результатов компьютерного моделирования с данными, полученными при проведении натурных экспериментов;
- обоснование технологических параметров отработки выемочного столба на основе полученных зависимостей распределения напряженно-деформированного состояния массива горных пород вокруг очистной выработки.

Развернутая структурно-логическая схема выполнения исследований представлена на рис. 1.30.

Теоретические исследования на первом этапе включали в себя анализ влияния закономерностей распределения напряженно-деформированного состояния массива горных пород на технологические параметры очистных работ. Для выбора правильного направления исследовательской работы был выполнен критический анализ основных гипотез горного давления, которые используются при решении практических задач механики горных пород на современном уровне развития горной науки. Это позволило обобщить известные закономерности проявления горного давления в очистных выработках, определить расчетные схемы и методики расчета НДС массива вокруг длинных очистных забоев.

На втором этапе теоретических исследований произведено обоснование математической модели геомеханических процессов, происходящих в горном массиве вследствие ведения очистных работ. Для получения модели, которая адекватно отображает процесс перераспределения напряжений и перемещений вокруг очистных выработок, было выполнено обоснование методики исследования горного давления; применяемого математического аппарата; программного комплекса, который с достаточной для практических расчетов точностью реализует принятый математический метод.

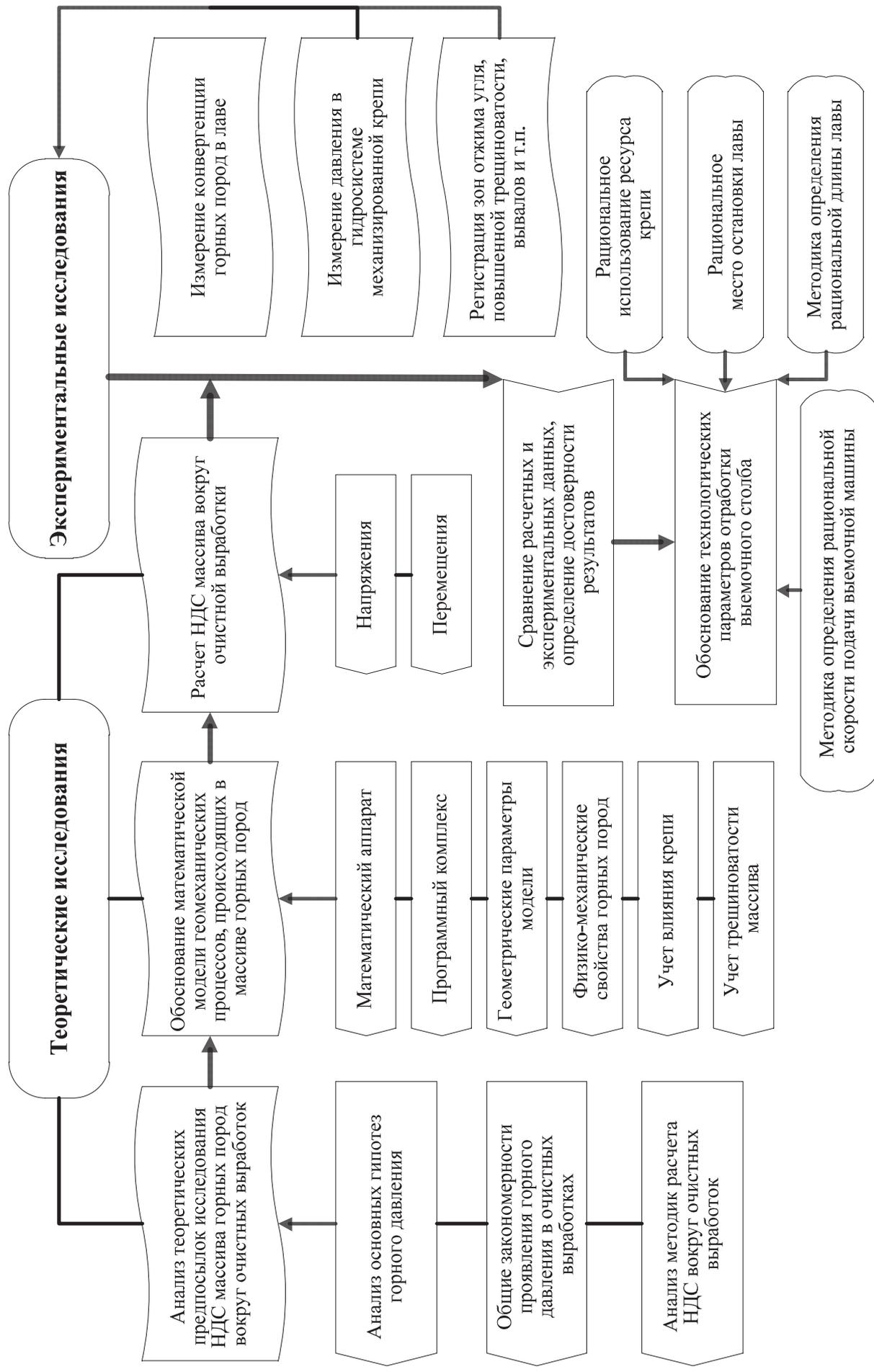


Рис. 1.30. Структурно-логическая схема проведения исследований

Также были обоснованы геометрические параметры используемой модели; физико-механические свойства горных пород, характерных для рассматриваемых горно-геологических условий; произведен учет влияния силовых характеристик крепи подготовительных и очистных выработок и структурных особенностей моделируемого массива горных пород.

На заключительном этапе теоретических исследований был выполнен расчет действующих напряжений и перемещений горных пород вокруг очистной выработки в зависимости от положения линии очистного забоя по длине выемочного столба.

Целью экспериментальных исследований, прежде всего, являлось установление как прямыми, так и косвенными измерениями закономерностей, которые определяются в ходе выполнения теоретической части работы. Для получения достоверных результатов натуральных экспериментов использовались общепринятые методики проведения исследований закономерностей распределения напряженно-деформированного состояния массива горных пород вокруг очистных выработок.

После обработки результатов теоретической и экспериментальной части было произведено определение сходимости и достоверности полученных данных, что позволило установить диапазон вариации значений, определяемых в ходе расчета.

На основе обобщения результатов выполненной работы были обоснованы методики определения рациональной длины лавы и скорости подачи выемочной машины, а также даны рекомендации по выбору рационального места запланированной остановки лавы и рациональному использованию ресурса механизированной крепи в конкретных горно-геологических условиях с учетом всех параметров, которые входят в используемую модель массива горных пород, включающего в себя очистную выработку.

ГЛАВА 2

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВОКРУГ ОЧИСТНЫХ ВЫРАБОТОК

Данная глава посвящена выбору метода исследования, математического аппарата, средств автоматизации процесса вычисления и обоснованию параметров пространственной компьютерной модели выемочного участка.

В п. 2.1 выполнено обоснование метода исследования горного давления и рассмотрены известные подходы к исследованию напряженно-деформированного состояния массива горных пород вокруг очистных выработок.

В п. 2.2 выполнен выбор и обоснована целесообразность применения математического метода, который в большей степени подходит для решения поставленных в работе задач.

В п. 2.3 рассмотрены вопросы, касающиеся возможности реализации выбранного математического метода в программных продуктах, которые позволяют автоматизировать процесс вычисления, также уделено внимание практическому применению и подтверждению достоверности полученных результатов.

В п. 2.4 выполнено обоснование геометрических параметров, необходимых для построения компьютерной модели выемочного участка (п. 2.4.1); приведены физико-механические характеристики горных пород с учетом анизотропии прочностных и деформационных свойств (п. 2.4.2); указаны способы учета влияния силовых параметров крепи очистных и подготовительных выработок (п. 2.4.3), а также рассмотрена возможность учета трещиноватости горных пород посредством использования коэффициента структурного ослабления массива (п. 2.4.4).

В п. 2.5 изложена методика, в соответствии с которой были проведены в шахтных условиях эксперименты по установлению закономерностей распределения напряженно-деформированного состояния массива горных пород вокруг очистной выработки.

2.1. Обоснование метода исследования горного давления

Для исследования НДС массива горных пород успешно применяются методы шахтных, лабораторных и теоретических исследований. Метод шахтных исследований горного давления является основным. Однако трудности, связанные с регистрацией и наблюдением за проявлениями и изменениями НДС в породном массиве, несопоставимость данных исследований в различных горно-геологических условиях и другие причины заставляют прибегать к теоретическим и лабораторным методам исследования. В этом случае шахтный эксперимент служит критерием достоверности полученных результатов.

Огромное преимущество лабораторных исследований состоит в том, что в процессе эксперимента можно менять условия, придавать по желанию решающее значение тем или иным факторам для установления взаимосвязи явлений. Из лабораторных методов наиболее научно обоснованным и эффективным является метод физического моделирования геомеханических процессов.

К физическому моделированию относятся следующие методы: 1) геометрическое моделирование; 2) центробежное моделирование; 3) компенсирующей нагрузки; 4) моделирование на эквивалентных материалах; 5) оптическое исследование напряжений; 6) комбинированные [15].

Сущность и область эффективного применения каждого из методов физического моделирования массива горных пород и процессов, происходящих в нем при выемке полезного ископаемого, подробно изложены в работах [48, 80, 142 – 144] и др.

На современном этапе развития горной науки и компьютерных технологий наибольший интерес представляют теоретические исследования с применением математических моделей геомеханических процессов, протекающих в массиве горных пород [73].

В отличие от физического моделирования, при котором на уменьшенной модели, но в эквивалентной реальному объекту среде изучают сам процесс, при математическом моделировании исследуют дифференциальное уравнение, описывающее тот или иной процесс.

Для решения таких дифференциальных уравнений используются как аналитические, так и различные приближенные методы. Наибольшее распространение получили метод конечных элементов (МКЭ), метод конечных разностей, метод прямых, интегральный метод, вариационный метод (метод Монте-Карло), метод дискретных элементов (МДЭ) и др. Уравнения с помощью таких приближенных методов приводят к виду, при котором они могут быть решены на быстродействующих ЭВМ. При этом отсутствуют сложные физические модели, на изготовление которых уходит много средств и времени. Кроме того, сам процесс моделирования и изучения того или иного явления значительно ускоряется.

В современных постоянно усложняющихся технико-экономических и горно-геологических условиях функционирования горнодобывающих предприятий предъявляются все более жесткие требования к точности выполняемых расчетов параметров НДС массива и степени адекватности рассматриваемой модели реальному физическому процессу, протекающему в массиве горных пород. Физическое моделирование не в состоянии соответствовать высокому уровню предъявляемых требований ввиду ряда принципиальных недостатков. К основным недостаткам физического моделирования относятся трудности, связанные с получением количественных характеристик моделируемого процесса, переносом полученных результатов в натурные условия и сложность изучения параметров НДС массива на объемных моделях. Замена пространственной задачи плоской имеет ряд серьезных возражений, которые сформулировал и обобщил А.А. Борисов [13]:

1. В шахтных условиях имеют место различные случаи взаимодействия пачек слоев; если допустить некоторую аналогию в работе пачки слоев с работой пачки плит, то выполнение условия замены модуля продольной упругости (E) на приведенный модуль упругости (E_{np}) недостаточно, чтобы распространить эту аналогию на работу пачки балок.

2. Аналогия изгиба пластины с изгибом балки-полоски допустима лишь в пределах упругих деформаций. Кровля же, сложенная твердыми слоистыми породами, испытывает также деформации ползучести и даже разрушения, обладает анизотропией, ослаблена разного рода трещинами и включениями.
3. Производственные процессы (выемка, крепление призабойного пространства и посадка кровли) развиваются в двух направлениях: по простиранию и вдоль очистного забоя. На плоской модели производится имитация этих процессов лишь в одном направлении.
4. Плоская модель не дает представления о процессах деформаций и разрушений кровли вблизи штреков или околострековых целиков.
5. Проведенные А.А. Борисовым [15] исследования показывают, что на плоской модели неполно воспроизводится характер разрыхления пород непосредственной кровли при ее обрушении.
6. На плоской модели не воспроизводятся изгибающие моменты, действующие параллельно забою.

Математическое моделирование, в свою очередь, свободно от вышеперечисленных недостатков и может применяться для решения объемных задач механики горных пород, обеспечивая высокую точность и достоверность получаемых результатов. Однако следует отметить, что точность и достоверность рассчитываемых параметров зависят в первую очередь от соответствия применяемого математического аппарата решаемой задаче.

2.2. Обоснование применения математического аппарата

В настоящее время существует множество методов, способов и подходов к решению дифференциальных уравнений, которые отличаются точностью получаемых результатов, трудоемкостью выполняемых операций и областью эффективного применения. Учитывая особенности дифференциальных уравнений, описывающих напря-

женно-деформированное состояние горных пород вокруг очистной выработки, к методу их решения были предъявлены следующие требования:

1. Возможность полной автоматизации процесса расчета напряжений и деформаций в массиве горных пород. Это связано тем, что при рассмотрении очистной выработки необходимо выполнять математические операции с большими объемами числовых данных.
2. Точность расчета достаточная для решения практических задач механики горных пород.
3. Возможность решения объемных задач.
4. Возможность нахождения решений для горных выработок и выработочного пространства, имеющих сложную геометрическую форму, как в плане, так и в разрезе.
5. Наличие ясной физической трактовки происходящих процессов.

На современном этапе развития численных методов решения дифференциальных уравнений метод конечных элементов (МКЭ) наиболее полно соответствует требованиям, предъявленным выше.

Основная идея метода конечных элементов состоит в том, что любую непрерывную величину, такую, как деформация, давление и перемещение, можно аппроксимировать дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей. Кусочно-непрерывные функции определяются с помощью значений непрерывной величины в конечном числе точек рассматриваемой области. В общем случае непрерывная величина заранее неизвестна и нужно определить значения этой величины в некоторых внутренних точках области. Однако дискретную модель очень легко построить, если сначала предположить, что числовые значения этой величины в каждой внутренней точке области известны. После этого можно перейти к общему случаю.

Итак, при построении дискретной модели непрерывной величины поступают следующим образом:

1. В рассматриваемой области фиксируется конечное число точек. Эти точки называются узловыми или просто узлами.
2. Значение непрерывной величины в каждой узловой точке считается переменной, которая должна быть определена.
3. Область определения непрерывной величины разбивается на конечное число подобластей, называемых элементами. Эти элементы имеют общие узловые точки и в совокупности аппроксимируют форму области.
4. Непрерывная величина аппроксимируется на каждом элементе полиномом, который определяется с помощью узловых значений этой величины. Для каждого элемента определяется свой полином, но полиномы подбираются таким образом, чтобы сохранялась непрерывность величины вдоль границ элемента.

Преимущества и недостатки

В настоящее время область применения метода конечных элементов очень обширна и охватывает все физические задачи, которые могут быть описаны дифференциальными уравнениями. Наиболее важными преимуществами метода конечных элементов, благодаря которым он широко используется, являются следующие:

1. Свойства материалов смежных элементов не должны быть обязательно одинаковыми, что позволяет применять метод к телам, составленным из нескольких материалов.
2. Криволинейная область может быть аппроксимирована с помощью прямолинейных элементов или описана точно с помощью криволинейных элементов. Таким образом, методом можно пользоваться не только для областей с правильной формой границы.
3. Размеры элементов могут быть переменными. Это позволяет укрупнить или измельчить сеть разбиения области на элементы, если в этом есть необходимость.
4. С помощью метода конечных элементов не представляет труда рассмотрение граничных условий с разрывной поверхностной нагрузкой, а также смешанных граничных условий.

5. Возможность сведения задачи к системе линейных или нелинейных алгебраических уравнений непосредственно, без предварительной формулировки их дифференциальных аналогов.
6. Основные процедуры МКЭ стандартны и не зависят от размерности и типа используемых конечных элементов, что позволяет осуществить унификацию этих процедур и создавать программные комплексы по расчету конструкций широкого класса и назначения.

Главный недостаток метода конечных элементов заключается в необходимости составления вычислительных программ и применения вычислительной техники. Вычисления, которые требуется проводить при использовании метода конечных элементов, слишком громоздки для ручного счета даже в случае решения очень простых задач. Для решения сложных задач необходимо использовать быстродействующие ЭВМ, обладающие большой памятью [73].

Благодаря появлению современной высокопроизводительной вычислительной техники с большим объемом памяти, стало возможным применение метода конечных элементов для решения пространственных задач с достаточно сложными входными параметрами. Этот численный метод занял ведущее место, вытеснив постепенно все остальные методы приближенного вычисления. Преимущества МКЭ как расчетного метода очевидны.

Метод конечных элементов в сочетании с мощными ЭВМ допускает использование моделей материалов практически любой степени сложности [122]. Благодаря МКЭ появилась реальная возможность перейти к расчету конструкций при сложном напряженном состоянии. Метод конечных элементов выступает не только как численный метод анализа, но и служит инструментом моделирования.

Численный метод математического моделирования на основе разбиения исследуемой области на конечные элементы нашел широкое применение в практике инженерных расчетов и был комплексно реализован в целом ряде программных пакетов, направленных на решение той или иной прикладной задачи механики твердого тела.

Суть метода конечных элементов можно кратко изложить на примере распространенных задач механики. Рассмотрим, например, произвольную конструкцию, находящуюся под воздействием приложенных к ней сил. Конструкция, представляющая собой распределенную систему сложной геометрической формы, изображается в виде совокупности конечного количества относительно простых объектов правильной геометрической формы (конечных элементов, КЭ). В качестве таких элементов могут выступать стержни, элементы пластин, многогранники. Конечные элементы, аппроксимирующие исходную конструкцию, считаются связанными между собой в граничных точках – узлах, в каждом из которых вводится несколько степеней свободы, количество которых зависит от геометрической формы элемента и типа решаемой физической задачи. Например, для аппроксимации конструкций стержневыми элементами обычно вводится шесть степеней свободы в узле, а при моделировании объемными элементами – по три поступательных перемещения. Действующие на конструкцию внешние нагрузки приводятся к эквивалентным силам (моментам), прикладываемым в узлах конечных элементов. Ограничения на перемещение конструкции (закрепления) также переносятся на конечные элементы, которыми моделируется исходный объект. Поскольку каждый КЭ имеет заранее определенную форму, а также известны его геометрические характеристики и характеристики материала, для каждого КЭ, которыми моделируется конструкция, можно записать систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), определяющих смещение узлов КЭ под действием приложенных в эти узлы сил. Так, для задачи статического анализа конструкций такая система уравнений в матричной форме записывается следующим образом:

$$K_{кэ} \times X_{кэ} = P_{кэ}, \quad (2.1)$$

где $K_{кэ}$ – матрица жесткости конечного элемента, порядок которой равен количеству степеней свободы в узле КЭ;

$P_{кэ}$ – вектор сил, приложенных к узлам конечного элемента;
 $X_{кэ}$ – вектор неизвестных узловых перемещений конечного элемента.

Записывая систему (2.1) для каждого конечного элемента, аппроксимирующего исходную физическую систему, рассматриваем их совместно и получаем аналогичную систему уравнений для полной конструкции

$$K_2 \times X_2 = P_2, \quad (2.2)$$

где K_2 – глобальная матрица жесткости конструкции, порядок которой равен произведению количества подвижных узлов конструкции на число степеней свободы в одном узле;

P_2 – глобальный вектор сил, приложенных к узлам конечно-элементной дискретизации;

X_2 – глобальный вектор неизвестных узловых перемещений конструкции, подлежащий определению.

Формируя и решая систему уравнений (2.2), получаем значения перемещений в узлах конечно-элементной сетки, а также дополнительные физические величины, например, напряжения. Эти значения будут приближенными (с позиции теоретически возможного "точного" решения соответствующего дифференциального уравнения математической физики), но погрешность решения может быть очень небольшой – доли процента на тестовых задачах, имеющих "точное" аналитическое решение. Погрешность получаемого в результате конечно-элементной аппроксимации решения обычно плавно уменьшается по мере увеличения степени дискретизации моделируемой системы. Другими словами, чем большее количество КЭ участвует в дискретизации (или чем меньше относительные размеры КЭ), тем точнее получаемое решение. Естественно, что более плотное разбиение на КЭ требует еще более значительных вычислительных затрат. Подробнее сам метод и методики построения матриц жесткости изложены в [27, 34, 46, 81, 101 и др.].

2.3. Обоснование применения программного комплекса на базе метода конечных элементов

В настоящее время существует множество программных комплексов, которые, используя метод конечных элементов, способны решать целый ряд инженерных и научно-практических задач. Однако каждая из них имеет свои определенные особенности и подходы к решению. Этим в основном и обусловлено такое многообразие программных продуктов и приложений.

Исходя из того, что объектом исследования является слоистый массив анизотропных горных пород, а решение поставленных задач предполагает рассмотрение объемных математических моделей, были сформулированы основные требования, предъявляемые к программному комплексу.

Программный продукт должен позволять:

- моделировать слоистый массив горных пород;
- моделировать различные физико-механические свойства горных пород и материалов в различных направлениях, т.е. возможность учета анизотропии горного массива;
- решать задачи в пространственной постановке;
- учитывать крепление горных выработок;
- учитывать характер взаимодействия слоев пород на контакте раздела.
- моделировать основные системы трещин.

По мнению авторов, наиболее полно предъявляемым требованиям соответствует программный комплекс SolidWorks с приложением COSMOS/Works.

SolidWorks – продукт компании SolidWorks Corporation (США). Программа SolidWorks – это система автоматизированного проектирования (САПР), позволяющая создавать модели и подробные чертежи.

При этом SolidWorks имеет кроме вышеуказанных еще и дополнительные возможности и преимущества:

- возможность построения 3D-модели, снабженной разнообразной технологической информацией, в результате чего модель в дальнейшем используется как основной источник информации;
- система снабжена каталогами стандартных компонентов (метизов, профилей, материалов и т.д.), позволяющих сократить время создания модели;
- чертежи генерируются на основе 3D-модели в полуавтоматическом режиме;
- система позволяет максимально детализировать модель – чем больше технических характеристик можно заложить в 3D-модель, тем более реальным будет конечный результат;
- система позволяет выявить ошибки на ранней стадии моделирования объекта, что позволяет сэкономить общее время, затраченное на проектирование;
- технология SolidWorks позволяет создавать 2D-виды непосредственно из 3D-модели. Причем дальнейшее изменение модели автоматически изменит 2D-виды, что также позволяет избежать ошибок.

Интегрированное с SolidWorks приложение Simulation также имеет ряд очень важных для решения поставленных задач преимуществ.

Simulation – это конечно-элементный комплекс, который создан компанией Dassault Systemes специально для совместного использования с системой твердотельного параметрического моделирования SolidWorks. Комплекс представляет собой открытую систему модулей, предназначенных для решения задач прочности, устойчивости, динамики конструкций, а также задач оптимизации, гидродинамики и электромагнитного излучения.

В приложении Simulation используются AccuStress – современная технология построения конечно-элементных сеток с учетом характерных особенностей геометрии изделия. Специальные алгоритмы распознают области с сильным изменением геометрических параметров изделия (маленькие отверстия, закругленные кромки и т.п.) и генерируют сетку конечных элементов меньших размеров, соответ-

ствующих геометрии выделенных "критических" областей. Сетка может быть построена автоматически или в режиме пользовательского контроля. Программа генерирует порядка 100000 элементов в минуту. Конечно-элементная сетка строится в виде 8-узловых тетраэдров двумя способами: с использованием традиционных алгоритмов и по схеме Делано-Воронова. Второй алгоритм, как правило, работает быстрее. Тонкостенные элементы конструкции можно моделировать оболочечными конечными элементами. Предусмотрена функция конвертации объемных элементов выделенной тонкостенной части изделия в оболочечные элементы.

Simulation может рассчитывать сборки. Это качество программы является принципиально важным. Составные части сборки могут быть выполнены из разных материалов. Для каждого отдельного объекта конечно-элементная сетка генерируется изолированно, а соединения моделируются контактными элементами, учитывающими характер взаимодействия между составными частями. Специальное меню позволяет пользователю определить характер соединения деталей – без трения, с трением, жесткое и др.

В программе используются новые разработки решателей: Direct Sparse Solver и New FFE (Fast Finite Element) Solver. Первый решатель работает примерно в 15 раз быстрее, чем решатели альтернативных программ и требует в 3 раза меньше оперативной памяти компьютера. Он построен на новой технологии обработки и хранения разреженных матриц. Второй решатель является новой редакцией итерационного решателя. Выбор между ними определяется пользователем по результатам эффективности вычислений.

Программа Simulation полностью интегрирована в SolidWorks и доступна для использования в области прочностного анализа.

Графические возможности визуализации результатов расчетов вполне достаточны для подготовки отчетных материалов. Современная технология Open GL поддерживает все графические представления результатов: разрезы, изоповерхности, точечные и векторные изображения и т.д. Пользователь может получить все данные о напряженно-деформированном состоянии в любой точке конструк-

ции, указав на эту точку мышкой. Не выходя из области визуализации, можно вывести интересные силы реакции. Результаты можно увидеть в движении, используя функции анимации результатов. Программа генерирует отчет в текстовом и HTML-формате с внедренными VRML-моделями и AVI-файлами. Конечно-элементные модели экспортируются в форматах PATRAN и IDEAS.

Граничные условия и нагрузки выбираются из списков, определяющих практически все интересные для конструктора варианты. Закрепление или нагрузка могут быть связаны с вершинами, гранями и поверхностями модели. Геометрические объекты можно жестко фиксировать, закреплять шарнирно, определять для них предписанные перемещения и т.д. Нагрузка может быть задана не только как фиксированная величина, но и в виде величины переменной, как полиномиальная функция координат в некоторой окрестности поверхности изделия. Нагрузка может быть также задана в виде центробежных сил: в специальном окне пользователь задает угловое ускорение и скорость вращения изделия относительно выбранной оси [7].

Проверка точности и достоверности получаемых результатов показала, что максимальная ошибка вычислений составляет 7,6 %, в среднем же отклонения от аналитических решений редко превышают 2 %. Более полно и подробно результаты тестирования программ на работоспособность и точность получаемых решений представлены в периодических изданиях [1 – 3].

Программный комплекс SolidWorks в связке с приложением Simulation обладает огромными возможностями и рядом неоспоримых преимуществ, однако программный продукт – это только инструмент для решения поставленных задач. Несомненно, чем качественнее и лучше используемый набор инструментов, тем точнее и достовернее полученный результат, тем не менее, не стоит забывать, что адекватность математической модели в большей степени зависит от соответствия исходных параметров реальным характеристикам исследуемого объекта, т.е. массива горных пород.

2.4. Обоснование параметров модели

2.4.1. Геометрические параметры

Геометрические параметры модели зависят, прежде всего, от размеров зоны влияния очистных работ на массив горных пород. Для правильного определения этих параметров необходимо использовать данные многолетних маркшейдерских наблюдений и рекомендации нормативно-правовых документов, регламентирующие порядок определения этой зоны. В настоящее время в Украине юридическую силу имеют "Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях" [85], согласно которым границы влияния очистной выработки на земную поверхность (мульды сдвижения) определяются граничными углами. Граничные углы – это внешние относительно выработанного пространства углы, образованные на вертикальных разрезах по главным сечениям мульды горизонтальной линией и линиями, соединяющими границы выработанного пространства с граничными точками сдвижения на земной поверхности, в качестве которых принимаются точки со значениями оседаний 10 – 15 мм, наклонов или деформаций $5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$. Различают граничные углы по простиранию δ_0 , падению β_0 и восстанию γ_0 пласта. Значения граничных углов для Донецкого угольного бассейна равны $\delta_0 = \gamma_0 = 75^\circ$, $\beta_0 = 75 - 0,8\alpha$, но не менее 25° (α – угол падения пласта), для Западного Донбасса $\delta_0 = \gamma_0 = \beta_0 = 65^\circ$ [85, 141].

Руководствуясь [85], можно определить геометрические размеры модели в плане. Вертикальные размеры модели принимаются из условия моделирования всей толщи горных пород, которые непосредственно участвуют в формировании НДС массива вокруг очистной выработки, т.е. всех литологических разностей от пласта до земной поверхности и не менее 50-кратной мощности вынимаемого слоя вглубь подстилающего угольный пласт массива. Согласно [19, 85], зона влияния очистной выработки на породы почвы пласта распространяется не более чем на 50 вынимаемых мощностей.

На рис. 2.1 и 2.2 изображены расчетные схемы для определения геометрических размеров модели для случая отработки выемочного столба по простиранию. При отработке столба по падению расчетная схема принципиально не изменится, только следует сделать замену в (2.3) $Z_M \rightarrow L_M$ и $Z_L \rightarrow L_L$, в (2.4) – $L_M \rightarrow Z_M$ и $L_L \rightarrow Z_L$.

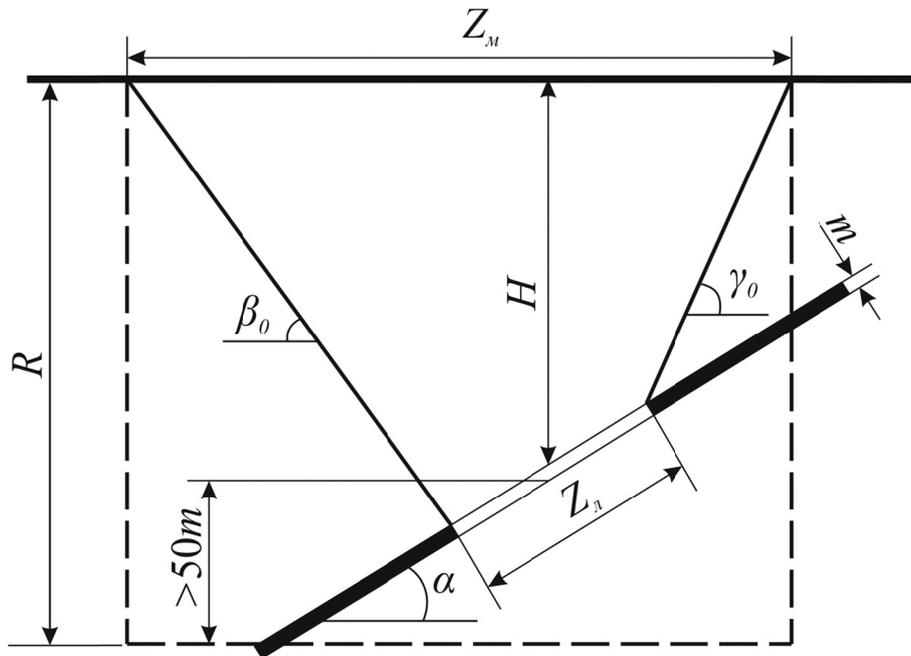


Рис. 2.1. Расчетная схема для определения геометрических параметров модели по падению пласта

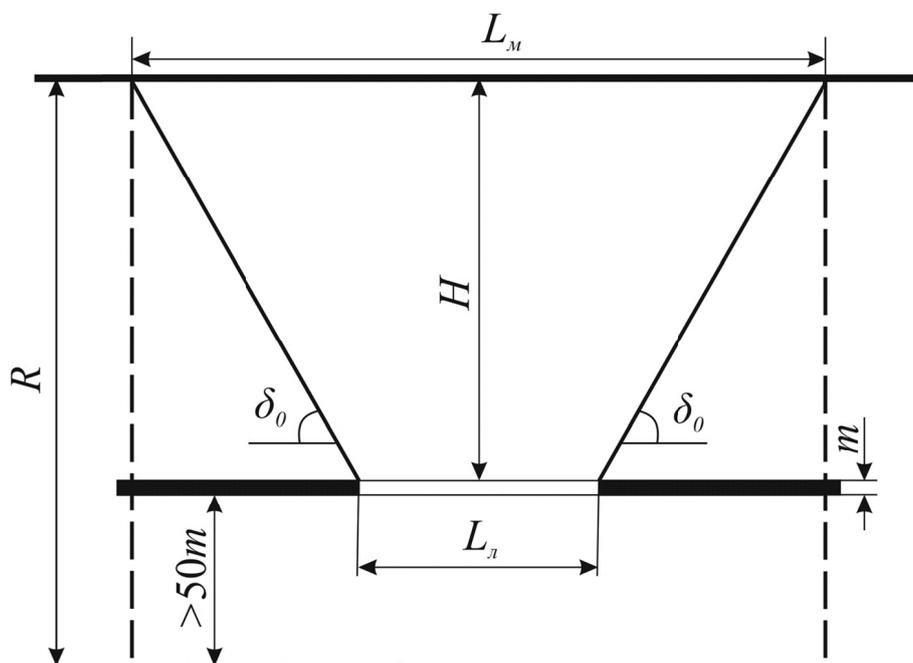


Рис. 2.2. Расчетная схема для определения геометрических параметров модели по простиранию пласта

Исходя из расчетной схемы (рис. 2.1), была получена формула для определения горизонтального размера модели по направлению вкрест подвигания очистного забоя:

$$Z_M \geq Z_L \left[\cos \alpha + \frac{\sin \alpha \sin(2\alpha + \gamma_0 - \beta_0)}{2 \sin(\beta_0 - \alpha) \sin(\gamma_0 + \alpha)} \right] + H \frac{\sin(\gamma_0 + \beta_0)}{\sin(\beta_0 - \alpha) \sin(\gamma_0 + \alpha)}, \quad (2.3)$$

где Z_M – горизонтальный размер модели по направлению вкрест подвигания очистного забоя, м;

Z_L – длина лавы, м;

γ_0, β_0 – граничные углы сдвижения по падению пласта, град;

α – угол падения пласта, град;

H – расстояние от середины лавы до земной поверхности, м.

Исходя из расчетной схемы, представленной на рис. 2.2, была получена формула для определения горизонтального размера модели по направлению подвигания очистного забоя:

$$L_M \geq L_L + 2H \operatorname{ctg} \delta_0, \quad (2.4)$$

где L_M – горизонтальный размер модели по направлению подвигания очистного забоя, м;

L_L – максимальное моделируемое подвигание очистного забоя, м;

δ_0 – граничный угол сдвижения по простиранию пласта, град;

H – расстояние от середины лавы до земной поверхности, м.

Вертикальные размеры модели массива горных пород должны удовлетворять выражению

$$R \geq H + 50m, \quad (2.5)$$

где m – вынимаемая мощность пласта, м.

Для условий Западного Донбасса с учетом того, что $\delta_0 = \gamma_0 = \beta_0 = 65^\circ$, принимая $\alpha \approx 0^\circ$, формулы 2.3 и 2.4 могут быть представлены в виде:

$$Z_m \geq Z_l + 0,93H \approx Z_l + H, \quad (2.6)$$

$$L_m \geq L_l + 0,93H \approx L_l + H. \quad (2.7)$$

Диапазон глубин пластов, принятых к разработке в ОАО "Павлоградуголь", колеблется в пределах 230 – 700 м, длина механизированных лав изменяется от 180 до 350 м.

2.4.2. Физико-механические характеристики горных пород, вмещающих угольный пласт

Горные породы имеют различные физико-механические свойства, зависящие от их вещественного и гранулометрического состава, условий залегания и происходивших во время их формирования геологических процессов.

При анализе и расчетах механических процессов, происходящих в массивах пород при ведении горных работ, из широкого ряда физических свойств пород требуется знание плотностных и механических свойств. В общем случае физико-механические характеристики по различным направлениям в массиве пород различны, т.е. горные породы проявляют анизотропию свойств, и в связи с этим изменяется характер распределения напряжений вокруг выработок. Даже если основные механические характеристики образцов пород, слагающих массивы различных типов, близки между собой, свойства таких массивов и поведение пород вокруг выработок могут существенно различаться. Слоистость, напластование, перемежаемость пород с различными механическими свойствами может обуславливать механическую анизотропию массива, несмотря на то, что каждая из пород, слагающих толщу, является по данным испытаний образцов механически изотропной. Эта анизотропия связана с существенным различием механических свойств на контактах между слоями и пластами слагающих толщу пород [118].

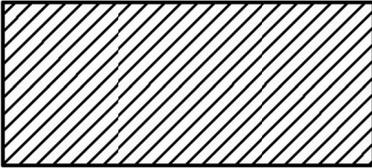
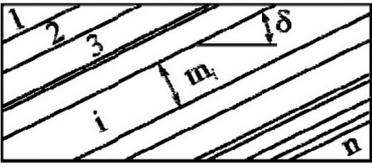
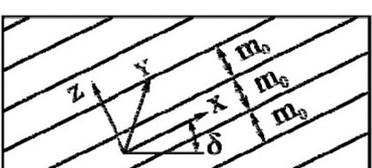
Согласно [9], по характеру неоднородности и анизотропии массивы горных пород можно отнести к различным категориям (табл. 2.1).

Характеристики массива горных пород

Массив горных пород	Однородный	Неоднородный	
		статически неоднородный	с упорядоченной неоднородностью
Изотропный	Свойства пород не зависят от направления координат точки опробования	Свойства пород не зависят от направления, но являются случайными функциями координат точки опробования	Свойства пород не зависят от направления, но являются некоторыми детерминированными функциями координат точки опробования
Анизотропный	Свойства пород зависят от направления, но не зависят от координат точки опробования	Свойства пород зависят от направления и являются случайными функциями координат точки опробования	Свойства пород зависят от направления и являются некоторыми детерминированными функциями координат точки опробования

В настоящее время разработана теория упругости анизотропной среды, позволяющая вычислять напряжения вокруг отверстий различной конфигурации. Известен ряд работ о распределении напряжений вокруг отверстий круговой, эллиптической, прямоугольной и других форм при различных случаях анизотропии [55, 66, 96]. Однако лишь отдельные теоретические решения доведены непосредственно до числа с учетом реальных свойств деформирующейся среды, в частности для горных пород [65 – 66]. Основные рассматриваемые модели массива горных пород представлены в табл. 2.2.

Основные модели массива горных пород

Название модели	Принципиальная схема	Независимые упругие константы
Изотропный массив		E, μ
Слоистый массив, состоящий из отдельных упругих изотропных пластов		$E_1, \mu_1, E_2, \mu_2, \dots$ E_i, μ_i
Трансверсально-изотропный массив		$E_z, \mu_{zx},$ $\mu_{xy} = \mu_{yx},$ $E_x = E_y,$ $G_{xz} = G_{yz}$

Важное практическое значение имеет частный случай анизотропии, когда массив горных пород может быть представлен упругой средой, в каждой точке которой имеется одно главное направление и бесконечное множество главных направлений в плоскости, нормальной к первому. Подобный тип анизотропии называют трансверсально-изотропным. Он характерен для тонкослоистых осадочных, метаморфических пород, слюд, пегматитовых тел и др. При этом деформирование может быть охарактеризовано с помощью пяти независимых констант, определяющих связь между напряжениями и деформациями [118].

Учитывая то, что для большинства горных пород наблюдается практически линейная зависимость между приращениями деформаций и приращениями напряжений, уравнения обобщенного закона Гука для упругого трансверсально-изотропного массива можно записать в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_x = \frac{1}{E_1} (\sigma_x - \mu_1 \sigma_y - \mu_1 \sigma_z); \gamma_{yz} = \frac{1}{G_2} \tau_{yz}; \\ \varepsilon_y = \frac{1}{E_1} (\sigma_y - \mu_1 \sigma_x - \mu_1 \sigma_z); \gamma_{zx} = \frac{1}{G_2} \tau_{zx}; \\ \varepsilon_z = \frac{1}{E_1} \left(\frac{E_1}{E_2} \sigma_z - \mu_1 \sigma_y - \mu_1 \sigma_x \right); \gamma_{xy} = \frac{1}{G_1} \tau_{xy}. \end{array} \right.$$

Здесь E_1 и E_2 – модули упругости в плоскости слоев и в направлении, нормальном к ним. Коэффициент поперечных деформаций μ_1 характеризует отношение продольных и поперечных деформаций в плоскости слоев, а μ_2 – отношение соответствующих деформаций в плоскости, нормальной к напластованию. Модули сдвига G_1 и G_2 являются коэффициентами пропорциональности между касательными напряжениями τ и сдвиговыми деформациями γ соответственно в плоскостях слоев и в плоскости, нормальной к ним. При этом модуль G_1 может быть выражен через E_1 и μ_1 с помощью известного соотношения:

$$G_1 = \frac{E_1}{2(1+\mu_1)}. \quad (2.8)$$

Модуль G_2 для анизотропного тела с достаточной для практических расчетов точностью может быть определен через другие постоянные [12, 118]

$$G_2 = \frac{E_1 E_2}{(E_1 + E_2 + 2\mu_1 E_2)}. \quad (2.9)$$

Следует заметить, что на связь упругих постоянных в виде (2.9) для некоторых ортотропных тел указывал в 1863 г. Б. Сен-Венан [156], в 1935 г. ее использовал в расчетах по оценке напряженно-деформированного состояния скальных пород под сооружениями К. Вольф [162], в 1954 г. – К.В. Руппенейт для оценки влияния анизотропии пород на концентрацию напряжений на контуре эллиптиче-

ского отверстия [95]. Расчеты по формуле (2.9) показали хорошую сходимость экспериментальных и расчетных значений для G_2 [12].

Количественная оценка анизотропии физико-механических свойств горных пород дана в [115]. Значения упругих констант для некоторых осадочных и метаморфических пород наиболее характерных для угольных месторождений приведены в [6, 51, 94, 126 и др.].

Экспериментальные данные, полученные К.В. Руппенейтом [94] при испытании горных пород, представлены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Значение отношений $\frac{E_1}{E_2}$ для горных пород

Породы	Модули пропорциональности $\frac{E_1}{E_2}$	
	среднее	от – до
Крупнозернистые песчаники	0,96	0,88 – 1,09
Среднезернистые песчаники	1,19	0,94 – 1,57
Мелкозернистые песчаники	1,09	0,90 – 1,48
Алевролиты	1,42	0,29 – 1,97
Сланцы песчанистые	1,48	–

Экспериментальные данные, полученные для Донецкого угольного бассейна А.И. Бероном, Е.С. Ватолиным, М.И. Койфманом и др. [51] при исследовании прочности и деформируемости горных пород, приведены в табл. 2.4.

**Анизотропия прочностных и деформационных
свойств горных пород**

Горная порода	$\frac{\sigma_{сж\perp}}{\sigma_{сж\parallel}}$	$\frac{\sigma_{p\parallel}}{\sigma_{p\perp}}$	$\frac{E_1}{E_2}$
Алевролит	1,38 – 2,0	1,3 – 1,45	1,16 – 1,61
Аргиллит	1,30	1,74	1,30
Песчаник	1,42	1,70	1,28
Сланец глинистый	1,25	1,95	1,32
Сланец песчанистый	1,39	1,56	1,41
Уголь	1,29	1,60	1,22

Значения коэффициента Пуассона μ по нормали и параллельно к слоистости находятся в пределах 0,10 – 0,44, отклонение для различных направлений редко превышает 15 %.

Анализ вышеизложенных физико-механических характеристик горных пород показывает, что относительно направления слоистости изменение значений упругих констант может достигать 50 % и более. Такая разница в свойствах, несомненно, будет влиять на закономерности распределения напряжений в массиве горных пород, что должно быть учтено при построении математической модели геомеханических процессов.

Для условий Западного Донбасса характерно наличие шести видов горных пород, которые в основном и слагают все литологические разности в данном регионе. К ним относятся уголь, алевролит, аргиллит, сланец песчанистый, сланец глинистый и песчаник. Все эти породы обладают различными физико-механическими характеристиками с более или менее выраженной анизотропией прочностных и деформационных свойств.

Согласно [94] и результатам изысканий, изложенным в "Геолого-промышленном очерке Западного Донбасса" [28], степень метаморфизма углей Западного Донбасса изменяется в направлении с се-

веро-запада на юго-восток. В этом же направлении изменяется и степень метаморфизма углевмещающих пород: увеличивается плотность, прочность, водоустойчивость и уменьшается пористость. Прочность аргиллитов увеличивается с 7,7 до 32,4 МПа, алевролитов – с 7,6 до 34,1 МПа, песчаников – с 6,0 до 47,8 МПа.

Для Новомосковского, Западно-Павлоградского и Павлоградско-Петропавловского угленосных районов изменение физико-механических свойств наблюдается не только по площади, но и по всему стратиграфическому разрезу продуктивной толщи.

С увеличением глубины от 100 до 1200 м количественные и качественные изменения физико-механических показателей горных пород подчиняются следующим закономерностям:

- вещественный состав однотипных горных пород практически не изменяется. Об этом свидетельствует характер зависимости между удельным весом горных пород и глубиной залегания;
- колебания величины удельного веса аргиллитов, алевролитов и песчаников не превышают $0,02 \text{ кг/м}^3$ или 0,9 %, что соответствует погрешности, допускаемой при пикнеметрическом методе исследований;
- объемный вес аргиллитов увеличивается на $0,288 \text{ кг/м}^3$ или 11,5 %; алевролитов – на $0,371 \text{ кг/м}^3$ или 15 %, песчаников – на $0,309 \text{ кг/м}^3$ или 12,4 %;
- величина пористости снижается в 1,5 – 3 раза;
- влажность аргиллитов уменьшается в 2 – 3 раза, алевролитов – в 3 – 5 раз, песчаников – в 4 – 5 раз;
- предел прочности на одноосное сжатие возрастает в 1,5 – 2 раза. Повышение прочности пород происходит, главным образом, за счет уменьшения их влажности и пористости. Снижение пористости в 2 раза влечет за собой увеличение прочности аргиллитов в 1,5 раза, алевролитов – в 1,6 раза, песчаников – в 1,3 раза. Аналогичные явления зафиксированы при уменьшении влажности.

Механическая прочность пород с увеличением глубины изменяется в основном за счет уплотнения. Основной первопричиной уплотнения являются возрастающие с глубиной гравитационные си-

лы. Под действием силовых факторов изменяются и деформационные характеристики горных пород.

Анализ экспериментальных данных, полученных в условиях одноосного сжатия образцов пород правильной формы, позволил установить, что с ростом сжимающих нагрузок выделяется три характерных периода деформирования пород. В первом периоде при нагрузках 0 – 25 % от разрушающих кривая продольных деформаций характеризуется небольшой выпуклостью в сторону оси деформаций. В этом случае наблюдается сравнительно равномерное увеличение модуля упругости и коэффициента Пуассона.

