

Министерство высшего и среднего специального образования СССР
МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

Доц., канд. техн. наук
ЛИТВИНСКИЙ Гарри Григорьевич

**СТАТИКА И КИНЕТИКА ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ
И НЕУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД
В ПОДЗЕМНЫХ ВЫРАБОТКАХ**

Специальность 01.04.07 — «Физика твердого тела
(горных пород)»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва — 1977

Работа выполнена в Коммунарском горно-металлургическом институте.

Официальные оппоненты:

проф., докт. техн. наук К. А. АРДАШЕВ,
проф., докт. техн. наук М. И. ВЕСКОВ,
проф., докт. техн. наук С. В. КУЗНЕЦОВ.

Ведущая организация — Институт горного дела Сибирского Отделения АН СССР.

Защита состоится « 25 » . . . 04 . . . 1977 г.

в . . . час. на заседании специализированного совета Д-47/7 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.07 — «Физика твердого тела (горных пород)» при Московском ордена Трудового Красного Знамени горном институте.

Адрес: 117935, Москва, В-49, Ленинский проспект, 6.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан « 24 » . . . 03 . . . 1977 г.

Ученый секретарь специализированного совета

проф., докт. техн. наук И. В. БАКЛАШОВ

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. Установление объективных закономерностей протекания механических процессов в массиве горных пород (проявлений горного давления) и выбор способов управления ими является одной из самых сложных и актуальных проблем горной науки, многие аспекты ее остаются недостаточно изученными и спорными. Усложнение горно-геологических условий приводит к повышению стоимости крепления и поддержания горных выработок. Только по Украинскому Донбассу поддерживается 13,5 тыс. км выработок, из них ежегодно ремонтируется и перекрепляется 4 тыс. км, на что расходуется свыше 250 млн. руб.

«Основными направлениями развития народного хозяйства СССР на 1976—1980 годы», принятыми XXV съездом КПСС, поставлена задача по увеличению темпов роста производительности труда и интенсивному расширению добычи полезных ископаемых. Совершенствование методов ведения подземных работ немыслимо без глубокого исследования процессов, происходящих в горном массиве, на основе современных концепций физики горных пород. Эти исследования направлены на изучение закономерностей и разработку методов расчета протекания механических процессов в массиве горных пород, на создание эффективных способов и средств управления этими процессами. Тем самым формулируются и получают научное обоснование инженерные решения по созданию новой техники и технологии добычи полезных ископаемых, по повышению эффективности, безопасности работ и улучшению технико-экономических показателей горнодобывающей промышленности, что имеет важное народнохозяйственное значение.

Целью работы является научное обоснование, разработка и практическое приложение расчетных методов проявлений горного давления и создание способов активного горно-инженерного воздействия на напряженно-деформированное состояние и прочность массива горных пород.

Основная идея решения проблемы заключается в установлении целостной физической картины протекания механических процессов в массиве на основе закономерностей статистики и кинетики неупругого деформирования и разрушения горных пород в подземных выработках.

Методы и объекты исследования. Достижение поставленной цели осуществляется применением комплексной методики, включающей как составные, взаимно дополняющие элементы, аналитические исследования, шахтные инструментальные наблюдения, лабораторные эксперименты, опытно-промышленную проверку и внедрение рекомендаций.

Основными объектами исследования являются массив горных пород, капитальные и подготовительные горные выработки вне и в зоне вредного влияния очистных работ. Кроме того, в работе рассматриваются: исходное напряженное состояние массива горных пород, физические свойства горных пород, устойчивость породных обнажений незакрепленных горных выработок.

Научная новизна работы заключается:

— в установлении закономерностей влияния основных горнотехнических факторов (негидростатичность исходного поля напряжений, прочностная анизотропия и неоднородность горных пород, некруговая форма выработки, неравномерный отпор крепи, силы гравитации в разрушенных породах) на формирование вокруг выработки зоны неупругих деформаций постановкой и решением неосесимметричного класса упруго-пластических задач с учетом запредельных деформаций горных пород;

— в постановке, формулировании и решении нового класса задач кинетики разрушения горных пород вокруг выработки, исследовании реономных параметров разрушения горных пород; создании методов расчета процессов разрушения и деформации пород в подземных выработках;

— в создании, разработке, испытании и внедрении активных способов горно-инженерного воздействия на напряженное состояние и прочность массива с целью управления происходящими в нем процессами разрушения и деформации пород вокруг подземных выработок.