При нагрузках 25 – 80 % от разрушающих (второй период) рост деформаций пропорционален росту напряжений. Породный материал проявляет упругие свойства и поэтому модуль упругости при таких нагрузках практически не изменяется.

В третьем периоде при нагрузках, превышающих 80 % от разрушающих, горные породы переходят в упруго-пластическое состояние. Пластические деформации, возникающие в результате микрорастрескивания, растут вплоть до момента разрушения. Модуль упругости в этой области напряжений несколько уменьшается, а коэффициент Пуассона достигает максимального значения [28].

Такую же картину поведения горных пород в процессе нагружения отмечает К.В. Руппенейт [94]. Однако проведенные им исследования показывают, что величина модулей упругости в различных периодах имеет один и тот же порядок, а отклонение этих величин лежит в пределах возможной погрешности наблюдений и не превосходит разброса значений, получаемых при каждом виде испытаний образцов. Поэтому решение задачи распределения НДС для массива, сложенного вышеуказанными горными породами, в упругой постановке не противоречит физике происходящего процесса и обеспечивает достаточную для практических целей точность получаемых результатов.

В общем случае для Новомосковского района показатели модуля упругости колеблются в пределах 1 – 15 ГПа, для Павлоградско-Петропавловского – 3 – 40 ГПа. Значения коэффициента Пуассона μ

изменяются от 0,1 до 0,4. Для большинства литологических разностей величина μ колеблется в пределах 0,27 – 0,35 [28].

Коэффициент анизотропии K_a для пород Западного Донбасса, по данным В.Т. Глушко [29], изменяется в пределах 1 – 2 (табл. 2.5).

Таблица 2.5

Коэффициент анизотропии для пород Западного Донбасса

Значение K_a	Количество проб, % для каждого литологического типа		
	песчаник	алевролит	аргиллит
$K_a < 1,2$	78,40	13,55	6,20
$1 < K_a < 1,5$	7,20	44,50	18,75
$1,5 < K_a < 2,0$	7,20	24,45	17,90
$K_a > 2,0$	7,20	17,65	53,55

Коэффициент K_a связан с модулями упругости выражением [71]

$$K_a = \sqrt{\frac{E_1}{E_2}}$$

На основании данных [6, 9, 28 – 29, 47, 49, 51, 94, 113, 115 и др.], для усредненных условий Западного Донбасса все физико-механические свойства горных пород, необходимые для построения математической модели упругого трансверсально-изотропного горного массива, были сведены в табл. 2.6 (индексы 1 и 3 соответствуют плоскости изотропии, индекс 2 – нормали к плоскости изотропии).

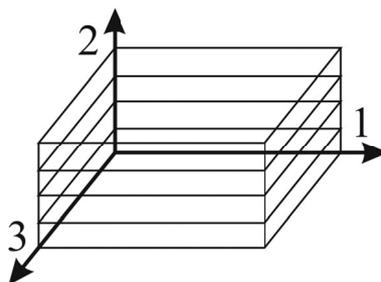


Таблица 2.6

**Основные физико-механические свойства горных пород
Западного Донбасса**

Характеристика	Уголь	Алевролит	Аргиллит	Сланец песчанистый	Сланец глинистый	Песчаник
E_1 , ГПа	39,00	19,70	20,00	25,20	11,60	25,60
E_2 , ГПа	32,00	10,00	8,00	16,80	7,10	20,50
E_3 , ГПа	39,00	19,70	20,00	25,20	11,60	25,60
μ_{12}	0,25	0,28	0,23	0,22	0,30	0,29
μ_{21}	0,21	0,14	0,09	0,15	0,18	0,23
μ_{31}	0,27	0,25	0,21	0,20	0,27	0,26
G_{13} , ГПа	16,18	8,62	9,16	10,99	4,90	10,39
G_{21} , ГПа	14,34	5,58	5,05	8,57	3,59	9,05
G_{32} , ГПа	14,34	5,58	5,05	8,57	3,59	9,05
$\sigma_{сж2}$, МПа	35,00	28,00	21,30	27,40	17,00	32,50
σ_{p2} , МПа	4,00	2,00	1,50	2,80	1,20	3,00
$\sigma_{сж1}$, МПа	27,00	21,00	17,00	20,00	14,00	23,00
σ_{p1} , МПа	6,40	4,20	3,20	4,30	2,40	4,50
$\sigma_{сдвиг13}$, МПа	6,57	4,70	3,69	4,64	2,90	5,09
ρ , кг/м ³	1320	2510	2370	2540	2290	2600

Однако необходимо учитывать, что значения деформационных характеристик, приведенные в табл. 2.6, были получены при испытании образцов относительно небольших размеров. Исследования физико-механических свойств горных пород в местах их естественного залегания [94, 125 – 126, 143] показывают, что модули упругости как параллельно, так и перпендикулярно напластованию, при наличии в массиве волосяных трещин, характерных для подавляющего большинства массивов осадочных и метаморфических горных пород, оказываются в 6 – 8 раз меньше значений, полученных в ходе лабораторных испытаний образцов. При формировании массива данных физико-механических свойств горных пород необходимо учитывать этот факт.

2.4.3. Параметры моделирования крепи очистных и подготовительных выработок

Для получения закономерностей распределения НДС массива вокруг очистной выработки необходимо учитывать влияние работы крепи как очистных, так и подготовительных выработок с вмещающими горными породами. Однако соотношение геометрических параметров крепи и рассматриваемой области горного массива (см. формулы (2.3) – (2.7) не позволяет моделировать крепь в состоянии "как есть". Поэтому влияние реальной крепи, состоящей из совокупности отдельных модулей (секции механизированной крепи для очистного забоя и крепи рамы для подготовительных выработок), в модели предложено заменить распределенной нагрузкой, которая прилагается непосредственно в месте контакта крепи с массивом горных пород.

Моделирование крепи подготовительных выработок

Многолетний опыт работы показал, что в условиях Донецкого угольного бассейна для крепления подготовительных горных выработок наиболее рационально использовать арочную податливую трехзвенную крепь из СВП № 27 сечением 11,2 – 13,8 м² [114, 121]. Для условий Западного Донбасса было научно обосновано применение

разновидности трехзвенной арочной податливой крепи, которая получила название КШПУ.

Основываясь на результатах исследований [50], для расчета плотности установки крепи принимаем следующие ориентировочные величины сопротивления одной арки крепи: для арок из профиля № 27 и № 33 несущая способность отдельных конструкций составляет 300 – 500 кН, при этом максимальная возможная конструктивная податливость не превышает 300 мм. В узле податливости используются силы трения между металлическими элементами, стянутыми зажимными накладками, поэтому крепь оказывает постоянное сопротивление опускающимся породам кровли [86]. С достаточной для практических расчетов точностью величина давления крепи на кровлю может быть найдена из следующего выражения

$$F = \frac{Pa}{b}, \text{ кПа}, \quad (2.10)$$

где P – сопротивление одной арки крепи, кН;

a – шаг установки крепи, рам/м;

b – ширина выработки, м.

Моделирование крепи очистного забоя

В настоящее время на шахтах Украины добыча угля производится из комплексных механизированных лав, оснащенных механизированными комплексами. В своем большинстве механизированные комплексы представлены следующими типами: КД-80, МКД-90, МКД-90Т, МКДД и др. Основной составной частью каждого комплекса является гидрофицированная крепь. К силовым элементам крепи относятся гидравлические стойки, которых в секции мехкрепи может быть две или четыре в зависимости от ее конструкции. В качестве рабочей жидкости в гидрофицированных крепях используется эмульсия, которая представляет собой смесь воды и специальных присадок.

Основная работа гидравлической стойки происходит в режиме постоянного сопротивления. В номинальном режиме каждая секция механизированной крепи КД-80 постоянно оказывает давление на кровлю порядка 2,5 МПа, на почву – 3,0 МПа [52]. Давление на вмещающие пласт породы передается через жесткую плиту основания и перекрытия, которая имеет размеры для крепи КД-80 1,3 м×1,5 м (площадь около 2 м²) и расположена на расстоянии 2,5 м от плоскости забоя.

При построении модели для корректного учета работы механизированной крепи необходимо задавать вышеуказанные силовые и геометрические параметры.

2.4.4. Учет трещиноватости массива

Хотя в земной коре встречаются массивы практически нетрещиноватых пород, однако, как правило, скальные и полускальные породы разбиты тремя или более системами трещин. На глубине эти трещины могут быть плотно сомкнуты, и в их плоскостях может сохраняться значительное сцепление – до 20 – 30 % от сцепления в сплошном теле. Трещины могут быть раскрытые, заполненные милонитом или зияющие. В зонах тектонического дробления густота трещин может возрасти вплоть до щебнеобразного состояния породы. Трещиноватый массив можно рассматривать как некогда монолитный и подвергнутый за пределами деформированию до определенной степени, предельный график которого находится где-то в промежутке между предельным графиком монолита и графиком остаточной прочности. В зависимости от степени трещиноватости сцепление массива будет составлять некоторую долю λ от сцепления образца. Показатель λ называют коэффициентом структурного ослабления.

В табл. 2.7 приведены ориентировочные значения коэффициента структурного ослабления для различных пород [122].

Значение коэффициента структурного ослабления

Характеристика породы	Коэффициент структурного ослабления при прочности пород на сжатие в образце, λ (МПа)			
	< 2	2 – 10	10 – 40	> 40
Без четко видимой трещиноватости	0,90	0,70	0,60	0,50
Плотного сложения с нормальносекущей трещиноватостью	0,50	0,40	0,35	0,30
Плотного сложения с прерывистыми кососекущими трещинами	0,30	0,25	0,20	0,15
С нарушенной структурой	0,10	0,08	0,06	0,03

Трещины, наклоненные под углом $30 - 50^\circ$ к направлению действия нагрузки, в наибольшей степени снижают прочность, поэтому для массивов с наклонными трещинами значения коэффициента λ ниже (табл. 2.7). Также λ зависит от прочности монолитных образцов – трещины больше снижают прочность пород с высокой прочностью монолитных образцов. Породы с нарушенной структурой (зоны дробления, деформированные породы в зонах сдвижения от подземных работ, зоны геологических нарушений и т.п.) по существу имеют остаточную прочность.

Малотрещиноватые массивы с высокими значениями коэффициента структурного ослабления ($\lambda > 0,25$) сохраняют основные свойства монолитных образцов, в частности хрупкость, разупрочнение в запредельной области деформирования, склонность к динамическому разрушению [122].

Системы основных трещин, характерных для рассматриваемой области массива горных пород, могут быть смоделированы секущими плоскостями, которые пересекают моделируемые горные породы в

зависимости от ориентации трещин в натуре. Причем на контакте поверхностей задаются условия взаимодействия пород. Как правило, такое взаимодействие учитывается коэффициентом трения покоя для пары "порода – порода", но в зависимости от реальных условий могут быть рассмотрены различные варианты сопряжений с определенной контактной прочностью. По такой же схеме учитываются условия взаимодействия на контакте слоев, слагающих моделируемый массив горных пород.

Коэффициенты трения покоя для пары "порода – порода" детально изучены Л.И. Бароном [11]. На основании данных [11] для горных пород, характерных для условий Западного Донбасса, была составлена табл. 2.8.

Таблица 2.8

Коэффициенты трения покоя для пары "порода – порода"

Горная порода	f_n	Горная порода	f_n
Каменный уголь	0,40 – 0,45	Сланец песчанистый	0,38 – 0,41
Алевролит	0,35 – 0,39	Сланец глинистый	0,36 – 0,40
Аргиллит	0,33 – 0,37	Песчаник	0,38 – 0,42

Как видно из табл. 2.8, коэффициент трения покоя для всех типов пород с достаточной для практических расчетов точностью может быть принят $f_n = 0,35 – 0,40$.

Математическое моделирование геомеханических процессов позволяет учитывать влияние многих горно-геологических и технологических факторов на закономерности распределения НДС вокруг выработок, а использование проверенных и хорошо зарекомендовавших себя методов и подходов к решению поставленных задач обеспечивает подтверждение достоверности получаемых результатов. Однако несмотря на это, шахтный эксперимент является основным критерием достоверности полученных результатов, и поэтому он должен быть поставлен и проведен в соответствии с установленными методиками, рекомендациями и стандартами.

2.5. Методика проведения шахтных экспериментов

При проведении исследований проявления горного давления в длинных очистных забоях в качестве основных были приняты "Методические указания по исследованию горного давления на угольных и сланцевых шахтах" [71].

Общая задача изучения проявлений горного давления в очистных забоях сводилась к установлению закономерностей распределения конвергенции горных пород в лаве, а также давления эмульсии в гидростойках механизированной крепи.

2.5.1. Объем и методика шахтных исследований

Согласно методике [71], был выполнен обязательный минимум измерений и наблюдений, а также установлены и изучены следующие геологические и горнотехнические условия проведения испытаний: мощность, состав и строение пласта, его трещиноватость; физико-механические свойства угля; угол падения пласта; состав и строение кровли, ее трещиноватость; механические свойства пород кровли; состав и строение почвы; прочность почвы на вдавливание; глубина разработки; геологические нарушения; длина лавы и выемочного столба; паспорта крепления и погашения выработок.

Выбранная для проведения исследований лава имела следующие характеристики: длина лавы составляла 190 м, длина выемочного столба – 1300 м, глубина разработки – 445 м, угол падения пласта $\alpha < 3^\circ$, диапазон изменения скорости подвигания – 4 – 6 м/сут, в пределах выемочного столба отсутствовали непереходимые геологические нарушения, а также влияние других очистных забоев, т.к. исследуемая лава являлась первой и единственной в рассматриваемом блоке, соответственно возможность влияния, как подработки, так и надработки вынимаемого пласта исключена.

При изучении взаимодействия механизированной крепи с боковыми породами в процессе проведения эксперимента был выполнен необходимый комплекс наблюдений и измерений.

Осуществлялись:

- наблюдения за устойчивостью и состоянием кровли в призабойном пространстве лавы, характером ее обрушения за крепью, перемещением и проникновением разрушенных пород в призабойное пространство со стороны кровли и зоны обрушения;
- измерения конвергенции горных пород в призабойном пространстве лавы по нормали к пласту;
- измерения податливости гидростоек механизированной крепи;
- измерения сопротивления гидростоек крепи от момента начального распора до момента передвижки;
- наблюдения за взаимодействием перекрытий с кровлей и оснований с почвой, а также производилась оценка вдавливания крепи в боковые породы;
- наблюдения за взаимодействием гидравлических стоек с основаниями и перекрытиями секций.

Исследования проводились как в период отхода лавы от целика и генеральной посадки основной кровли, так и в период установившегося шага обрушения пород кровли.

Длительность проведения исследований в период генеральной посадки основной кровли позволила зафиксировать момент осадки. Длительность исследований при установившемся шаге обрушения кровли определялась методом, изложенным в методике [70].

В соответствии с [70] для получения 5 % точности определения конвергенции горных пород при принятых значениях надежности определения границ 0,95 и вероятности попадания случайной величины в них 0,99 длительность исследований должна быть равной примерно 120 – 130 циклам (70 – 80 м).

В ходе эксперимента измерения производились с момента выхода лавы из разрезной печи до момента ее отхода на расстояние 300 м. Второй цикл экспериментов начинался на отметке, когда до полной отработки выемочного столба оставалось 280 – 300 м и заканчивался в момент постановки лавы на демонтаж.

Количество секций вдоль лавы, на которых производились измерения, составляло 80 – 90 % от общего числа секций механизированной крепи, что позволило набрать необходимый статистический материал, который полностью удовлетворяет требованиям надежности и обеспечивает необходимую точность результатов.

В общем случае объем выполненных шахтных исследований в полной мере соответствует требованиям математической статистики, общепринятым стандартам и методикам [37, 70 – 71].

2.5.2. Способы и средства шахтных исследований

Ниже приводятся способы и средства изучения геологических и горнотехнических условий, а также способы и средства изучения взаимодействия крепи с боковыми породами:

- вынимаемая мощность фиксировалась при каждом цикле измерений через каждые 10 м с помощью измерительной рулетки с ценой деления 1 мм и точностью около 1 %;
- состав и строение пласта угля оценивались через каждые 10 м подвигания забоя. Состав, строение и трещиноватость пласта угля изучались в соответствии с "Руководством" [92];
- угол падения пласта измерялся угломерным инструментом с точностью до 1° каждые 10 м подвигания забоя совместно с маркшейдерской службой шахты;
- особое внимание обращалось на состав и строение пород кровли: слоистость, мощность слоев, тип контактов между слоями, наличие трещиноватости и ее ориентировку. Они изучались в обнажениях и зонах обрушения кровли по рекомендациям, изложенным в "Методическом пособии" [72].
- глубина разработки устанавливалась по плану горных работ;
- в процессе исследований устанавливался фактический паспорт крепления и отмечались его отклонения от проектного (последовательность передвижки секций, отставание от комбайна, крепление сопряжений и др.).

При исследовании взаимодействия механизированной крепи с кровлей выполнялись следующие работы.

- Наблюдение за состоянием кровли в призабойном пространстве лавы, характером ее обрушения за крепью, перемещением и проникновением разрушенных пород в призабойное пространство со стороны кровли и зоны обрушения велось визуально с использованием простейших измерительных инструментов (складного метра, измерительной рулетки и т.п.); для фиксации необходимых размеров осуществлялось эскизирование и фотографирование исследуемых объектов. Особое внимание обращалось на нарушения кровли: трещины, заколы, обрезы и вывалы. Фиксировался момент появления нарушения кровли, отмечалось на каком расстоянии от забоя оно появилось, при какой общей ширине призабойного пространства, при каких производственных процессах. В дальнейшем отмечались все изменения нарушений вплоть до выхода их за пределы призабойного пространства, при этом измерялись геометрические параметры нарушений. Наблюдение за состоянием кровли велось во всех доступных местах, особенно тщательно в бесстоечном призабойном пространстве.
- Измерение взаимного смещения кровли и почвы в призабойном пространстве лавы осуществлялось по нормали к пласту. Измерение взаимного смещения боковых пород по нормали к пласту производилось с помощью стоек СУИ. Взаимное смещение боковых пород по нормали к пласту является основным параметром проявления горного давления и поэтому измерялось во всех случаях, где это возможно.
- Измерение податливости гидростоек крепи осуществлялось с момента распора и до момента разгрузки секций крепи с помощью металлических линеек с ценой деления 1 мм.
- Измерение сопротивления стоек крепи производилось от их распора до разгрузки с помощью показывающих манометров с пределом измерения 40 МПа и точностью ± 1 МПа, также параллельно использовались промышленные индикаторы давления,

которыми были оснащены клапанные блоки каждой гидравлической стойки. Предел измерения индикаторов давления составлял 50 МПа и точность измерения ± 5 МПа.

- При наблюдениях за взаимодействием перекрытий с кровлей и оснований с почвой устанавливалась степень контактирования их с боковыми породами по методике [149]. Устанавливались схемы взаимодействия перекрытий и оснований с боковыми породами и схемы их нагружения. Велись наблюдения за состоянием кровли в зазорах между перекрытиями. Фиксировалось поведение кровли при разгрузке и передвижке секций крепи. Измерялась мощность породной подушки на перекрытии и под основанием.

Способы и средства проведенных шахтных исследований в полной мере соответствуют методикам [37, 70 – 72, 92, 149] и обеспечивают достаточную точность и надежность измеренных и зафиксированных данных.

ГЛАВА 3

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ В МАССИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД ВОКРУГ ОЧИСТНОЙ ВЫРАБОТКИ

В данной главе решается третья, поставленная в исследовательской работе, задача по установлению закономерностей формирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород вокруг очистных выработок.

В п. 3.1 изложена методика проведения пространственного компьютерного моделирования выемочного участка и обоснованы геометрические параметры моделируемой области слоистого трансверсально-изотропного массива, который включает в себя очистную выработку. Также указан способ учета силовых и геометрических характеристик крепи подготовительной и очистной выработок, приведена теория прочности и критерий перехода горной породы в предельное состояние.

В п. 3.2 описана методика и приведены результаты решения инверсных задач, целью которых являлось уточнение прочностных и деформационных свойств горных пород, входящих в пространственную модель выемочного участка.

В п. 3.3 представлены результаты моделирования и закономерности распределения напряженно-деформированного состояния горных пород вокруг очистной выработки. Установлен механизм обрушения кровли в выработанное пространство по мере подвигания лавы (п. 3.3.1); определена величина конвергенции горных пород на линии посадочного ряда стоек механизированной крепи в зависимости от положения очистного забоя вдоль выемочного столба (п. 3.3.2); выявлены основные закономерности распределения напряжений в пласте и вмещающих породах вокруг очистной выработки (п. 3.3.3); определены зависимости изменения конвергенции горных пород в подготовительной выработке как впереди очистного забоя, так и после прохода лавы (п. 3.3.4); приведено сравнение результатов моделирования для различных моделей массива горных пород (п. 3.3.5).

3.1. Методика моделирования

Посредством программного пакета SolidWorks 2010 была построена компьютерная модель для условий разработки пласта C^H_8 на шахте "Западно-Донбасская" ОАО "Павлоградуголь". Исходные технологические и горно-геологические данные представлены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Исходные данные для построения модели

Технологический параметр	Значение
Длина лавы, м	190
Механизированная крепь	КД-80
Угол залегания пласта, град	0 – 2
Вынимаемая мощность, м	0,95 – 1,05
Крепь подготовительного штрека	КШПУ-13,2
Наименование пласта	C^H_8
Глубина ведения очистных работ, м	445
Система разработки	столбовая
Направление отработки столба	по простиранию

Геометрические размеры модели в плане определялись в соответствии с формулами (2.6) и (2.7). Размер модели в направлении вкрест движения очистного забоя при длине лавы 190 м должен составлять не менее 635 м. Учитывая, что моделирование должно отобразить полную картину перераспределения напряженно-деформированного состояния массива при движении очистного забоя и охватить несколько циклов обрушения основной кровли, принимаем моделируемую величину отхода лавы от разрезной печи равной не менее 200 м. Исходя из этого, размер модели в направлении подвигания очистного забоя должен быть не менее 645 м. Размер модели по вертикали в соответствии с формулой (2.5) должен составлять не менее 510 м. При моделировании для решения поставленных задач целесообразно рассматривать только пласты крепких горных пород, поэто-

му вес дисперсных грунтов (наносов и песков Бучакского водоносного горизонта) был заменен пригрузкой, приложенной к верхнему слою твердых горных пород. Мощность покрывающего слоя мягких грунтов находилась в пределах 87 – 100 м, исходя из этого, приложенная пригрузка составила 2,5 МПа. Для упрощения математической обработки и дискретизации моделируемой области горного массива в качестве объемной геометрической фигуры, в которую необходимо заключить исследуемую область, был выбран цилиндр. Окончательно геометрические размеры цилиндра составили: высота 427 м, диаметр окружности в основании 700 м. Расположение всех литологических разностей в модели соответствовало стратиграфической колонке, характерной для моделируемого выемочного участка (стратиграфическая колонка выемочного участка приведена в приложении Б).

Конечно-элементная сетка строилась в виде 8-узловых тетраэдров по схеме Делано-Воронова. Максимальный линейный размер конечного элемента не превышал 10 м. Учитывая, что модель имела одну плоскость симметрии, которая проходила нормально к середине очистного забоя, математический расчет производился только для одной симметричной части. Необходимые граничные условия на краевых частях модели и на плоскости симметрии соблюдались. Общий вид модели показан на рис. 3.1 и 3.2.

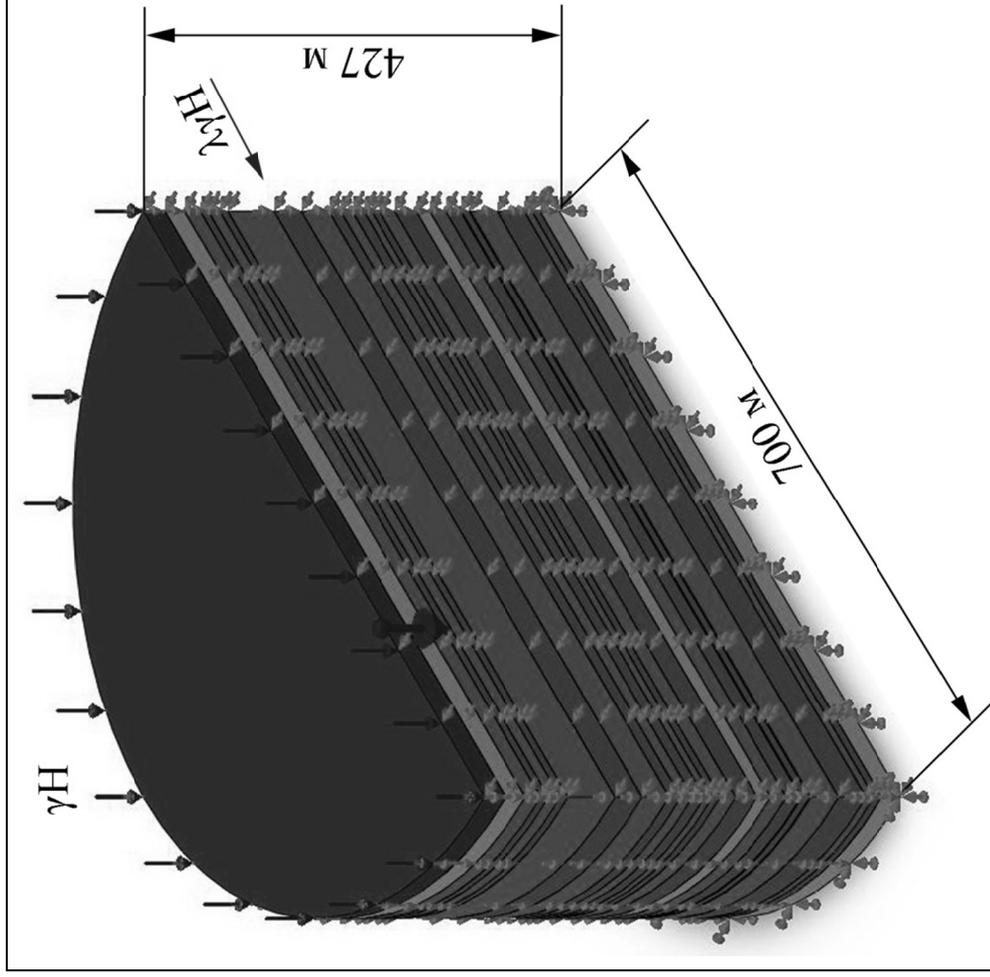


Рис. 3.1. Общий вид модели

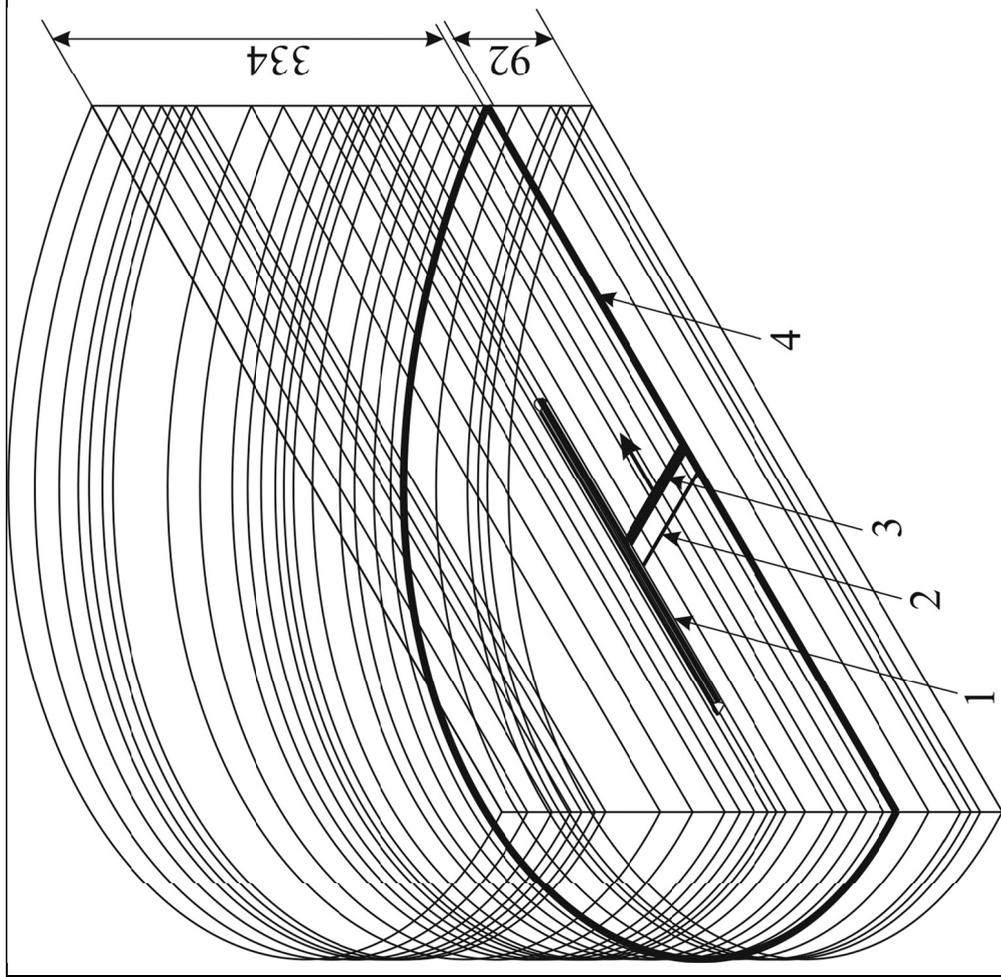


Рис. 3.2. Расположение выработок в модели
 1 – подготовительная выработка (300 м);
 2 – положение разрезной печи;
 3 – полупролет лавы (95 м);
 4 – отрабатываемый пласт.

Подготовительная выработка в модели имела прямоугольную форму, при этом геометрические параметры (высота и ширина) соответствовали крепи КШПУ сечением $13,2 \text{ м}^2$, которая применяется на шахте "Западно-Донбасская" в качестве крепи подготовительных выработок. Распределенная нагрузка на кровлю была рассчитана по формуле (2.10) и составила около 100 кПа , нагрузка на почву задавалась по линии постановки ножек крепи и составляла 200 кН на 1 погонный метр выработки. Вид подготовительной выработки и принципиальная расчетная схема представлены на рис. 3.3 и 3.4.

Влияние крепи очистной выработки моделировалось распределенной нагрузкой на кровлю и почву пласта, которая задавалась в месте постановки механизированной крепи. Геометрические параметры области приложения нагрузки соответствовали геометрическим параметрам плиты перекрытия и основания механизированной крепи КД-80.

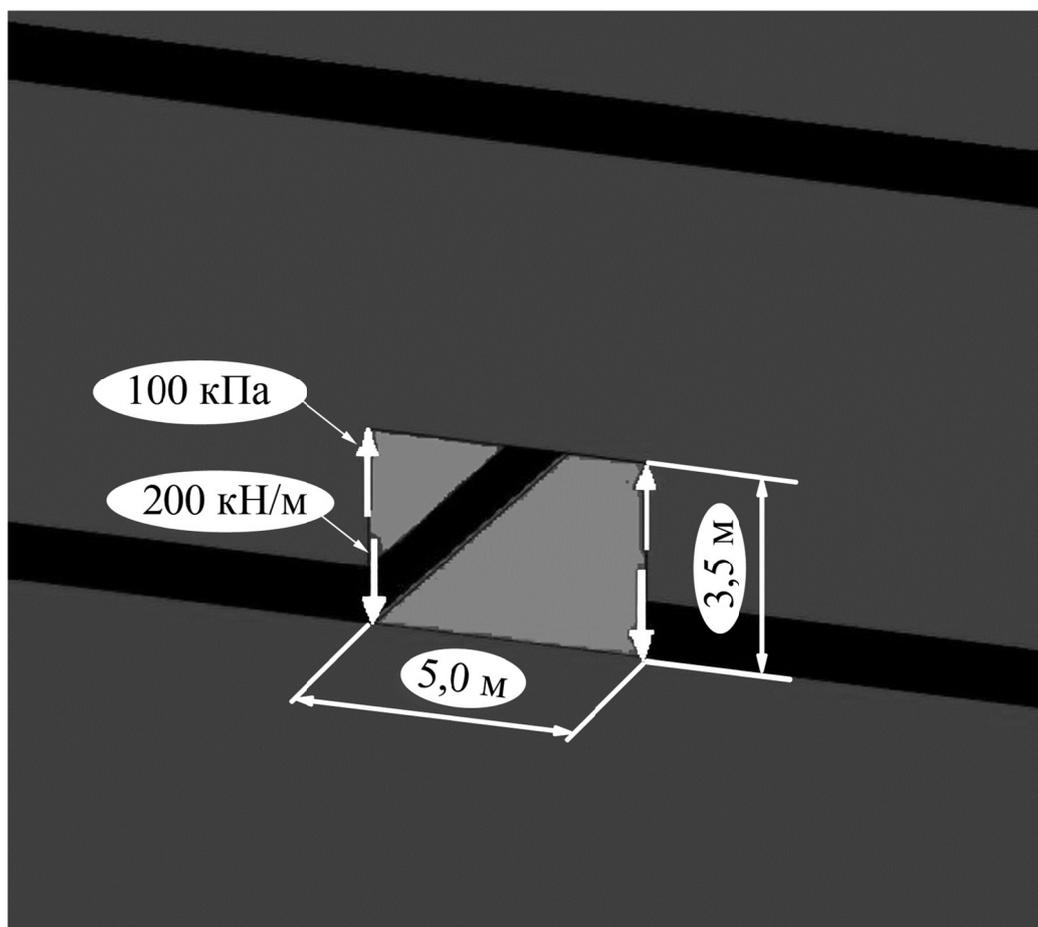


Рис. 3.3. Вид подготовительной выработки в модели (изометрия)

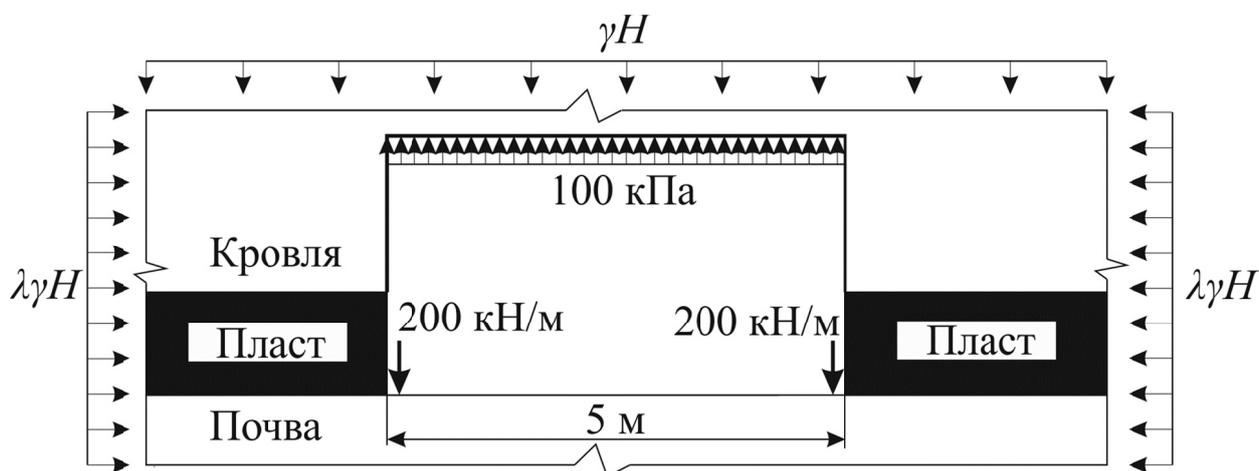


Рис. 3.4. Принципиальная схема расстановки распределенных и сосредоточенных нагрузок в подготовительной выработке

Область приложения давления находилась на расстоянии 2,5 м от плоскости забоя и имела прямоугольную форму с размерами 1,5×190 м. Давление на кровлю задавалось 2,5 МПа, на почву – 3,0 МПа. Вид очистной выработки и принципиальная расчетная схема приведены на рис. 3.5 – 3.6.

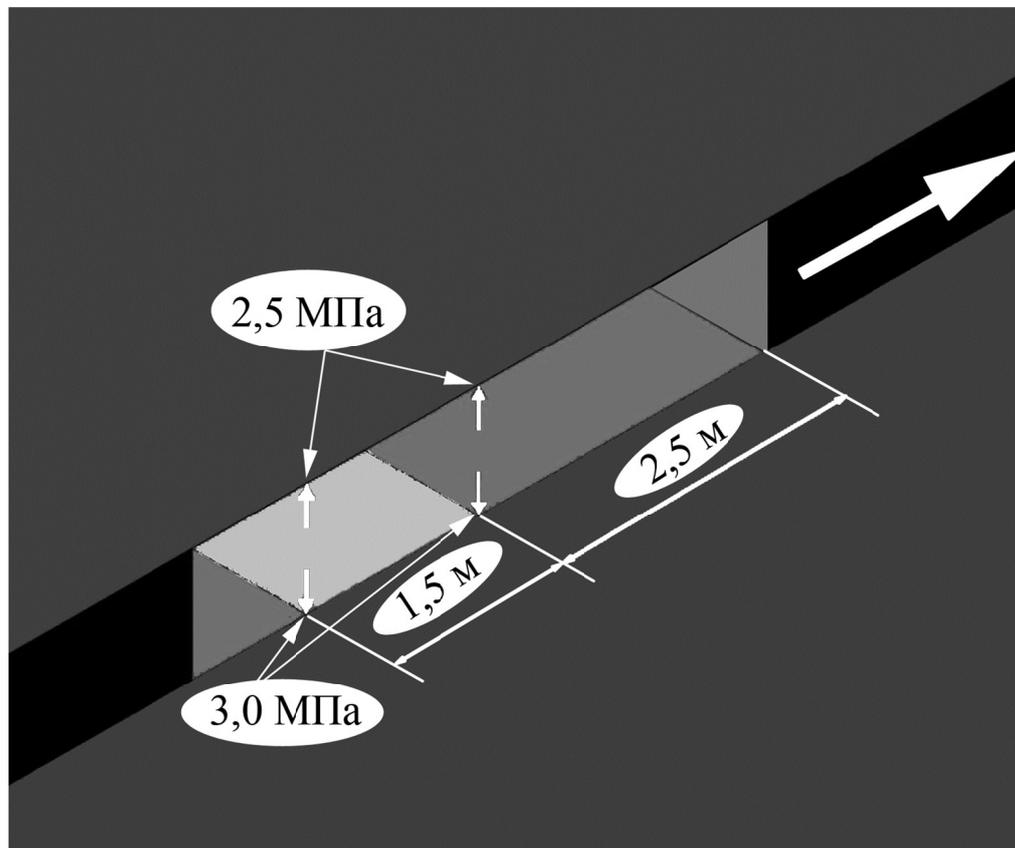


Рис. 3.5. Вид очистной выработки в модели (изометрия)

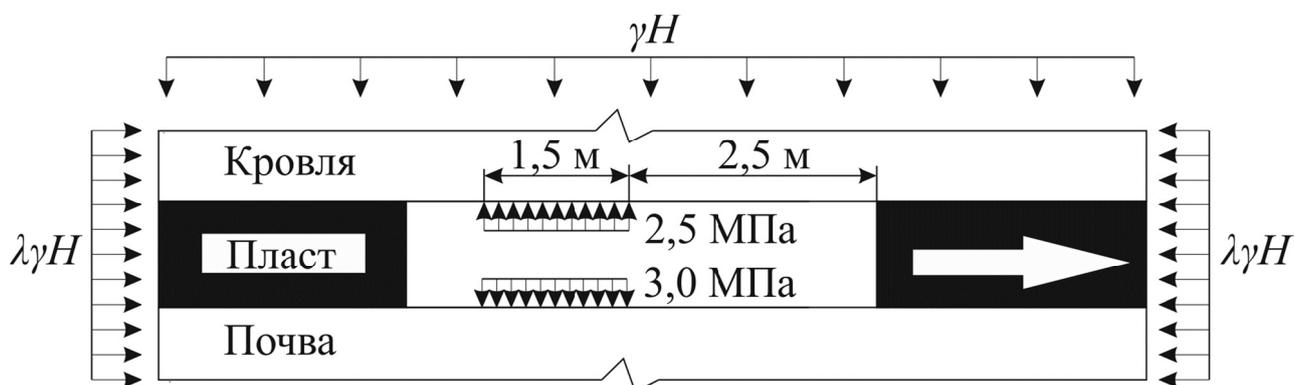


Рис. 3.6. Принципиальная схема расстановки распределенных нагрузок в очистной выработке

Моделирование производилось от момента отхода лавы от разрезной печи до отметки положения забоя 235 м с шагом через каждые 10 м. При моделировании каждого последующего положения очистного забоя вдоль выемочного столба в качестве исходных данных принимались результаты моделирования предыдущего положения.

Такой подход к моделированию позволил пошагово рассматривать происходящие в массиве процессы перераспределения напряженно-деформированного состояния, что существенно увеличивает значимость и практическую ценность полученных результатов.

В качестве теории прочности принималась теория предельных напряженных состояний Мора-Кулона. Условие прочности горной породы записывалось в виде

$$1 \geq \frac{\sigma_1}{k_1 \sigma_{p\parallel}} - \frac{\sigma_3}{k_2 \sigma_{сж\perp}},$$

где σ_1, σ_3 – главные напряжения, $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$;

$\sigma_{p\parallel}$ – предел прочности горной породы на растяжение параллельно напластованию;

k_1 – коэффициент структурного ослабления, учитывающий снижение предела прочности на растяжение в массиве по сравнению с образцом, $k_1 = 0,6$;

$\sigma_{сж\perp}$ – предел прочности горной породы на сжатие перпендикулярно напластованию;

k_2 – коэффициент структурного ослабления, учитывающий снижение предела прочности на сжатие в массиве по сравнению с образцом, $k_2 = 0,8$.

3.2. Тестирование модели

Для получения закономерностей перераспределения напряженно-деформированного состояния массива горных пород вокруг очистной выработки было произведено тестирование компьютерной модели на предмет уточнения деформационных и прочностных свойств горного массива. Уточнение осуществлялось методом решения инверсных задач, которые ставят целью нахождение физических характеристик моделируемой среды при известном воздействии граничных условий и известном распределении исследуемых функций в пределах моделируемой области. Таким образом, по заданным граничным и начальным условиям, нескольким зависимостям распределения конвергенции горных пород в лаве, построенным по данным натурных изысканий, для исследуемой области находятся числовые значения параметров, характеризующие деформационные и прочностные свойства горного массива. В простейшем случае такая задача решается многократным повторением серий прямых задач. Подбор ведется до тех пор, пока зависимость, получаемая в процессе моделирования, не совпадет с заданной точностью с такой же зависимостью, построенной по результатам натурных экспериментов [26]. Поскольку решение задач осуществляется численным методом (МКЭ), то для исключения влияния размера конечного элемента на точность расчета целесообразно решение как инверсных (тестовых), так и прямых задач производить для одного и того же размера конечного элемента.

В ходе проведения натурных исследований в условиях шахты "Западно-Донбасская" ОАО "Павлоградуголь" были получены экспериментальные кривые распределения конвергенции на отметке посадочного ряда гидрофицированных стоек механизированной крепи в лаве в зависимости от положения очистного забоя вдоль выемочного столба. Эти зависимости были использованы в качестве известного

распределения исследуемых функций в пределах моделируемой области.

Результаты сходимости кривых, полученных в ходе решения инверсных задач, с экспериментальными кривыми в аналитическом виде представлены в табл. 3.2 (z – координата по длине лавы).

Таблица 3.2

Результаты решения инверсных задач

Положение забоя, м	Уравнение кривой, полученной при моделировании	Величина достоверности аппроксимации
5	$K = 3 \cdot 10^{-10} z^4 - 2 \cdot 10^{-6} z^2 + 0,025$	–
15	$K = 8 \cdot 10^{-10} z^4 - 5 \cdot 10^{-6} z^2 + 0,110$	$R^2 = 0,753$
25	$K = 4 \cdot 10^{-10} z^4 - 5 \cdot 10^{-6} z^2 + 0,168$	$R^2 = 0,820$
35	$K = -3 \cdot 10^{-10} z^4 + 8 \cdot 10^{-7} z^2 + 0,217$	$R^2 = 0,835$
45	$K = 1,45 \cdot 10^{-9} z^4 - 2 \cdot 10^{-5} z^2 + 0,180$	$R^2 = 0,819$
55	$K = 1,45 \cdot 10^{-9} z^4 - 2 \cdot 10^{-5} z^2 + 0,206$	$R^2 = 0,808$
65	$K = 1,45 \cdot 10^{-9} z^4 - 2 \cdot 10^{-5} z^2 + 0,235$	$R^2 = 0,839$
75	$K = 2 \cdot 10^{-9} z^4 - 10^{-5} z^2 + 0,137$	$R^2 = 0,824$
85	$K = 6 \cdot 10^{-10} z^4 - 1,2 \cdot 10^{-5} z^2 + 0,284$	$R^2 = 0,876$
95	$K = 6 \cdot 10^{-10} z^4 - 1,8 \cdot 10^{-5} z^2 + 0,352$	$R^2 = 0,846$
105	$K = 1,45 \cdot 10^{-9} z^4 - 2 \cdot 10^{-5} z^2 + 0,311$	$R^2 = 0,839$
115	$K = 1,45 \cdot 10^{-9} z^4 - 2 \cdot 10^{-5} z^2 + 0,317$	$R^2 = 0,842$
125	$K = 2 \cdot 10^{-9} z^4 - 10^{-5} z^2 + 0,164$	$R^2 = 0,856$
135	$K = 6 \cdot 10^{-10} z^4 - 1,2 \cdot 10^{-5} z^2 + 0,302$	$R^2 = 0,864$
145	$K = 6 \cdot 10^{-10} z^4 - 1,8 \cdot 10^{-5} z^2 + 0,373$	$R^2 = 0,861$
155	$K = 1,45 \cdot 10^{-9} z^4 - 2 \cdot 10^{-5} z^2 + 0,299$	$R^2 = 0,892$
165	$K = 1,45 \cdot 10^{-9} z^4 - 2 \cdot 10^{-5} z^2 + 0,323$	$R^2 = 0,829$
175	$K = 2 \cdot 10^{-9} z^4 - 10^{-5} z^2 + 0,169$	$R^2 = 0,893$
185	$K = 6 \cdot 10^{-10} z^4 - 1,2 \cdot 10^{-5} z^2 + 0,261$	$R^2 = 0,851$
195	$K = 6 \cdot 10^{-10} z^4 - 1,8 \cdot 10^{-5} z^2 + 0,350$	$R^2 = 0,883$
205	$K = 1,45 \cdot 10^{-9} z^4 - 2 \cdot 10^{-5} z^2 + 0,298$	$R^2 = 0,814$
215	$K = 1,45 \cdot 10^{-9} z^4 - 2 \cdot 10^{-5} z^2 + 0,312$	$R^2 = 0,847$
225	$K = 2 \cdot 10^{-9} z^4 - 10^{-5} z^2 + 0,165$	$R^2 = 0,863$
235	$K = 6 \cdot 10^{-10} z^4 - 1,2 \cdot 10^{-5} z^2 + 0,267$	$R^2 = 0,867$

По аналогии с изгибом пластин и оболочек, которые в общем случае под воздействием распределенной нагрузки изгибаются по поверхностям четвертого порядка [123], для описания кривых распределения конвергенции горных пород по длине лавы были использованы уравнения четвертого порядка.

Некоторые характерные результаты сходимости кривых, полученных в ходе решения инверсных задач с экспериментальными кривыми, в графическом виде приведены на рис. 3.7 – 3.14.

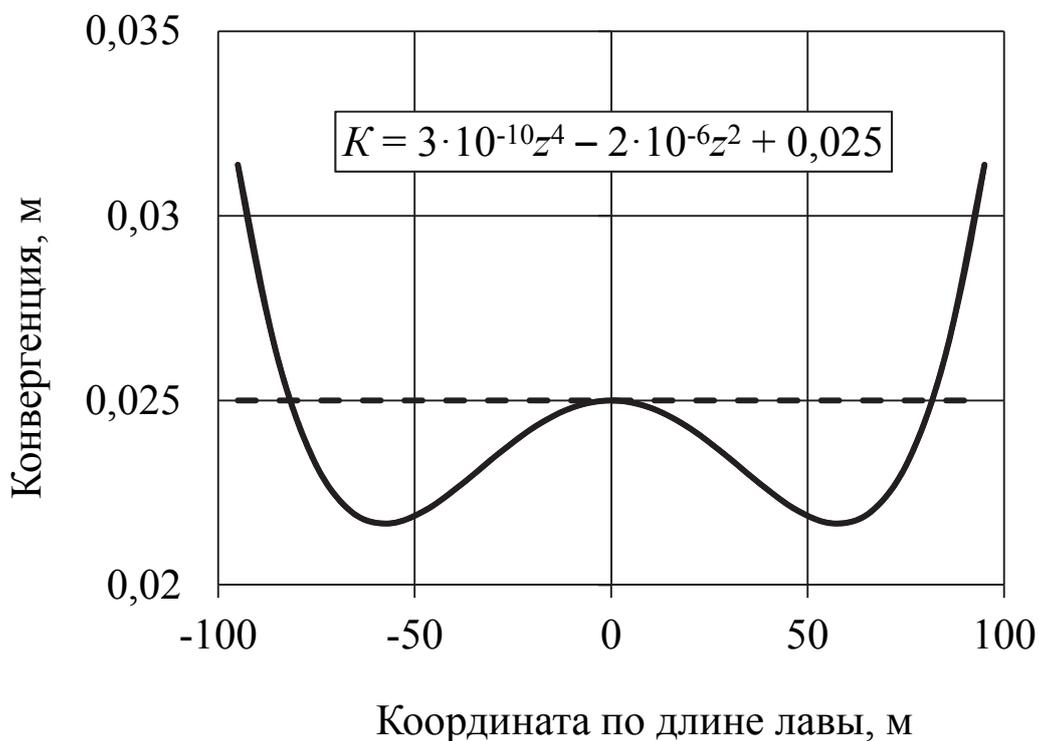


Рис. 3.7. Конвергенция по длине лавы при отходе от разрезной печи $\Delta L = 5$ м:

— — экспериментальная кривая; — — аппроксимирующая кривая

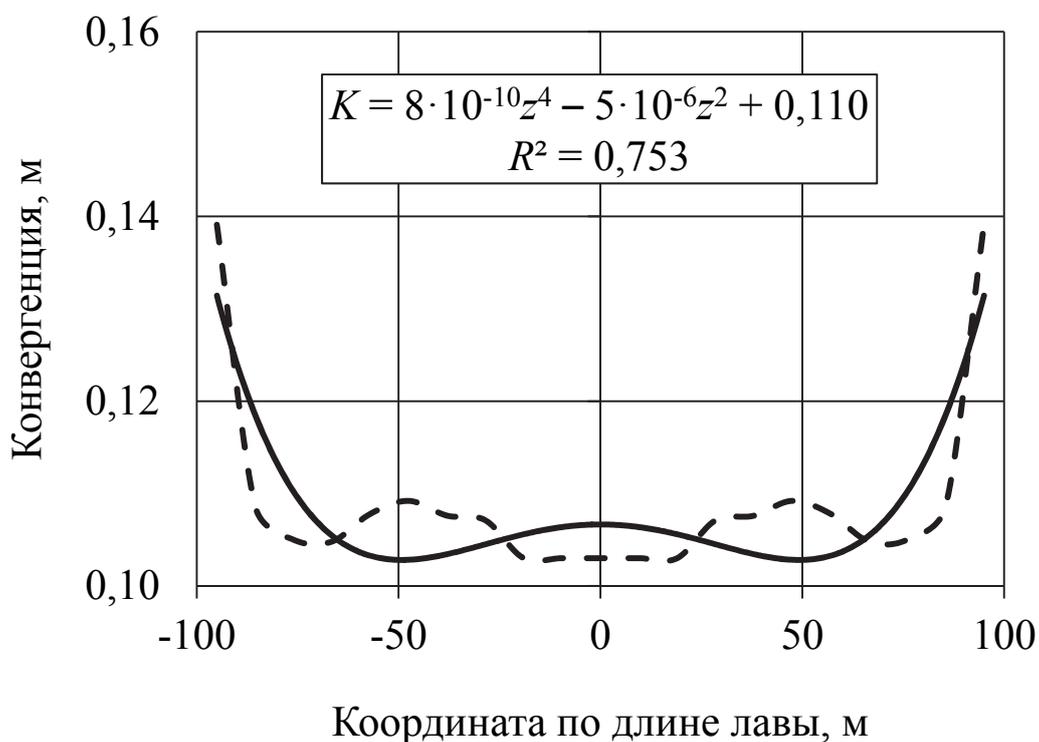


Рис. 3.8. Конвергенция по длине лавы при отходе от разрезной печи $\Delta L=15$ м:

— — экспериментальная кривая; — — аппроксимирующая кривая

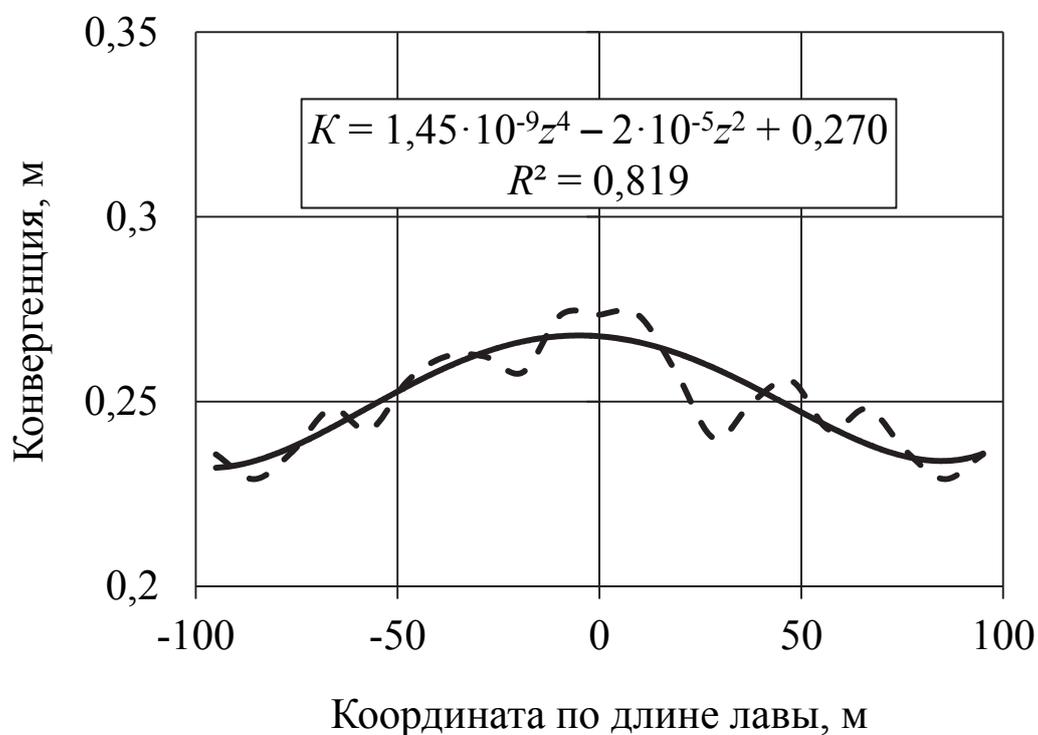


Рис. 3.9. Конвергенция по длине лавы при отходе от разрезной печи $\Delta L=45$ м:

— — экспериментальная кривая; — — аппроксимирующая кривая

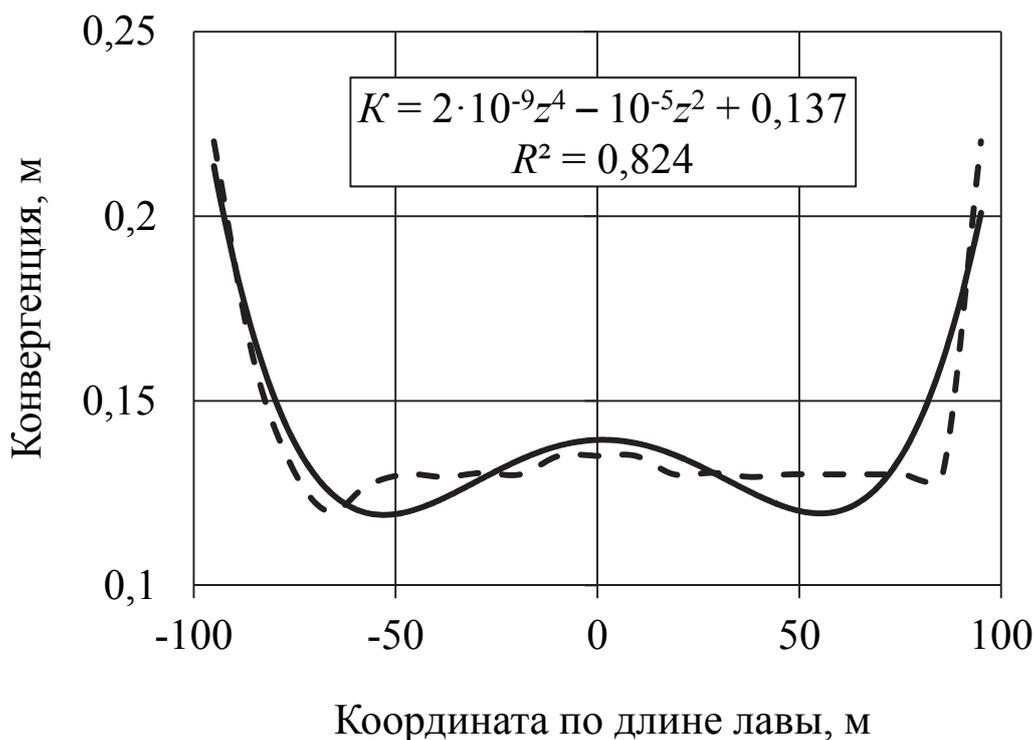


Рис. 3.10. Конвергенция по длине лавы при отходе от разрезной печи $\Delta L=75$ м:

— — экспериментальная кривая; — — аппроксимирующая кривая

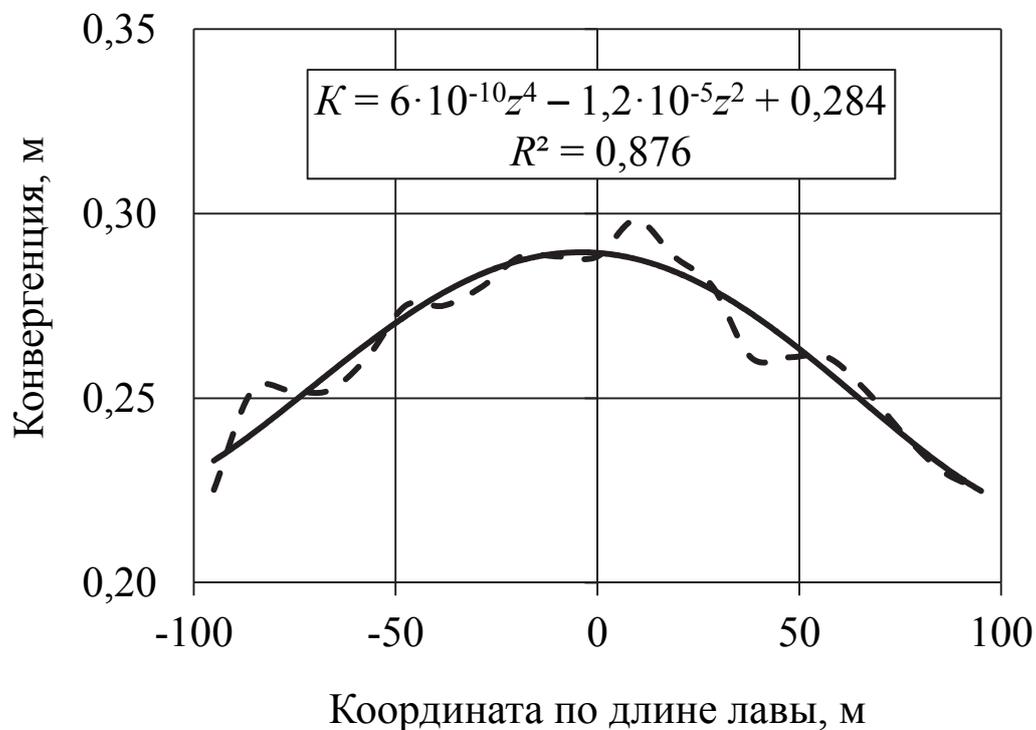


Рис. 3.11. Конвергенция по длине лавы при отходе от разрезной печи $\Delta L=85$ м:

— — экспериментальная кривая; — — аппроксимирующая кривая

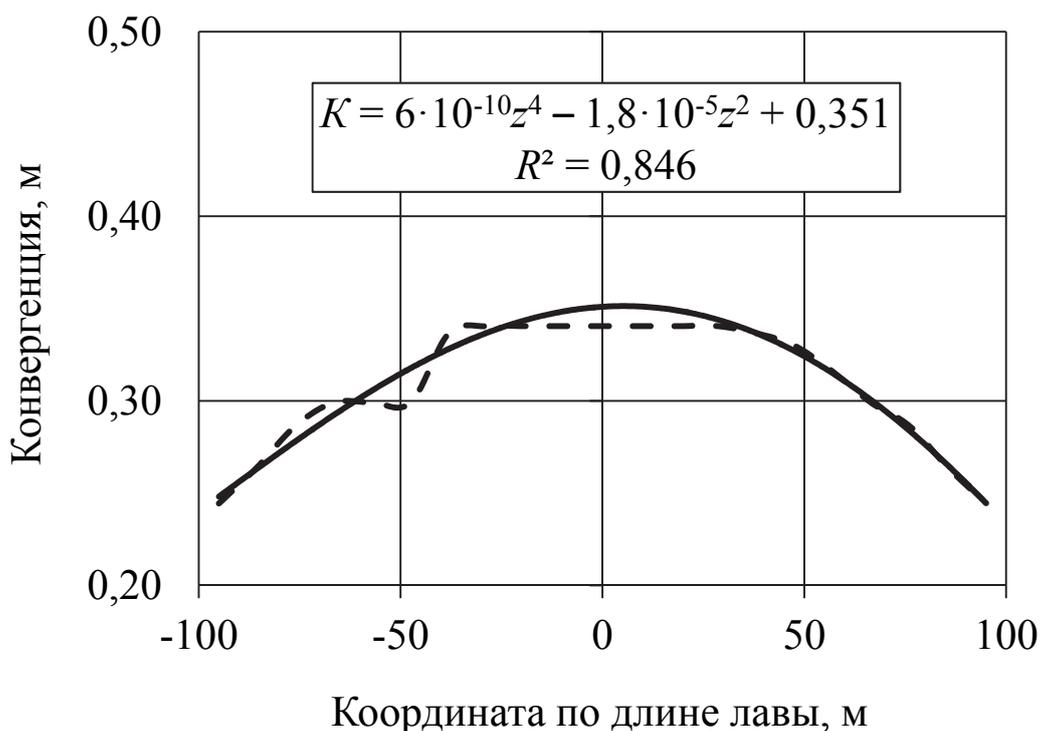


Рис. 3.12. Конвергенция по длине лавы при отходе от разрезной печи $\Delta L=95$ м:

— — экспериментальная кривая; — — аппроксимирующая кривая

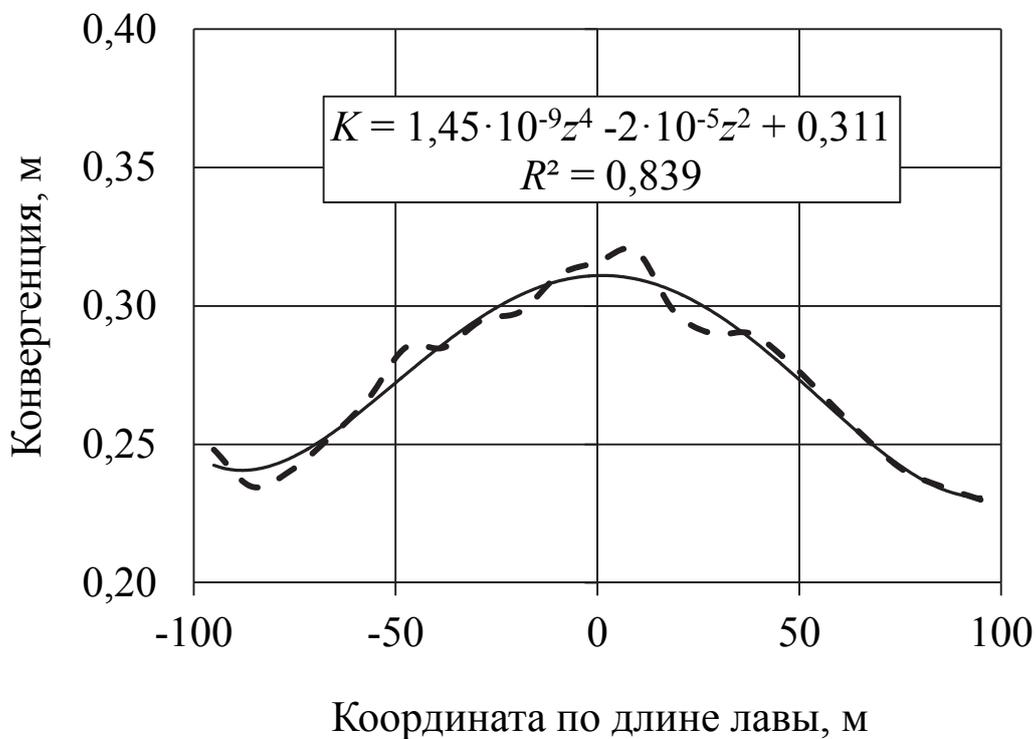


Рис. 3.13. Конвергенция по длине лавы при отходе от разрезной печи $\Delta L=105$ м

— — экспериментальная кривая; — — аппроксимирующая кривая

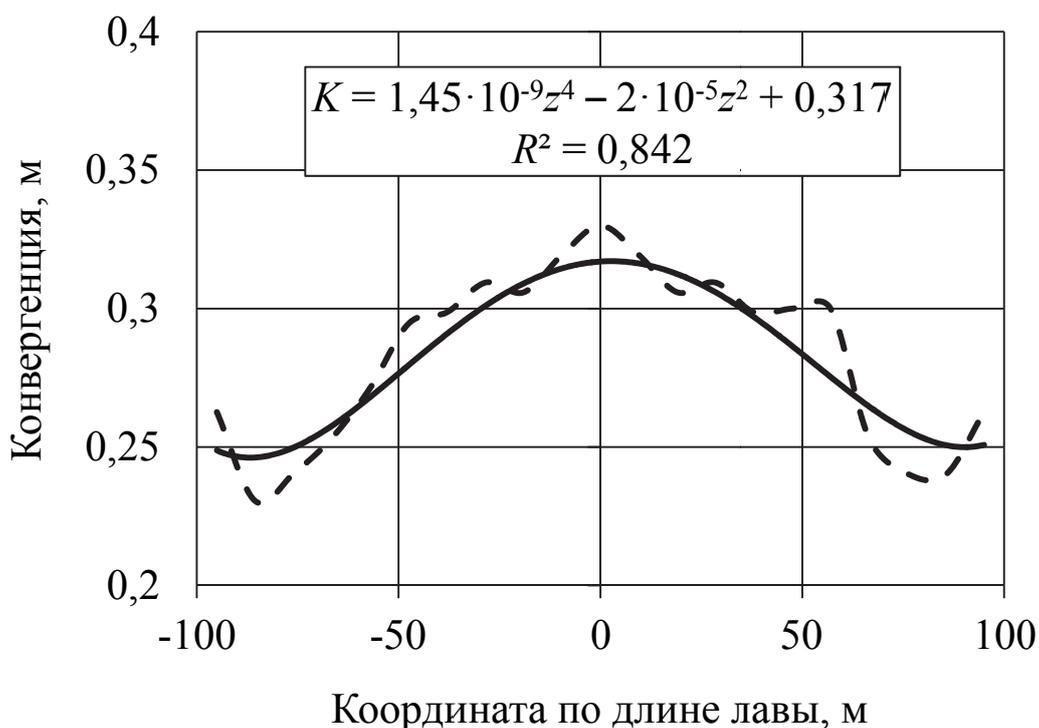


Рис. 3.14. Конвергенция по длине лавы при отходе от разрезной печи $\Delta L = 115$ м

— — экспериментальная кривая; — — аппроксимирующая кривая

С учетом результатов решения инверсных задач были скорректированы деформационные и прочностные свойства моделируемого горного массива. Скорректированные данные, которые были окончательно использованы для построения модели, приведены в табл. 3.3.

В табл. 3.3. индексы 1 и 3 соответствуют плоскости изотропии. Индекс 2 соответствует нормали к плоскости изотропии.

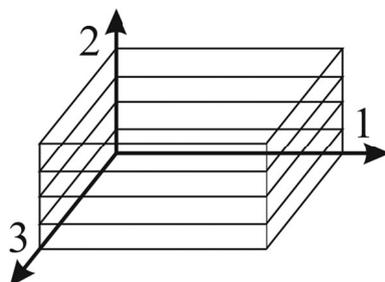


Таблица 3.3

**Скорректированные физико-механические свойства
горных пород для условий шахты "Западно-Донбасская"**

Характеристика	Уголь	Алеврит	Аргиллит	Сланец песчанистый	Сланец глинистый	Песчаник
E_1 , ГПа	5,57	2,81	2,86	3,60	1,66	3,66
E_2 , ГПа	4,57	1,43	1,14	2,40	1,01	2,93
E_3 , ГПа	5,57	2,81	2,86	3,60	1,66	3,66
μ_{12}	0,25	0,28	0,23	0,22	0,30	0,29
μ_{21}	0,21	0,14	0,09	0,15	0,18	0,23
μ_{31}	0,27	0,25	0,21	0,20	0,27	0,26
G_{13} , ГПа	2,31	1,23	1,31	1,57	0,70	1,48
G_{21} , ГПа	2,05	0,80	0,72	1,22	0,51	1,29
G_{32} , ГПа	2,05	0,80	0,72	1,22	0,51	1,29
$\sigma_{сж2}$, МПа	35,00	28,00	21,30	27,40	17,00	32,50
σ_{p2} , МПа	4,00	2,00	1,50	2,80	1,20	3,00
$\sigma_{сж1}$, МПа	27,00	21,00	17,00	20,00	14,00	23,00
σ_{p1} , МПа	6,40	4,20	3,20	4,30	2,40	4,50
$\sigma_{сдв13}$, МПа	6,57	4,70	3,69	4,64	2,90	5,09
ρ , кг/м ³	1320	2510	2370	2540	2290	2600

3.3. Результаты моделирования

3.3.1. Механизм обрушения кровли при подвигании очистного забоя

В результате движения очистного забоя (увеличения размера выработанного пространства) в массиве горных пород происходят качественные и количественные изменения. Одним из основных показателей, характеризующих такие изменения, является момент перехода вмещающих разрабатываемый угольный пласт горных пород в предельное состояние. Как правило, переход в предельное состояние сопровождается потерей устойчивости обнажений и обрушением пород в выработанное пространство. Размеры и момент появления зон, в которых горная порода находится в предельном состоянии, приведены в приложении А.

Анализ результатов моделирования позволяет установить закономерность и периодичность образования зон предельного состояния горных пород в зависимости от размеров выработанного пространства. При отходе лавы до 25 м в кровле наблюдается зона по высоте не превышающая двух мощностей вынимаемого пласта угля, в которой горная порода достигла предельного состояния (рис. 3.15, светлым цветом показана область предельного состояния).

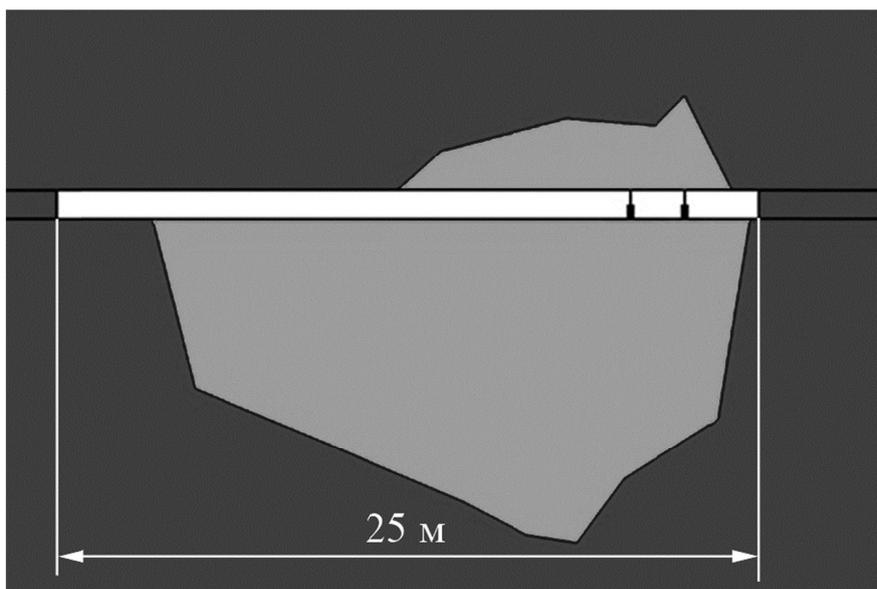


Рис. 3.15. Распределение зон предельного состояния горных пород при отходе лавы от разрезной печи до $\Delta L = 25$ м

В промежутке 35 – 45 м в зоне предельного состояния оказывается нижняя часть слоя алевролита мощностью 8 м, который залегает непосредственно над вынимаемым пластом, на высоту 3 – 4-кратной вынимаемой мощности, что соответствует первому моменту потери устойчивости непосредственной кровли пласта (рис. 3.16, светлым цветом показана область предельного состояния).

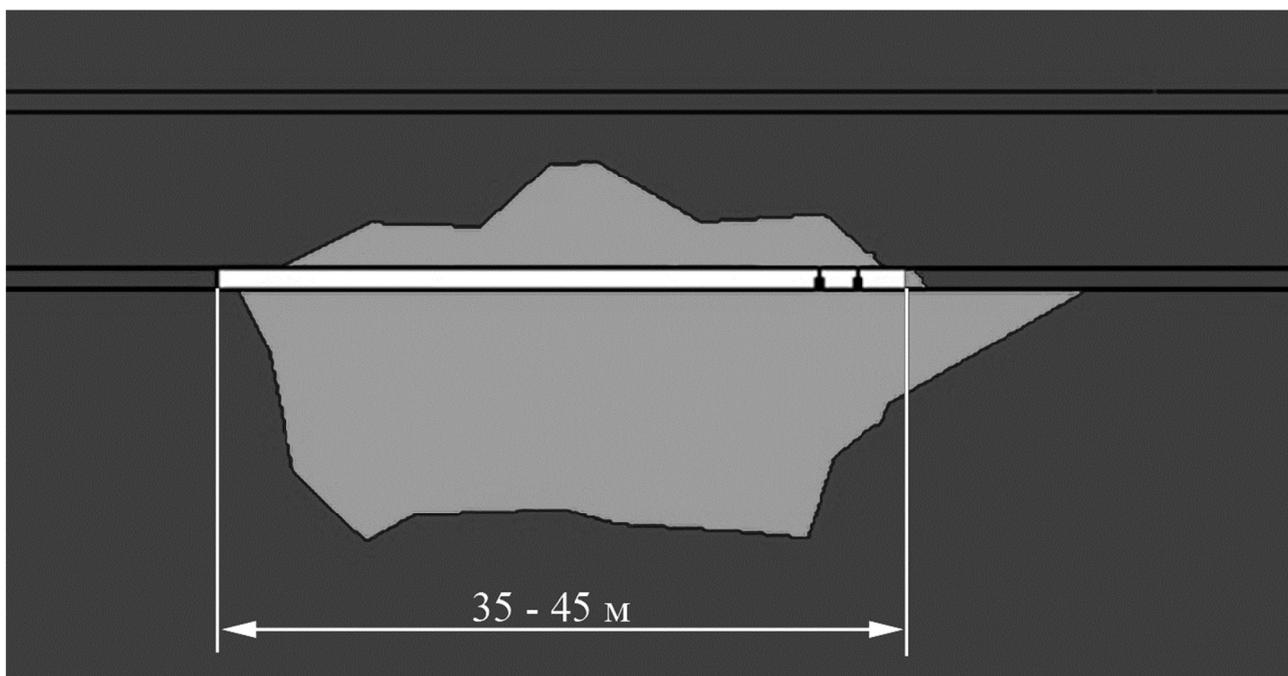


Рис. 3.16. Распределение зон предельного состояния горных пород при отходе лавы от разрезной печи $\Delta L = 35 - 45$ м

Далее до отметки 55 м непосредственная кровля обрушается вслед за передвижкой секций механизированной крепи. На момент отхода очистного забоя на расстояние 55 – 65 м, за линией посадочных стоек механизированной крепи и в месте проведения разрезной печи, на всю мощность слоя алевролита, расположенного над разрабатываемым пластом, развивается зона предельного состояния, что приводит к обрушению этого слоя в выработанное пространство, т.е. происходит так называемая посадка основной кровли пласта (рис. 3.17, светлым цветом показана область предельного состояния).

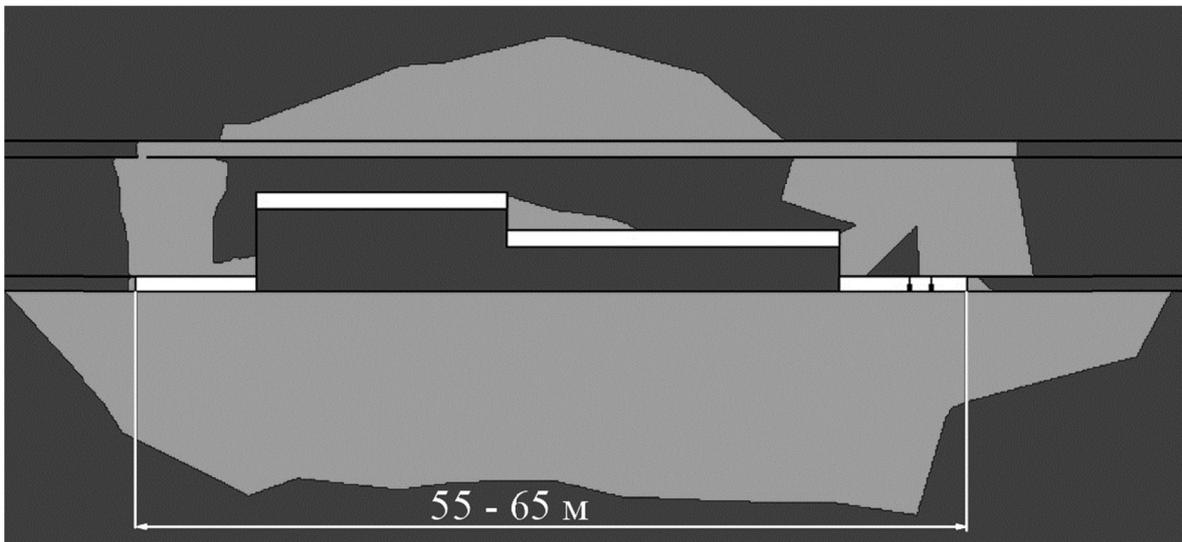


Рис. 3.17. Распределение зон предельного состояния горных пород при отходе лавы от разрезной печи $\Delta L = 55 - 65$ м

На отметке 65 – 75 м зона предельного состояния горных пород развивается по вертикали на высоту 40 м и включает в себя первые четыре слоя горных пород, расположенных над вынимаемым пластом. Причем обрушение всех этих слоев происходит приблизительно по линии постановки посадочного ряда стоек механизированной крепи, т.е. отсутствует консольное зависание пород, что и объясняет значительное уменьшение давления на крепь (рис. 3.18, светлым цветом показана область предельного состояния).

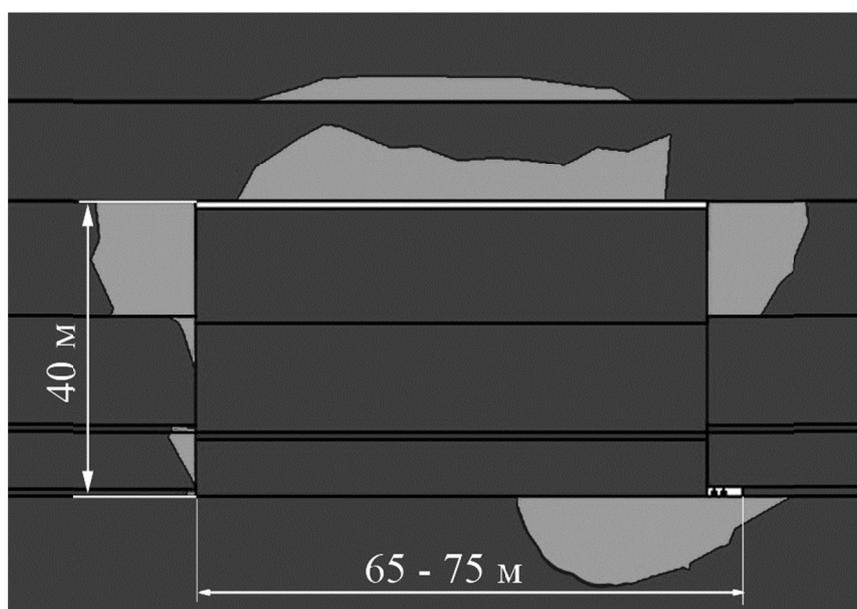


Рис. 3.18. Распределение зон предельного состояния горных пород при отходе лавы от разрезной печи $\Delta L = 65 - 75$ м

С отметки отхода 75 м наблюдается явно выраженная периодичность в формировании зон предельного состояния горных пород. При дальнейшем подвигании линии очистного забоя до положения 95 м имеет место консольное зависание пород кровли на всей протяженности 20-метрового отхода, за исключением нижней части первого от обрабатываемого пласта слоя алевролита мощностью 8 м. В этом слое происходит формирование зоны предельного состояния на высоту до трех вынимаемых мощностей на протяжении всего указанного отхода, т.е. имеет место обрушение непосредственной кровли вслед за передвижкой секций механизированной крепи. В промежутке между 95 – 105 м происходит отрыв зависшей консоли 5-метрового слоя алевролита. В этом же промежутке прекращается развитие зоны предельного состояния по вертикали. На этот момент максимальная высота этой зоны составляет 63 – 65 м, выше – происходит плавное опускание без нарушения сплошности, т.е. горные породы не достигают предельного состояния (рис. 3.19, светлым цветом показана область предельного состояния).

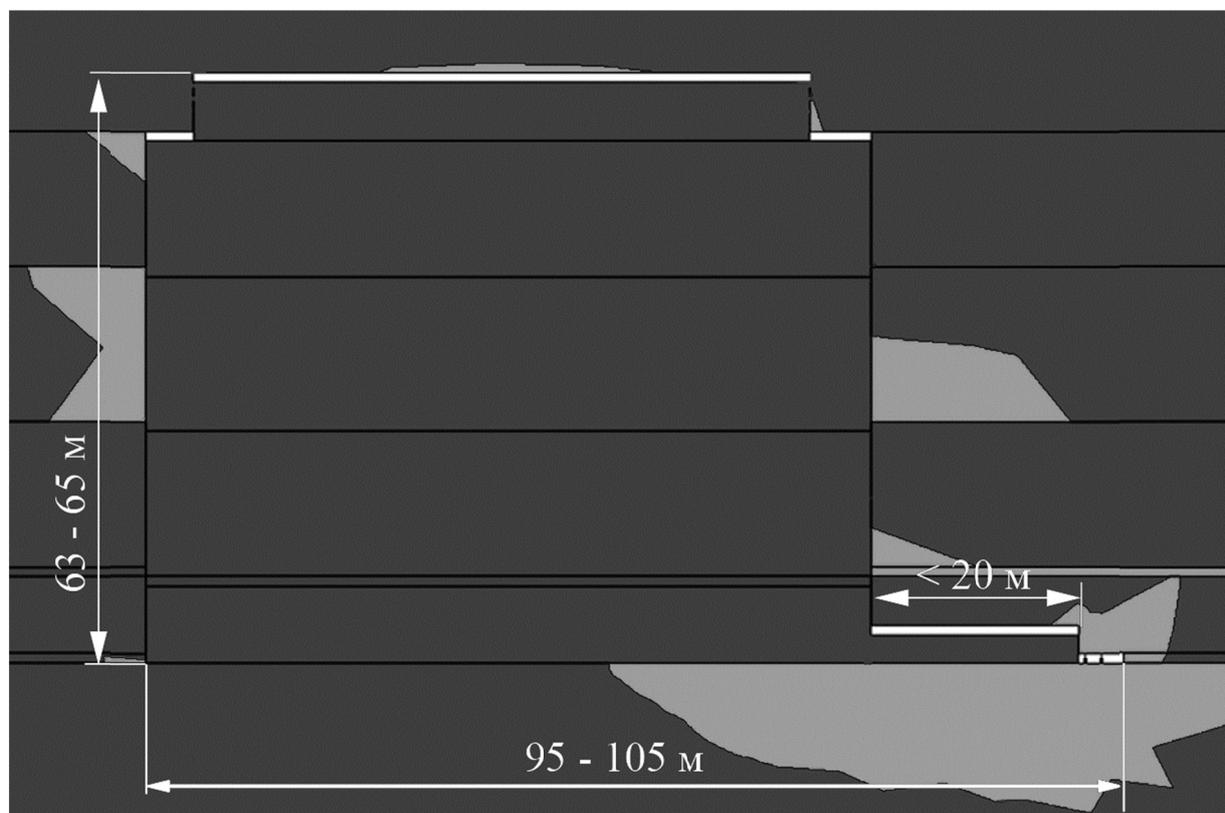


Рис. 3.19. Распределение зон предельного состояния горных пород при отходе лавы от разрезной печи $\Delta L = 95 - 105$ м

На отметке 115 – 125 м имеет место обрушение первых от разрабатываемого пласта четырех слоев общей мощностью 40 м. Между 125 – 135 м происходит переход в предельное состояние остальной части (23 – 25 м) горных пород, которые находятся в зоне потенциального обрушения (ниже отметки плавного прогиба). Из вышеперечисленного видно, что, начиная с отметки положения очистного забоя 75 м, обрушение консоли первого от пласта 8-метрового слоя алевролита происходит сначала с шагом до 20 м и далее без зависания вслед за передвижкой секций механизированной крепи до момента разгрузки призабойной части в результате отрыва консоли горных пород до высоты 40 м. Обрушение пластов до высоты 40 м происходит с шагом 40 – 50 м; до высоты отметки плавного прогиба (63 – 65 м) – с шагом 50 – 60 м. В почве, которая представлена аргиллитом мощностью 28 м, зона предельного состояния развивается вглубь пласта на расстояние, равное 10 – 14 вынимаемым мощностям и охватывает призабойную зону и часть выработанного пространства. Качественно и количественно такая картина сохраняется вдоль всего выемочного столба (рис. 3.20) [22].

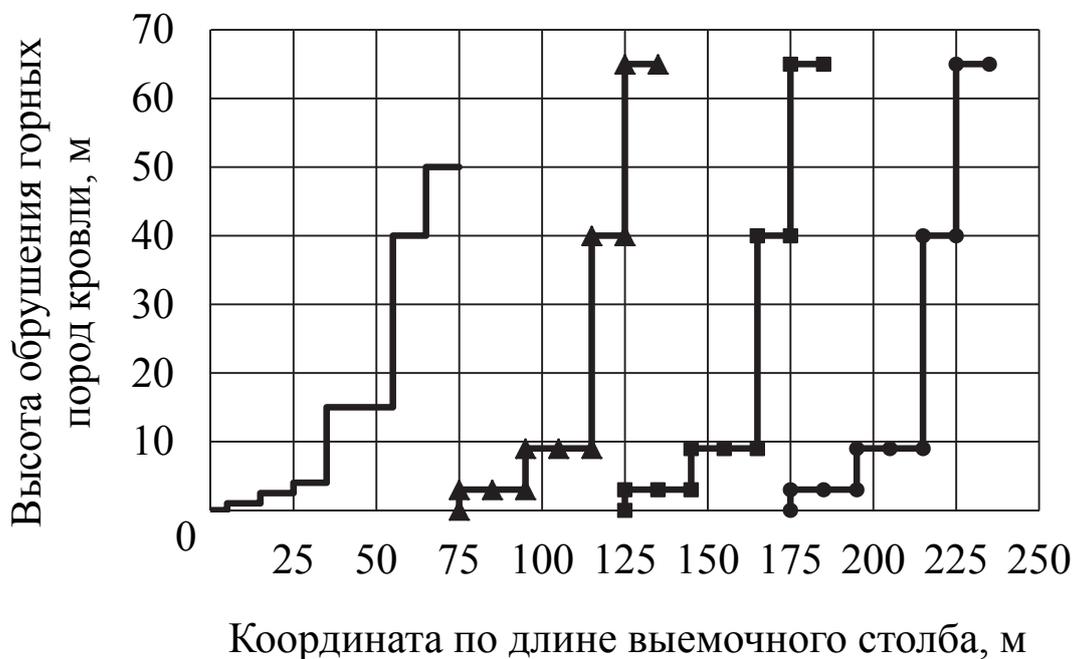


Рис. 3.20. Высота обрушения горных пород кровли по длине выемочного столба:

- до появления периодичности; ■ для периодичности $n = 2$;
- ▲ для периодичности $n = 1$; ● для периодичности $n = 3$

3.3.2. Определение величины конвергенции в лаве в зависимости от положения линии очистного забоя

Величина конвергенции в лаве в зависимости от положения очистного забоя вдоль выемочного столба является важным параметром, который позволяет определить запас раздвижности стойки механизированной крепи и оценить степень опасности посадки крепи на жесткое основание. Уравнения, описывающие функцию конвергенции горных пород на линии посадочного ряда стоек гидрофицированной крепи, приведены в табл. 3.2. Для удобства использования указанные зависимости были объединены в несколько групп.

В общем случае значение конвергенции можно определить по формуле

$$K = f(z) + П(z), \quad (3.1)$$

где $f(z)$ – закономерность опускания кровли по длине лавы для определенного положения очистного забоя;

$П(z)$ – закономерность поднятия почвы по длине лавы для определенного положения очистного забоя.

Закономерность распределения конвергенции имеет вид

$$f(z) = aZ^4 + bZ^2 + C, \quad (3.2)$$

где a, b, C – эмпирические коэффициенты, которые зависят от положения очистного забоя по длине выемочного столба.

Значение коэффициентов a, b, C в зависимости от величины отхода очистного забоя от разрезной печи представлены в табл. 3.4.