Научное значение этих разработок заключается в трактовке процесса разрушения горных пород с кинетических позиций термофлуктуационной концепции прочности и создании научных основ расчета протекания механических процессов в породном массиве вокруг подземных выработок. Развиваемое в работе научное направление является плодотворным не только в горной геомеханике, но и в смежных разделах горной науки (расчет действия взрыва, термомеханическое разрушение, расчет целиков, устойчивость бортов карьеров и др.);

Достоверность научных положений обеспечена поэтапной всесторонней проверкой получаемых выводов в каждом из разделов и в целом по работе и подтверждается обоснованностью принятых методов исследований и исходных предположений, положенных в основу выполнения работы. Теоретическая часть работы базируется на использовании методов теоретической физики, механики сплошной среды (теории упругости и пластичности), теории прочности и механики разрушения. Все аналитические решения доведены до численных результатов, а неизбежные идеализации расчетных схем подробно обсуждаются и при необходимости корректируются эмпирическими коэффициентами, получаемыми из шахтных замеров. Шахтные инструментальные наблюдения проводились в широком диапазоне горно-геологических условий и являлись критерием правильности постановки и решения граничных задач. Технологические рекомендации по управлению проявлениями горного давления в выработках проверены и подтверждены экспериментальными и шахтными исследованиями, а на конечной стадии — промышленными испытаниями и внедрением. Проведена широкая апробация полученных результатов.

Практическая ценность работы. На основании теоретических и экспериментальных исследований по решению задач статики и кинетики неупругого деформирования и разрушения горных пород разработаны методы расчета процессов проявлений горного давления в подземных выработках с учетом большинства важнейших горно-геологических и производственно-технических факторов. Предложена классификация проявлений горного давления в подземных выработках и метод расчета устойчивости их породного контура. Использование расчетных методов позволяет повысить надежность проектных решений, снизить издержки производства, связанные с возведением дорогостоящих конструкций крепи при отсутствии горного давления и необходимостью перекрепления выработок в сложных горно-геологических условиях.

Внедрение разработанных новых активных способов крепления и охраны позволит повысить устойчивость горных выработок, сократить затраты на их проведение и крепление.

Реализация работы в промышленности. Результаты выполненных исследований и предложений внедряются в производственную практику и используются исследовательскими, учебными и проектными институтами при составлении инструктивных документов по управлению горным давлением и расчету крепи, при составлении паспортов крепления. С участием автора составлены следующие нормативно-технические документы:

1. Временное руководство по расчету параметров крепи капитальных горных выработок глубоких шахт для пологих кластов Донбасса. Донецк, Донуги, 1965.

2. Руководство по расчету грузонесущей способности блочной крепи с учетом ее устойчивости. Донецк, Донгипрошахт, 1968.

3. Руководство по расчету устойчивости породного контура протяженных горных выработок. Коммунарск, КГМИ, 1973.

4. Инструкция и методические указания по экспресс-методу определения физико-механических свойств горных пород портативным прибором ППЭИ-2м. Коммунарск, КГМИ, 1974.

5. Руководство по расчету параметров и выбору конструкций крепи капитальных выработок глубоких шахт Донбасса. Донецк, Донуги, 1972.

6. Единые указания по прогнозированию проявлений горного давления, выбору параметров, способов охраны и методов расчета рациональных конструкций крепи капитальных выработок глубоких шахт основных угольных бассейнов страны (проект). Л., ВНИМИ, 1975.

7. Каталог паспортов наблюдений за проявлением горного давления в подготовительных выработках. Л., ВНИМИ, 1975.

Разработанные под руководством и при непосредственном участии автора новые способы управления проявлениями горного давления прошли успешные опытно-промышленные испытания и внедряются на шахтах угольной промышленности. Инструктивные материалы и рекомендации переданы для использования в проектные институты Минуглепрома СССР.