**Значение коэффициентов a , b , C в зависимости от положения
очистного забоя**

Положение забоя, м	a м^{-4}	b м^{-2}	C , м	Z , м
5	$3 \cdot 10^{-10}$	$-2 \cdot 10^{-6}$	0,007	[- 95; +95]
15	$8 \cdot 10^{-10}$	$-5 \cdot 10^{-6}$	0,056	
25	$4 \cdot 10^{-10}$	$-5 \cdot 10^{-6}$	0,105	
35	$-3 \cdot 10^{-10}$	$8 \cdot 10^{-7}$	0,217	
45	$1,45 \cdot 10^{-9}$	$-2 \cdot 10^{-5}$	0,296±13 %	
55				
65				
$S=0$	$2 \cdot 10^{-9}$	-10^{-5}	0,162±10 %	
$S=1$	$6 \cdot 10^{-10}$	$-1,2 \cdot 10^{-5}$	0,271±10 %	
$S=2$	$6 \cdot 10^{-10}$	$-1,8 \cdot 10^{-5}$	0,361±4 %	
$S=3$	$1,45 \cdot 10^{-9}$	$-2 \cdot 10^{-5}$	0,295±3 %	
$S=4$	$1,45 \cdot 10^{-9}$	$-2 \cdot 10^{-5}$	0,317±3 %	

Начиная с отметки 75 м, наблюдается явно выраженная периодичность, поэтому для определения функции конвергенции горных пород для произвольного положения очистного забоя вдоль выемочного столба необходимо определить параметр S , характеризующий положение лавы в пределах одного периода (рис. 3.21), который в свою очередь должен удовлетворять неравенству

$$4 \geq S = \frac{L - 75 - 50n}{10} \geq 0, \quad (3.3)$$

где L – произвольное положение очистного забоя, м, $L \in [75; L_{cm}]$;

L_{cm} – максимальная длина выемочного столба, м;

n – произвольный множитель (номер периода), который подбирается с тем условием, чтобы неравенство (3.3) выполнялось,

$n = 0, 1, 2, \dots, N$.

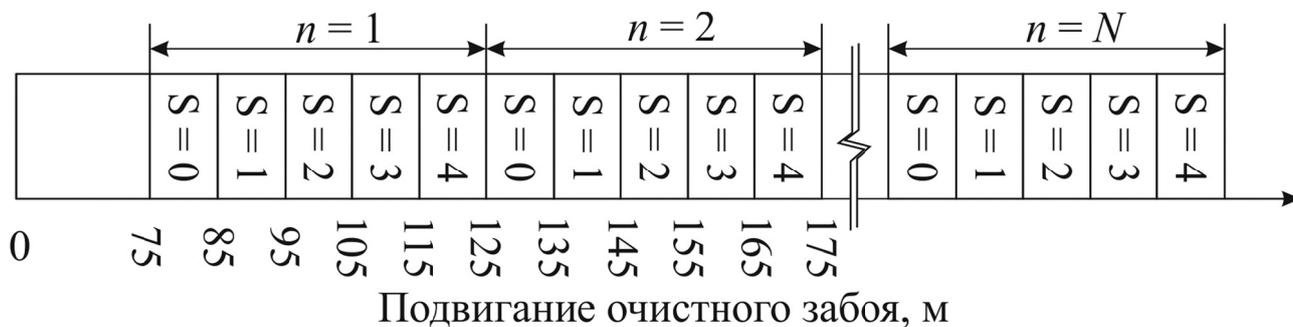


Рис. 3.21. Периодичность проявления горного давления по длине выемочного столба

Полученное значение параметра S округляется до ближайшего целого числа, затем по табл. 3.4 выбирается соответствующая функция распределения. Для получения более точных значений для промежуточных положений очистного забоя (шаг менее 10 м) необходимо вычислить значения функции в крайних точках заданного интервала и после этого методом линейной интерполяции определить величину конвергенции горных пород для интересующего промежуточного положения очистного забоя [24].

Как видно из табл. 3.4, до отметки положения очистного забоя 45 м функция конвергенции горных пород по длине лавы в каждом случае имеет различные коэффициенты. Необходимо отметить, что на самом деле, в силу большого порядка малости коэффициентов a и b , конечные значения будут немногим отличаться от значения параметра C (рис. 3.22 – 3.25).

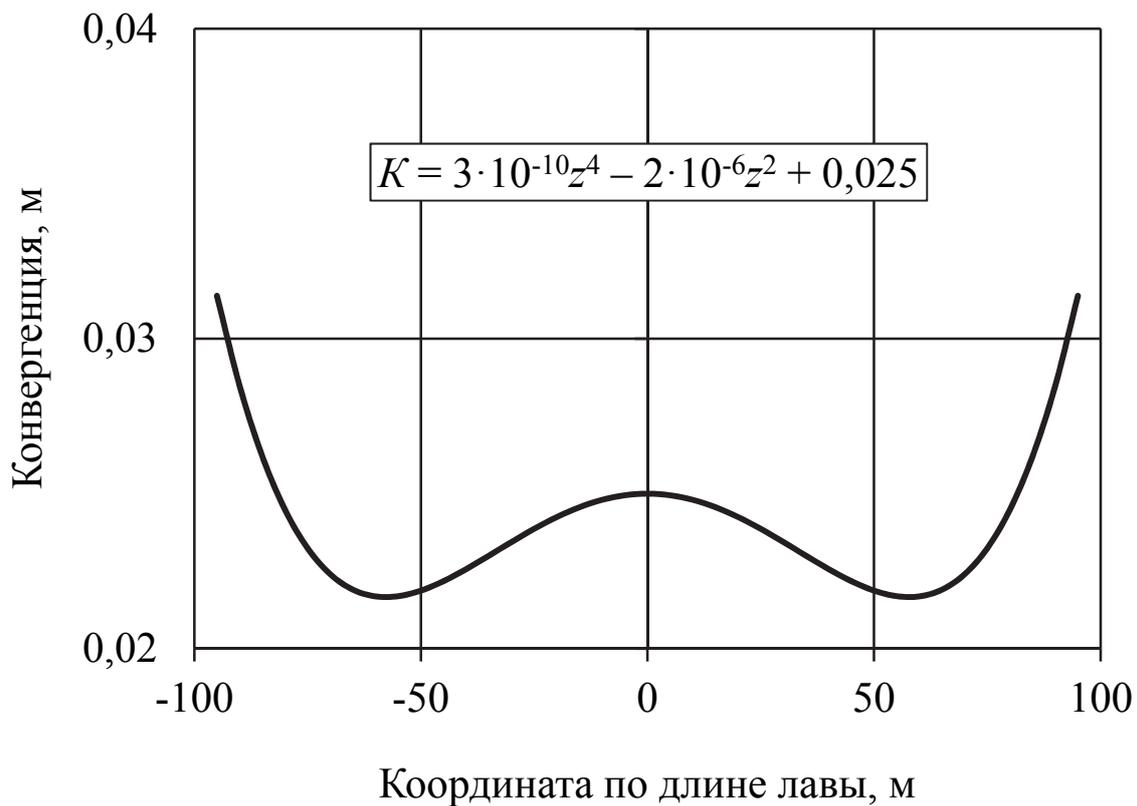


Рис. 3.22. Распределение конвергенции по длине лавы при отходе от разрезной печи $\Delta L = 5$ м

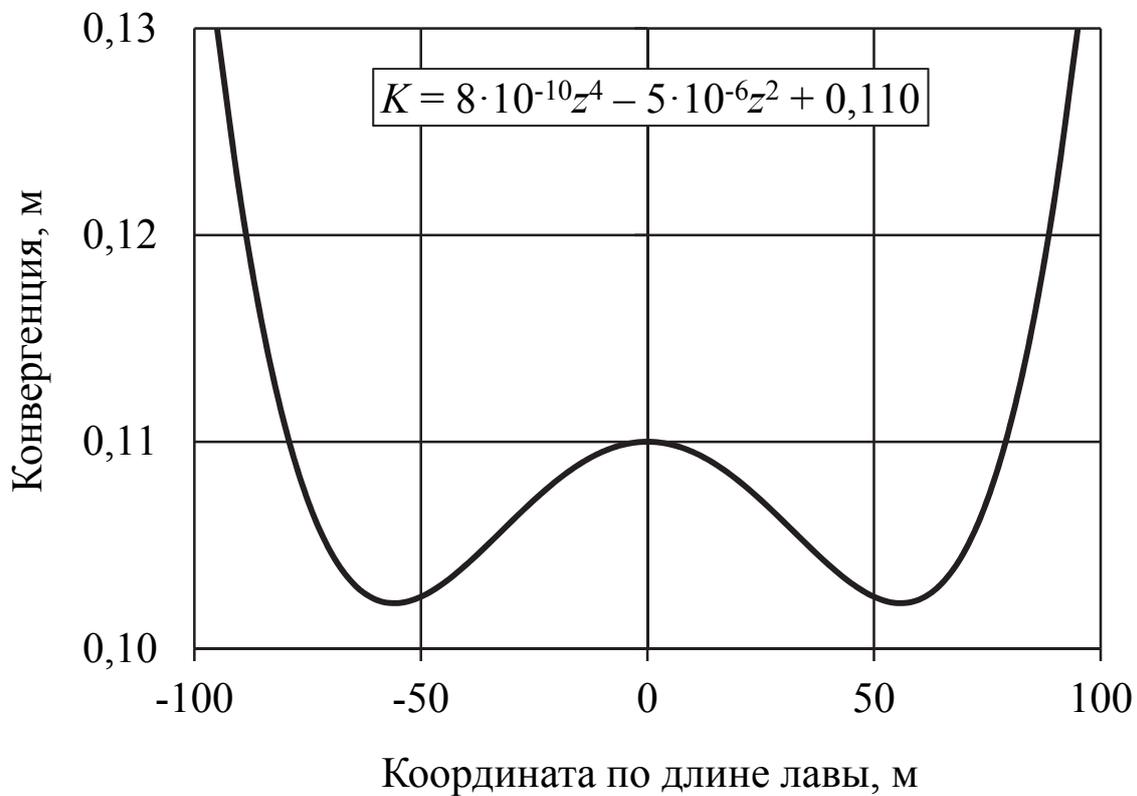


Рис. 3.23. Распределение конвергенции по длине лавы при отходе от разрезной печи $\Delta L = 15$ м

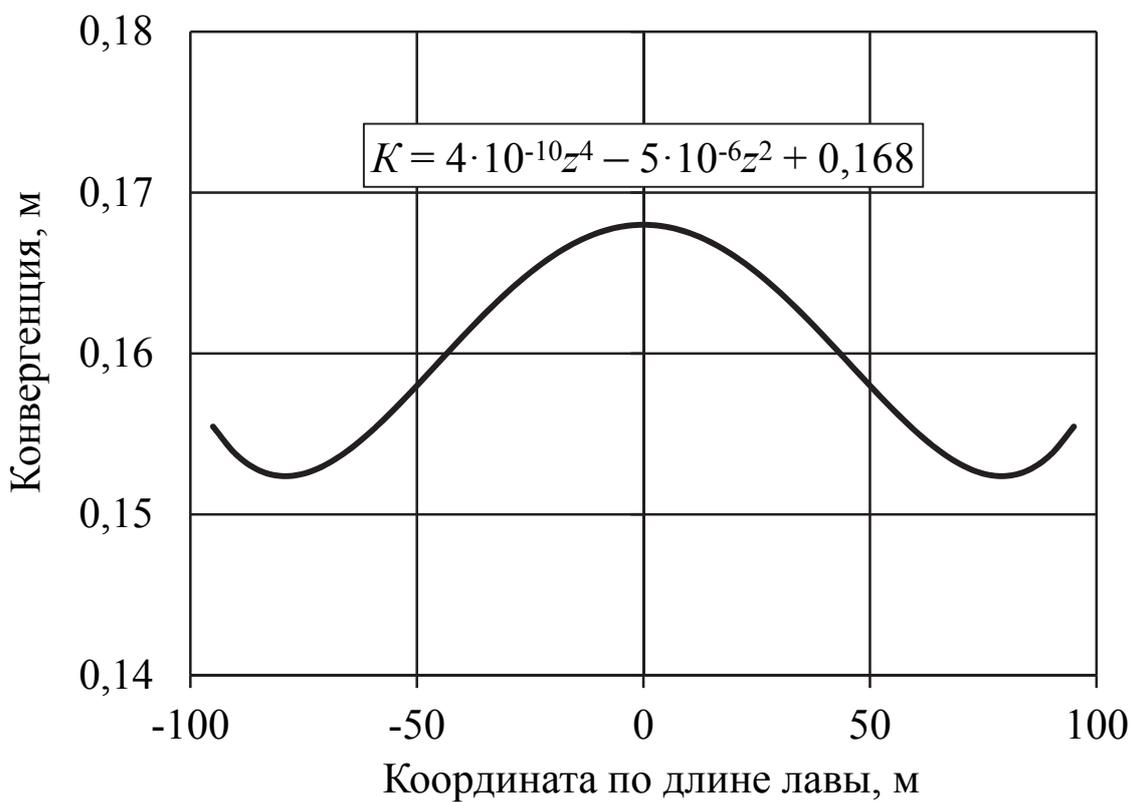


Рис. 3.24. Распределение конвергенции по длине лавы при отходе от разрезной печи $\Delta L = 25$ м

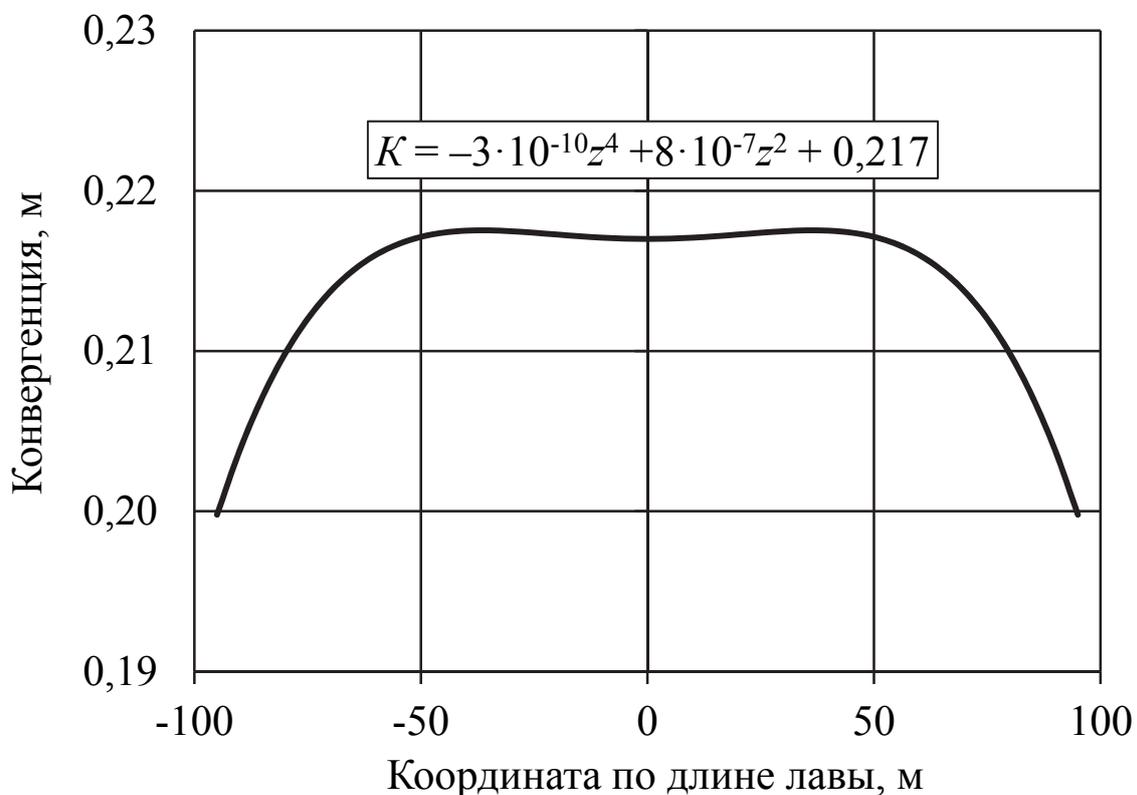


Рис. 3.25. Распределение конвергенции по длине лавы при отходе от разрезной печи $\Delta L = 35$ м

Конвергенция горных пород для положений 45 – 65 м описывается одной кривой с величиной разброса значений, не превышающих 13 % (рис. 3.26).

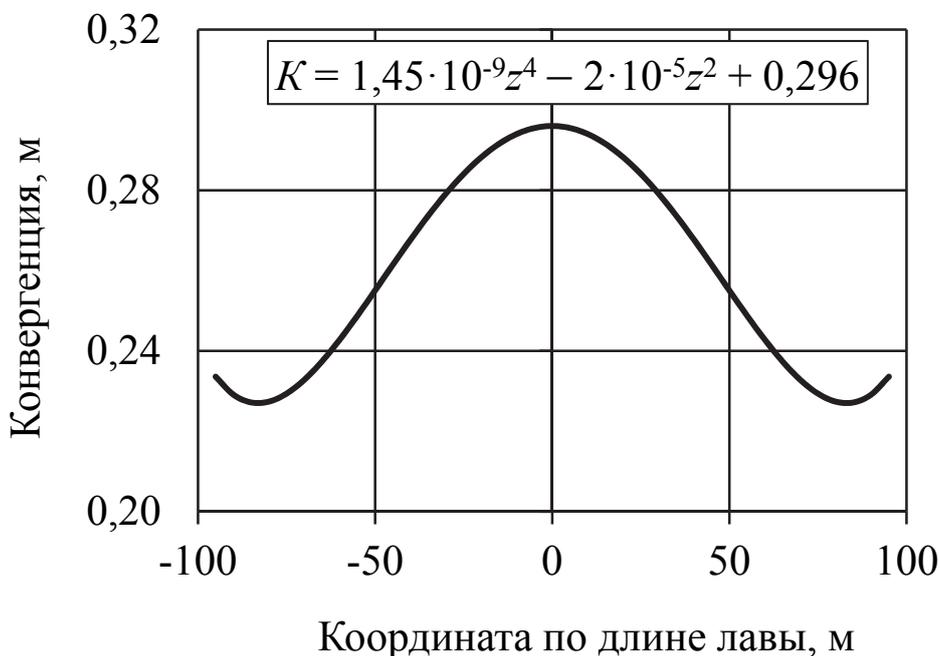


Рис. 3.26. Распределение конвергенции по длине лавы при отходе от разрезной печи $\Delta L = 45 - 65$ м

Графики распределения конвергенции по длине лавы для положений очистного забоя, в которых параметр $S = 0 \dots 4$, приведены на рис. 3.27 – 3.31.

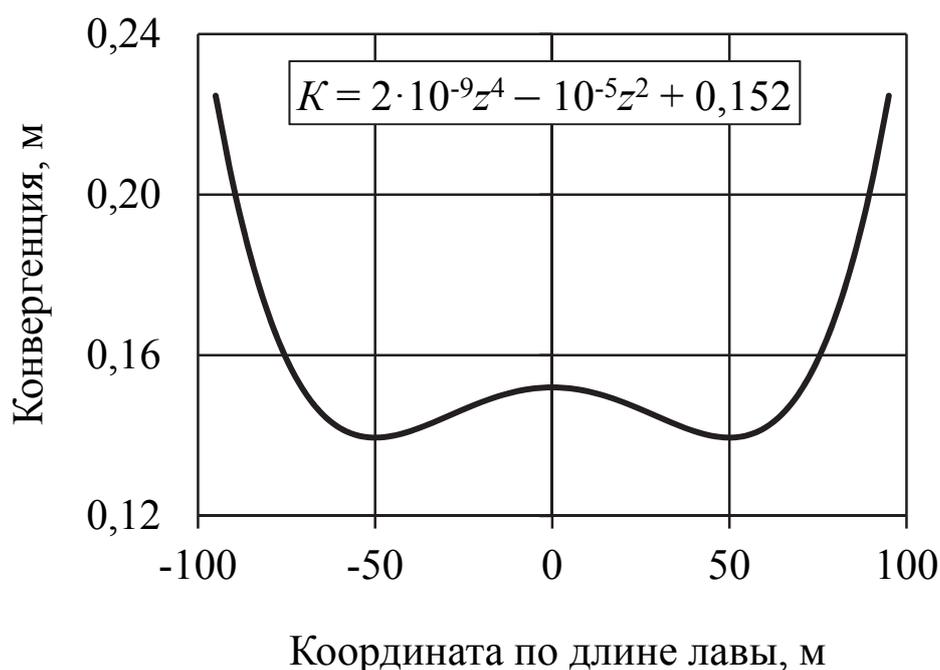


Рис. 3.27. Распределение конвергенции по длине лавы при $S = 0$

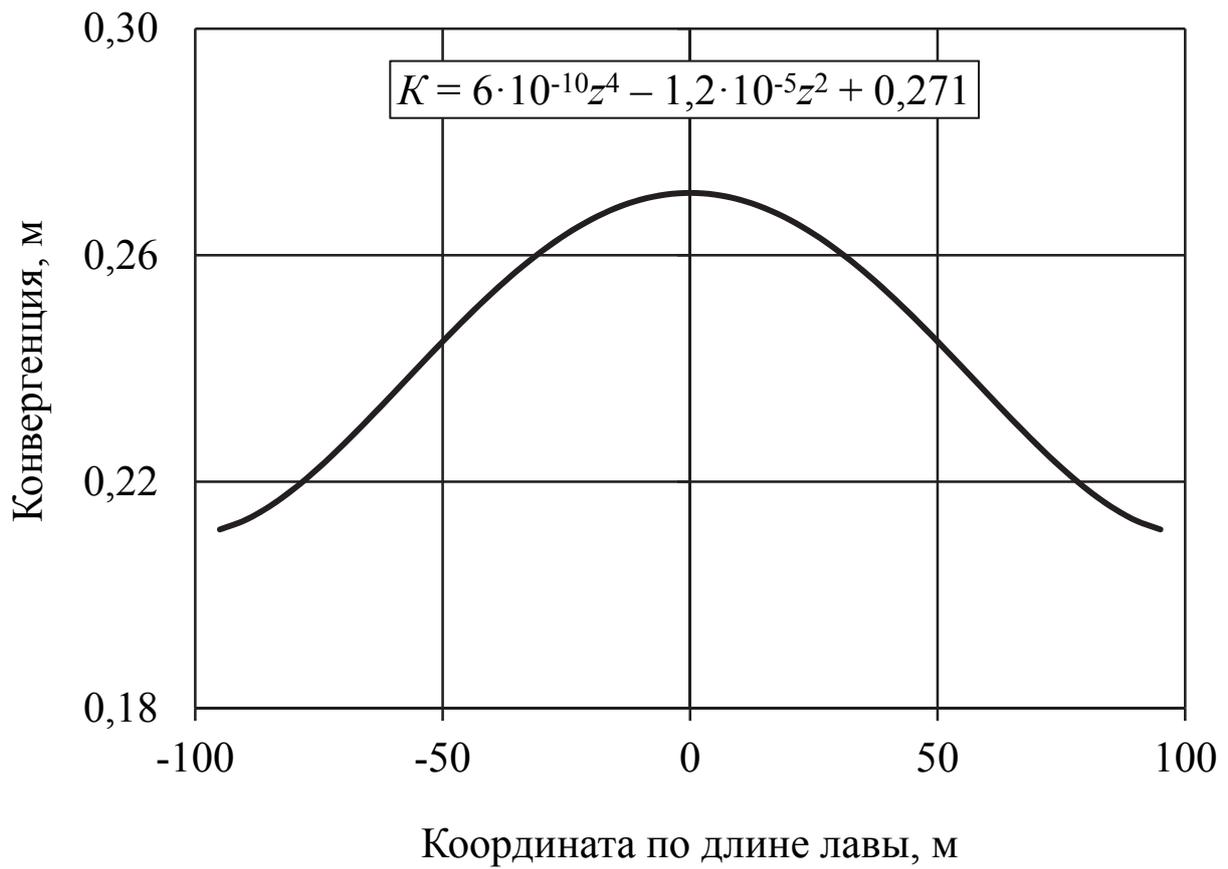


Рис. 3.28. Распределение конвергенции по длине лавы при $S = 1$

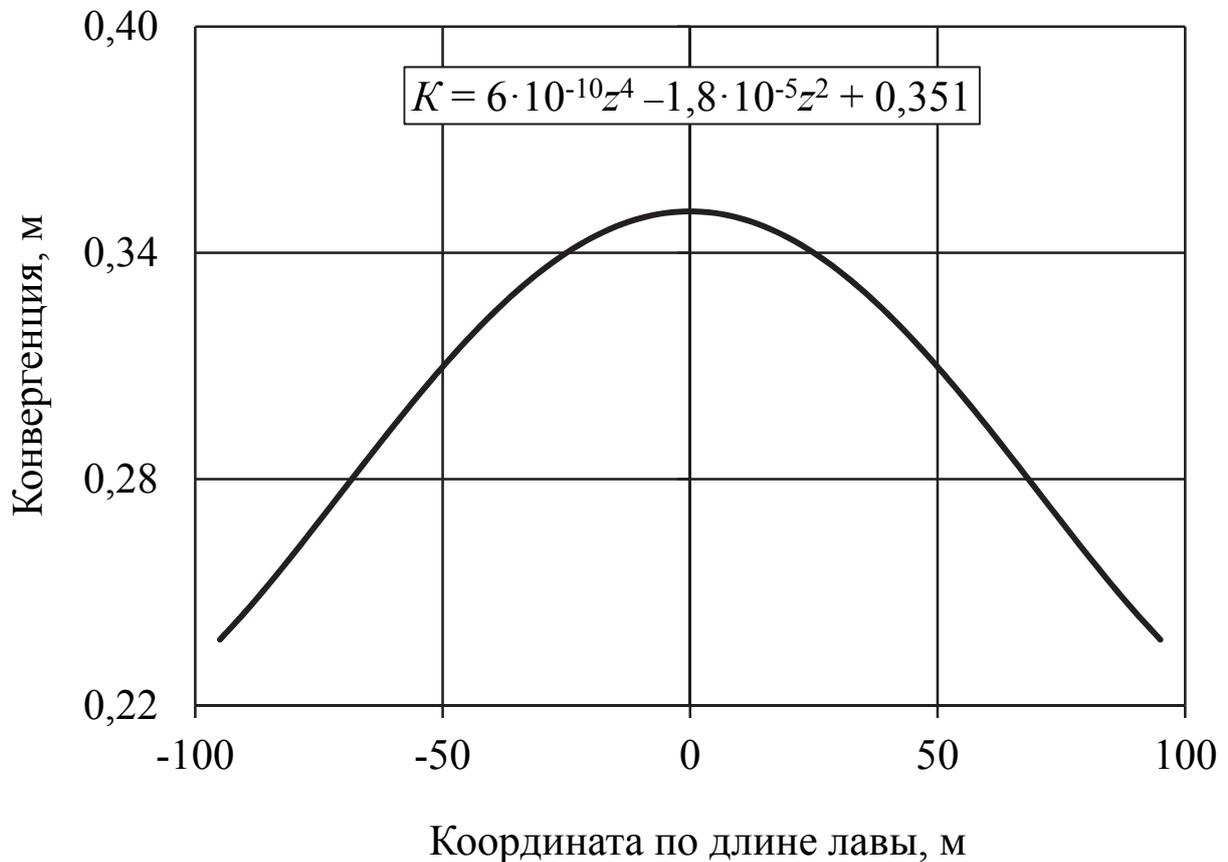


Рис. 3.29. Распределение конвергенции по длине лавы при $S = 2$

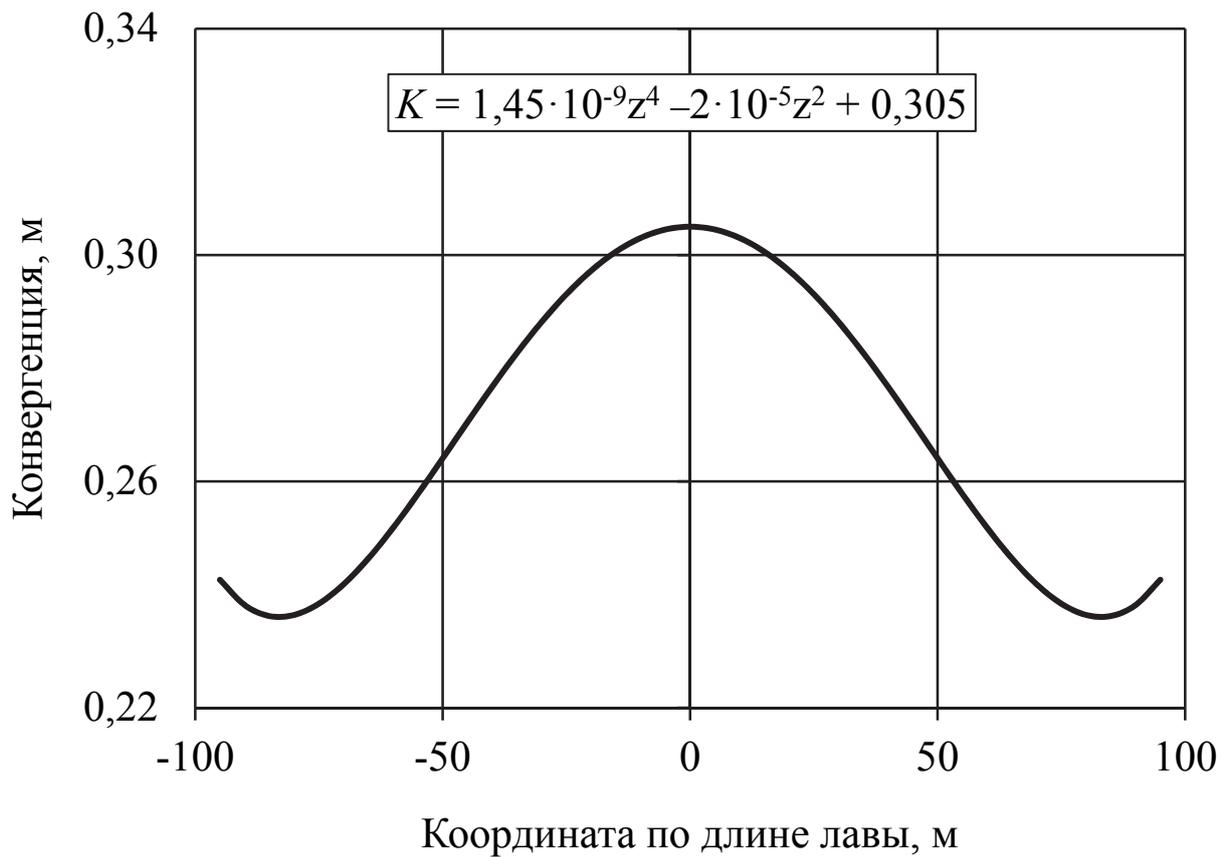


Рис. 3.30. Распределение конвергенции по длине лавы при $S = 3$

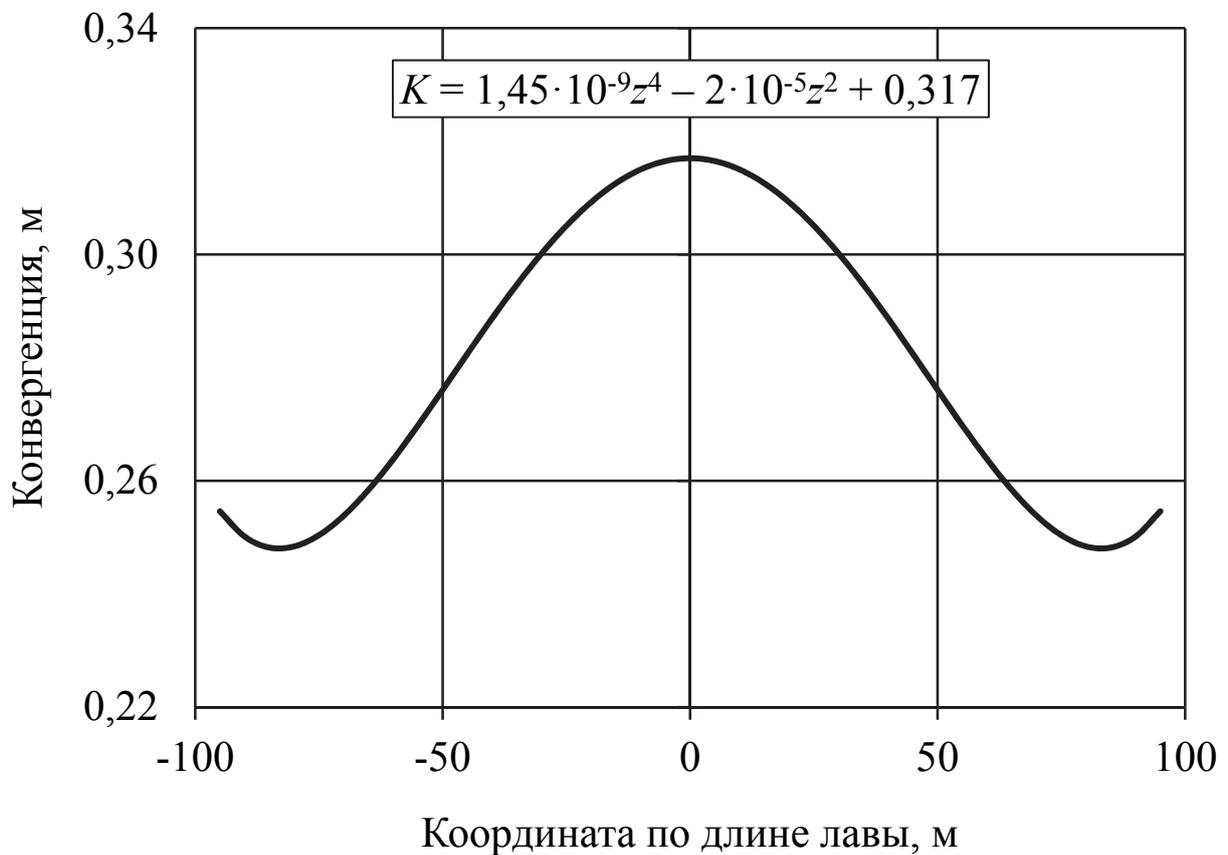


Рис. 3.31. Распределение конвергенции по длине лавы при $S = 4$

Объемный график изменения конвергенции горных пород на линии постановки посадочного ряда стоек механизированной крепи по длине выемочного столба показан на рис. 3.32.

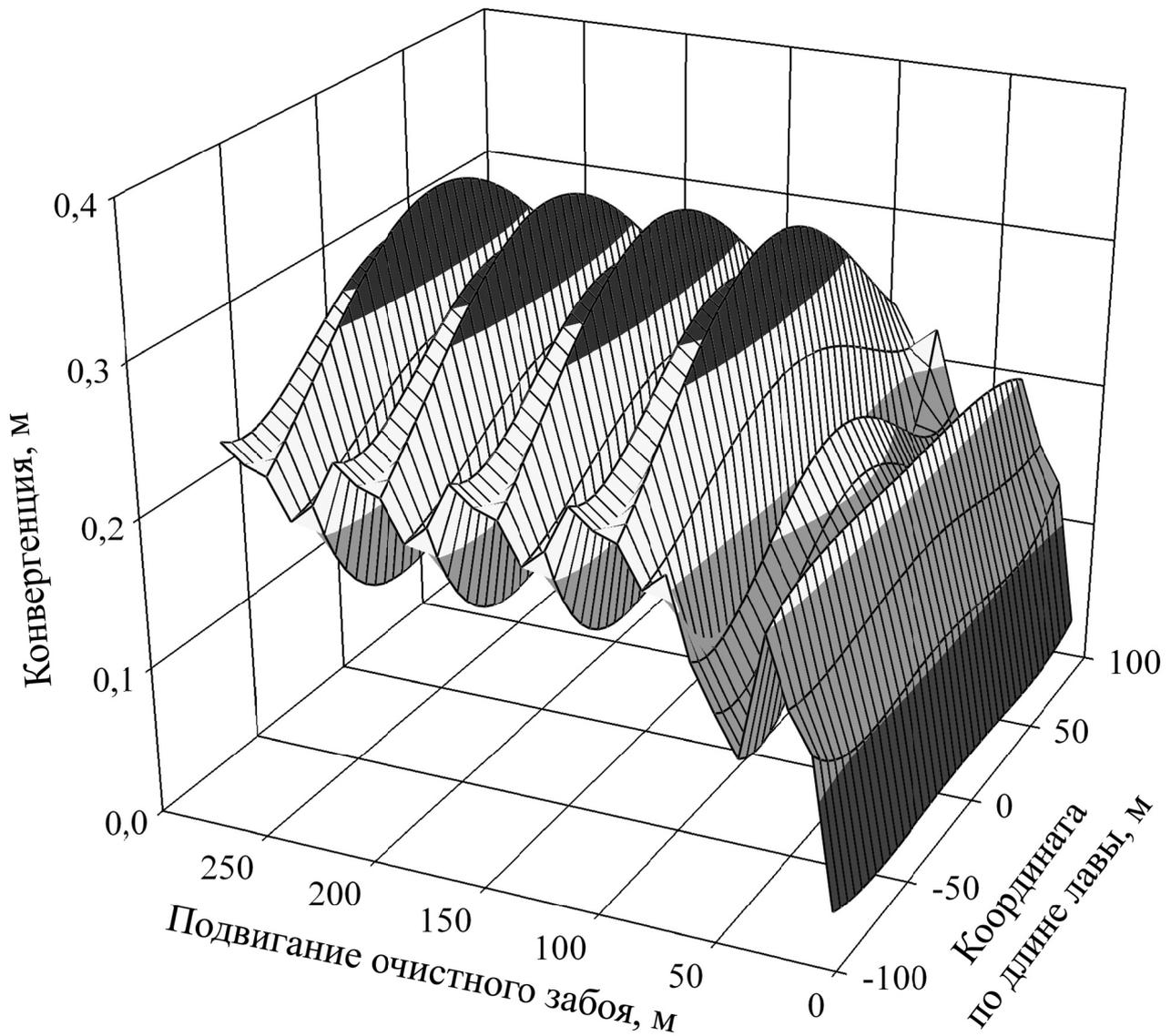
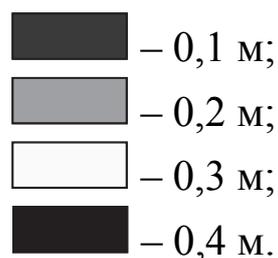


Рис. 3.32. Закономерность изменения конвергенции горных пород на линии постановки посадочного ряда стоек механизированной крепи по длине выемочного столба:



3.3.3. Распределение напряжений вокруг очистной выработки

Распределение напряженного состояния горных пород вокруг очистной выработки зависит от положения лавы вдоль выемочного столба и, очевидно, находится во взаимосвязи с механизмом обрушения, который изложен в п. 3.3.1. Это означает, что качественно и количественно картина распределения напряжений в пласте как вдоль лавы, так и вдоль выемочного столба будет изменяться в зависимости от наличия и размеров зависания горных пород в выработанном пространстве.

Обработка результатов моделирования показала, что в общем случае зависимость изменения напряжений по длине выемочного столба можно представить в виде

$$\sigma_y = (F(z;L) - P_0)e^{-kX} + P_0, X \in [0; L_{cm}], \quad (3.4)$$

- где σ_y – вертикальная составляющая горного давления, МПа;
 $F(z; L)$ – функция распределения вертикальной составляющей горного давления на плоскости забоя по длине лавы z в зависимости от положения очистного забоя вдоль выемочного столба L , МПа;
 P_0 – вертикальная составляющая горного давления в нетронутым массиве на данной глубине ведения очистных работ, МПа;
 k – показатель затухания напряжений по длине выемочного столба, m^{-1} ;
 X – значение в метрах на координатной оси, направленной по длине выемочного столба, $X \in [0; L_{cm}]$, значение $X = 0$ соответствует плоскости очистного забоя;
 L_{cm} – максимальная длина выемочного столба, м.

Вертикальная составляющая горного давления в нетронутым массиве для данной глубины ведения очистных работ определяется исходя из геостатической теории горного давления, которая в условиях Западного Донбасса хорошо подтверждается опытом ведения горных работ:

$$P_0 = \sum_{i=1}^n \gamma_i H_i, \text{ МПа,}$$

где γ_i – объемный вес i -той горной породы, МН/м³;

H_i – мощность слоя i -той горной породы, м.

Функция $F(z; L)$ в промежутке $z \in [-85; +85]$ (длина лавы представляет собой промежуток $[-95; +95]$) описывается прямой линией, которая параллельна оси абсцисс, с разбросом значений, не превышающим 10 %, т.е. в указанном промежутке вертикальная составляющая горного давления по длине лавы практически не изменяется. Поэтому функция распределения вертикальной составляющей горного давления на плоскости забоя по длине лавы z зависит только от положения очистного забоя вдоль выемочного столба L .

Численные значения параметров, входящих в формулу (3.4), для условий отработки пласта C_8^H на шахте "Западно-Донбасская" ОАО "Павлоградуголь" составляют: $P_0 = 11,0$ МПа; $k = 0,15$; значения функции $F(z; L)$ в промежутке $z \in [-85; +85]$ представлены в табл. 3.5.

Таблица 3.5

**Значение функции $F(z; L)$ в промежутке $z \in [-85; +85]$
в зависимости от положения очистного забоя**

Отход от разрезной печи, м	$F(L)$, МПа	Величина вариации по длине лавы, %
1	2	3
5	15	±6,6
15	21	±5,0
25	28	±10,0
35	36	±10,0
45	40	±7,2

Продолжение табл. 3.5

1	2	3
55	42	±10,0
65	45	±4,5
*S = 0	30	±6,6
S = 1	40	±5,0
S = 2	45	±10,0
S = 3		
S = 4		

*Значение параметра S определяется по формуле (3.3).

Однако принимая во внимание объемное напряженное состояние и коэффициент структурного ослабления горного массива, согласно теории предельных напряженных состояний (теория прочности Мора-Кулона), переход призабойной части угольного пласта в предельное состояние происходит при достижении вертикальной составляющей горного давления $F(L)$ предельного значения, равного σ_y^{np} . При соблюдении условия $F(L) \geq \sigma_y^{np}$ протяженность предельной области X_0 , считая от плоскости забоя вглубь массива вдоль выемочного столба, можно найти, выразив из формулы (3.4) значение X и приняв $\sigma_y = \sigma_y^{np}$:

$$X_0 = \frac{1}{k} \ln \frac{F(z; L) - P_0}{\sigma_y^{np} - P_0}, \text{ м.} \quad (3.5)$$

С учетом формулы (3.5) формула (3.4) для случая $F(L) \geq \sigma_y^{np}$ примет вид

$$\sigma_y = (\sigma_y^{np} - P_0)e^{-k(X - X_0)} + P_0, \quad X \in [X_0; L_{cm}]. \quad (3.6)$$

На границе перехода из области предельного состояния в область допустимых нагрузок находится максимум опорного горного давления впереди очистного забоя. Соответственно расстояние от плоскости забоя до этого максимума находится по формуле (3.5), а из

формулы (3.6) видно, что по абсолютному значению максимум опорного горного давления впереди очистного забоя не может превышать предельно допустимого напряжения, которое возможно для данного напряженно-деформированного состояния горного массива. На плоскости забоя, в случае наличия в призабойной части угольного массива предельной области, вертикальная составляющая горного давления будет приблизительно равняться пределу прочности на одноосное сжатие угольного пласта в массиве с учетом его трещиноватости, неоднородности и частичной нарушенности. Согласно [125] для таких зон и сильно трещиноватых массивов коэффициент структурного ослабления находится в пределах 0,1 – 0,3 (большее значение соответствует нормальносекущей трещиноватости, меньшее – кососекущей).

Для рассматриваемых горно-геологических условий согласно методике, изложенной в [5, 6], был построен паспорт прочности для угля (пласт С^н₈). Для диапазона напряжений, которые действуют в горизонтальной плоскости в призабойной части угольного пласта, предельная величина вертикальной составляющей горного давления σ^{np}_y составила 30 – 36 МПа. Обеспечивая 10 % точность расчета, значение σ^{np}_y можно принять равным 33 МПа. Тогда, согласно данным табл. 3.5 и формулы (3.4), положение максимума опорного давления будет изменяться от 0 до 4,5 м от плоскости обнажения вглубь массива в зависимости от положения очистного забоя вдоль выемочного столба. Абсолютное значение максимума составит 33 МПа, что приблизительно равно $3P_0$. Графические зависимости распределения напряжений вдоль выемочного столба для участка лавы, который входит в промежуток [– 85; +85], приведены на рис. 3.33 – 3.36.

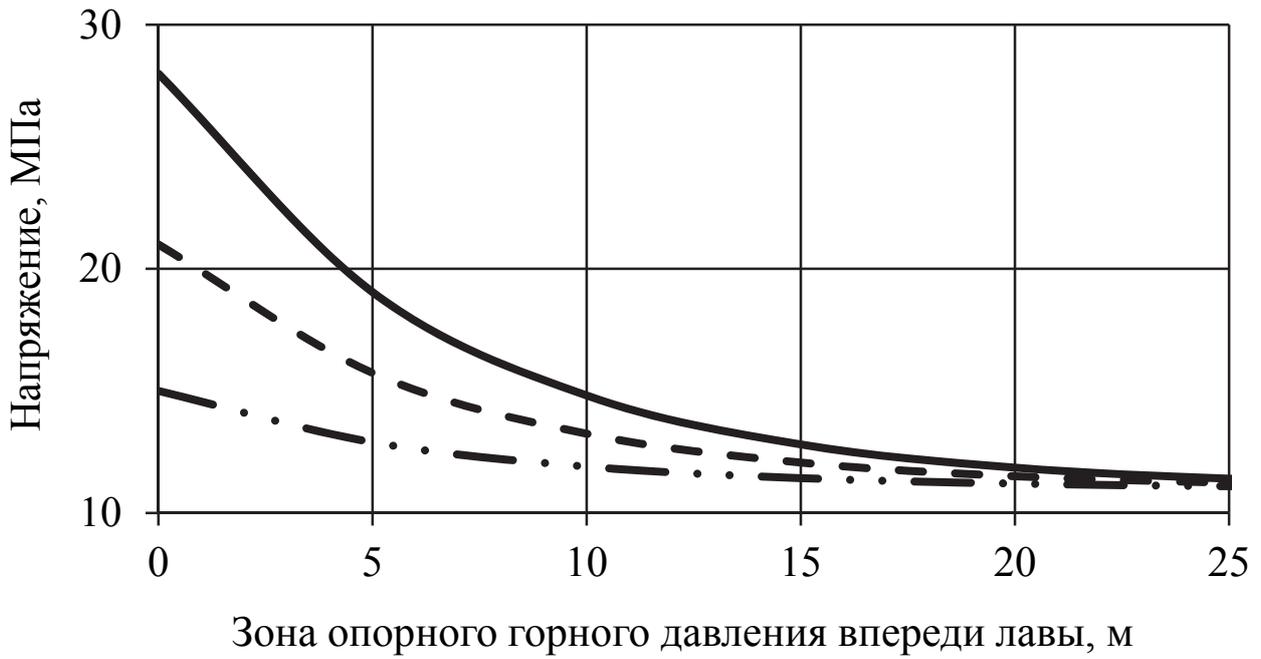


Рис. 3.33. Распределение вертикальной составляющей горного давления в пласте при отходе лавы от разрезной печи $\Delta L = 5 - 25$ м:
 - · · - отход лавы 5 м; - - отход лавы 15 м; — отход лавы 25 м.

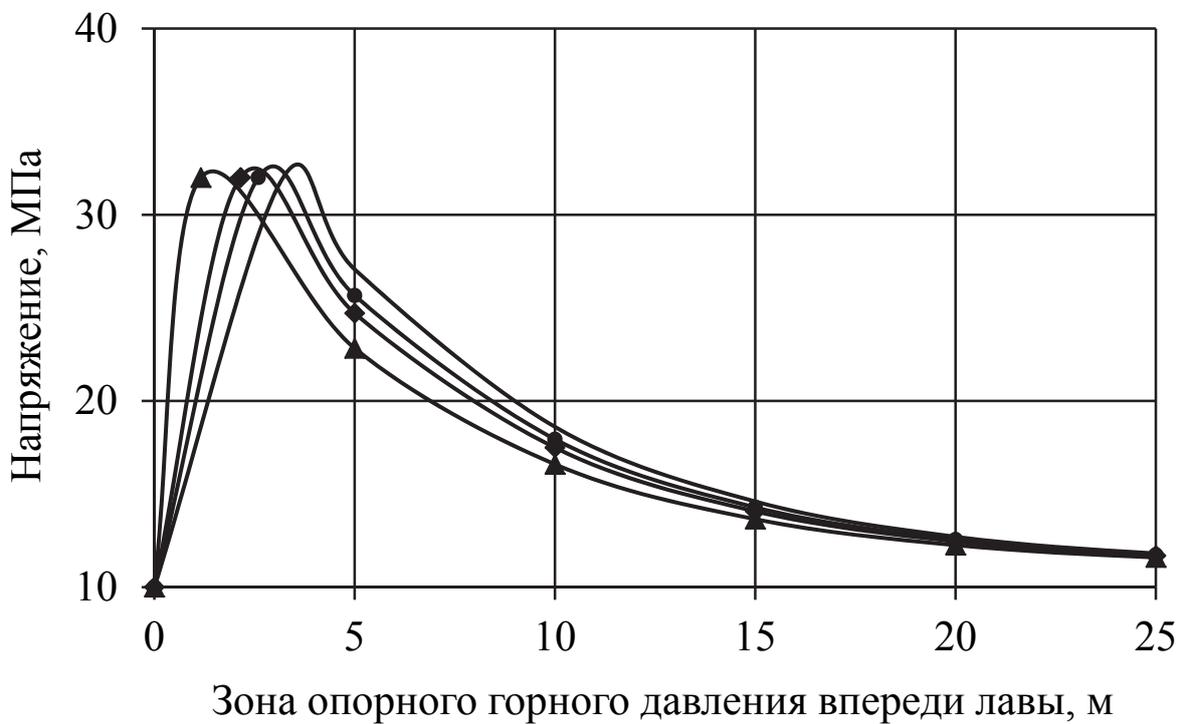


Рис. 3.34. Распределение вертикальной составляющей горного давления в пласте при отходе лавы от разрезной печи $\Delta L = 35 - 65$ м:
 —▲— отход лавы 35 м; —◆— отход лавы 45 м;
 —●— отход лавы 55 м; — отход лавы 65 м.

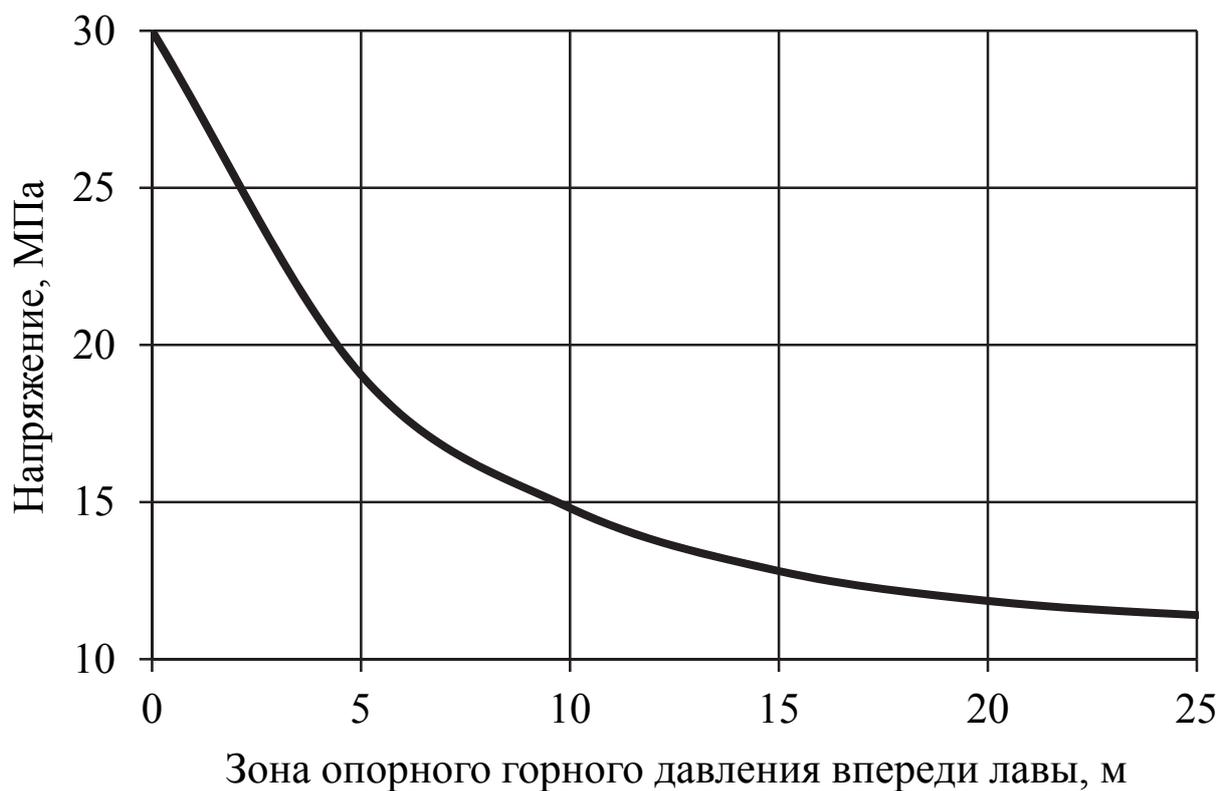


Рис. 3.35. Распределение вертикальной составляющей горного давления в пласте при $S = 0$

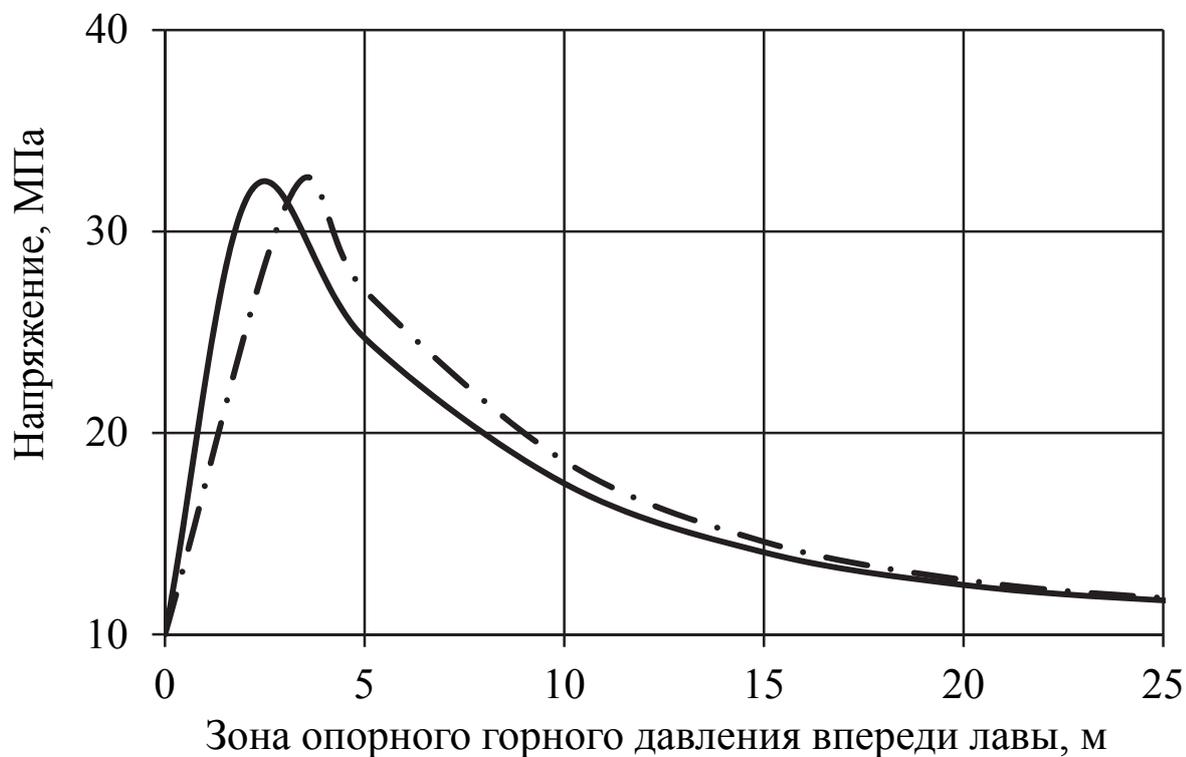


Рис. 3.36. Распределение вертикальной составляющей горного давления в пласте при $S = 1 \dots 4$:
 — отход лавы $S = 1$; - · - отход лавы $S = 2 \dots 4$.

Из рис. 3.33 – 3.36 видно, что начиная с отметки отхода лавы от разрезной печи 35 м максимум горного давления практически постоянно располагается в массиве на расстоянии 1,2 – 4,5 м от плоскости очистного забоя. Исключением являются положения лавы, для которых $S = 0$. Необходимо отметить, что при переходе в положение $S = 0$ имеет место переходная зона длиной 3,5 – 4,5 м, в которой максимум по мере подвигания лавы перемещается к плоскости забоя. После прохождения этой зоны распределение напряжений в пласте соответствует закономерности, показанной на рис. 3.35.

В промежутках по длине лавы $z \in [-95; -85)$ и $(+85; +95]$, т.е. на расстоянии до 10 м от выемочных штреков, в пласте наблюдается несколько иная картина распределения напряжений и перемещений. Для положения линии очистного забоя до 15 – 25 м от разрезной печи вертикальная составляющая горного давления на плоскости забоя изменяется от 11,0 до 19,0 МПа. Начиная с отметки отхода 25 – 35 м напряжение в плоскости забоя практически не зависит от положения лавы вдоль выемочного столба и составляет $24,0 \text{ МПа} \pm 10 \%$ [158]. Исключением являются положения забоя, для которых параметр $S = 0$. Для таких случаев напряжение на плоскости забоя равняется $18,0 \text{ МПа} \pm 10 \%$. Графики распределения напряжений в пласте угля на концевых 10 м участках лавы в зависимости от положения очистного забоя вдоль выемочного столба приведены на рис. 3.37.

Как видно из рис. 3.37, на расстоянии 6 – 8 м от линии очистного забоя вглубь массива на концевых 10-метровых участках лавы наблюдается зона разгрузки, в которой вертикальная составляющая горного давления находится в пределах $0,7 - 0,75P_0$. По протяженности эта зона занимает расстояние равное 60 – 65 м. Это явление объясняется совместным влиянием очистной и подготовительной выработок на краевые участки пласта. По своим деформационным свойствам в направлении действия вертикальной составляющей горного давления уголь в 4 раза превосходит аргиллит, который залегает в почве пласта. Поэтому в указанной области происходит интенсивное "вдавливание" угольного пласта в почву, что вызывает значительное поднятие (пучение) горных пород почвы в сечении штрека.

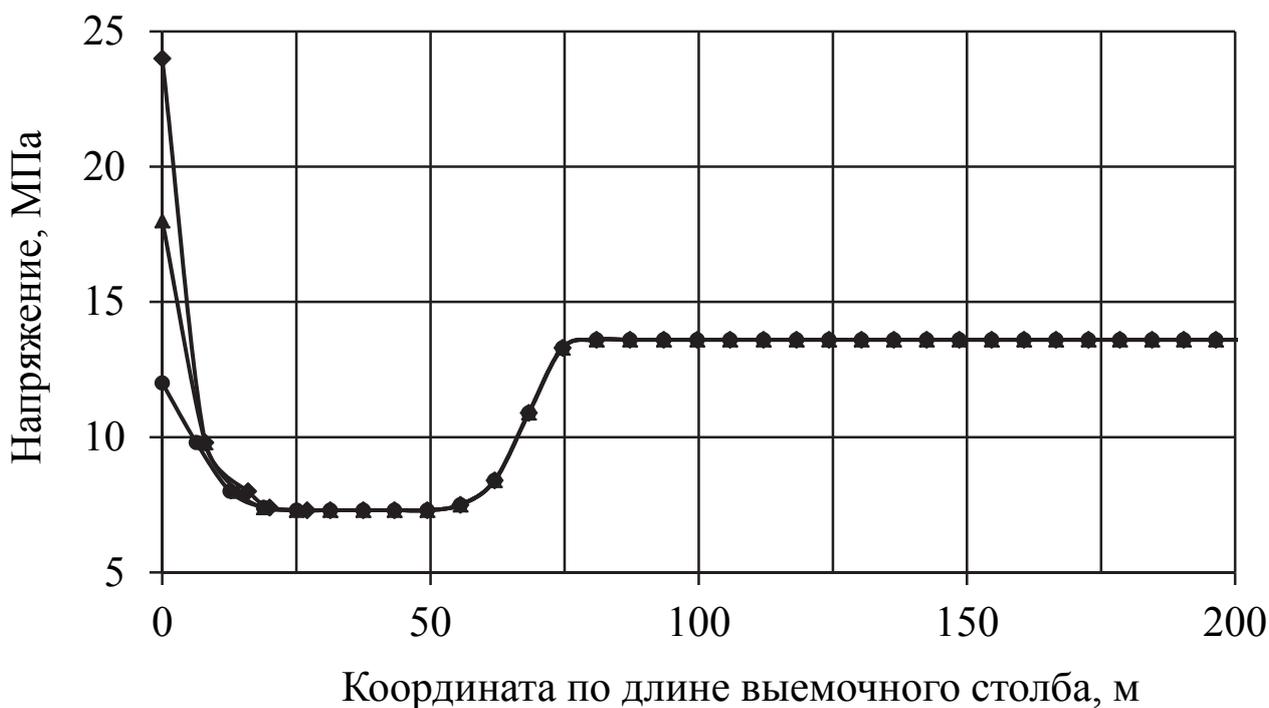


Рис. 3.37. Распределение вертикальной составляющей горного давления в пласте на концевых 10 м участках лавы:

- — отход лавы до 15 м;
- ◆ — отход лавы более 25 м;
- ▲ — для положения лавы $S = 0$

Согласно результатам моделирования величина пучения почвы в створе с лавой для отхода очистного забоя до 45 м составляет 0,05 – 0,30 м, для последующих положений – 0,40 – 0,50 м. Результаты, полученные при моделировании, хорошо согласуются и подтверждаются опытом отработки лав на пласте C^H_8 в условиях шахты "Западно-Донбасская". В натуральных условиях пучение почвы в подготовительных выработках 874-й лавы составляло 0,40 – 0,60 м. Как и в реальных условиях, в используемой модели горного массива каждый предыдущий слой горных пород является упругим основанием для каждого последующего. При определенном соотношении деформационных свойств этих слоев разгрузка краевых частей лавы от горного давления может происходить различными способами. Так, в рассматриваемых условиях энергия, запасенная краевым участком упругодеформированного пласта, перешла в работу по выдавливанию пород почвы в полость подготовительной выработки. Этим и объясняется наличие зоны разгрузки в угольном пласте вдоль штрека. Мак-

симальная величина пучения почвы наблюдается в створе с лавой, минимальная – на границе совместного влияния очистного забоя и подготовительной выработки, т.е. на расстоянии 65 – 70 м от линии забоя впереди лавы и составляет 0,05 – 0,10 м. Далее наблюдается зона влияния только подготовительной выработки. Вдоль всей длины выемочного штрека, начиная с отметки 65 – 70 м от плоскости очистного забоя на ширину до 10 м, по бокам выработки тянется область повышенных напряжений, вызванных наличием самой полости выработки. В этой области вертикальная составляющая горного давления находится в пределах $1,25 - 1,35P_0$.

Также на концевых участках лавы на расстоянии 4 – 6 м от штрека и на расстоянии до 10 м вглубь отрабатываемого столба от плоскости забоя, в зоне совместного влияния очистной и подготовительной выработок имеет место наличие касательных напряжений, абсолютные значения которых в пласте и в кровле пласта, представленной алевролитом мощностью 8 м, соизмеримы с пределом прочности горной породы на сдвиг (рис. 3.38).

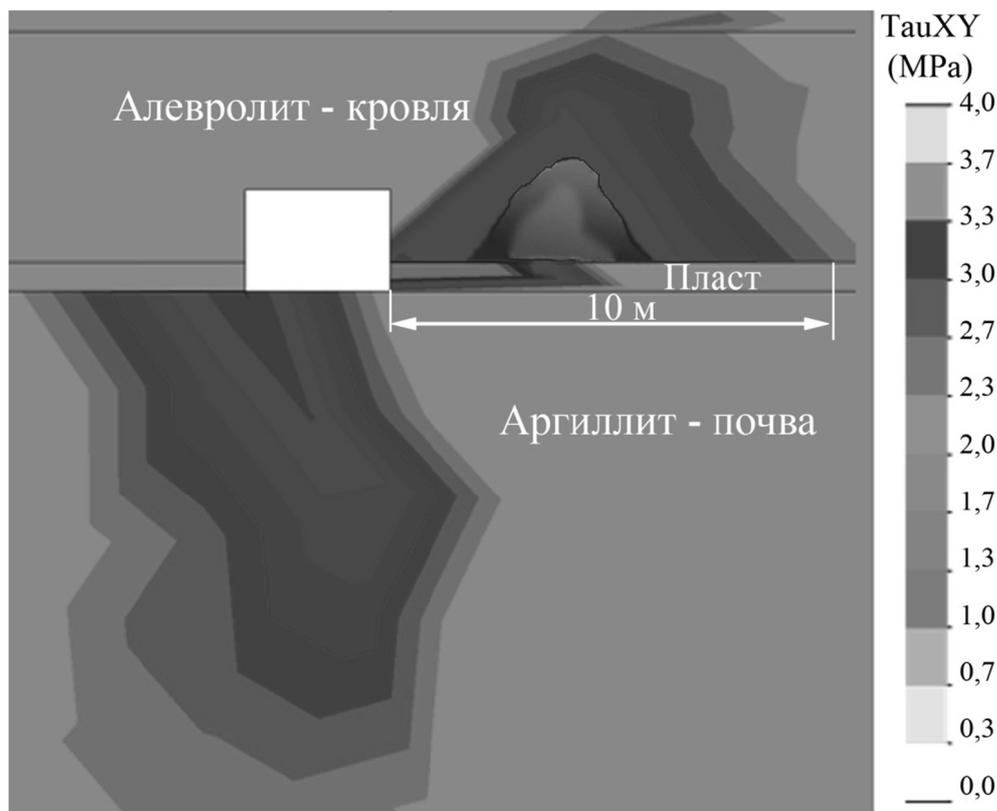


Рис. 3.38. Распределение касательных напряжений на концевых участках лавы

В указанной области действия касательных напряжений возможен разрыв сплошности горной породы. Натурные исследования, проводимые в 874-й лаве, подтверждают наличие секущих трещин как в пласте, так и в кровле. Эти трещины и заколы располагались параллельно оси выемочного штрека на расстоянии 5 – 8 м от подготовительной выработки, причем свое начало они явно брали в массиве горных пород, расположенном впереди очистного забоя.

Полученные в ходе моделирования результаты, хорошо согласуются и подтверждаются натурными исследованиями распределения напряженно-деформированного состояния горных пород вокруг очистной выработки. Это означает, что применяемая модель горного массива адекватно и с достаточной для практического применения точностью описывает все процессы перераспределения напряжений и деформаций, которые происходят в массиве горных пород при выемке полезного ископаемого [23, 25, 160].

3.3.4. Определение величины конвергенции в подготовительной выработке в зависимости от положения линии очистного забоя

Величина опускания пород кровли в подготовительной выработке зависит от длины зависания консоли горных пород в выработанном пространстве лавы. Поэтому периодичность появления максимальных значений опускания находится во взаимосвязи с механизмом обрушения, который изложен в п. 3.3.1.

При отходе лавы от разрезной печи на расстояние до 65 – 75 м максимальное опускание пород кровли по оси выемочного штрека происходит в середине выработанного пространства. Это объясняется тем, что максимальный прогиб слоев горных пород кровли под действием равномерно распределенной нагрузки имеет место в центре защемленного пролета (аналогия с изгибом плит, защемленных по четырем сторонам). Величина опускания в этом промежутке согласно результатам моделирования изменяется от 40 до 220 мм. После момента обрушения слоя алевролита мощностью 8 м, который залегает непосредственно над разрабатываемым пластом, в выработанном

пространстве лавы образуется консольное зависание горных пород. Согласно теории пластин и оболочек [54, 123] максимальный прогиб в случае свободного консольного зависания имеет место в точке, наиболее удаленной от места заделки, т.е. на плоскости, по которой произошло обрушение горных пород. При увеличении длины консоли до 20 – 25 м (положения забоя, для которых параметр $S = 0$, $S = 1$ и $S = 2$) положение точки максимального опускания кровли по оси выемочного штрека не изменяется, т.е. расстояние от плоскости забоя до этой точки увеличивается по мере подвигания лавы с 5 до 25 м. После обрушения зависания алевролита основную роль в формировании зоны максимального опускания пород кровли в штреке играют горные породы, которые располагаются выше обрушившегося алевролита. Учитывая то, что эти слои уже не имеют свободно зависающей консоли, т.к. по трем сторонам имеет место заделка в массиве, а четвертый край опирается на уже обрушенные горные породы, место положения точки максимального опускания будет располагаться приблизительно посередине этого пролета. По мере подвигания очистного забоя величина пролета будет увеличиваться до предельного значения и, соответственно, будет перемещаться положение точки максимального опускания кровли. После обрушения этих слоев наступит разгрузка массива горных пород, что приводит к возможности образования консольного зависания алевролита, который располагается непосредственно над вынимаемым угольным пластом, и происходит повторение циклов обрушения горных пород, влияющих на величину и распределение опускания кровли по длине подготовительной выработки в выработанном пространстве лавы.

Величина и распределение опускания пород кровли в подготовительном штреке после прохода лавы в зависимости от положения очистного забоя вдоль выемочного столба приведены в табл. 3.6 и на рис. 3.39.

**Опускание пород кровли в подготовительной выработке
после прохода лавы**

Положение забоя, м	Величина опускания, мм	Расстояние до плоскости очистного забоя, м
5	40	2,5
15	80	7,5
25	110	12,5
35	150	17,5
45	180	22,5
55	210	27,5
65	220	32,5
* $S=0$	240±10 % (160±10 %)**	5,0 – 15,0
$S=1$	240±10 % (180±10 %)**	15,0 – 20,0
$S=2$	240±10 %	20,0 – 25,0
$S=3$	260±10 %	17,5 – 22,5
$S=4$	280±10 %	22,5 – 27,5

*Значение параметра S определяется по формуле (3.3).

**Принимать только при $n = 0$ (см. формулу 3.3).

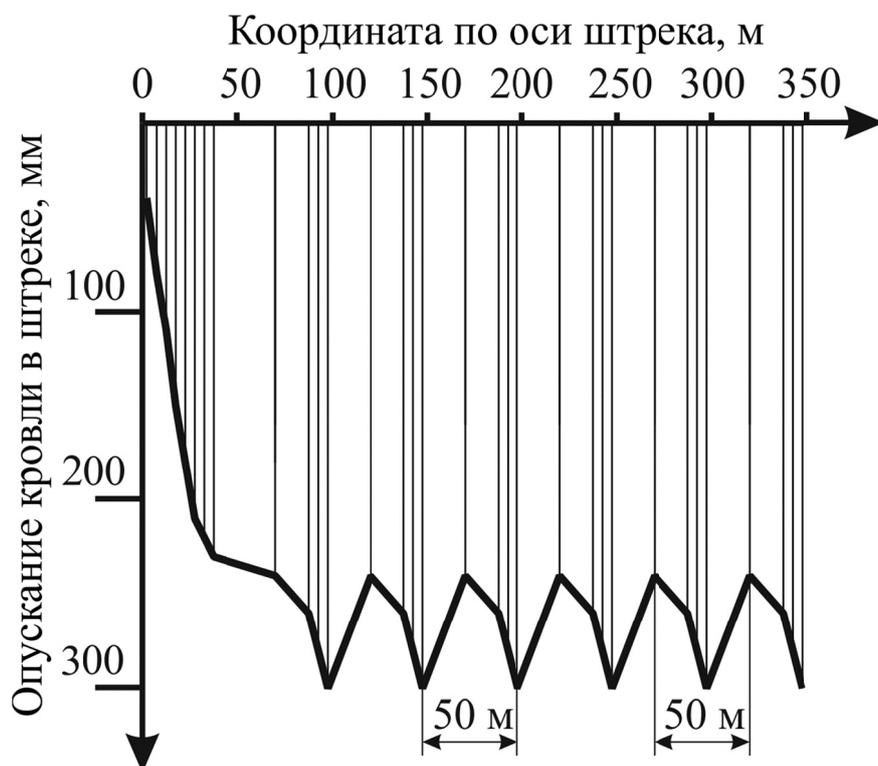


Рис. 3.39. Распределение опускания пород кровли в подготовительном штреке после прохода лавы

Как видно из рис. 3.39, опускание пород кровли в подготовительной выработке, начиная с отметки отхода лавы 75 м от разрезной печи, имеет явно выраженную периодичность, т.е. по длине штрека через каждые 50 м наблюдается максимум или минимум смещения кровли. В общем случае указанную периодичность можно описать математическим выражением вида

$$\theta_{\text{выр}} = w + \Delta \left| \sin\left(\frac{\pi(\psi - x)}{u}\right) \right|, x \in [\psi; L_{cm}], \quad (3.7)$$

где w – минимальное значение смещения кровли в пределах периода, мм;

Δ – разница между максимальным и минимальным смещением кровли в пределах периода, мм;

ψ – отметка, с которой начинается проявление периодичности, м;

u – длина одного полного периода, м;

x – координата положения точки вдоль штрека для которой определяется $\theta_{выр}$, м.

Для моделируемых условий отработки 874 лавы на пласте C^H_8 шахты "Западно-Донбасская" ОАО "Павлоградуголь" – $w = 240$; $\Delta = 60$; $\psi = 70$; $u = 50$. С коэффициентом достоверности аппроксимации $R^2 = 0,93$ для указанных условий выражение (3.7) примет вид

$$\theta_{выр} = 240 + 60 \left| \sin \left(\frac{\pi(70 - x)}{50} \right) \right|, \quad x \in [70; L_{cm}].$$

Конвергенция пород в выемочном штреке после прохода лавы будет складываться из величины опускания кровли и величины поднятия почвы в рассматриваемом сечении. Процесс пучения пород почвы в подготовительной выработке подробно описан в п. 3.3.3. Однако при определении остаточной высоты и площади поперечного сечения выработки после прохода лавы необходимо учитывать технологические особенности ведения горных работ, а именно наличие подрывки почвы, средства усиления крепи и способ охраны подготовительной выработки, качество восстановления ножек крепи при использовании технологии очистных работ, предусматривающей вынос приводных головок забойного конвейера на штреки и др. Необходимо отметить, что количественные значения опусканий кровли в штреке (табл. 3.6 и рис. 3.39) показательны для случая, когда технология ведения очистных работ не предусматривает снятие в створе с лавой бокового сегмента крепи выработки или предполагает качественное восстановление ножки крепежной рамы после ее снятия. При несоблюдении этого условия опускание кровли может превышать указанные значения в 2 – 3 раза и более, однако качественная картина распределения смещений пород кровли в выемочном штреке после прохода лавы не изменится и будет соответствовать закономерности, представленной на рис. 3.39, и аналитически записываться в виде (3.7).

Для определения величины конвергенции в выемочном штреке впереди очистного забоя в общем случае можно воспользоваться формулой:

$$Kg = Kr(x) + Pv(x), \quad (3.8)$$

где $Kr(x)$ – зависимость опускания кровли в штреке впереди очистного забоя;

$Pv(x)$ – зависимость поднятия почвы в штреке впереди очистного забоя.

$$Kr(x) = De^{-\xi x}, \quad (3.9)$$

$$Pv(x) = Re^{-vx}, \quad (3.10)$$

где D, R – величина опускания кровли и поднятия почвы соответственно в створе с лавой, м;

ξ, v – коэффициенты затухания перемещений, m^{-1} ;

x – расстояние, отсчитываемое от плоскости забоя, м.

Коэффициенты, входящие в формулы (3.9) и (3.10), для условий разработки пласта C^H_8 на шахте "Западно-Донбасская" приведены в табл. 3.7.

Таблица 3.7

Значение коэффициентов D, R, n, v в зависимости от положения очистного забоя

Положение забоя, м	D	R	ξ	v	x
1	2	3	4	5	6
5	0,05	0,10	0,02	0,02	[0; L_{cm}]
15	0,07	0,15			
25	0,09	0,18			
35	0,11	0,22			

Продолжение табл. 3.7

1	2	3	4	5	6
45	0,13	0,30	0,02	0,02	[0; L_{cm}]
55	0,15	0,32			
65	0,16	0,35			
* $S=0$	0,17±7 %	0,45±10 %			
$S=1$					
$S=2$					
$S=3$	0,19±5 %	0,50±10 %			
$S=4$	0,21±5 %				

*Значение параметра S определяется по формуле (3.3).

С учетом количественных значений коэффициентов (табл. 3.7) формулу (3.8) можно записать в виде

$$Kg = (D + R)e^{-0,02x}, \text{ где } x \in [0; L_{cm}]. \quad (3.11)$$

Закономерности распределения опускания кровли и поднятия почвы по длине подготовительного штрека впереди очистного забоя в зависимости от положения лавы по длине выемочного столба представлены на рис. 3.40 и 3.41.

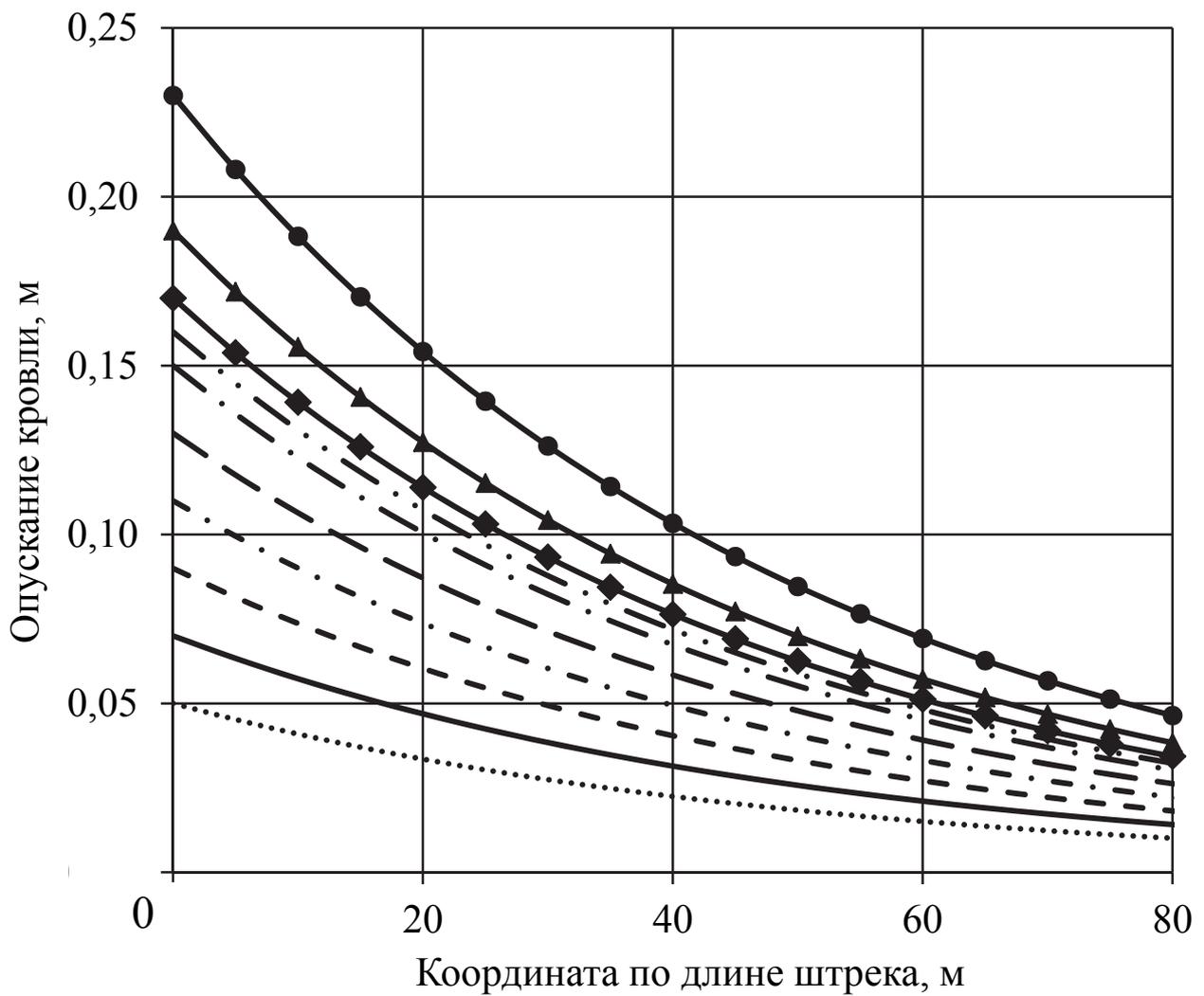
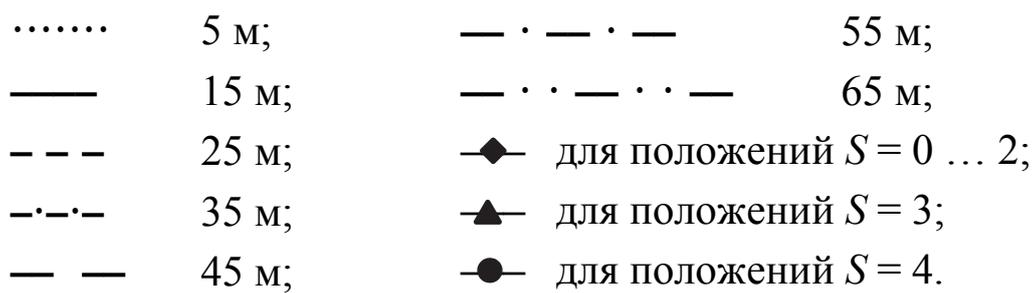


Рис. 3.40. Распределение опускания кровли по длине штрека впереди очистного забоя при отходе лавы от разрезной печи:



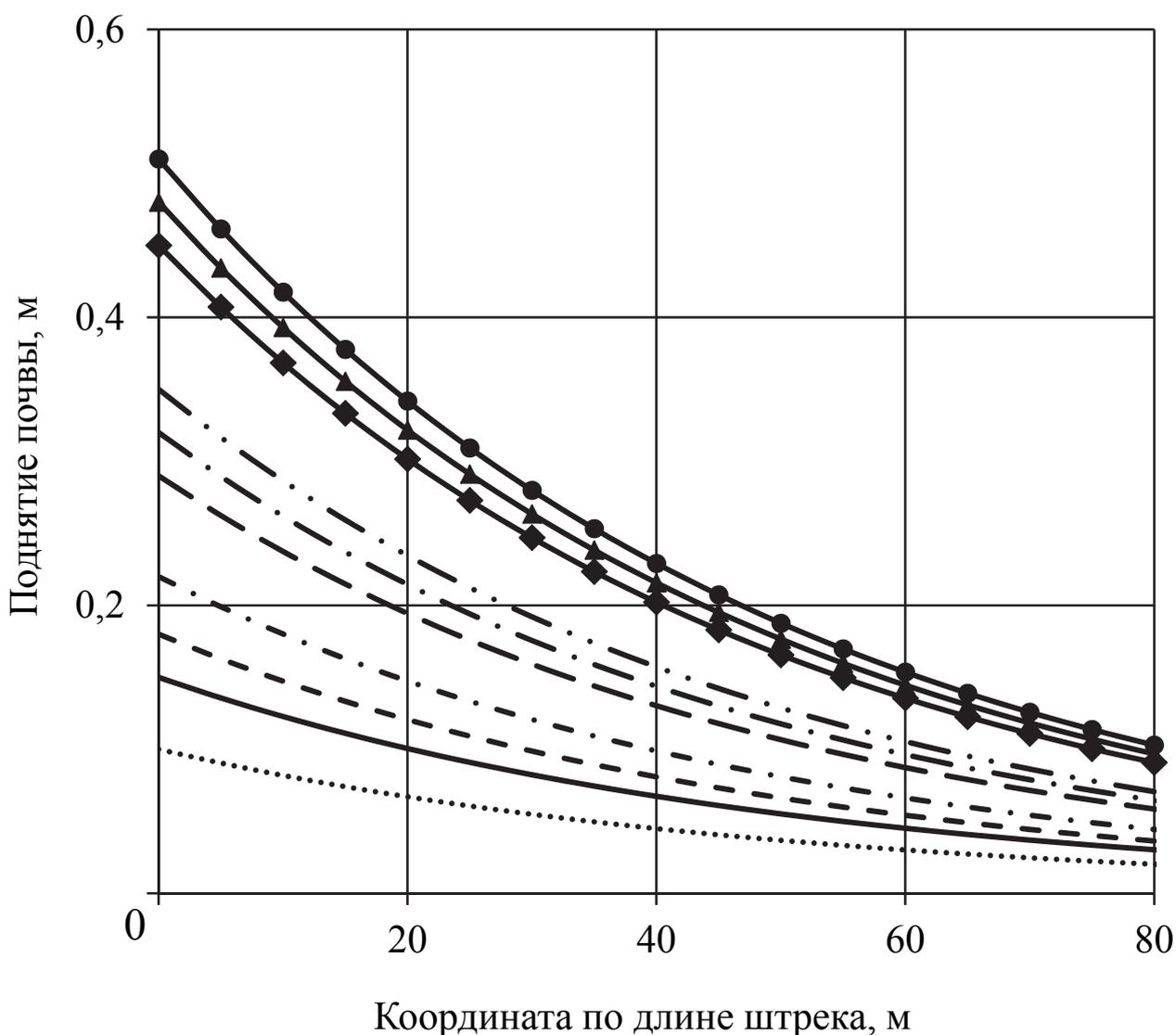


Рис. 3.41. Распределение поднятия почвы по длине шторека
впереди очистного забоя при отходе лавы от разрезной печи:

.....	5 м;	— · — · —	55 м;
————	15 м;	— · · — · · —	65 м;
-----	25 м;	◆	для положений $S = 0 \dots 2$;
-·-·-	35 м;	▲	для положений $S = 3$;
— —	45 м;	●	для положений $S = 4$.

В соответствии с формулой (3.8) конвергенция горных пород по длине шторека впереди очистного забоя (рис. 3.42) для определенного положения лавы вдоль выемочного столба представляет собой сумму значений опускания кровли и поднятия почвы для этого же положения.

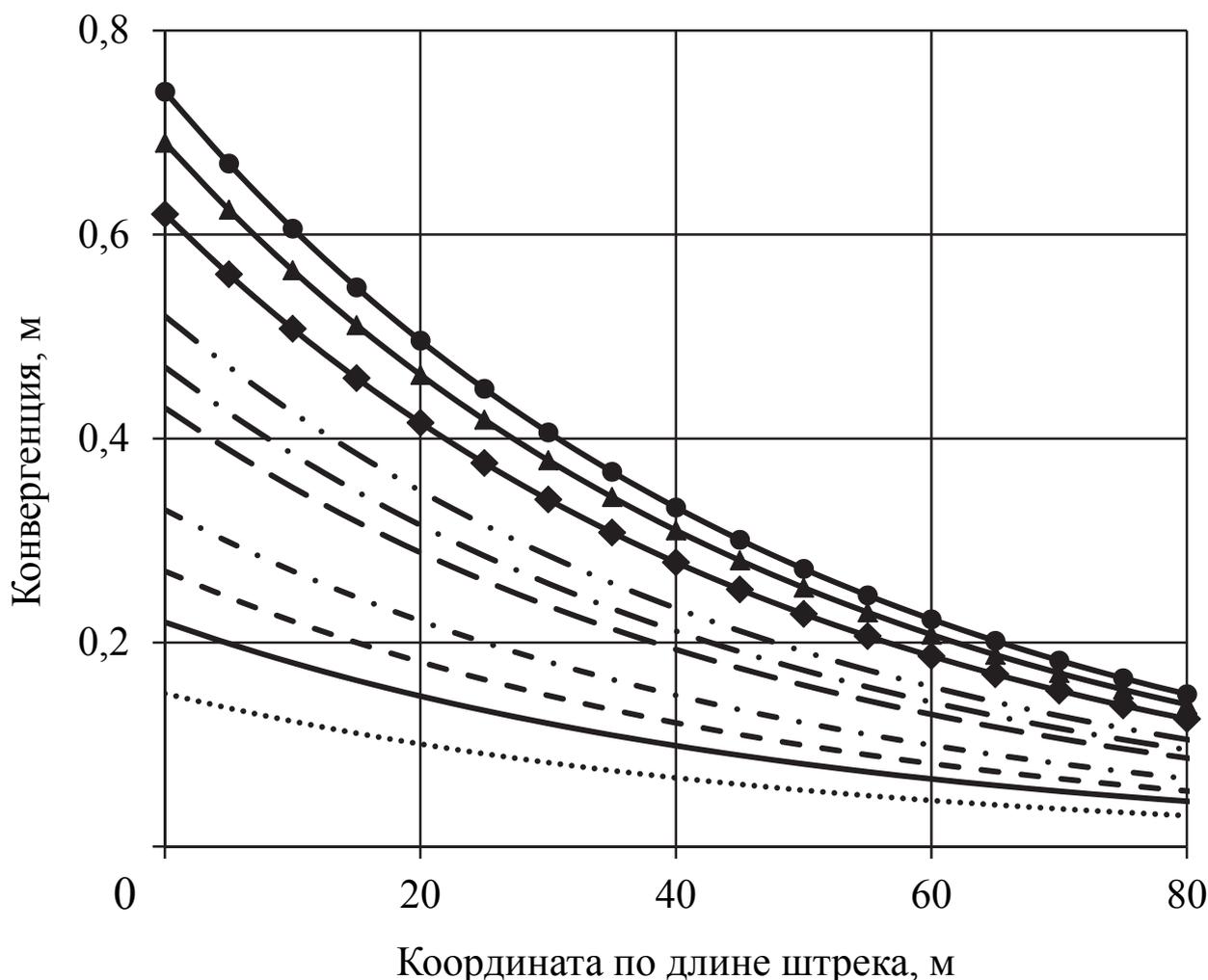


Рис. 3.42. Распределение конвергенции по длине штрека впереди очистного забоя при отходе лавы от разрезной печи:

.....	5 м;	— · — · —	55 м;
————	15 м;	— · · — · · —	65 м;
-----	25 м;	◆	для положений $S = 0 \dots 2$;
-·-·-·-	35 м;	▲	для положений $S = 3$;
— — —	45 м;	●	для положений $S = 4$.

Из рис. 3.40 – 3.42 видно, что на расстоянии более 65 – 70 м от положения линии очистного забоя, т.е. вне зоны совместного влияния подготовительной и очистной выработок, согласно результатам моделирования, поднятие почвы составляет менее 0,12 м, опускание кровли – менее 0,07 м. В первом приближении эта часть подготовительного штрека может рассматриваться как выработка, расположенная вне зоны влияния очистных работ.

3.3.5. Сравнение результатов моделирования, полученных с использованием различных видов моделей

Для обоснования целесообразности применения пространственной геомеханической модели выемочного участка с учетом всех вышеуказанных свойств было проведено тестовое моделирование для одинаковых горно-геологических условий (условия отработки 874-й лавы пласта С^н₈ шахты "Западно-Донбасская") с использованием дополнительно двух различных видов компьютерных моделей. Основные характеристики сравниваемых моделей приведены в табл. 3.8.

Таблица 3.8

Основные характеристики сравниваемых моделей

Учитываемые факторы	Модель 1	Модель 2	Модель 3
Толща горных пород, вмещающая угольный пласт	+	+	+
Слоистость горного массива	+	-	-
Анизотропия деформационных и прочностных свойств горных пород	+	-	-
Силовые параметры крепи подготовительной и очистной выработок	+	-	-
Пространственность геомеханических процессов	+	-	+
Пошаговое моделирование перемещения очистного забоя	+	+	+

В качестве графиков сравнения были выбраны закономерности распределения конвергенции горных пород по длине лавы на линии постановки посадочного ряда стоек механизированной крепи при одинаковых отходах очистного забоя от разрезной печи ΔL . Характерные результаты сравнения приведены на рис. 3.43 – 3.47.