Апробация работы. Результаты исследований доложены заинтересованным организациям и соответствующим координационным совещаниям, одобрены последними и рекомендованы к использованию. Основные материалы диссертационной работы докладывались: на конференции по инженерно-техническим проблемам разработки месторождений полезных ископаемых (г. Ленинград, 1966 г.), республиканских научно-технических конференциях по проблемам угольной промышленности (г. Донецк, 1966, 1968, 1969 гг.), Всесоюзном симпозиуме по проблемам реологии горных пород и релаксации в твердых телах (г. Днепропетровск, 1968 г.), Всесоюзной конференции «Давление и механические напряжения в развитии состава, структуры и рельефа литосферы» (г. Ленинград, 1969 г.), ежегодных научно-технических конференциях по горному делу и геологии (г. Коммунарск, 1969—1976 гг.), всесоюзных научных конференциях вузов СССР с участием НИИ «Физика горных пород и процессов» (г. Москва, 1971, 1974, 1977 гг.), Всесоюзном научно-техническом семинаре «Опыт создания и внедрения крепей для капитальных выработок глубоких шахт. Расчет и конструирование крепи» (г. Ленинград, 1974 г.), IV региональном семинаре «Горное давление в капитальных и подготовительных выработках» (г. Караганда, 1974 г.), VI Всесоюзной конференции по прочности и пластичности (г. Москва, 1975 г.), Всесоюзном семинаре «Проведение

и крепление горных выработок в неустойчивых горных породах» (г. Павлоград, 1976 г.) Всесоюзном совещании-семинаре «Роль горной науки в процессе подземной разработки рудных месторождений» (г. Москва, 1976 г.), в научно-исследовательских институтах (ВНИМИ, Донуги, ИГТМ АН УССР, ИГД СО АН СССР и др.), в проектных и производственных организациях (Днепрогипрошахт, Южгипрошахт, Донгипрошахт, п. о. «Краснодонуголь» и пр.).

Публикация. Основные положения диссертации отражены в 29 печатных работах и 2 изобретениях.

Объем работы. Диссертация содержит 7 глав, включая 271 стр. машинописного текста, 79 рисунков, 23 таблицы, список литературы из 231 наименования, а также 6 приложений.

1. Состояние изученности проблемы, актуальные направления исследований

Ретроспективный анализ развития горной геомеханики как науки показывает, что основными объектами ее исследования являлись проявления горного давления в горных выработках. Лишь в последнее время расширилась область изучения горной геомеханики, а качественные представления сменились количественными закономерностями, завершающими длительный сложный процесс формирования и построения физической картины изучаемого комплекса явлений.

Современные существующие воззрения на проявления горного давления в капитальных и подготовительных выработках сформировались в результате выполнения обширных и трудоемких исследований в ряде научно-исследовательских и учебных институтов: ВНИМИ (К. А. Ардашев, Н. П. Бажин, Г. А. Крупенников, Г. Л. Фисенко); Донуги (Ю. З. Заславский, А. Н. Зорин); ИГД им. А. А. Скочинского (В. И. Барановский, М. Н. Гелескул, М. И. Весков, Ю. М. Либерман, К. В. Руппенейт); ИГД СО АН СССР (Б. В. Власенко, Г. И. Грицко, Е. И. Шемякин); ИММ АН КазССР (Ж. С. Ержанов, Ш. М. Айталиев, М. Т. Алимжанов); ИГТМ АН УССР (В. Т. Глушко); ДГИ (А. П. Максимов, Л. Я. Парчевский); ДПИ (М. П. Зборщик, К. В. Кошелев); ЛГИ (А. А. Борисов, Н. С. Булычев, А. Г. Протосеня); МГИ (И. В. Баклашов, Ю. А. Векслер, Л. В. Ершов, Л. Н. Насонов, И. Л. Черняк) и др.

По этой проблеме горной науки существуют глубокие и всесторонние обзоры состояния вопроса и достигнуты заметные успехи в описании процессов, происходящих в массиве горных пород, а также накоплен ценный фактический материал. В то же время проблема изучения механических процессов деформирования и разрушения пород вокруг подземных выработок является одной из самых сложных, так как она

тесно связана с остальными объектами горной геомеханики и при ее решении необходимо учитывать влияние большого числа геологических и технологических факторов. Проведенные ранее исследования позволили установить для конкретных горно-геологических условий ряд закономерностей проявлений горного давления на основе, главным образом, производственно-инструментальных наблюдений.

Проведенный анализ изученности проблемы показал, что до настоящего времени вопросы разрушения породных массивов, как процессы, развивающиеся во времени, практически оставались вне поля зрения исследователей; нет достоверно установленных количественных закономерностей протекания механических процессов в массиве горных пород и влияния основных горнотехнических факторов; большинство методов расчета базируется на осесимметричных расчетных схемах; а способы управления горным давлением сводились в основном к пассивному устранению негативных последствий его проявления в выработках.

Таким образом, степень отчетливости физических представлений, необходимая для получения достаточного объема количественных закономерностей изучаемых явлений, все еще не вполне удовлетворяет запросы практики. Это связано, главным образом, с неизбежностью схематизации реальной картины явления до уровня модели и привлечения специальных дополнительных гипотез. Происходящее углубление знаний в каждой из ветвей горной геомеханики приводит к необходимости пересмотра ранее принятых физических моделей явления.

Последние работы школы акад. С. Н. Журкова в области физики твердого тела по созданию научных основ термофлуктуационной концепции прочности позволяют по-новому оценить разрушения породного массива вокруг выработки во времени. С другой стороны, новые данные о поведении материалов на ниспадающей ветви диаграммы нагружения при испытании на жестких прессах дают возможность значительно уточнить физическую модель разрушения пород и образования зоны неупругих деформаций вокруг выработки. Кроме того, рассматриваемые в большинстве случаев осесимметричные упругопластические задачи об образовании зоны неупругих деформаций нуждаются в переформулировании и развитии с целью отказа от принятых ранее идеализаций.

В связи с этим задачами диссертационной работы явились:

1. Постановка, формулирование и решение неосесимметричных упругопластических задач горной геомеханики о статическом равновесии массива горных пород в окрестности выработки и изучение закономерностей влияния основных горнотехнических факторов.

2. Изучение механизма хрупкого разрушения горных пород с позиций термофлуктуационной концепции прочности; постановка, формулирование и решение нового класса задач кинетики хрупкого разрушения горных пород в окрестности подземных выработок, приложение результатов для разработки расчетных методов проявлений горного давления с учетом фактора времени.

3. Обоснование, разработка и применение новых способов горно-инженерного воздействия на массив горных пород с позиций активного вмешательства в естественный процесс развития разрушения и деформирования пород.

2. Шахтные инструментальные наблюдения проявлений горного давления

2.1. Цель и методика исследований состояла в изучении закономерностей разрушения и смещения массива пород в горную выработку, обосновании принятых идеализаций и расчетных схем прогнозирования устойчивости выработок.

Методика натурных исследований базировалась на рекомендациях ВНИМИ, Донуги, ИГД им. А. А. Скочинского, ИГТМ АН УССР по ведению наблюдений в капитальных и подготовительных выработках с помощью контурных и глубинных реперов.

Для расширения информации о механизме деформирования пород в выработку была разработана усложненная методика наблюдений в подготовительных выработках, использующая движущуюся систему координат, связанную с очистным забоем (координаты Эйлера). Это потребовало установки увеличенного числа наблюдательных пунктов вдоль выработки (от 10 до 20). Расстояние между наблюдательными пунктами обосновано теоремой отсчетов Котельникова и оказалось равным не более половины шага посадки основной кровли в лаве.

Результаты исследований представлены в виде паспортов шахтных наблюдений и переданы ВНИМИ.

2.2. Исследование прочностных свойств горных пород производилось в местах установки замерных станций. В связи с необходимостью проведения массовых испытаний образцов горных пород непосредственно на месте отбора проб в шахте был разработан экспресс-метод определения прочности пород на растяжение и сжатие по выбуренным кернам без их дальнейшей обработки, позволяющий достигнуть многократного повторения испытаний при минимальном расходе кернавого материала. Реализация этого и других методов определения деформационно-прочностных показателей пород потребовала разработки надежного, простого в эксплуатации портативного прибора для экспресс-испытаний пород ППЭИ-2м, где использован принцип многофункциональности конструктивных элементов и узлов.