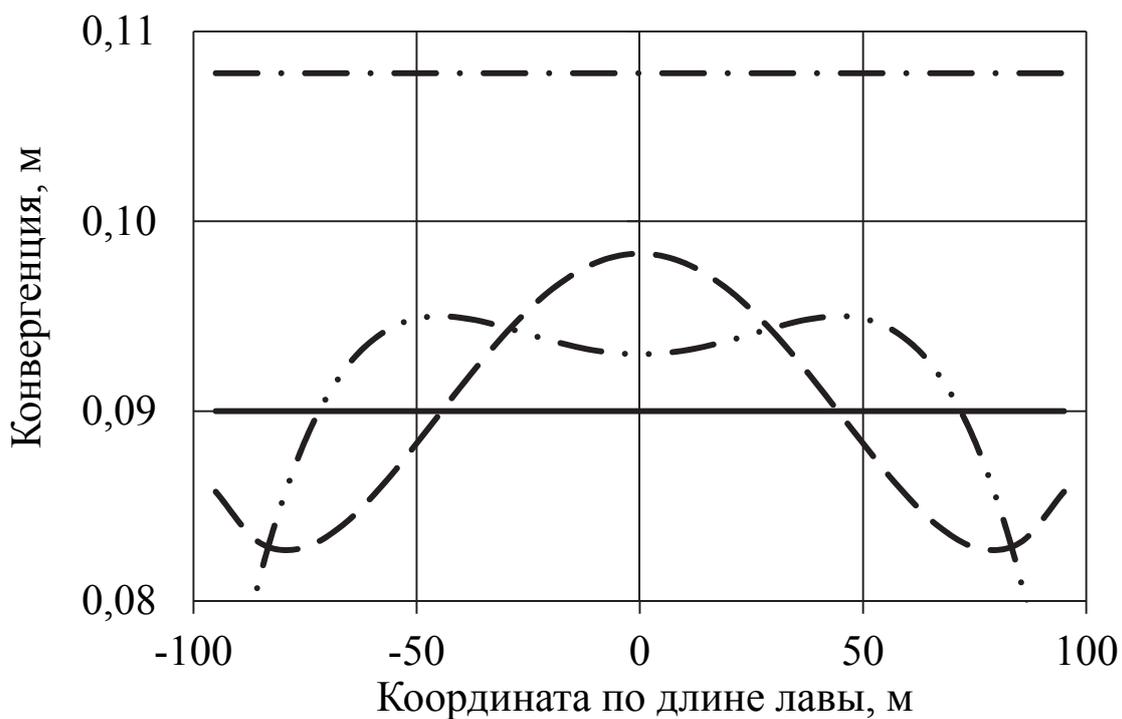


Рис. 3.43. Распределение конвергенции по длине лавы при отходе от разрезной печи $\Delta L = 25$ м:

— экспериментальная кривая; — — — в модели 1;
 — · — в модели 2; — · · — в модели 3.

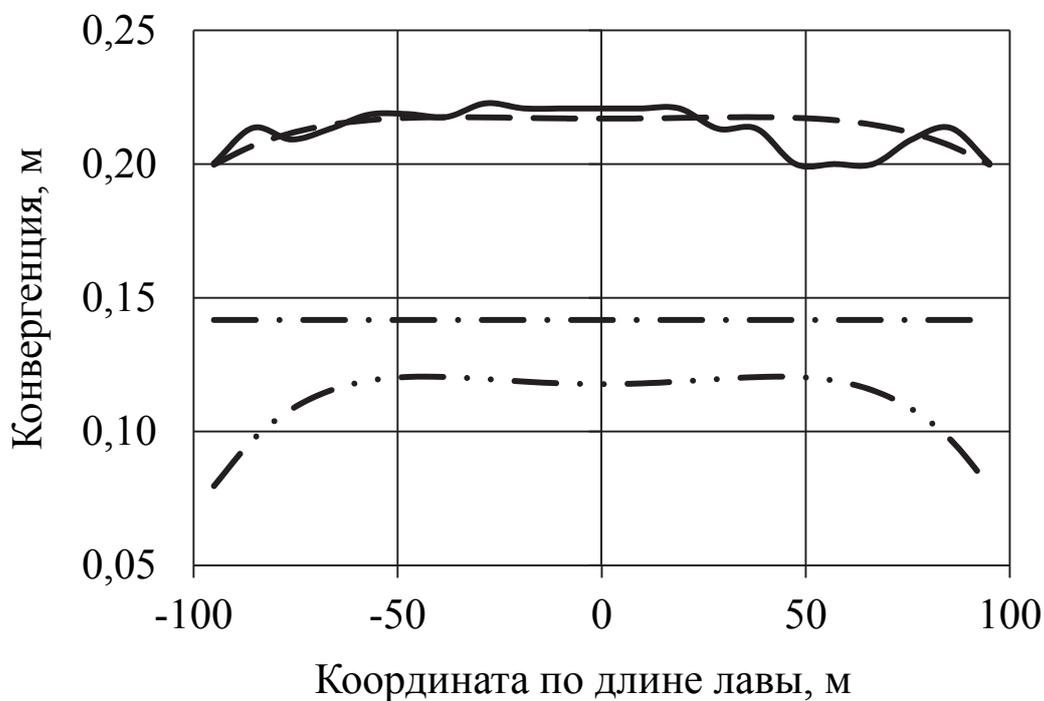


Рис. 3.44. Распределение конвергенции по длине лавы при отходе от разрезной печи $\Delta L = 35$ м:

— экспериментальная кривая; — — — в модели 1;
 — · — в модели 2; — · · — в модели 3.

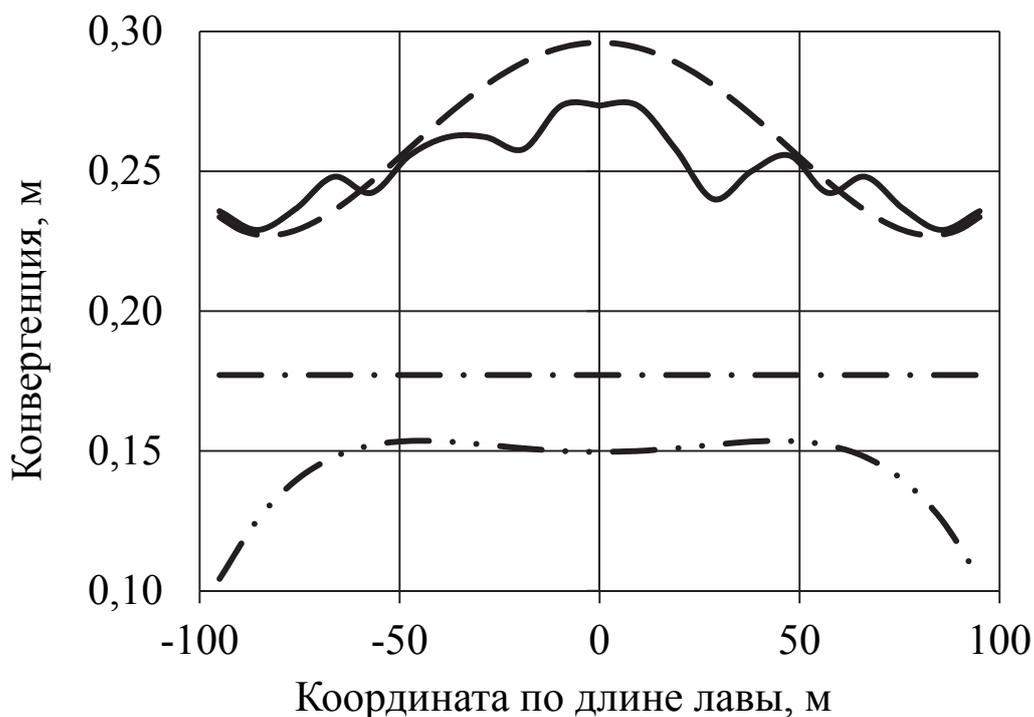


Рис. 3.45. Распределение конвергенции по длине лавы при отходе от разрезной печи $\Delta L = 55$ м:

- | | | | |
|-------|---------------------------|---------|-------------|
| — | экспериментальная кривая; | - - - | в модели 1; |
| - · - | в модели 2; | - · · - | в модели 3. |

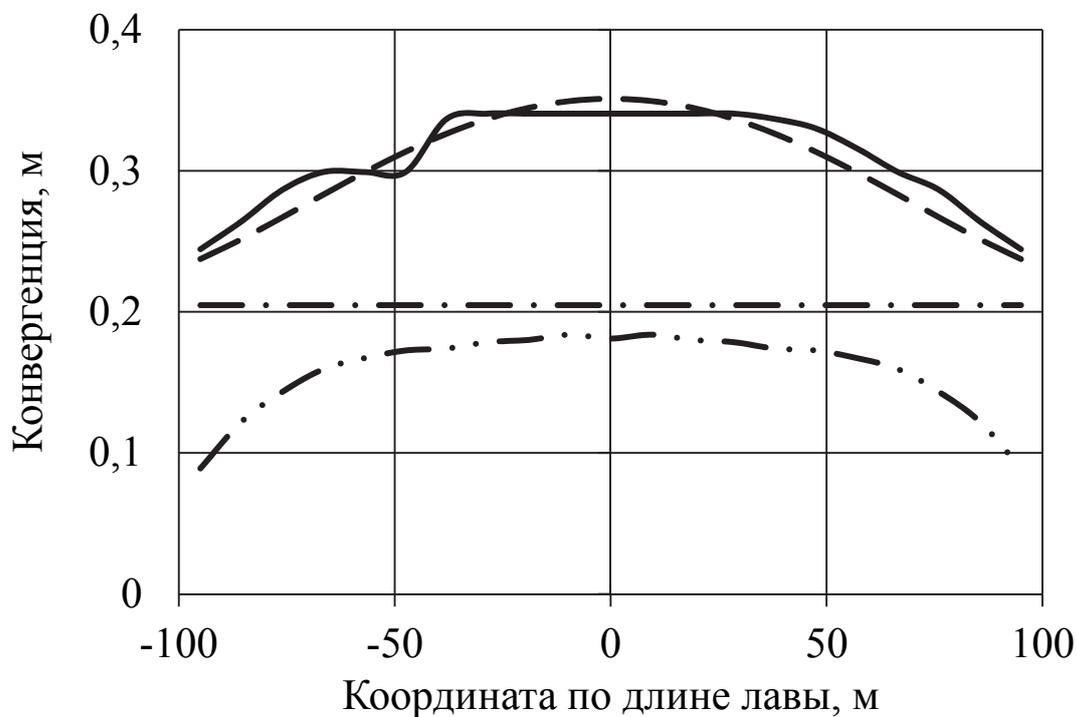


Рис. 3.46. Распределение конвергенции по длине лавы при отходе от разрезной печи $\Delta L = 95$ м:

- | | | | |
|-------|---------------------------|---------|-------------|
| — | экспериментальная кривая; | - - - | в модели 1; |
| - · - | в модели 2; | - · · - | в модели 3. |

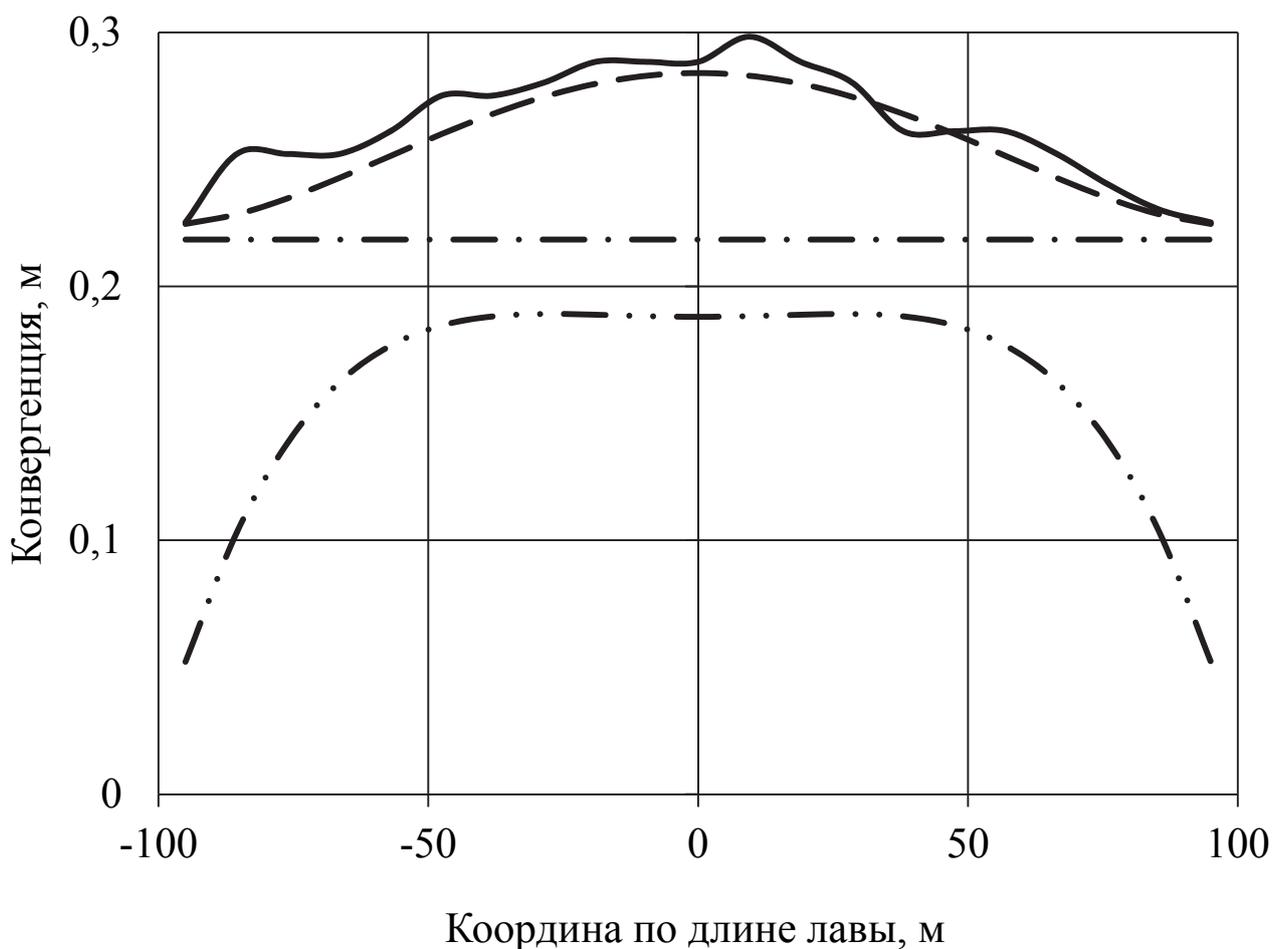


Рис. 3.47. Распределение конвергенции по длине лавы при отходе от разрезной печи $\Delta L = 135$ м:

— экспериментальная кривая; — — в модели 1;
 — · — в модели 2; — · · — в модели 3.

Из рис. 3.43 – 3.47 видно, что до момента отхода лавы от разрезной печи до $\Delta L = 25$ м результаты, полученные с применением различных моделей, практически совпадают с экспериментальной кривой (разброс значений не превышает 15 – 20 %), а при дальнейшем отходе лавы от разрезной печи "модель 2" и "модель 3" дают в 1,5 – 2 раза заниженные результаты конвергенции пород в лаве. В свою очередь, результаты, полученные на "модели 1", совпадают с экспериментальными данными на 80 – 85 %. Этот факт подтверждает, что моделирование с использованием более совершенных моделей, в которых максимально возможно учтены реальные горно-геологические

и горнотехнические условия, дают более точные результаты и наиболее адекватно отражают геомеханические процессы, которые происходят в массиве горных пород вокруг очистных выработок при добыче полезного ископаемого. Также необходимо отметить, что механизм обрушения горных пород кровли, полученный на "моделях 2 и 3", существенно отличается от механизма, полученного на "модели 1", и не подтверждается опытом отработки лавы в моделируемых горно-геологических условиях, что еще раз подтверждает невозможность использования указанных моделей для прогнозирования поведения массива горных пород вокруг очистных выработок и обоснования технологических параметров отработки выемочных столбов.

ГЛАВА 4

ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОТРАБОТКИ ВЫЕМОЧНОГО СТОЛБА

В данной главе приведено обоснование рациональных технологических параметров отработки выемочного столба и разработаны рекомендации, которые позволяют избежать аварийных ситуаций в лаве и обеспечить высокий коэффициент извлечения и использования очистного оборудования.

В п. 4.1 изложена методика определения рациональной длины лавы по фактору конвергенции горных пород на посадочном ряде стоек механизированной крепи и даны рекомендации, которые позволяют избежать посадки секций на жесткое основание. Приведен проверочный расчет величины конвергенции при заданной длине лавы и типоразмере механизированной крепи для очистной выработки, в которой произошла посадка секций на жесткое основание.

В п. 4.2 изложена методика определения рациональной скорости подачи выемочной машины по фактору устойчивости горных пород в призабойном пространстве лавы. Предложенная методика позволяет рассчитать рациональную скорость подачи выемочной машины, при которой величина эквивалентных напряжений, действующих в плоскости забоя в непосредственной кровле и вынимаемом пласте, будет меньше предельно допустимых эквивалентных напряжений для данного типа горных пород.

В п. 4.3 определено и обосновано положение рациональных мест остановки очистных работ по длине выемочного столба, в которых запас податливости посадочных стоек механизированной крепи является максимальным.

В п. 4.4 указана относительная величина износа гидростоек механизированной крепи в зависимости от их расположения вдоль очистного забоя, приведена схема и даны рекомендации по рациональному использованию ресурса механизированного комплекса в лаве на основе обеспечения равномерного износа гидростоек механизированной крепи.

4.1. Обоснование методики определения рациональной длины лавы по фактору конвергенции на посадочном ряде стоек механизированной крепи

Длина лавы является одним из главных параметров системы разработки, который влияет на технико-экономические показатели работы очистного забоя и добычного участка в целом. Для конкретных горно-геологических условий существует оптимальная длина лавы, при которой затраты на 1 т добычи угля будут минимальными [117]. Решение таких задач, как правило, заключается в составлении экономико-математической модели участка, как функции от длины лавы, с последующей ее реализацией либо путем дифференцирования функции, или методом перебора вариантов [19, 41]. Однако, помимо экономической целесообразности, на выбор длины лавы оказывают существенное влияние горно-геологические факторы (распределение в пределах выемочного поля геологических нарушений, качества и мощности полезного ископаемого и т.п.) и технические возможности используемого оборудования.

В общем случае увеличение длины лавы приводит к увеличению машинной части очистного забоя и снижению доли концевых операций в общем времени цикла выемки, что в свою очередь способствует увеличению нагрузки на лаву и снижению себестоимости добытого угля. Поэтому при отсутствии ограничений по горно-геологическим факторам, как правило, длину лавы принимают исходя из технических возможностей очистного оборудования (в основном ограничивающим фактором является длина забойного конвейера). На современном этапе развития горнопромышленного комплекса украинские и российские производители оборудования для очистных работ могут осуществлять поставку механизированных комплексов для добычи угля длиной до 250 – 300 м, импортные аналоги (комплексы DBT, OSTROJ, JOY и др.) имеют максимальную длину 400 – 450 м.

Результаты компьютерного моделирования и натурных исследований показывают, что конвергенция горных пород в очистном забое описывается кривой (3.2), которая имеет локальный экстремум

(максимум) в точке $x = 0$, т.е. в средней части лавы. Это означает, что при определенной длине лавы в определенном положении очистного забоя вдоль выемочного столба возможен случай, когда общая конвергенция горных пород на линии постановки посадочного ряда стоек механизированной крепи (формула (3.1) в средней части лавы окажется больше допустимой податливости гидрофицированных стоек. В этом случае происходит посадка крепи на жесткое основание, что делает невозможным передвижку секций механизированной крепи и является аварийной ситуацией (рис. 4.1).

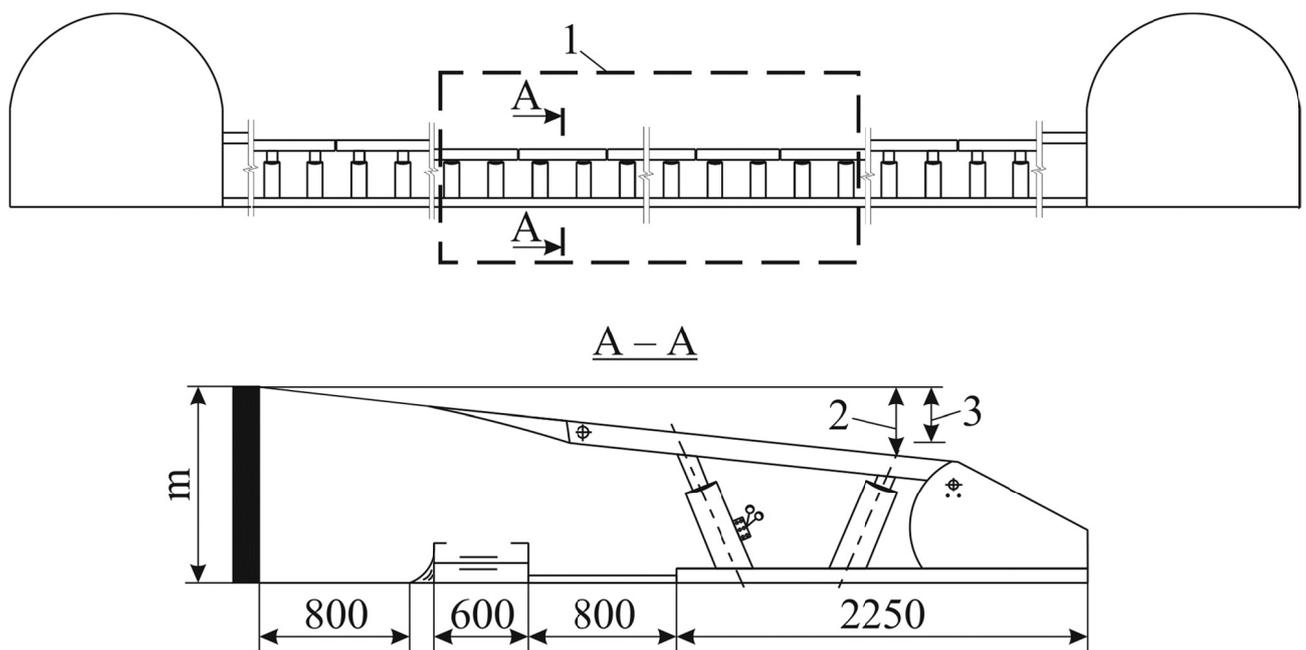


Рис. 4.1. Наиболее вероятная область посадки крепи на жесткое основание:

- 1 – область, в которой величина конвергенции превышает максимальную податливость стойки;
- 2 – величина конвергенции горных пород;
- 3 – максимально возможная податливость стойки.

Из теории изгиба пластин и оболочек [89, 123] известно, что прогиб плит прямо пропорционален длине в четвертой степени и обратно пропорционален произведению модуля упругости и куба толщины пластины. Однако получение аналитического решения для определения предельной длины лавы в данных горно-геологических

условиях для данного типа механизированной крепи весьма затруднительно. Это объясняется необходимостью решения задачи в объемной постановке с учетом комплексного влияния силовых параметров крепи очистных и подготовительных выработок, изменения физико-механических свойств горных пород в плоскости напластования и в плоскости, ей перпендикулярной, геометрических параметров зон предельного состояния в кровле разрабатываемого пласта, механизма формирования области обрушения, начиная от вынимаемого пласта до высоты плавного прогиба горных пород без нарушения сплошности и др. Решение такой многофакторной задачи возможно только с использованием численных методов. Определение рациональной длины лавы в рассматриваемых горно-геологических условиях для принятого очистного оборудования необходимо производить методом составления компьютерной модели выемочного участка (см. п. 3.1) с последующим решением серии прямых задач до момента выявления четкой периодичности в формировании зон предельного состояния горных пород вокруг очистной выработки. Далее в пределах установленного периода по формуле (3.1) определяется максимальная конвергенция горных пород на линии постановки посадочного ряда стоек механизированной крепи (наиболее вероятное место посадки секции на жесткое основание). Сравнивая полученные результаты с допустимой по техническим характеристикам используемых крепей податливостью, делается вывод о возможности принятия моделируемой длины лавы в качестве проектной. Учитывая погрешность вычислений используемого численного метода (МКЭ) и разброс физико-механических свойств горных пород в пределах выемочного участка, результаты моделирования необходимо рассматривать в доверительном интервале не менее 15 %.

В случае, когда вероятная конвергенция пород в лаве превышает максимально возможную конструктивную податливость гидрофицированных стоек, необходима разработка рекомендаций по принятию правильного технологического решения. В качестве возможных вариантов разрешения возникшей ситуации могут быть использованы следующие рекомендации:

1. Уменьшение длины лавы до безопасной величины по фактору конвергенции горных пород на линии постановки посадочного ряда стоек механизированной крепи. Основным недостатком данного варианта является использование не в полной мере технических возможностей забойного оборудования, что в итоге отрицательно влияет на себестоимость добытого угля. Как вариант, может быть рассмотрен случай замены некоторых узлов и агрегатов забойного комплекса на те, которые предназначены для обеспечения нормальной работы лавы уже со скорректированной (меньшей) длиной.
2. Использование в зоне вероятной посадки крепи на жесткое основание секций с повышенной несущей способностью. Увеличение несущей способности некоторых крепей (КД-80, КД-90, КД-99 и др.) возможно путем соответствующей настройки стоечных клапанов ЭКП. Также возможен вариант использования по длине лавы крепей различного типа, например, совместное использование обычных секций и секций типа "Т" (тяжелый тип). К недостаткам этого варианта можно отнести то, что настройкой клапанов ЭКП увеличить несущую способность секции возможно не более чем на 20 %, дальнейшее увеличение номинального давления внутри гидроцилиндра приводит к повышенной деформации уплотнений и, как следствие, быстрому выходу стоек из строя. При использовании секций с различной несущей способностью в месте перехода с одного типа на другой наблюдается увеличение касательных напряжений в кровле, что может привести к повышенной трещиноватости и локальным вывалам породы из кровли в зоне перехода.
3. Использование механизированной крепи с величиной допустимой податливости гидростоек, превышающей максимальное значение конвергенции горных пород в лаве. Это решение может быть реализовано путем выбора соответствующего стандартного типоразмера механизированной крепи или заказа заводу-изготовителю крепи с необходимой конструктивной податливостью.

4. Применение способов управления кровлей, предполагающих принудительное обрушение завесаний горных пород в выработанном пространстве лавы (различные виды торпедирования). К недостаткам этого способа относятся необходимость использования дополнительного дорогостоящего оборудования в случае гидроразрыва кровли и повышенные требования правил безопасности [38, 84] в случае применения буровзрывных работ, а также общая сложность и трудоемкость выполняемых операций.
5. Увеличение вынимаемой мощности за счет присечки боковых пород в зоне вероятной посадки крепи на жесткое основание как по длине лавы, так и по длине выемочного столба. Недостатками данного предложения являются невозможность применения при использовании струговой выемки и снижение качества добываемого угля за счет увеличения зольности со всеми вытекающими последствиями.

Возможность применения каждого из указанных вариантов или их комбинации зависит от конкретных горнотехнических условий и должна сопровождаться технико-экономическим обоснованием.

После принятия того или иного решения необходимо произвести проверочное моделирование с учетом скорректированных условий, и только после получения позитивного результата можно закладывать в проект окончательную (рациональную) длину лавы, тип очистного оборудования и другие технологические параметры.

Согласно предлагаемой методике (обоснование параметров модели приведено в главе 2, описание самой методики моделирования дано в главе 3) была построена пространственная компьютерная модель выемочного участка для условий отработки 157-й лавы (пласт С₆) на шахте "Степная". Исходные данные для моделирования представлены в табл. 4.1.

В ходе пространственного компьютерного моделирования были получены зависимости распределения конвергенции горных пород на линии постановки стоек гидрофицированной крепи OSTROJ 70/125T в зависимости от положения очистного забоя вдоль выемочного столба.

Исходные данные для построения модели

Параметр	Значение
Длина лавы, м	303
Механизированная крепь	OSTROJ 70/125Г
Угол залегания пласта, град	2 – 4
Вынимаемая мощность, м	1,00
Управление кровлей	полное обрушение
Наименование пласта	C ₆
Глубина ведения очистных работ, м	300 – 490
Система разработки	столбовая
Расположение лавы	по падению

Анализ полученных закономерностей позволил установить, что для отметки отхода очистного забоя от разрезной печи 85 – 95 м распределение конвергенции горных пород по длине лавы на линии постановки гидростоек механизированной крепи описывается уравнением

$$K = 6 \cdot 10^{-10} z - 2 \cdot 10^{-5} z^2 + 0,251,$$

а начиная с отхода 115 – 125 м и более – уравнением вида:

$$K = 7 \cdot 10^{-10} z^4 - 3 \cdot 10^{-5} z^2 + 0,436,$$

где K – конвергенция, м;

z – длина лавы, м, $z \in [-151,5; +151,5]$.

Графически эти зависимости приведены на рис. 4.2.

Из рис. 4.2 видно, что в моделируемых горно-геологических и горнотехнических условиях при отходе лавы от разрезной печи порядка 55 – 65 м произойдет посадка крепи на жесткое основание.

Результаты моделирования подтверждаются опытом отработки 157-й лавы на шахте "Степная", на которой в мае 2009 года при отходе лавы от разрезной печи 56 м произошла авария, связанная с посадкой механизированной крепи на жесткое основание, хотя согласно методике, которая была использована при составлении паспорта выемочного участка, коэффициент запаса крепи OSTROJ 70/125T, исходя из рабочего сопротивления секции, составил $K_{зан} = 7,35$.

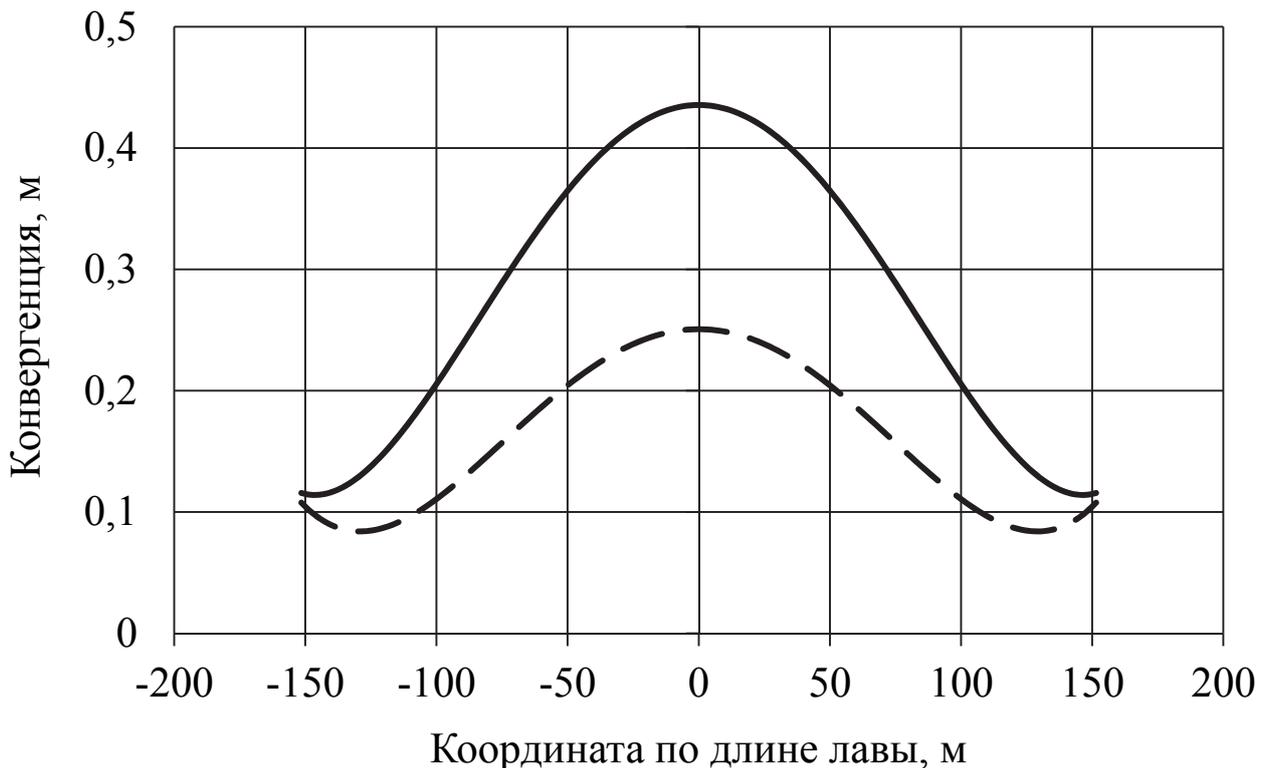


Рис. 4.2. Распределение конвергенции по длине лавы:

— при отходе более 75 м; - - - при отходе 55 – 65 м;

- 0 – 0,2 м – область нормальной работы крепи;
- 0,2 – 0,3 м – область, в которой возможна посадка крепи на жесткое основание;
- > 0,3 м – область, в которой происходит посадка крепи на жесткое основание.

Для обеспечения безаварийной работы выемочного участка в рассматриваемых условиях с принятым типом оборудования (механизированная крепь OSTROJ 70/125T) необходимо:

- уменьшить длину лавы до безопасной величины (200 – 210 м);
- увеличить вынимаемую мощность до 1,2 – 1,25 м.

Для обеспечения безаварийной работы выемочного участка в рассматриваемых условиях с принятой длиной лавы (303 м) необходимо:

- принимать механизированную крепь с запасом податливости гидростоек механизированной крепи не менее 0,45 м (при сопротивлении секции крепи 3500 – 4000 кН);
- увеличивать сопротивление секции механизированной крепи до величины, которая обеспечит заданную податливость гидростоек.

Как уже отмечалось выше, для любого принятого технического и технологического решения должно быть проведено проверочное пространственное компьютерное моделирование для конкретного выемочного участка и получены характерные закономерности распределения конвергенции по длине лавы в зависимости от положения очистного забоя по длине выемочного столба.

Экономический эффект от увеличения длины лавы в основном заключается в уменьшении доли удельных затрат на проведение подготовительных выработок в общей структуре себестоимости добычи угля. Исходя из этого может быть составлена функция зависимости доли удельных затрат на проведение подготовительных выработок от длины лавы

$$f(z) = \frac{nLQ}{Z},$$

где Q – стоимость проведения 1 погонного метра подготовительной выработки, грн/м;

L – длина подготовительной выработки, м;

n – необходимое количество подготовительных выработок;

Z – длина лавы, м.

Экономический эффект от увеличения длины лавы в этом случае может быть найден по формуле

$$\begin{aligned} \Xi &= \int_0^{Z_2} \int_{\frac{nLQ}{Z_2}}^{\frac{nLQ}{Z_1}} dz d(f(z)) = \int_0^{Z_2} \left[\frac{nLQ}{Z_1} - \frac{nLQ}{Z_2} \right] dz = \\ &= nLQ \left[\frac{1}{Z_1} - \frac{1}{Z_2} \right] Z_2 = \frac{nLQ(Z_2 - Z_1)}{Z_1} \end{aligned}$$

где Z_1 – длина лавы по базовому варианту, м;

Z_2 – длина лавы по фактору конвергенции горных пород в лаве, м.

Например, принимая для условий Западного Донбасса следующие усредненные значения (в ценах 2010 года): $Q = 10^4$ грн/м; $L = 1500$ м; $n = 2$; $Z_1 = 200$ м, экономический эффект от увеличения длины лавы на 50 м, т.е. до $Z_2 = 250$ м, составит

$$\Xi_{200}^{250} = \frac{2 \cdot 1500 \cdot 10^4 \cdot (250 - 200)}{200} = 7,5 \cdot 10^6 \text{ грн.}$$

Графически полученное решение представлено на рис. 4.3.

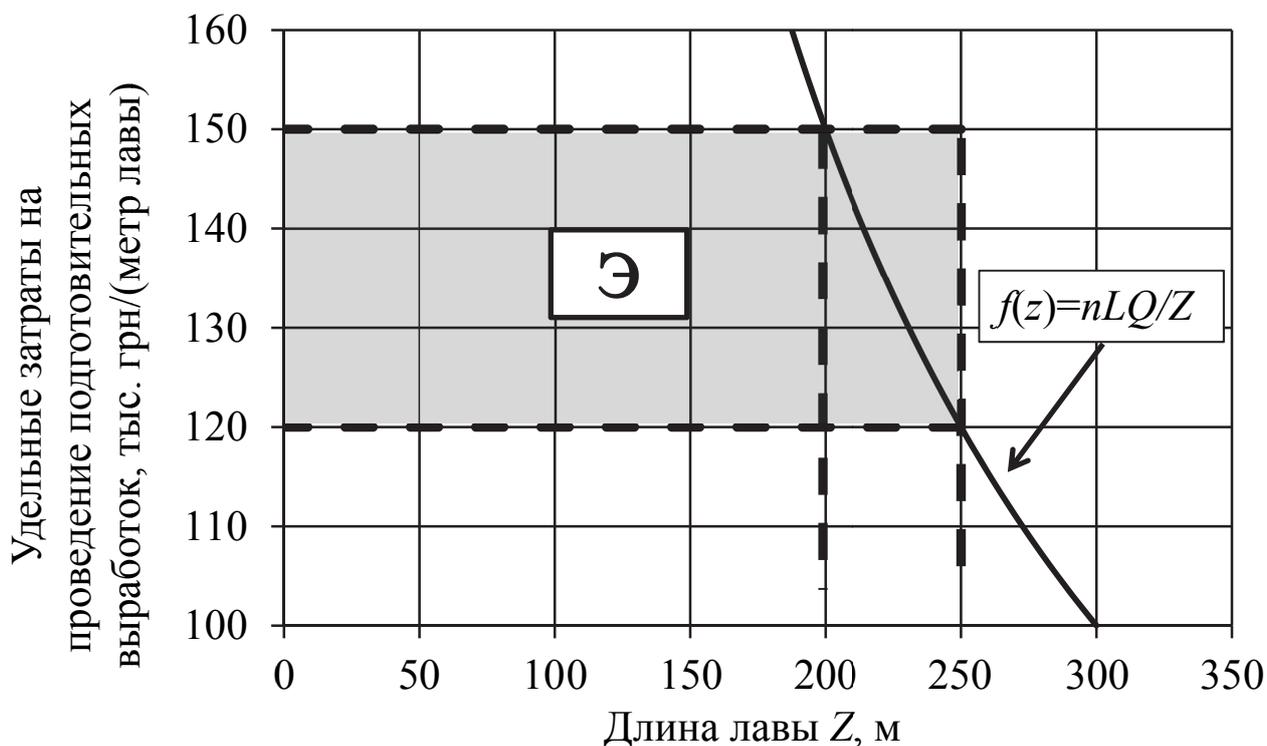


Рис. 4.3. К определению экономического эффекта от увеличения длины лавы

4.2. Методика определения рациональной скорости подачи выемочной машины по фактору устойчивости призабойного пространства

В результате нарушения горного массива выработками происходит перераспределение напряженно-деформированного состояния, что приводит к изменению начального напряженного состояния горных пород. Процесс постоянного изменения напряжений в массиве характерен для горных выработок, которые изменяют свое положение во времени и пространстве, т.е. для действующих очистных и проходческих забоев. Искусственные полости, проводимые в массиве горных пород, вызывают изменение напряжений в какой-то ограниченной области горного массива, что приводит к формированию так называемой зоны влияния выработки на этот массив, которая характеризуется аномальным по сравнению с начальным полем напряжений. Указанная зона перемещается вместе с движущимся забоем, т.е.

по мере подвигания в область влияния выработки попадают все новые, ранее нетронутые части массива горных пород.

В работах [10, 60 – 62, 83, 144] неоднократно отмечалось, что существует обратная связь между продолжительностью действий повышенных напряжений в массиве и прочностными характеристиками горных пород. Используя это явление, можно рассчитать рациональную скорость подвигания забоя, при которой прочность горных пород, окружающих непосредственно плоскость обнажения, с учетом фактора времени будет больше или равна величине действующих на плоскости забоя напряжений с учетом фактора релаксации.

Решение выше указанной задачи будет производиться с учетом следующих положений и допущений:

- напряжение в любой точке массива складывается из начального напряжения (давления в нетронутым массиве) и добавочного, которое возникает в результате ведения горных работ (движения лавы);
- упругие деформации распространяются в массиве мгновенно;
- сразу же после перераспределения упругих деформаций в массиве начинаются процессы релаксации напряжений;
- пластические деформации горных пород за рассматриваемый промежуток времени принимаем большего порядка малости по сравнению с упругими деформациями, поэтому считаем, что процесс релаксации происходит при постоянной относительной деформации;
- с течением времени упругие деформации превращаются (переходят) в пластические;
- пластические деформации – это необратимые деформации, которые происходят в результате смещения зерен горной породы друг относительно друга, образования трещин на микро- и макроуровне и других необратимых процессов, которые приводят к снижению прочности горной породы;
- модуль упругости горной породы считаем постоянным и слабо зависящим от времени и действующих в массиве напряжений;

- форма кривых релаксации напряжений слабо зависит от величины действующего напряжения, т.е. аналитическая функция, которая описывает процесс релаксации напряжения для конкретной горной породы, справедлива для всего диапазона изменения начальных напряжений.

Для обеспечения безаварийной работы очистного забоя необходимо, чтобы величина действующих в угольном пласте и в непосредственной кровле напряжений по всей длине лавы, в пределах ширины захвата исполнительного органа выемочной машины, была меньше или равнялась прочности рассматриваемых горных пород с учетом фактора времени. Выполнение этого условия позволит избежать неконтролируемого отжима угольного пласта и обрушения пород непосредственной кровли сразу вслед за проходом исполнительного органа очистного комбайна. Исходя из этого, в качестве контрольной, для которой будет производиться расчет, необходимо принимать наиболее удаленную точку, расположенную на границе зоны влияния очистных работ впереди лавы, соответственно в плоскости пласта и в плоскости пород непосредственной кровли.

Зависимость распределения напряжений впереди лавы в рассматриваемом пласте горных пород в сечении, перпендикулярном линии очистного забоя и проходящем через выбранную контрольную точку, устанавливается на основании пространственного компьютерного моделирования (см. п. 3.3.3). Для системы координат, в которой начало координат совмещено с положением очистного забоя, эта зависимость будет иметь следующий вид

$$\sigma^{\text{экв}} = (F(z; L)^{\text{экв}} - P_0^{\text{экв}}) e^{-kX} + P_0^{\text{экв}}, \quad X \in [0; X_0], \quad (4.1)$$

где $\sigma^{\text{экв}}$ – эквивалентное напряжение, МПа;

$F(z; L)^{\text{экв}}$ – функция распределения эквивалентного напряжения на плоскости забоя по длине лавы z в зависимости от положения очистного забоя вдоль выемочного столба L , МПа;

- $P_0^{экс}$ – эквивалентное напряжение, действующее в нетронутом массиве на данной глубине ведения очистных работ, МПа;
- k – показатель затухания напряжений по длине выемочного столба, m^{-1} ;
- X – значение в метрах на координатной оси, совпадающей с направлением движения очистного забоя, $X \in [0; X_0]$, значение $X = 0$ соответствует плоскости очистного забоя, $X = X_0$ – положению контрольной точки;
- X_0 – координата наиболее удаленной точки, располагающейся на границе влияния очистных работ, м.

Учитывая, что в задаче рассматривается объемное напряженное состояние массива горных пород, для нахождения эквивалентных напряжений целесообразно применить формулу эквивалентности согласно теории прочности П.П. Баландина, приводящую сложное напряженное состояние (для случая, когда $\sigma_3 < \sigma_1 = \sigma_2$) к простому одноосному

$$\sigma^{экс} = \frac{(1 - \psi)(\sigma_3 + 2\sigma_1) + \sqrt{(1 - \psi)^2(\sigma_3 + 2\sigma_1)^2 + 4\psi(\sigma_3 - \sigma_1)^2}}{2\psi}, \quad (4.2)$$

где ψ – коэффициент хрупкости, $\psi = \sigma_p / \sigma_{сж}$.

Учет релаксации напряжений можно производить по зависимости Больцмана – Вольтерра – Ержанова [83]

$$\sigma(t) = \frac{E\varepsilon(t)}{\left(1 + \frac{\delta}{1 - \alpha} t^{1 - \alpha}\right)}, \quad (4.3)$$

где $\varepsilon(t)$, $\sigma(t)$ – деформация и напряжение, соответствующее рассматриваемому моменту времени t , отсчитываемому от момента начального нагружения тела;

E – модуль упругости;

α, δ – параметры ползучести, определяются на основании длительных испытаний горных пород на ползучесть.

С другой стороны, зависимость прочности горной породы от времени нагружения может быть описана следующей зависимостью:

$$[\sigma^{\text{экв}}(t)] = [\sigma_{\text{дл}}^{\text{экв}}] + e^{-nt}([\sigma_{\text{мгн}}^{\text{экв}}] - [\sigma_{\text{дл}}^{\text{экв}}]) \quad (4.4)$$

где $[\sigma^{\text{экв}}(t)]$ – эквивалентная прочность горной породы на момент времени t , отсчитываемого от момента начального нагружения тела;

$[\sigma_{\text{дл}}^{\text{экв}}]$ – длительная эквивалентная прочность горной породы на момент времени $t \rightarrow \infty$, отсчитываемого от момента начального нагружения тела;

$[\sigma_{\text{мгн}}^{\text{экв}}]$ – мгновенная эквивалентная прочность горной породы на момент времени $t = 0$, отсчитываемого от момента начального нагружения тела;

n – показатель затухания напряжений во времени, с^{-1} .

Согласно [8], диапазон изменения мгновенной прочности горных пород находится в пределах 1,2 – 1,9 от значения их длительной прочности. По результатам исследований [29, 61 – 62] для пород Западного Донбасса $\sigma_{\text{мгн}} = (1,3 - 1,7)\sigma_{\text{дл}}$, а время релаксации составляет 3 – 5 суток.

Еще одним немаловажным фактором, влияющим на прочностные характеристики горных пород, является скорость изменения пригрузки. Для условий Западного Донбасса ИГТМ НАН Украины была проведена большая экспериментальная работа по определению прочностных, деформационных и реологических параметров горных пород, характерных для данного региона. Обработка экспериментальных данных, представленных в диссертационной работе В.Ю. Кукулина [61] для условий Новомосковского и Павлоградско-Петропавловского геолого-промышленного района Донбасса, показала, что зависимость прочности горной породы от скорости нагруже-

ния изменяется по логарифмическому закону. При увеличении скорости изменения напряжений с 0,01 до 10 МПа/с наблюдается увеличение предела прочности пород на одноосное сжатие на 40 – 50 %. Это означает, что для оценки устойчивости призабойного пространства лавы необходимо учитывать не только реологические процессы, протекающие в массиве горных пород, но и скорость изменения напряжений в горных породах, которые непосредственно окружают очистной забой. Время действия напряжений в массиве и скорость изменения нагрузки на горные породы при выемке полезного ископаемого находятся в зависимости от скорости подачи выемочной машины.

В общем случае условие устойчивости призабойного пространства будет иметь вид

$$[\sigma_{np}^{экр}(v)] \geq \sigma^{экр}(v), \quad (4.5)$$

где $[\sigma_{np}^{экр}(v)]$ – эквивалентный предел прочности горной породы как функция скорости подачи выемочной машины, МПа;

$\sigma^{экр}(v)$ – эквивалентное напряжение, действующее в призабойной части лавы, как функция скорости подачи выемочной машины, МПа;

v – скорость подачи выемочной машины, м/с.

Для решения неравенства (4.5) относительно v необходимо записать соотношения и составить соответствующие уравнения, связывающие скорость подачи выемочной машины с реологическими и прочностными характеристиками горных пород.

Определение зависимости предела прочности горной породы от скорости нагружения

Согласно [61] зависимость предела прочности горной породы от скорости нагружения изменяется по логарифмическому закону, а значит, может быть записана в виде

$$[\sigma^{\text{эКВ}}] = q \ln\left(\frac{d\sigma}{dt}\right) + u, \quad (4.6)$$

где $\frac{d\sigma}{dt}$ – скорость нагружения, МПа/с;

q, u – коэффициенты, зависящие от типа горной породы.

Определение скорости нагружения призабойной части лавы

Функция распределения упругих напряжений в горных породах впереди очистного забоя имеет вид (4.1). Тогда изменение величины напряжений на конечном промежутке $\Delta r = (r_1 - r_2)$, который представляет собой ширину захвата исполнительного органа выемочной машины, можно найти из следующего выражения

$$d\sigma = \frac{\partial \sigma^{\text{эКВ}}}{\partial x} \Delta r, \quad (4.7)$$

учитывая, что

$$\Delta r = -v dt, \quad (4.8)$$

(4.7) запишется в виде

$$\frac{d\sigma}{dt} = -v \frac{\partial \sigma^{\text{эКВ}}}{\partial x} = kv(F(z;L)^{\text{эКВ}} - P_0^{\text{эКВ}})e^{-kX}, \quad (4.9)$$

где X – координата точки, в которой определяется тангенс угла наклона касательной к оси абсцисс, $X = (r_1 + r_2)/2$.

Определение зависимости прочности от времени действия напряжений и скорости нагружения

Принимаем в уравнении (4.4) $[\sigma^{\text{эКВ}}_{\text{мгн}}] = w[\sigma^{\text{эКВ}}_{\text{дл}}]$, где w – отношение мгновенной прочности к длительной (как уже отмечалось выше $w = 1,2 - 1,9$). Тогда (4.4) будет иметь вид

$$[\sigma^{\text{ЭКВ}}(t)] = \frac{[\sigma_{\text{МЗН}}^{\text{ЭКВ}}]}{w} + e^{-nt}([\sigma_{\text{МЗН}}^{\text{ЭКВ}}] - \frac{[\sigma_{\text{МЗН}}^{\text{ЭКВ}}]}{w}) = [\sigma_{\text{МЗН}}^{\text{ЭКВ}}] \left(\frac{1 + e^{-nt}(w-1)}{w} \right). \quad (4.10)$$

Очевидно, что для каждой конкретно взятой скорости нагружения предел прочности $[\sigma^{\text{ЭКВ}}]$ будет равняться $[\sigma_{\text{МЗН}}^{\text{ЭКВ}}]$, тогда принимая в (4.6) $[\sigma^{\text{ЭКВ}}] = [\sigma_{\text{МЗН}}^{\text{ЭКВ}}]$, для (4.10) можно записать

$$[\sigma^{\text{ЭКВ}}(t)] = \left(q \ln \left(\frac{d\sigma}{dt} \right) + u \right) \left(\frac{1 + e^{-nt}(w-1)}{w} \right). \quad (4.11)$$

Заменяя в (4.11) $\frac{d\sigma}{dt}$ на выражение (4.9), получим

$$[\sigma^{\text{ЭКВ}}(t)] = \left(q \ln \left(kv(F(z;L)^{\text{ЭКВ}} - P_0^{\text{ЭКВ}}) e^{-\frac{k(r_1+r_2)}{2}} \right) + u \right) \times \left(\frac{1 + e^{-nt}(w-1)}{w} \right) \quad (4.12)$$

Определение времени релаксации напряжений в массиве как функции скорости подачи выемочной машины

Время, за которое координата контрольной точки переместится с X_0 до 0 (из глубины массива на плоскость забоя), будет соответствовать времени релаксации напряжений и может быть найдено из выражения

$$t = NT, \quad (4.13)$$

где N – количество циклов выемки, шт;

T – время одного цикла, с.

Время релаксации напряжений в массиве, как функция скорости подачи выемочной машины, имеет вид

$$t = \left(\frac{(L_l - \sum L_n) + 2L_k}{v} + \frac{(L_l - \sum L_n)}{v_{зач}} \right) \frac{X_0}{\Delta r} \varphi, \quad (4.14)$$

где L_l – длина лавы, м;

$\sum L_n$ – суммарная длина ниш;

L_k – длина концевого участка лавы для выполнения самозарубки комбайна в пласт, м;

$v_{зач}$ – скорость выемочной машины по зачистке (только для односторонней схемы работы комбайна, для челноковой $v_{зач} \rightarrow \infty$), м/с;

φ – коэффициент увеличения времени подвигания лавы за счет наличия ремонтной смены и других запланированных простоев, $\varphi = t_{сум}/t_{доб}$, где $t_{сум}$ – количество часов в сутках, $t_{доб}$ – количество часов в сутки по добыче;

Δr – эффективная ширина захвата исполнительного органа выемочной машины, м.

С учетом (4.13) и (4.14) выражение (4.12) примет вид

$$[\sigma_{np}^{экв}(v)] = \left(q \ln(kv(F(z;L)^{экв} - P_0^{экв})e^{-\frac{k(r_1+r_2)}{2}}) + u \right) \times \\ \times \left(\frac{1 + e^{-n \left(\left(\frac{(L_l - \sum L_n) + 2L_k}{v} + \frac{(L_l - \sum L_n)}{v_{зач}} \right) \frac{X_0}{r} \varphi \right)} (w - 1)}{w} \right) k_{осл}, \quad (4.15)$$

где $k_{осл}$ – коэффициент структурного ослабления, $k_{осл} = 0,5 - 0,8$.

С учетом выражений для релаксации напряжений (4.3) и времени (4.14) для фактически действующих на плоскости забоя эквивалентных напряжений можно записать следующее выражение

$$\sigma^{\text{эКВ}}(\nu) = \frac{(F(z; L)^{\text{эКВ}} - P_0^{\text{эКВ}})e^{-kX} + P_0^{\text{эКВ}}}{\left(1 + \frac{\delta}{1 - \alpha} \left(\left(\frac{(L_L - \sum L_H) + 2L_K}{\nu} + \frac{(L_L - \sum L_H)}{\nu_{\text{зач}}} \right) \frac{X_0}{\Delta r} \varphi \right)^{1 - \alpha} \right)}. \quad (4.16)$$

Подставляя (4.15) и (4.16) в (4.5), получим неравенство с одним неизвестным параметром ν , при выполнении которого на момент подхода очистного забоя к контрольной точке не произойдет потеря устойчивости обнажения горных пород

$$\begin{aligned} & \frac{(F(z; L)^{\text{эКВ}} - P_0^{\text{эКВ}})e^{-kX} + P_0^{\text{эКВ}}}{\left(1 + \frac{\delta}{1 - \alpha} \left(\left(\frac{(L_L - \sum L_H) + 2L_K}{\nu} + \frac{(L_L - \sum L_H)}{\nu_{\text{зач}}} \right) \frac{X_0}{\Delta r} \varphi \right)^{1 - \alpha} \right)} \leq \\ & \leq \left(q \ln(k\nu(F(z; L)^{\text{эКВ}} - P_0^{\text{эКВ}})e^{-\frac{k(r_1 + r_2)}{2}}) + u \right) \times \\ & \times \left(\frac{1 + e^{-n \left(\left(\frac{(L_L - \sum L_H) + 2L_K}{\nu} + \frac{(L_L - \sum L_H)}{\nu_{\text{зач}}} \right) \frac{X_0}{\Delta r} \varphi \right)} (w - 1)}{w} \right) k_{\text{осл}}. \end{aligned} \quad (4.17)$$

В ходе решения неравенства (4.17) относительно ν определяется рациональная скорость подачи выемочной машины по фактору устойчивости призабойного пространства. Следует отметить, что решение (4.17) не может быть получено в явно выраженной символьной форме, а только с применением графического метода или при помощи специальных математических программных пакетов типа MathCad, MathLab и др.

Для условий отработки пласта C_8^H на шахте "Западно-Донбасская" численные значения параметров, входящих в (4.17) для угольного пласта и непосредственной кровли, приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

**Исходные данные для расчета скорости подачи выемочной
машины для условий отработки пласта С₈^н на шахте
"Западно-Донбасская"**

Параметр	Единицы измерения	Уголь	Алевролит (непосредственная кровля)
$F(z; L)^{экв}$	МПа	17,60	15,54
$P_0^{экв}$	МПа	5,00	3,56
k	м ⁻¹	0,15	0,15
X_0	м	30	30
δ	с ^{-0,3}	0,005	0,0094
α	с ^{-0,3}	0,690	0,726
n	с ⁻¹	86400	86400
w	—	1,64	1,59
ψ	—	0,13	0,11
q	с	2,14	2,18
u	МПа	31,38	24,25
Δr	м	0,8	0,8
φ	—	1,33	1,33
r_1	м	0	0
r_2	м	0,8	0,8
X	м	0	0
L_L	м	190	190
ΣL_H	м	0	0
L_K	м	20	20
$v_{зач}$	м/с	∞	∞
$k_{осл}$	—	0,7	0,5

Зависимость длительной эквивалентной прочности от скорости нагружения для угля приведена на рис. 4.4. Исходные экспериментальные данные для построения этого графика были взяты из диссертационной работы В.Ю. Куклина [61]. Согласно [61], испытания для углей и песчаников проводились при боковом давлении $\sigma_1 = \sigma_2 = -3$ МПа; для аргиллитов, алевролитов и сланцев при боковом давлении $\sigma_1 = \sigma_2 = -1,5$ МПа.

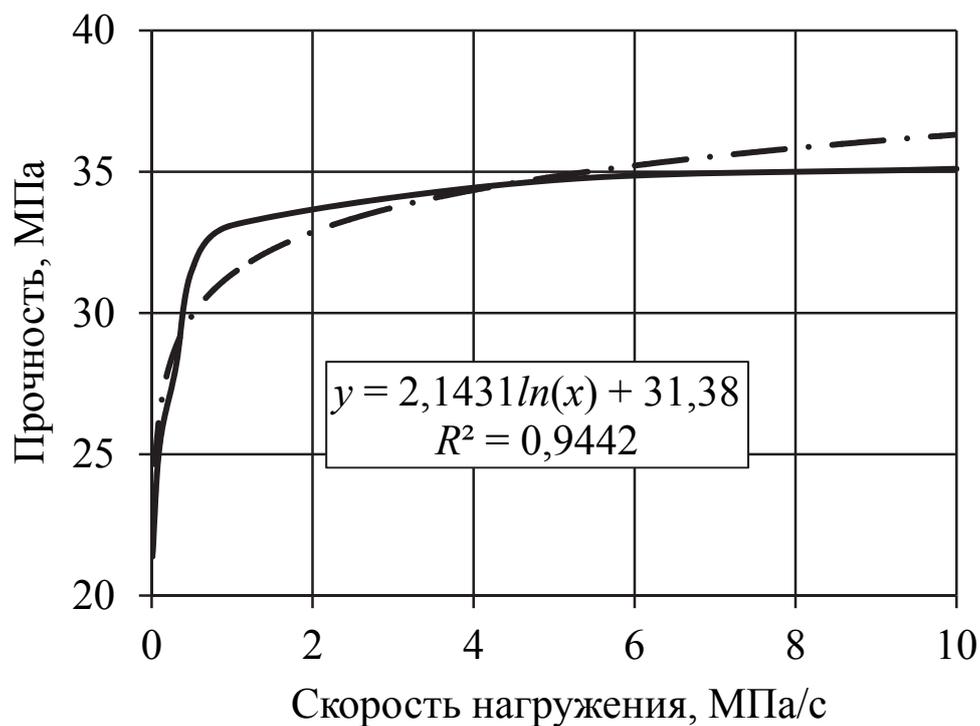


Рис. 4.4. Зависимость прочности угля от скорости нагружения:
— экспериментальная кривая; — · — аппроксимирующая кривая.

Графическое решение (4.17) для угольного пласта приведено на рис. 4.5.

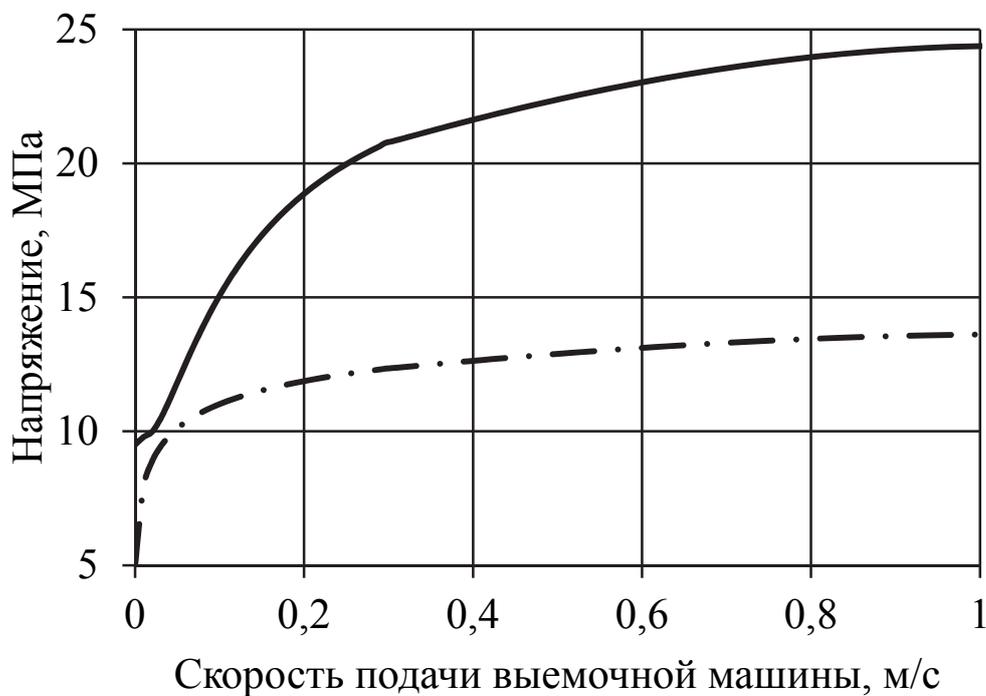


Рис. 4.5. Графическое решение неравенства (4.17)
для угольного пласта

— предельное напряжение; — · — напряжение в массиве.

Зависимость длительной эквивалентной прочности от скорости нагружения для алевролитов (непосредственная кровля) представлены на рис. 4.6.

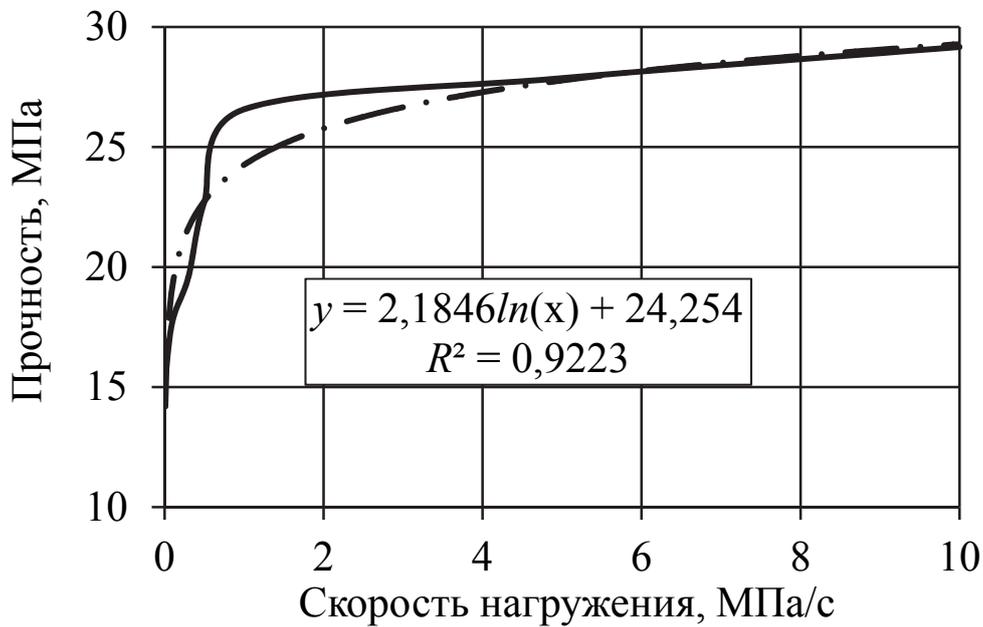


Рис. 4.6. Зависимость прочности алевролита от скорости нагружения: — экспериментальная кривая; — · — аппроксимирующая кривая.

Графическое решение (4.17) для алевролита, которым представлена непосредственная кровля пласта, приведено на рис. 4.7.

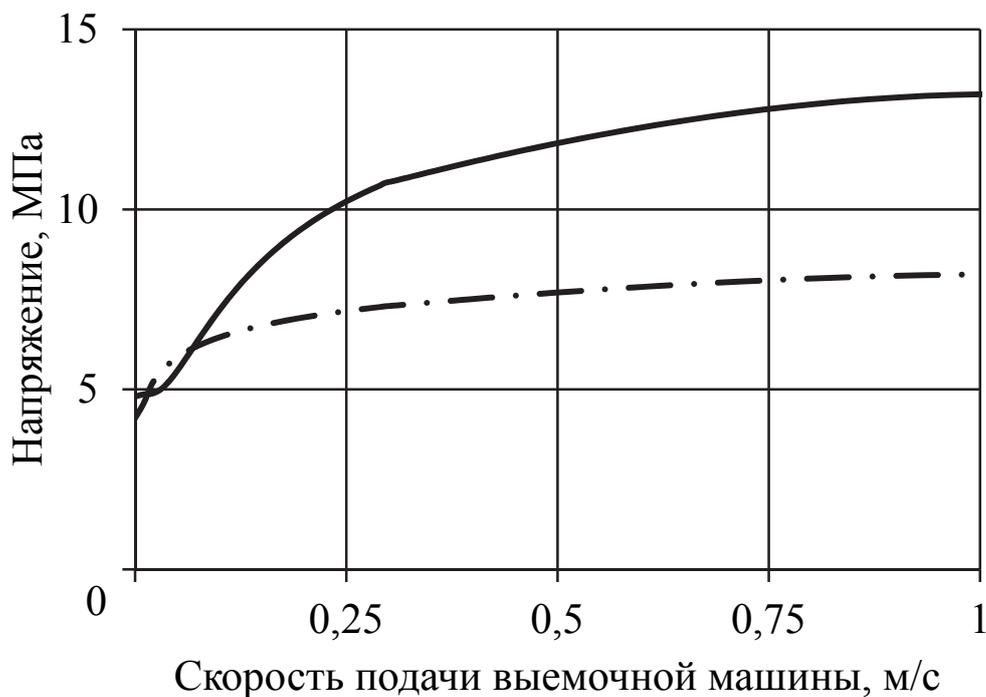


Рис. 4.7. Графическое решение неравенства (4.17) для алевролита — предельные напряжения; — · — напряжения в массиве.

Анализ полученных решений показывает, что для вынимаемого пласта (см. рис. 4.5) кривые действующих напряжений на плоскости забоя и прочности не пересекаются, и на всей числовой прямой кривая прочности находится выше кривой действующих напряжений. Это означает, что при любой скорости подачи выемочной машины в призабойной части угольного пласта не произойдет потери устойчивости. Полученные результаты решения хорошо согласуются и подтверждаются опытом отработки 874-й лавы на шахте "Западно-Донбасская", в которой за весь срок эксплуатации не наблюдался отжим угля и потеря устойчивости призабойной части обрабатываемого пласта. Для пород кровли (рис. 4.6), которая представлена алевролитами, в интервале изменения скорости подачи выемочной машины от 0,015 до 0,067 м/с напряжения, действующие в плоскости забоя, на 7 – 10 % превышают предельно допустимые, что дает возможность прогнозировать при указанных скоростях подачи потерю устойчивости пород кровли. Опыт отработки 874-й лавы, в которой скорость подачи комбайна составляла 0,025 – 0,035 м/с (1,5 – 2,1 м/мин), показывает, что практически на всем протяжении выемочного столба в срединной части очистного забоя наблюдались клиновидные вывалы, трещины и заколы в кровле пласта, что подтверждает действие эквивалентных напряжений, превышающих эквивалентный предел прочности горной породы.

Предложенная методика определения скорости подачи выемочной машины по фактору устойчивости горных пород в призабойном пространстве лавы позволяет исключить аварийные ситуации, связанные с обрушением обнажений горных пород в полость очистной выработки, а в некоторых случаях дает возможность выбрать правильный режим работы выемочной машины, что, в свою очередь, позволит контролировать процесс отжима угольного пласта.

В общем случае прогнозирование устойчивости вынимаемого пласта и пород кровли в плоскости забоя в зависимости от скорости подачи выемочной машины является важной составляющей технологического проектирования работы выемочного участка, а сама ско-

рость – важным технологическим параметром обработки выемочного столба.

4.3. Выбор рационального места остановки лавы

При обработке выемочного столба, начиная с какой-то определенной величины отхода очистного забоя от разрезной печи, имеет место периодичность обрушения кровли и соответственно периодичность появления максимальных значений конвергенции пород в лаве. В пределах одного периода величина конвергенции изменяется от минимального до максимального значения в зависимости от положения очистного забоя вдоль выемочного столба (см. формулу (3.1) и табл. 3.4). В ходе обработки результатов компьютерного моделирования устанавливается положение очистного забоя, которому соответствует максимальная конвергенция горных пород в лаве. Для условий разработки пласта С^н₈ (874-я лава) на шахте "Западно-Донбасская" ОАО "Павлоградуголь" максимальное сближение горных пород почвы и кровли на линии постановки посадочного ряда стоек механизированной крепи соответствует положению очистного забоя, для которого параметр $S = 2$ (см. формулу (3.3)).

При обработке выемочного столба иногда возникает необходимость остановки лавы на какой-то длительный промежуток времени. Причиной прекращения очистных работ могут быть запланированные мероприятия по ремонту или замене горношахтного оборудования, как в пределах выемочного участка (замена выемочной машины, рештачного става забойного конвейера, ленточных конвейеров на штреках, массовая замена стоек механизированной крепи и др.), так и на шахте в целом (ремонт или переоснащение установки главного подъема, установки главного вентилятора, ГПП и др.). При планировании указанных мероприятий необходимо учитывать, что остановка лавы в положениях, для которых характерны максимальные значения конвергенции, крайне нежелательна (рис. 4.8).

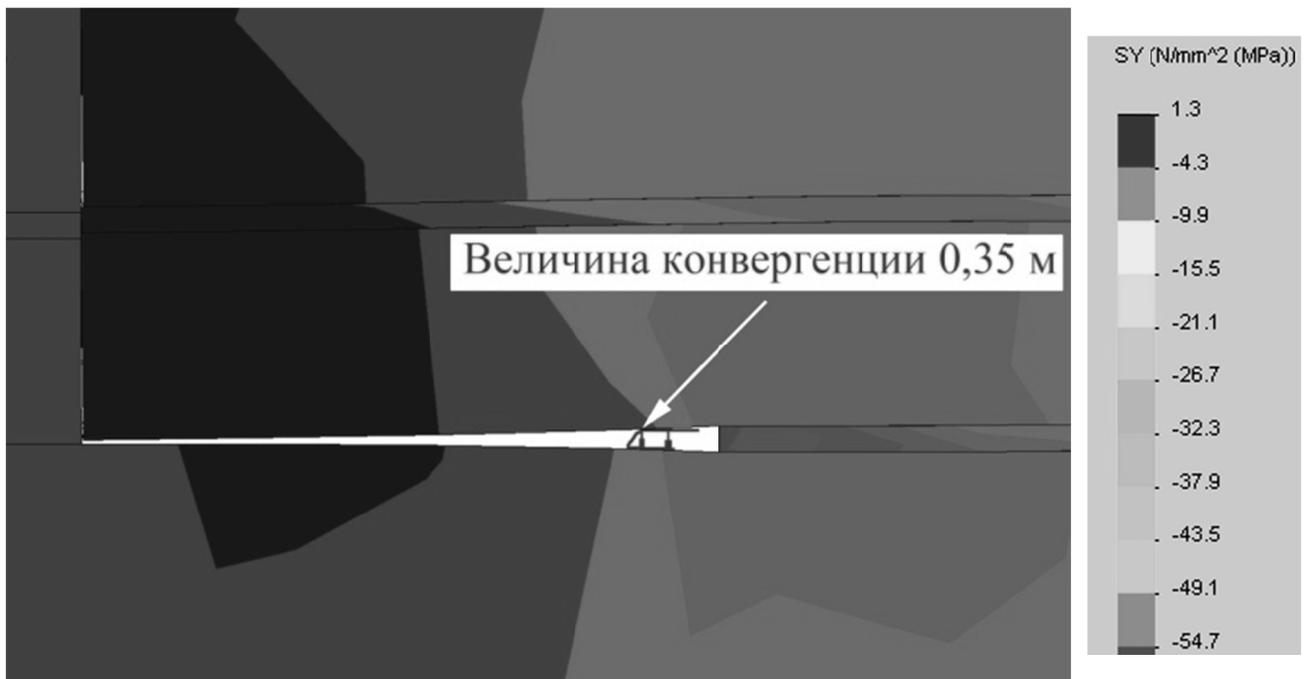


Рис. 4.8. Нерациональное положение лавы вдоль выемочного столба для остановки очистных работ

Это объясняется тем, что с течением времени в горном массиве начинают развиваться реологические процессы, процессы релаксации напряжений, происходит уменьшение модуля упругости горных пород [8 – 10, 39, 68, 100, 142 – 144], что приводит к уменьшению жесткости породных слоев и, как следствие, к дополнительному прогибу кровли и пучению почвы в лаве. Также в этих положениях консольное зависание горных пород в выработанном пространстве оказывает длительное повышенное давление на секции механизированной крепи, что отрицательно сказывается на гидросистеме очистного комплекса. Суммарное действие вышеуказанных процессов и явлений может привести к посадке крепи на жесткое основание или вызвать другие аварийные (предаварийные) ситуации в лаве. Во избежание внештатных ситуаций, устранение негативных последствий которых, как правило, связаны с большими материальными и трудовыми затратами, остановку очистного забоя необходимо осуществлять в положениях, которым соответствует минимальная конвергенция пород в лаве. Для условий 874-й лавы (пласт C^H_8 , шахта "Западно-Донбасская") это положения очистного забоя, для которых параметр $S = 0$ (см. формулу (3.3)). В этом случае призабойная часть угольного

пласта и секции механизированного комплекса находятся в относительно разгруженном стабильном состоянии, а гидрофицированные стойки имеют максимальный запас податливости, что исключает возможность посадки крепи на жесткое основание (рис. 4.9).

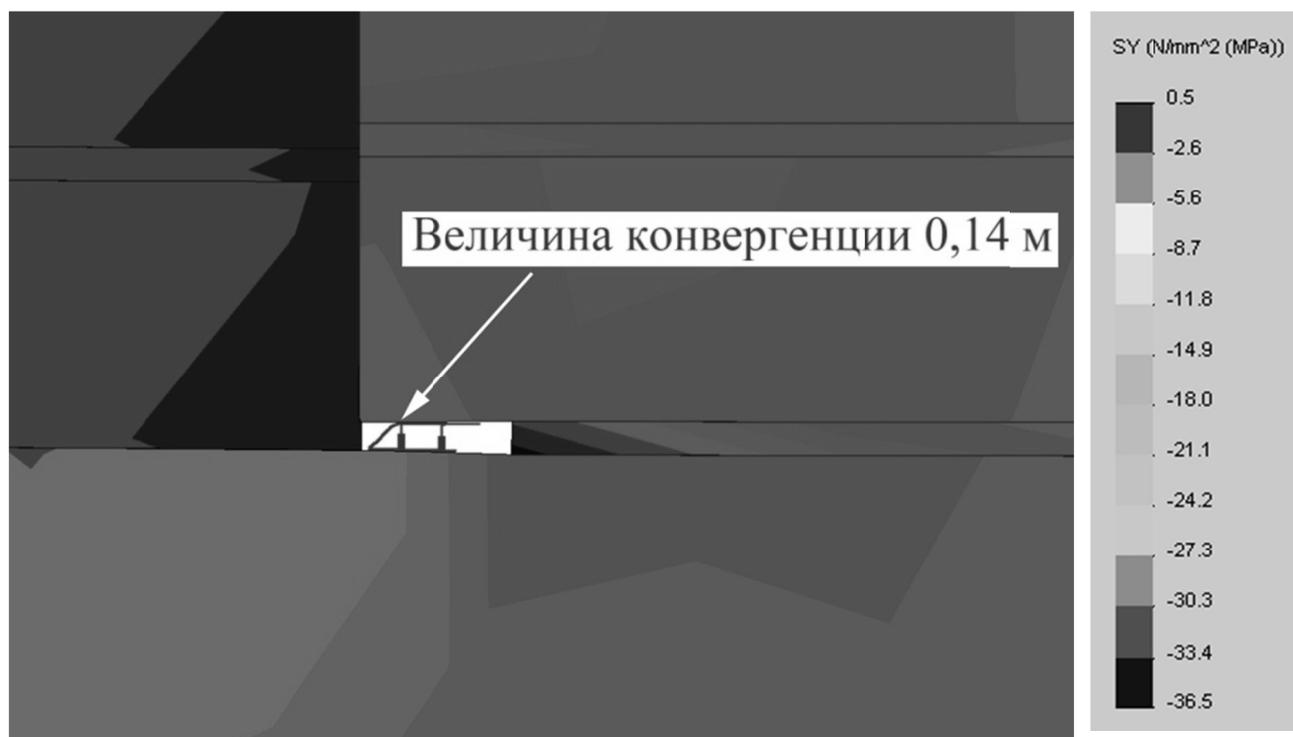


Рис. 4.9. Рациональное положение лавы вдоль выемочного столба для остановки очистных работ

Учитывать периодичность возникновения максимальных значений конвергенции горных пород в лаве также целесообразно и при определении места постановки механизированного комплекса на демонтаж после завершения отработки выемочного столба. Правильный выбор положения линии очистного забоя на момент прекращения добычных работ позволит увеличить коэффициент извлечения забойного оборудования из демонтажной камеры и существенно повысит безопасность ведения горных работ, связанных с демонтажем механизированного комплекса.

4.4. Рациональное использование ресурса механизированной крепи

Установленные в п. 3.3.2 закономерности распределения конвергенции горных пород в лаве в зависимости от положения очистного забоя вдоль выемочного столба показывают, что конвергенция горных пород и соответственно фактическая величина податливости стоек механизированной крепи в середине лавы оказывается на 40 – 60 % больше, чем на краях. Это означает, что при прочих равных условиях износ гидроцилиндров по направлению от краев к середине лавы будет возрастать пропорционально величине опускания стоек и в центре на 40 – 60 % превысит износ стоек, расположенных на краевых участках механизированного комплекса. Для обеспечения бесперебойной и безаварийной работы секций механизированной крепи к стойкам, находящимся в зоне повышенного потенциального износа, необходимо применять дополнительные мероприятия по ремонту и профилактическому обслуживанию, что позволит увеличить время наработки на отказ гидроцилиндров стоек механизированной крепи и общую эффективность использования забойного оборудования. Для обеспечения равномерного износа механизированных крепей по длине лавы, в некоторых случаях при монтаже забойного комплекса в новую лаву без выдачи на поверхность и проведения капитального ремонта, целесообразно произвести расстановку секций в обратном порядке, т.е. крепь, которая находилась в середине лавы, необходимо монтировать в краевые части, а ту, которая работала в условиях пониженного износа, целесообразно располагать в средней части очистного забоя (рис. 4.10).

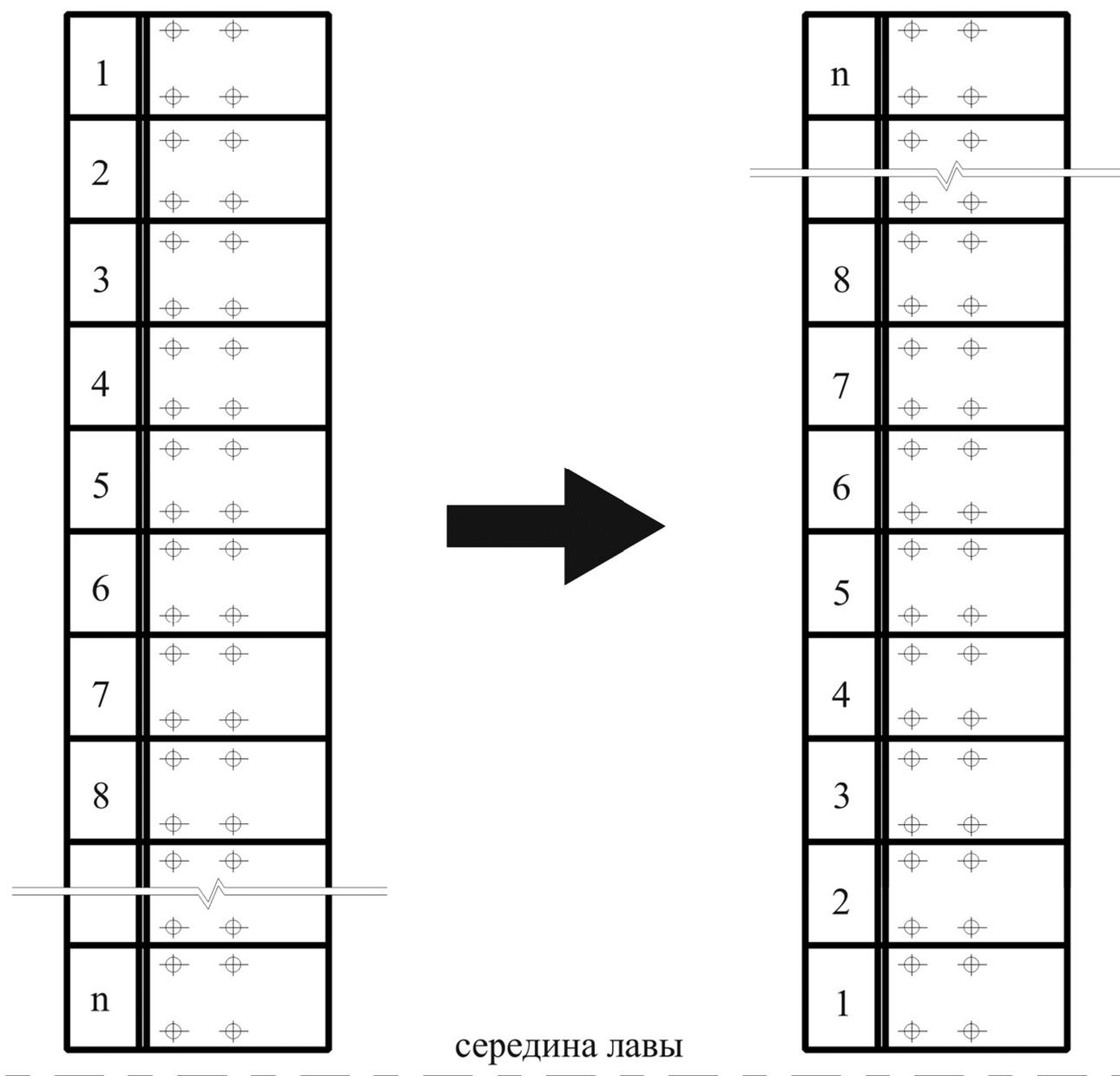


Рис. 4.10. Схема монтажа секций в новую лаву

Таким образом, целью указанных рекомендаций является увеличение срока безремонтной эксплуатации гидростоек механизированной крепи и повышение коэффициента использования очистного оборудования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В научно-исследовательской работе решена актуальная научная задача по обоснованию технологических параметров отработки выемочного столба с учетом изменения напряженно-деформированного состояния слоистого трансверсально-изотропного массива горных пород вокруг очистной выработки, что позволяет повысить эффективность добычи полезного ископаемого.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Выполненный анализ методов определения технологических параметров очистной выемки показал, что на современном уровне развития горной науки отсутствует комплексный подход, учитывающий в расчетных схемах влияние:
 - всей толщи горных пород, вмещающих угольный пласт;
 - слоистости горного массива;
 - анизотропии деформационных и прочностных свойств горных пород;
 - силовых параметров крепи подготовительной и очистной выработок;
 - пространственности процессов, происходящих в массиве;
 - периодичности проявления горного давления в очистном забое.
2. Обоснованы геометрические параметры пространственной компьютерной модели слоистого трансверсально-изотропного горного массива с учетом физико-механических свойств пород в плоскости изотропии и нормальной к ней, влияния силовых характеристик крепи очистной и подготовительной выработок.
3. Установлены закономерности формирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород вокруг очистных выработок, а именно:

- установлен механизм обрушения пород кровли в выработанном пространстве лавы в зависимости от положения очистного забоя вдоль выемочного столба, который позволяет определить периодичность обрушения горных пород кровли и геометрические размеры области предельного состояния горного массива;
- определено, что в зависимости от положения очистного забоя вдоль выемочного столба распределение конвергенции горных пород вдоль посадочного ряда стоек механизированной крепи характеризуется переменными коэффициентами a , b и C и описывается уравнением четвертого порядка вида $K = aZ^4 + bZ^2 + C$, что позволяет определить запас податливости гидростоек механизированной крепи по длине лавы в любом положении очистного забоя вдоль выемочного столба;
- установлено, что изменение вертикальной составляющей напряжения в разрабатываемом пласте вдоль выемочного столба, за исключением 10-метровых концевых участков лавы, описывается экспоненциальной зависимостью вида $\sigma_y = (F(z; L) - P_0)e^{-kX} + P_0$, $X \in [0; L_{cm}]$ – для случая, когда призабойная часть находится в области действия допустимых напряжений; и вида $\sigma_y = (\sigma_y^{np} - P_0)e^{-kX} + P_0$, $X \in [\frac{1}{k} \ln \frac{F(L) - P_0}{\sigma_y^{np} - P_0}; L_{cm}]$, когда в призабойной части угольного пласта имеет место предельное состояние угольного массива;
- определено, что на концевых 10-метровых участках очистного забоя, начиная с отметки отхода лавы от разрезной печи 25 – 35 м, давление в плоскости забоя практически не зависит от положения лавы вдоль выемочного столба и составляет 1,8 – 2,2 P_0 ;
- определена зона совместного влияния подготовительной и очистной выработок и установлена закономерность распределения напряжений в этой зоне. По длине лавы зона совместного влияния подготовительной и очистной выработки охватывает концевые 10-метровые участки, по длине выемочного столба эта зона распространяется на расстояние 65 – 70 м от плоскости забоя;

- установлено, что для рассматриваемых условий величина конвергенции в подготовительном штреке впереди очистного забоя описывается экспоненциальной зависимостью $Kg = (D + R)e^{-0,02x}$, где $x \in [0; L_{cm}]$, D и R – переменные, которые зависят от положения очистного забоя вдоль выемочного столба.
4. Обоснованы технологические параметры отработки выемочного столба с учетом закономерностей распределения напряженно-деформированного состояния массива горных пород вокруг очистной выработки:
 - рациональная длина лавы по фактору конвергенции горных пород на линии посадочного ряда стоек механизированной крепи;
 - рациональная скорость подачи выемочной машины по фактору устойчивости горных пород в призабойном пространстве лавы;
 - рациональное место запланированной остановки очистного забоя по длине выемочного столба с учетом периодичности обрушения пород кровли, в котором запас податливости посадочного ряда стоек механизированной крепи максимальный, что позволяет избежать аварийных ситуаций в лаве.
 5. Разработаны предложения по рациональному использованию ресурса механизированного комплекса в лаве на основе обеспечения равномерного износа гидростоек механизированной крепи.
 6. Обоснованность и достоверность научных результатов, выводов и рекомендаций исследовательской работы подтверждаются достаточным объемом шахтных экспериментальных исследований, выполненных по стандартным, апробированным методикам, удовлетворительной сходимостью (не ниже 80 %) результатов, полученных при компьютерном моделировании, с результатами натуральных шахтных экспериментов, положительными результатами внедрения разработок и рекомендаций в производство.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Аведьян, А. Прочность не для прочнистов. Опыт 1 [Текст] / А. Аведьян, А. Данилин // САПР и графика. – 2008. – № 1. – С. 12 – 24.
2. Аведьян, А. Прочность не для прочнистов. Опыт 2 [Текст] / А. Аведьян, А. Данилин // САПР и графика. – 2008. – № 2. – С. 11 – 25.
3. Аведьян, А. Прочность не для прочнистов. Опыт 3 [Текст] / А. Аведьян, А. Данилин // САПР и графика. – 2008. – № 3. – С. 12 – 22.
4. Акимов, А.Г. Сдвигение горных пород при подземной разработке угольных и сланцевых шахт [Текст] / А.Г. Акимов, Н.Б. Земисев. – М.: Недра, 1979. – 226 с.
5. Алексеенко, С.Ф. Физика горных пород. Горное давление [Текст]: сб. задач и упражнений / С.Ф. Алексеенко, В.П. Мележик. – К.: Вища шк. Головное изд-во, 1988. – 248 с.
6. Алексеенко, С.Ф. Физика горных пород. Горное давление [Текст] / С.Ф. Алексеенко, В.П. Мележик. – К.: Вища шк. Головное изд-во, 1987. – 280 с.
7. Алямовский, А. Инженерный анализ в среде SolidWorks [Текст] / А. Алямовский // Весь мир 3d.... – 2008. – № 4. – С. 28 – 36.
8. Баклашов, И.В. Деформирование и разрушение породных массивов [Текст] / И.В. Баклашов. – М.: Недра, 1988. – 270 с.
9. Баклашов, И.В. Механика горных пород [Текст] / И.В. Баклашов, Б.А. Картозия. – М.: Недра, 1975. – 271 с.
10. Баклашов, И.В. Механические процессы в породных массивах [Текст] / И.В. Баклашов, Б.А. Картозия. – М.: Недра, 1986. – 272 с.
11. Барон, Л.И. Характеристики трения горных пород [Текст] / Л.И. Барон. – М.: Наука, 1967. – 208 с.
12. Батугин, С.А. Анизотропия массива горных пород [Текст] / С.А. Батугин. – Новосибирск: Наука (Сиб. отделение), 1988. – 82 с.

13. Борисов, А.А. Механика горных пород и массивов [Текст] / А.А. Борисов. – М.: Недра, 1980. – 380 с.
14. Борисов, А.А. Расчет опорного давления вариационным методом [Текст] / А.А. Борисов, Н.Н. Кайдалов, В.Г. Лабазин // Физические процессы горного производства. – 1976. – № 3. – С. 17 – 23.
15. Борисов, А.А. Расчеты горного давления в лавах пологих пластов [Текст] / А.А. Борисов. – М.: Недра, 1964. – 278 с.
16. Борисов, А.А. Новые методы исследований и расчетов горного давления в лавах пологих пластов [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук / А.А. Борисов. – Л.: ЛГИ, 1960. – 276 с.
17. Бугара, М.И. Прогноз устойчивости непосредственной кровли в сложных горно-геологических условиях [Текст] / М.И. Бугара, Ю.Б. Грядущий, В.В. Назимко // Уголь Украины. – 1997. – № 4. – С. 15 – 17.
18. Бурчаков, А.С. Технология и механизация подземной разработки пластовых месторождений [Текст] / А.С. Бурчаков, Ю.А. Жежелевский, С.А. Ярунин. – М.: Недра, 1992. – 415 с.
19. Бурчаков, А.С. Технология подземной разработки пластовых месторождений полезных ископаемых [Текст] / А.С. Бурчаков, Н.К. Гринько, А.Б. Ковальчук. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1978. – 536 с.
20. Ван-Итерсон, Ф. Давление кровли на угольный пласт впереди забоя при разработке лавами по простиранию [Текст] / Ф. Ван-Итерсон // Вопросы теории горного давления: статьи. – М.: Госгортехиздат, 1961. – С. 182 – 199.
21. Власов, В.З. Балки, плиты и оболочки на упругом основании [Текст] / В.З. Власов, Н.Н. Леонтьев. – М.: Госфизматиздат, 1960. – 492 с.
22. Власов, С.Ф. Исследование механизма обрушения пород кровли на объемной модели слоистого трансверсально-изотропного массива при подвигании очистного забоя [Текст] / С.Ф. Власов, А.А. Сидельников // Науковий вісник НГУ. – 2010. – № 2. – С. 14 – 17.

23. Власов, С.Ф. Объемное моделирование напряженно-деформированного состояния трансверсально-изотропного массива горных пород вокруг очистной выработки [Текст] / С.Ф. Власов, А.А. Сидельников // Проблемы недропользования: сб. науч. тр. – СПб.: СПГГИ, 2010. – Ч.1. – С. 174 – 177.
24. Власов, С.Ф. Результаты исследования конвергенции горных пород в лаве в зависимости от положения очистного забоя вдоль выемочного столба на объемной модели [Текст] / С.Ф. Власов, А.А. Сидельников // Науковий вісник НГУ. – 2010. – № 3. – С. 39 – 41.
25. Власов, С.Ф. Результаты объемного моделирования напряженного состояния трансверсально-изотропного массива горных пород вокруг очистной выработки [Текст] / С.Ф. Власов, А.А. Сидельников // Науковий вісник НГУ. – 2010. – № 4. – С. 22 – 26.
26. Гавич, И.К. Теория и практика применения моделирования в гидрогеологии [Текст] / И.К. Гавич. - М.: Недра, 1980. – 358 с.
27. Галлагер, Р. Метод конечных элементов. Основы [Текст] / Р. Галлагер. – М.: Мир, 1984. – 348 с.
28. Геолого-промышленный очерк Западного Донбасса [Текст] / под ред. М.И. Струева; Министерство геологии УССР, трест "Укрюжгеология", Павлоградская геологоразведочная экспедиция. – Павлоград, 1974. – 589 с.
29. Глушко, В.Т. Проявление горного давления в глубоких шахтах [Текст] / В.Т. Глушко. – К.: Наукова думка, 1971. – 196 с.
30. Гмошинский, В.Г. Горное давление на пологий угольный пласт в окрестностях выработки [Текст] / В.Г. Гмошинский // Уголь. – 1957. – № 6. – С. 16 – 23.
31. Грядущий, Ю.Б. Геомеханические основы управления вывалоопасными кровлями в очистных забоях [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук / Ю.Б. Грядущий. – Макеевка, 1997. – 269 с.

32. Грядущий, Ю.Б. Обоснование повышения устойчивости кровли в очистном забое при периодическом характере проявлении горного давления [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Ю.Б. Грядущий. – М., 1993. – 230 с.
33. Грядущий, Ю.Б. Система геомеханической оценки вывалостойчивости кровли в очистных забоях [Текст] / Ю.Б. Грядущий // Тр. межд. конф. "Неделя горняка – 97". – М.: МГГУ, 1997. – С. 30 – 31.
34. Джордж, А. Численное решение больших разреженных систем уравнений [Текст] / А. Джордж, Дж. Лю – М.: Мир, 1984. – 284 с.
35. Динник, А.Н. Статьи по горному делу [Текст] / А.Н. Динник. – М.: Углетехиздат, 1957. – 87 с.
36. Динник, А.Н. Распределение напряжений вокруг подземных горных выработок [Текст] / А.Н. Динник, А.П. Моргаевский, Г.Н. Савин. – М.: Академиздат, 1938. – 64 с.
37. Единая методика шахтных испытаний механизированных крепей [Текст] / С.Т. Кузнецов, А.А. Орлов, В.Н. Хорин и др. – М.: ИГД им. А.А. Скочинского, 1966. – 12 с.
38. Единые правила безопасности при взрывных работах [Текст]: НПАОП 08.0-1.02-92. – Изд. офиц. – К.: МП "Квадро-Союз", 1993. – 172 с.
39. Ержанов, Ж.С. Теория ползучести горных пород и ее приложения [Текст] / Ж.С. Ержанов. – Алма-Ата: Наука, 1964. – 175 с.
40. Жуков, В.В. Напряженно-деформированное состояние слоистого массива [Текст] / В.В. Жуков, Е.В. Чернов, Г.Н. Довгенко. – Л.: Наука, 1973. – 132 с.
41. Задачник по підземній розробці вугільних родовищ [Текст] / К.Ф. Сапицький, В.П. Прокоф'єв, І.Ф. Ярембаш та ін. – Донецк: ДонДТУ, 1999. – 194 с.

42. Закономерности изменения состояния горного массива при отработке пологих пластов [Текст] / А.В. Савостьянов, В.И. Бузило, В.П. Сердюк, А.Г. Кошка // Материалы международной науч.-практ. конф. "Школа подземной разработки". – Д.: НГУ, 2008. – С. 93 – 97.
43. Зборщик, М.П. Геомеханика подземной разработки угольных пластов [Текст]. Т.1. / М.П. Зборщик, М.А. Ильяшов. – Донецк: ДонНТУ, 2006. – 256 с.
44. Зборщик, М.П. Выбор способов охраны и места расположения подготовительных выработок [Текст] / М.П. Зборщик. – К.: Техника, 1970. – 222 с.
45. Зборщик, М.П. Определение устойчивости непосредственной кровли в очистных забоях [Текст] / М.П. Зборщик, Ю.Б. Грядущий, В.В. Назимко // Геомеханическая оценка и обеспечение устойчивости кровель в очистных забоях. – Донецк: ЦНТБИ, 1997. – С. 16 – 24.
46. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике [Текст] / О. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
47. Зорин, А.Н. Механика разрушения горного массива и использование его энергии при добыче полезных ископаемых [Текст] / А.Н. Зорин, Ю.М. Халимендик, В.Г. Колесников. – М.: ООО "Недра-Бизнесцентр", 2001. – 413 с.
48. Изучение проявлений горного давления на моделях [Текст] / Г.Н. Кузнецов, М.Н. Будько, А.А. Филиппова, М.Ф. Шклярский. – М.: Углетехиздат, 1959. – 283 с.
49. Ильштейн, А.М. Закономерности проявления горного давления в лавах пологопадающих пластов угольных месторождений / А.М. Ильштейн. - М.: Углетехиздат, 1958. – 272 с.
50. Инструкция по поддержанию горных выработок на шахтах Западного Донбасса [Текст]. – СПб – Павлоград: ВНИМИ, 1994. – 96 с.
51. Исследования прочности и деформируемости горных пород [Текст] / А.И. Берон, Е.С. Ватолин, М.И. Койфман и др. – М.: Наука, 1973. – 208 с.

52. Казаков, С.С. Оборудование комплексно-механизированных лав [Текст] / С.С. Казаков, Б.П. Лелеко, В.Г. Шульга. – К.: Техніка, 1976. - 280 с.
53. Коваль, А.И. Обоснование параметров охранных конструкций выемочных штреков для их повторного использования [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / А.И. Коваль. – Д.: НГУ, 2008. – 187 с.
54. Коренев, Б.Г. Расчет плит на упругом основании [Текст] / Б.Г. Коренев, Е.И. Черниговская. – М.: ГСИ, 1962. – 355 с.
55. Космодамианский, А.С. Приближенный метод определения напряженного состояния изотропной пластики с конечным числом круговых отверстий [Текст] / А.С. Космодамианский // Механика и машиностроение. – М.: Отд-ние техн. наук, 1960. – № 2. – С. 132 – 135.
56. Кузнецов, Г.Н. Взаимодействие боковых пород и крепи в очистных выработках пологопадающих пластов каменного угля [Текст] / Г.Н. Кузнецов // Исследования по вопросам маркшейдерского дела. – М., 1953 – № 27. – С. 28 – 36.
57. Кузнецов, Г.Н. О механизме взаимодействия боковых пород и крепи в очистных выработках пологопадающих угольных пластов [Текст] / Г.Н. Кузнецов // Исследования по вопросам маркшейдерского дела. – М., 1954. - № 34. – С. 31 – 38.
58. Кузьменко, А.М. Метод прогноза состояния горного массива при подземной разработке [Текст] / А.М. Кузьменко, А.В. Савостьянов, А.В. Вивчаренко // Материалы международной науч.-практ. конф. "Школа подземной разработки". – Д.: НГУ, 2007. – С. 121 – 126.
59. Кузьменко, О.М. Вплив технологічних параметрів виймання вугілля на структурні зміни гірського масиву [Текст] / О.М. Кузьменко, О.В. Савост'янов, В.Д. Рябічев // Материалы международной науч.-практ. конф. "Школа подземной разработки". – Д.: НГУ, 2008. – С. 113 – 116.

60. Куклин, В.Ю. Задачи геомеханики охраны выработок в условиях интенсивной отработки угольных пластов [Текст] / В.Ю. Куклин // Геотехническая механика: сб. науч. тр. – Д.: ИГТМ НАН Украины им. Н.С. Полякова, 2000. – № 23. – С. 54 – 57.
61. Куклин, В.Ю. Геомеханическое обоснование параметров способов крепления и охраны выработок в неустойчивых породах при интенсивной отработке пологих угольных пластов [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / В.Ю. Куклин. – Д., 2004. – 169 с.
62. Куклин, В.Ю. Приближенная оценка реологических свойств горных пород [Текст] / В.Ю. Куклин, Н.Т. Бобро // Геотехническая механика: сб. науч. тр. / – Д.: ИГТМ НАН Украины им. Н.С. Полякова, 2002. – № 40. – С. 255 – 258.
63. Лабасс, А. Давление горных пород в угольных шахтах [Текст] / А. Лабасс // Вопросы теории горного давления: сб. переводов. – М.: Госгортехиздат, 1961. – 300 с.
64. Лабасс, А. Давление и движение пород: материалы междунар. конф. по горному давлению [Текст] / А. Лабасс. – М.: Госгортехиздат, 1961. – С. 59 – 164.
65. Лехницкий, С.Г. Теоретические исследования напряжений в упругом анизотропном массиве вблизи подземной выработки эллиптического сечения [Текст] / С.Г. Лехницкий // Труды ВНИМИ. – СПб.: ВНИМИ, 1962. – № 45. – С. 155 – 179.
66. Лехницкий, С.Г. Теория упругости анизотропного тела [Текст] / С.Г. Лехницкий. – М.: Наука, 1977. – 415 с.
67. Лыков, И.Ф. Кливаж и его влияние на характер обрушения пород [Текст] / И.Ф. Лыков. – М.: Недра, 1976. – 227 с.
68. Максимов, А.П. Горное давление и крепь выработок [Текст] / А.П. Максимов. – М.: Недра, 1973. – 282 с.
69. Матвеев, В.А. К вопросу применения ЭВМ для решения оперативных задач управления горным давлением в очистных забоях [Текст] / В.А. Матвеев // Проблемы механики горных пород. – Новосибирск, 1971. – С. 155 – 162.

70. Методика проведения в шахтных условиях экспериментов по установлению оптимального сопротивления механизированных крепей [Текст] / А.А. Орлов, О.Т. Степаненко, С.Г. Баранов, В.Ю. Сетков. – Л.: ВНИМИ, 1972. – 59 с.
71. Методические указания по исследованию горного давления на угольных и сланцевых шахтах [Текст] / К.А. Ардашев, А.М. Козел, И.Л. Давыдович и др. – Л.: ВНИМИ, 1973. – 102 с.
72. Методическое пособие по изучению слоистости и прогнозу расслаиваемости осадочных пород [Текст] / К.А. Ардашев, В.М. Шик, В.А. Рудаков и др. – Л.: ВНИМИ, 1967. – 47 с.
73. Моделювання геотехнічних систем [Текст] / Г.Г. Півняк, О.М. Шашенко, О.О. Сдвижкова, Б.С. Бусигін. – Д.: НГУ, 2009. – 247 с.
74. Мусхелишвили, Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. Основные уравнения, плоская теория упругости кручение и изгиб [Текст] / Н.И. Мусхелишвили. – М.: Изд-во. АН СССР, 1954. – 138 с.
75. Мусхелишвили, Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости [Текст] / Н.И. Мусхелишвили. – М.: Наука, 1966. – 707 с.
76. Назимко, И.В. Обоснование параметров интенсивной технологии выемки угольных пластов на больших глубинах [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / И.В. Назимко. – Д., 2009. – 158 с.
77. Назимко, И.В. Исследование влияния скорости подвигания очистного забоя на характер деформирования покрывающих пород [Текст] / И.В. Назимко // Вісник КТУ. – Кривий Ріг. – 2006. – № 5 (15). – С. 41 – 45.
78. Назимко, И.В. Особенности структуры обрушения и уплотнения пород при высоких скоростях подвигания очистного забоя [Текст] / И.В. Назимко // Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках; сб. науч. тр. XVII Междунар. школы. – Симферополь: ТНУ, 2007. – С. 215 – 217.

79. Назимко, И.В. Параметры зоны максимальных прогибов при разных скоростях подвигания очистного забоя [Текст] / И.В. Назимко // Проблемы гірського тиску: зб. наук. пр. ДонНТУ. – 2007. – С. 56 – 68.
80. Насонов, И.Д. Моделирование физических процессов в горном деле [Текст] / И.Д. Насонов, В.И. Ресин. – М.: Изд-во Академии горных наук, 1999. – 343 с.
81. Норри, Д. Введение в метод конечных элементов [Текст] / Д. Норри, Ж. де Фриз. – М.: Мир, 1981. – 304 с.
82. Орлов, А.А. Взаимодействие механизированных крепей с кровлей [Текст] / А.А. Орлов, Б.Ю. Сетков, С.Г. Баранов. – М.: Недра, 1976. – 336 с.
83. Порцевский, А.К. Основы физики горных пород, геомеханики и управления состоянием массива [Текст] / А.К. Порцевский, Г.А. Катков. – М.: МГУ, 2004. – 120 с.
84. Правила безопасности в угольных шахтах [Текст]: НПАОП 10.0-1.01-10. – Утв. 22.03.10 № 62. – Изд. офиц. – К.: Госгорпромнадзор Украины, 2010. – 432 с.
85. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях [Текст]: Утв. м-вом угольн. промышленности СССР. – Изд. офиц. – М.: Недра, 1981. – 288 с.
86. Практика управления горным давлением [Текст] / под общ. ред. О. Якоби. – М.: Недра, 1987. – 566 с.
87. Протасени, А.Г. О возможностях сведения решения двухсвязной задачи взаимного влияния двух горных выработок к односвязной [Текст] / А.Г. Протасени // Записки ЛГИ. – 1972. – Т. 56. – С. 76 – 83.
88. Протодяконов, М.М. Давление горных пород и рудничное крепление [Текст] / М.М. Протодяконов. – М.: Госгориздат, 1933. – 94 с.
89. Расчеты на прочность в машиностроении [Текст]. Т.3 / под ред. С.Д. Пономарева. – М.: МАШГИЗ. – 1959. – 1147 с.

90. Ростовцев, Д.С. Основные вопросы теории и практики в области управления кровлей по данным заграницы и СССР и их значение с точки зрения общих интересов народного хозяйства [Текст] / Д.С. Ростовцев. – М.: ГОНТИ, 1935. – С. 8 – 140.
91. Ростовцев, Д.С. Управление кровлей при разработке пологопадающих пластов каменного угля [Текст] / Д.С. Ростовцев. – М.: ГОНТИ, 1935 – 107 с.
92. Руководство по изучению геологического строения шахтных полей при подземной разработке угольных месторождений [Текст] / под ред. К.А. Ардашева. – Л.: ВНИМИ, 1972. – 34 с.
93. Руппенейт, К.В. Давление и смещение горных пород в лавах пологопадающих пластов [Текст] / К.В. Руппенейт. – М.: Углетехиздат, 1957. – 228 с.
94. Руппенейт, К.В. Механические свойства горных пород [Текст] / К.В. Руппенейт. – М.: Углетехиздат, 1956. – 324 с.
95. Руппенейт, К.В. Некоторые вопросы механики горных пород [Текст] / К.В. Руппенейт. – М.: Углетехиздат, 1954. – 384 с.
96. Савин, Г.Н. Распределение напряжений около отверстий [Текст] / Г.Н. Савин. – К.: Наукова думка, 1968. – 887 с.
97. Савостьянов, А.В. Теоретические основы управления состоянием массива горных пород [Текст] / А.В. Савостьянов. – Д.: ДГИ, 1984. – 164 с.
98. Савостьянов, А.В. Управление состояние массива горных пород [Текст]: учеб. пособ. / А.В. Савостьянов, В.Г. Ключков. – К.: УМК ВО, 1992. – 274 с.
99. Савостьянов, О.В. Керування станом масиву гірських порід [Текст]: посіб. для студ. вищ. навч. закл. / О.В. Савостьянов, В.Г. Ключков. – Д.: ДГІ, 1993. – 272 с.
100. Садовенко, И.А. Анализ и прогнозирование геотехнических процессов в остановленном очистном забое [Текст] / И.А. Садовенко. – Д.: ДГИ, 1990. – 21 с.
101. Сегерлинд, Л. Применение метода конечных элементов [Текст]: пер. с англ. / Л. Сегерлинд. – М.: Мир, 1979. – 392 с.

102. Сидельников, А.А. Обоснование параметров объемного моделирования массива горных пород вокруг очистной и подготовительных выработок [Текст] / А.А. Сидельников // Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр. ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины. – 2009. – Вып. 82. – С. 77 – 85.
103. Сеницын, А.П. Расчет балок и плит на упругом основании за пределом упругости: пособие для проектировщиков [Текст] / А.П. Сеницын. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1974. – 176 с.
104. Скипочка, С.И. Геомеханические аспекты поведения массива вблизи пластовых штреков при высоких скоростях подвигания лав [Текст] / С.И. Скипочка, А.В. Мухин, В.Ю. Куклин // Проблеми гірського тиску: зб. наук. праць ДонНТУ. – 2003. – № 9. – С. 108 – 119.
105. Скипочка, С.И. Диагностирование состояния угольного пласта как предпосылка разработки безопасных технологических решений [Текст] / С.И. Скипочка, В.Ю. Куклин // Геотехническая механика: сб. науч. тр. ИГТМ НАН Украины им. Н.С. Полякова. – 2001. – № 29. – С. 135 – 139.
106. Скипочка, С.И. Особенности геомеханики углепородного массива при высоких нагрузках на очистной забой [Текст] / С.И. Скипочка, А.В. Мухин, В.Ю. Куклин // Геотехническая механика: сб. науч. тр. ИГТМ НАН Украины им. Н.С. Полякова. – 2003. – № 41. – С. 16 – 22.
107. Скипочка, С.И. Элементы геомеханики углепородного массива при высоких скоростях подвигания лав [Текст] / С.И. Скипочка, Б.М. Усаченко, В.Ю. Куклин. – Д.: Лира ЛТД, 2006 – 248 с.
108. Склепович, К.З. Обоснование параметров технологии упрочнения пород на концевых участках лав [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / К.З. Склепович. – Алчевск, 2006. – 196 с.
109. Слесарев, В.Д. Вопросы управления кровлей [Текст] / В.Д. Слесарев. – М.: ОНТИ, 1935 – 65 с.
110. Слесарев, В.Д. Механика горных пород [Текст] / В.Д. Слесарев. – М.: Углетехиздат, 1948. – 236 с.

111. Слесарев, В.Д. Определение оптимальных размеров целиков различного значения [Текст] / В.Д. Слесарев. – М.: Углетехиздат, 1948. – 57 с.
112. Слесарев, В.Д. Управление горным давлением при разработке угольных пластов Донецкого бассейна [Текст] / В.Д. Слесарев. – М.: Углетехиздат, 1952. – 378 с.
113. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород [Текст] / под ред. Н.В. Мельникова. – М.: Недра, 1975. – 280 с.
114. Справочник по креплению горных выработок [Текст] / М.Н. Гелескун, В.Н. Хорин, Е.С. Кисилев, Н.П. Бушуев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1976. – 508 с.
115. Справочник физических констант горных пород [Текст] / под ред. С. Кларка мл. – М.: Мир, 1969. – 544 с.
116. Суворов, Н.Я. Влияние крепости горных пород на устойчивость капитальных выработок закрепленных мелкогабаритными тубингами [Текст] / Н.Я. Суворов, М.И. Чугай // Изв. вузов. Горный журнал. – М. – 1971. – № 6. – С. 32 – 34.
117. Технология подземной разработки пластовых месторождений полезных ископаемых [Текст] / В.И. Бондаренко, А.М. Кузьменко, Ю.Б. Грядущий и др. – Д.: Полиграфист, 2003. – 708 с.
118. Турчанинов, И.А. Основы механики горных пород [Текст] / И.А. Турчанинов, М.А. Иофис, Э.В. Каспарьян. – Л.: Недра, 1977. – 503 с.
119. Уинстенли, А. Управление кровлей в механизированных очистных забоях [Текст]: международная конференция по горному давлению в Льеже / А. Уинстенли – М.: Углетехиздат, 1957. – С. 56 – 69.
120. Указания по рациональному расположению, охране и поддержанию выработок на угольных шахтах СССР [Текст]. – Л.: ВНИМИ, 1977. – 56 с.
121. Унифицированные типовые сечения горных выработок [Текст]. Т. 1. Сечения выработок, закрепленных металлической арочной крепью из взаимозаменяемого шахтного профиля, при откатке вагонетками емкостью 1 – 4 м³. – К.: Будівельник, 1971. – 415 с.

122. Фадеев, А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике [Текст] / А.Б. Фадеев. – М.: Недра, 1987. – 221 с.
123. Феодосьев, В.И. Сопротивление материалов [Текст] / В.И. Феодосьев. – М.: Наука, 1972. – 544 с.
124. Филимонов, П.Є. Обґрунтування довжини і раціональних режимів кріплення кінцевих ділянок лав [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.15.02 / П.Є. Филимонов; [ДонНТУ]. – Донецьк, 2004. – 18 с.
125. Фисенко, Г.Л. Предельные состояния горных пород вокруг выработок [Текст] / Г.Л. Фисенко. – М.: Недра, 1976. – 272 с.
126. Фисенко, Г.Л. Прочностные характеристики массива горных пород [Текст] / Г.Л. Фисенко // Механика горных пород и маркшейдерское дело: статьи. – М.: Углетехиздат, 1959. – С. 91 – 100.
127. Фомичов, В.В. Обґрунтування параметрів управління шаруватим масивом навколо виїмкових виробок [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.15.02 / В.В. Фомичов; [НГУ]. – Д., 2008. – 18 с.
128. Хозяйкина, Н.В. Закономерности генерального обрушения кровли лавы в условиях шахт ГК "Добропольеуголь" [Текст] / Н.В. Хозяйкина // Изв. Тульского гос. ун-та. Серия "Геомеханика. Механика подземных сооружений". – 2003. – Вып. 1.– С. 318 – 322.
129. Хозяйкина, Н.В. Закономерности изменения напряженно-деформированного состояния породного массива на первом этапе отработки угольного пласта [Текст] / Н.В. Хозяйкина, Е.А. Сдвижкова // Збірник наукових праць НГУ. – Д.: РВК НГУ, 2003. – Т. 1, № 17. – С. 312 – 317.
130. Хозяйкина, Н.В. Закономерности обрушения пород кровли лав, вмещающих пласт прочных горных пород [Текст] / Н.В. Хозяйкина // Инф. бюл. Московского гос. горного ун-та. – 2004. – № 1. – С. 174 – 177.

131. Хозяйкина, Н.В. Обрушение пород кровли в лавах пологозалегающих пластов [Текст] / Н.В. Хозяйкина // Совершенствование технологии строительства шахт и подземных сооружений: тезисы докл. междунар. науч.-техн. конф. – Донецк: Норд-пресс, 2004. – С. 70 – 72.
132. Хозяйкина, Н.В. Закономірності зміни граничного напруженого стану у складноструктурній покрівлі лав положистих вугільних пластів [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Н.В. Хозяйкина. – Д., 2004. – 144 с.
133. Христианович, С.А. Об обрушении кровли в горных выработках [Текст] / С.А. Христианович, Г.И. Баренблат. – М.: Изд-во АН СССР, 1965. – 136 с.
134. Цимбаревич, П.М. Механика горных пород / П.М. Цимбаревич. – М.: Углетехиздат, 1948. – 247 с.
135. Цимбаревич, П.М. Рудничное крепление [Текст] / П.М. Цимбаревич. – М.: Углетехиздат, 1951. – 608 с.
136. Черватюк, В.Г. Геомеханическое обоснование параметров и разработка комбинированного способа и средств поддержания кровли на сопряжении лава-штрек в условиях неустойчивых пород [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / В.Г. Черватюк. – Д., 2003. – 162 с.
137. Черняк, И.Л. Анализ проявления горного давления в подготовительных выработках [Текст] / И.Л. Черняк, С.С. Горбунов // Уголь. – 1989. – № 1. – С. 15 – 17.
138. Черняк, И.Л. Влияние горного давления на показатели работы очистного забоя [Текст] / И.Л. Черняк, А.О. Охременко // Горный журнал. – 1990. – № 9. – С. 20 – 25.
139. Черняк, И.Л. Периодическое проявление горного давления в очистных забоях [Текст] / И.Л. Черняк, А.О. Охременко // Горный журнал. – 1988. – № 11. – С. 9 – 11.
140. Черняк, И.Л. Управление состоянием массива горных пород [Текст] / И.Л. Черняк, С.А. Ярунин. – М.: Недра, 1995. – 398 с.

141. Четверик, М.С. Теория сдвижения массива горных пород и управление деформационными процессами при подземной выемке угля [Текст] / М.С. Четверик, Е.В. Андрощук. – Д.: РИА "Днепр – VAL", 2004. – 148 с.
142. Шашенко, А.Н. Геомеханические процессы в породных массивах [Текст] / А.Н. Шашенко, Т. Майхерчик, Е.А. Сдвижкова. – Д.: НГУ, 2005. – 319 с.
143. Шашенко, А.Н. Деформируемость и прочность массивов горных пород [Текст] / А.Н. Шашенко, Е.А. Сдвижкова, С.Н. Гапеев. – Д.: НГУ, 2008. – 224 с.
144. Шашенко, А.Н. Механика горных пород [Текст]: учебник для ВУЗов / А.Н. Шашенко, В.П. Пустовойтенко. – К.: Новый друк, 2004. – 400 с.
145. Шевяков, Л.Д. О расчете прочных размеров и деформаций опорных целиков [Текст] / Л.Д. Шевяков // Изв. отд. техн. наук АН СССР – 1941. – № 7 – 8. – С. 3 – 13; №9. – С. 43 – 58.
146. Шевяков, Л.Д. Разработка месторождений полезных ископаемых [Текст] / Л.Д. Шевяков. – М.: Углетехиздат, 1956. – 683 с.
147. Шкурко, А.В. Обоснование способов управления отжимом угля в очистном забое при периодическом проявлении горного давления [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / А.В. Шкурко. – М., 1990. – 229 с.
148. Шпаккелер, Г. Методы исследования горного давления [Текст] / Г. Шпаккелер // Вопросы теории горного давления. – М.: Госгортехиздат, 1957. – С. 242 – 256.
149. Ягодкин, Г.И. Методика определения контактных нагрузок на перекрытия механизированных крепей поддерживающего типа [Текст] / Г.И. Ягодкин. – М.: ИГД им. А.А. Скочинского, 1967. – 52 с.
150. Eckard, A. Die mechanischen Einwirkungen des Abbaus auf das Verhalten des Gebirges [Text] / A. Eckard // Glückauf. – 1913. – № 49 – P. 24 – 36.
151. Friend, T.F. Roof Control on Longwall Faces and Discussion [Text] / T.F. Friend. – Trans.: Coal Division, 1929. – 71 p.

152. Haack, W. Die Erforschung des gebirgsdruckes [Text] / W. Haack // Glückauf. – 1928. – № 22. – P. 18 – 22.
153. Heim, A. Mechanismus des Gebirgbildung [Text] / A. Heim. – Basel.: 1878. – 87 p.
154. Phillips, D.W. Research problems on falls of ground [Text] / D.W. Phillips // Colliery Guard. – 1943. – № 42. – P. 28 – 39.
155. Ritter, W. Die Statik der Tunnelgewölde [Text] / W. Ritter. – Berlin.: 1879. – 59 p.
156. Saint-Venant, B. Mémoire sur la distribution d'élasticités [Text] / B. Saint-Venant // Journal de math, pures et appl. – 1863. – № 8. – P. 257 – 295, 353 – 430.
157. Schultz, A. Untersuchungen über Dimensionen der Sichertspfletern für den Saarbrücken Steinkohlenbergbau [Text] / A. Schultz. – Hütten: Zeit, 1867. – 64 p.
158. Sidelnikov, O.A. Results of the Experimental Researches of the Rock Mass Mode of Deformation in the Conditions of the Mine "Zapadnodonbaskay" / O.A. Sidelnikov // Widening Our Horizons. The 3rd International Forum for Students. – Dnipropetrovsk: NMU, 2008. – P. 182 – 185.
159. Spruth, F. Stebausbau in Stahl und leichtmetall [Text] / F. Spruth. – Essen.: 1951. – 147 p.
160. Vlasov, S. Results of the 3-D simulation of the transversely isotropic rock mass stress state around a longwall [Text] / S. Vlasov, A. Sidelnikov // New techniques and technologies in mining: сб. науч. тр.; CRC Press is an imprint of the Taylor & Francis Group. – Dnepropetrovs'k: LizunovPress Ltd, 2010. – P. 145 – 150.
161. Weber, H. Gebirgsbruck als die Ursache des Auftretens von Schlagwettern, Bläsern, Gasausbrüchen und Gebirgsschlägen [Text] / H. Weber // Glückauf. – 1916. – № 10. – P. 25 – 32.
162. Wolf, K. Ausbreitung der Kraft in der Halbebene und im Halbraum bei anisotropem Material [Text] / K. Wolf // Math und Mech. – 1935. – № 5. – P. 249 – 254.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

**Распределение зон предельного состояния
горных пород по результатам моделирования**

**Распределение зон предельного состояния в горных породах
в зависимости от положения линии очистного забоя**

Положение забоя, м	*Пласт мощность	Описание
1	2	3
05 – 25	<u>Алевролит</u> 8	Вдоль всей лавы по линии постановки механизированной крепи на высоту не более 1 м (m – вынимаемая мощность пласта)
25 – 45	<u>Алевролит</u> 8	Над всем выработанным пространством на высоту 3 – 4 м, форма – сводчатая, основание свода 25 – 30 м
45 – 55	<u>Алевролит</u> 8	Часть пласта, которая находится над выработанным пространством, на всю мощность
	<u>Уголь</u> 1	То же
	<u>Алевролит</u> 15	В нижней части пласта на высоту 5 – 6 м, симметрично относительно середины выработанного пространства; форма – сводчатая, основание свода 35 – 40 м
55 – 65	<u>Алевролит</u> 8	Порода переходит в запредельное состояние вслед за подвиганием очистного забоя на всю мощность пласта по всей длине лавы
	<u>Уголь</u> 1	То же

Продолжение табл. А.1

1	2	3
55 – 65	<u>Алевролит</u> 15	Часть пласта, которая находится над выработанным пространством, на всю мощность по всей длине лавы. Является "породой-мостом" для вышележащего аргиллита, т.е. несмотря на то, что аргиллит достигает предельного состояния (в силу существенной разницы в деформационных и прочностных свойствах) раньше чем алевролит, обрушение обоих пластов происходит только после достижения предельного состояния алевролитом по всей мощности
	<u>Аргиллит</u> 16	Часть пласта, которая находится над выработанным пространством на всю мощность
65 – 75	<u>Алевролит</u> 8	Порода переходит в запредельное состояние вслед за подвиганием очистного забоя на всю мощность пласта по всей длине лавы
	<u>Уголь</u> 1	То же
65 – 75	<u>Алевролит</u> 15	–"–
	<u>Аргиллит</u> 16	–"–
75 – 85	<u>Алевролит</u> 8	По всей длине консоли (10 м) в выработанном пространстве на высоту 2 – 3 м
	<u>Уголь</u> 1	По длине консоли в выработанном пространстве запредельное состояние отсутствует
	<u>Алевролит</u> 15	То же
	<u>Аргиллит</u> 16	–"–

Продолжение табл. А.1

1	2	3
75 – 85	<u>Песчаник</u> 14	На всю мощность пласта, по всей длине лавы, симметрично относительно середины выработанного пространства, ширина – 50 – 55 м
85 – 95	<u>Алевролит</u> 8	За линией постановки механизированной крепи на всю мощность пласта, происходит отрыв консоли длиной 20 м
	<u>Уголь</u> 1	То же
	<u>Алевролит</u> 15	По длине консоли в выработанном пространстве запредельное состояние отсутствует
	<u>Аргиллит</u> 16	То же
	<u>Песчаник</u> 14	–"–
	<u>Алевролит</u> 22	В нижней части пласта на высоту 6 – 8 м, симметрично относительно середины зоны обрушения пород в выработанное пространство; форма – сводчатая, основание свода 50 – 55 м
95 – 105	<u>Алевролит</u> 8	Порода переходит в запредельное состояние вслед за подвиганием очистного забоя на всю мощность пласта по всей длине лавы
	<u>Уголь</u> 1	То же
	<u>Алевролит</u> 15	По длине консоли в выработанном пространстве запредельное состояние отсутствует
	<u>Аргиллит</u> 16	То же

Продолжение табл. А.1

1	2	3
95 – 105	<u>Песчаник</u> 14	–"–
	<u>Алевролит</u> 22	Часть пласта, которая находится над зоной обрушения пород в выработанное пространство, на высоту 6 – 8 м
105 – 115	<u>Алевролит</u> 8	Порода переходит в запредельное состояние вслед за подвиганием очистного забоя на всю мощность пласта по всей длине лавы
	<u>Уголь</u> 1	То же
	<u>Алевролит</u> 15	По длине консоли в выработанном пространстве запредельное состояние отсутствует
	<u>Аргиллит</u> 16	То же
	<u>Песчаник</u> 14	–"–
	<u>Алевролит</u> 22	Часть пласта, которая находится над зоной обрушения пород в выработанное пространство, на высоту 6 – 8 м. Дальнейшее формирование зоны запредельного состояния по высоте прекращается, т.е. далее происходит плавный прогиб горных пород без нарушения сплошности
115 – 125	<u>Алевролит</u> 8	Порода переходит в запредельное состояние вслед за подвиганием очистного забоя на всю мощность пласта по всей длине лавы
	<u>Уголь</u> 1	То же
	<u>Алевролит</u> 15	За линией постановки механизированной крепи, на всю мощность происходит отрыв консоли длиной 40 – 50 м

Продолжение табл. А.1

1	2	3
115 – 125	<u>Аргиллит</u> 16	То же
	<u>Песчаник</u> 14	По длине консоли в выработанном пространстве запредельное состояние отсутствует
	<u>Алевролит</u> 22	Происходит плавный прогиб горных пород без нарушения сплошности
125 – 135	<u>Алевролит</u> 8	По всей длине консоли (10 м) в выработанном пространстве на высоту 2 – 3 м
	<u>Уголь</u> 1	По длине консоли в выработанном пространстве запредельное состояние отсутствует
	<u>Алевролит</u> 15	То же
	<u>Аргиллит</u> 16	–"–
125 – 135	<u>Песчаник</u> 14	Над выработанным пространством на всю мощность происходит отрыв консоли длиной 50 – 60 м
	<u>Алевролит</u> 22	Часть пласта, которая находится над зоной обрушения пород в выработанное пространство, на высоту 6 – 8 м. В вертикальном направлении происходит плавный прогиб горных пород без нарушения сплошности
135 – 145	<u>Алевролит</u> 8	За линией постановки механизированной крепи на всю мощность пласта, происходит отрыв консоли длиной 20 м
	<u>Уголь</u> 1	То же
	<u>Алевролит</u> 15	По длине консоли в выработанном пространстве запредельное состояние отсутствует

Продолжение табл. А.1

1	2	3
135 – 145	<u>Аргиллит</u> 16	То же
	<u>Песчаник</u> 14	–"–
	<u>Алевролит</u> 22	В вертикальном направлении происходит плавный прогиб горных пород без нарушения сплошности
145 – 155	<u>Алевролит</u> 8	Порода переходит в запредельное состояние вслед за подвиганием очистного забоя на всю мощность пласта по всей длине лавы
	<u>Уголь</u> 1	То же
	<u>Алевролит</u> 15	По длине консоли в выработанном пространстве запредельное состояние отсутствует
	<u>Аргиллит</u> 16	То же
	<u>Песчаник</u> 14	–"–
	<u>Алевролит</u> 22	Происходит плавный прогиб горных пород без нарушения сплошности
155 – 165	<u>Алевролит</u> 8	Порода переходит в запредельное состояние вслед за подвиганием очистного забоя на всю мощность пласта по всей длине лавы
	<u>Уголь</u> 1	То же
	<u>Алевролит</u> 15	По длине консоли в выработанном пространстве запредельное состояние отсутствует

Продолжение табл. А.1

1	2	3
155 – 165	<u>Аргиллит</u> 16	То же
	<u>Песчаник</u> 14	–"–
	<u>Алевролит</u> 22	Происходит плавный прогиб горных пород без нарушения сплошности
165 – 175	<u>Алевролит</u> 8	Порода переходит в запредельное состояние вслед за подвиганием очистного забоя на всю мощность пласта по всей длине лавы
	<u>Уголь</u> 1	То же
	<u>Алевролит</u> 15	За линией постановки механизированной крепи на всю мощность происходит отрыв консоли длиной 40 – 50 м
	<u>Аргиллит</u> 16	То же
	<u>Песчаник</u> 14	По длине консоли в выработанном пространстве запредельное состояние отсутствует
	<u>Алевролит</u> 22	В вертикальном направлении происходит плавный прогиб горных пород без нарушения сплошности
175 – 185	<u>Алевролит</u> 8	По всей длине консоли (10 м) в выработанном пространстве на высоту 2 – 3 м
	<u>Уголь</u> 1	По длине консоли в выработанном пространстве запредельное состояние отсутствует
	<u>Алевролит</u> 15	То же
	<u>Аргиллит</u> 16	–"–

Продолжение табл. А.1

1	2	3
175 – 185	<u>Песчаник</u> 14	Над выработанным пространством на всю мощность происходит отрыв консоли длиной 50 – 60 м
	<u>Алевролит</u> 22	Часть пласта, которая находится над зоной обрушения пород в выработанное пространство, на высоту 6 – 8 м. Выше происходит плавный прогиб горных пород без нарушения сплошности
185 – 195	<u>Алевролит</u> 8	За линией постановки механизированной крепи на всю мощность, происходит отрыв консоли длиной 20 м
	<u>Уголь</u> 1	То же
	<u>Алевролит</u> 15	По длине консоли в выработанном пространстве запредельное состояние отсутствует
185 – 195	<u>Аргиллит</u> 16	То же
	<u>Песчаник</u> 14	–"–
	<u>Алевролит</u> 22	Плавный прогиб горных пород без нарушения сплошности
195 – 205	<u>Алевролит</u> 8	Порода переходит в запредельное состояние вслед за подвиганием очистного забоя на всю мощность пласта по всей длине лавы
	<u>Уголь</u> 1	То же
	<u>Алевролит</u> 15	По длине консоли в выработанном пространстве запредельное состояние отсутствует
	<u>Аргиллит</u> 16	То же

Продолжение табл. А.1

1	2	3
195 – 205	<u>Песчаник</u> 14	–"–
	<u>Алевролит</u> 22	Происходит плавный прогиб горных пород без нарушения сплошности
205 – 215	<u>Алевролит</u> 8	Порода переходит в запредельное состояние вслед за подвиганием очистного забоя на всю мощность пласта по всей длине лавы
	<u>Уголь</u> 1	То же
	<u>Алевролит</u> 15	По длине консоли в выработанном пространстве запредельное состояние отсутствует
	<u>Аргиллит</u> 16	То же
	<u>Песчаник</u> 14	–"–
	<u>Алевролит</u> 22	Происходит плавный прогиб горных пород без нарушения сплошности
215 – 225	<u>Алевролит</u> 8	Порода переходит в запредельное состояние вслед за подвиганием очистного забоя на всю мощность пласта по всей длине лавы
	<u>Уголь</u> 1	То же
	<u>Алевролит</u> 15	За линией постановки механизированной крепи на всю мощность пласта, происходит отрыв консоли длиной 40 – 50 м
	<u>Аргиллит</u> 16	То же

Продолжение табл. А.1

1	2	3
215 – 225	<u>Песчаник</u> 14	По длине консоли в выработанном пространстве запредельное состояние отсутствует
	<u>Алевролит</u> 22	Плавный прогиб горных пород без нарушения сплошности
225 – 235	<u>Алевролит</u> 8	По всей длине консоли (10 м) в выработанном пространстве на высоту 2 – 3 м
	<u>Уголь</u> 1	По длине консоли в выработанном пространстве запредельное состояние отсутствует
	<u>Алевролит</u> 15	То же
	<u>Аргиллит</u> 16	–"–
	<u>Песчаник</u> 14	Над выработанным пространством на всю мощность происходит отрыв консоли длиной 50 – 60 м
	<u>Алевролит</u> 22	Часть пласта, которая находится над зоной обрушения пород в выработанное пространство, на высоту 6 – 8 м. Выше происходит плавный прогиб горных пород без нарушения сплошности

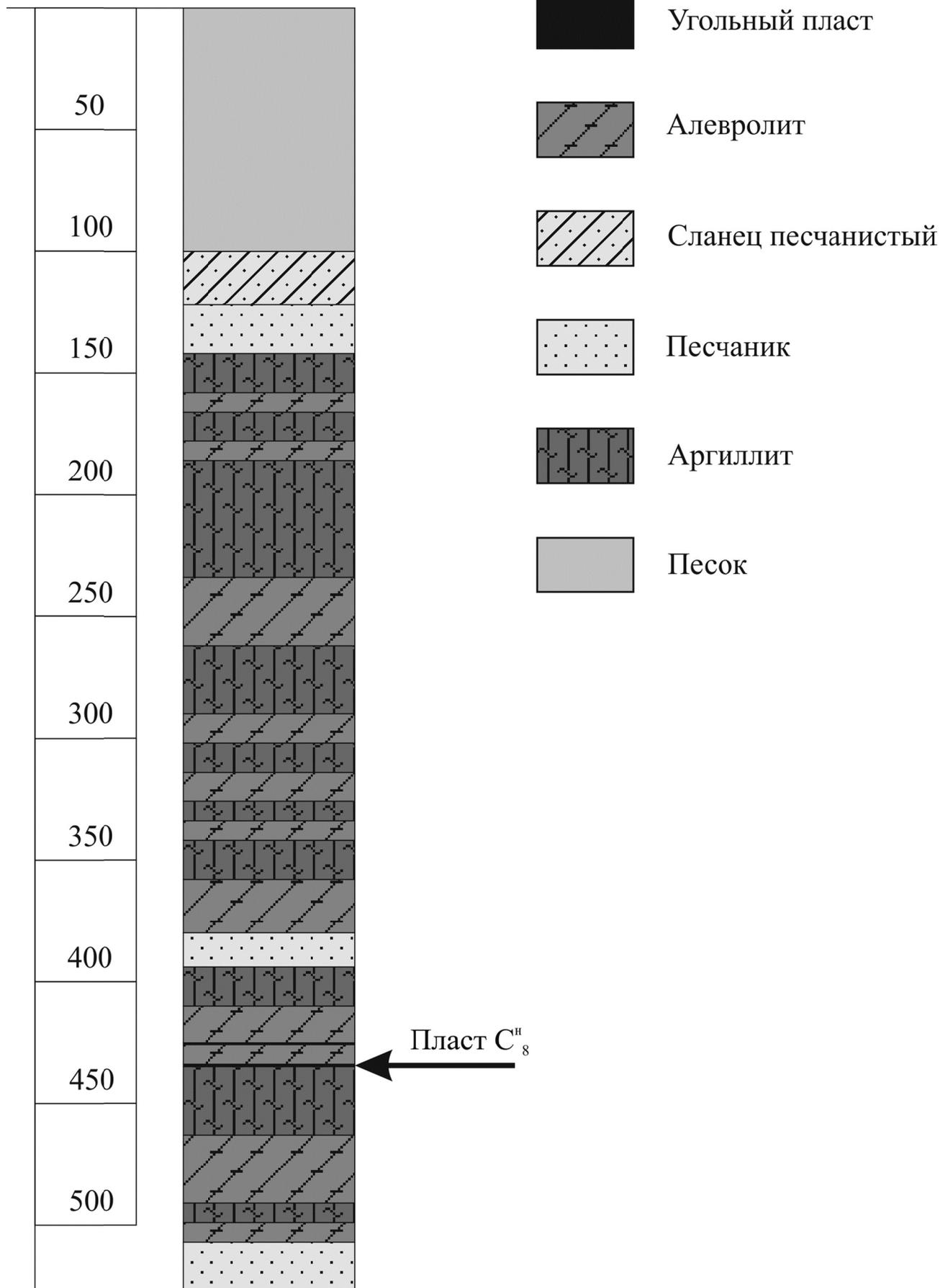
*В пределах рассматриваемого положения очистного забоя пласты горных пород располагаются в порядке залегания, начиная от разрабатываемого угольного пласта вверх; мощность дана в метрах.

Приложение Б

Стратиграфическая колонка

СТРАТИГРАФИЧЕСКАЯ КОЛОНКА
1:2000

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ



Наукове видання

Власов Сергій Федорович
Сідельников Олександр Анатолійович

**ПРОСТОРОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ
ГЕОМЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ
ПРИ ПІДЗЕМНІЙ РОЗРОБЦІ РОДОВИЩ**

Монографія
(російською мовою)

Редактор Є.М. Ільченко

Підп. до друку 29.05.2012 р. Формат 30×42/4
Папір офсет. Друк офсетний. Ум. друк. арк. 25,9. Обл.-вид. арк. 11,3
Тираж 300 пр. Замовлення №

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

49005, м. Дніпропетровськ, пр. Карла Маркса, 19