2.3. Анализ результатов шахтных наблюдений и их интерпретация — важнейший этап натуральных исследований. Проведенные обследования состояния крепи капитальных выработок показали, что наряду с недопустимо большим объемом деформированных участков крепи имеются выработки, где крепь не несет нагрузок. С целью определения области устойчивого и неустойчивого состояния контура выработки была проведена статистическая обработка натуральных наблюдений и определено критическое значение параметра $\gamma H/\sigma_{сж} = 0,25 \div 0,3$, при котором начинается образование зоны неупругих деформаций вокруг выработки. С помощью глубинных реперных станций и наблюдениями в перископическую трубу РВП-456 за расслоением пород в скважинах уточнена схема смещений пород в выработку, подтвержден механизм деформирования пород, предложенный И. Л. Черняком (1967 г.).

Инструментальные наблюдения в 39 подготовительных выработках проводились с 1971 по 1975 г. при широком варьировании горно-геологических условий, для чего было установлено 343 сечения контурных реперов и пробурено 23 скважины для глубинных реперов. Наблюдения позволили провести анализ влияния основных горно-геологических и производственно-технических факторов и получить результаты, раскрывающие более тонкие эффекты влияния очистных работ на смещения пород в горной выработке. Дополнены количественными оценками качественные представления о смещениях породного массива впереди лавы при изменении скорости движения очистного забоя и протяженности зоны опорного давления. Полученные результаты использованы для уточнения расчетных схем по прогнозированию проявлений горного давления в капитальной и подготовительной выработке, а экспериментально установленные закономерности и эффекты позволили проверить достоверность расчетных методик. При этом основной базовой предпосылкой рабочей расчетной схемы развития горного давления в подготовительной выработке должен быть учет влияния очистных работ через изменение напряженно-деформированного состояния массива.

2.4. Классификация основных форм устойчивости горных выработок получена в результате обобщения закономерностей проявлений горного давления и базируется на анализе процессов разрушения пород и формоизменения контура выработки под действием напряжений различных знаков: растягивающие напряжения, вызывая разрушение контура, приводят его к устойчивой форме равновесия в виде сводов обрушения, а при разрушении контура от сжатия концентрация напряжений на контуре повышается, приводя к снижению его устойчивости и образованию, при наличии отпорной крепи, зоны неупругих деформаций (ЗНД). Выделено 6 категорий устойчивости выработки, учитывающих развитие разрушений

контура в зависимости от знака напряжений, что позволяет произвести ориентировочную оценку горно-геологических условий заложения выработки, выбрать тип, режим работы крепи и расчетный метод прогнозирования ее параметров.

3. Исследование исходного напряженного состояния массива горных пород

Массив горных пород является важнейшим объектом исследования горной геомеханики, а его исходное напряженно-деформированное состояние предопределяет особенности развития геомеханических процессов вокруг выработок. Целью исследований данной главы явилась оценка исходного поля напряжений массива для обоснования граничных условий в краевых задачах горной геомеханики.

3.1. Поле напряжений в пластах наклонно-слоистого неоднородного горного массива можно оценить после описания его поведения под нагрузкой на основе присущих ему «среднеинтегральных» свойств. Считая, что массив состоит из однородных трансверсально-изотропных пластов различных горных пород моноклиналиного залегания, между которыми существует сцепление, он рассматривается как квазиоднородная среда. Записывая условия на контакте между пластами для напряжений и деформаций с учетом сцепления на основе обобщенного закона Гука, решается система рекуррентных соотношений, позволяющих определить усредненные упругие модули массива в целом. На основе гипотезы акад. А. Н. Динника (1925 г.) и решения Л. С. Ержанова и А. Я. Синяева (1963 г.) находится полный тензор напряжений в однородном анизотропном массиве в целом. Однако чаще всего требуется знать не напряженное состояние массива в целом, а тензор напряжений, действующих в каждом из пластов, для чего в работе предложены формулы, инвариантные относительно порядка чередования пластов.

На примере крутопадающей свиты Алмазная S_2^6 в Центральном районе Донбасса анализируются особенности распределения напряжений в массиве и его пластах. Показано, что, хотя анизотропия массива в целом зачастую слабо выражена, в нем можно наблюдать значительные аномалии напряженного состояния. Главные напряжения существенно отличаются в различных пластах по амплитуде и направлению, а максимальные напряжения могут значительно превышать вес вышележащей толщи пород даже при отсутствии тектонических сил.

3.2. Оценка коэффициента бокового распора массива с позиций реологии производилась с целью учета влияния происходящих в породах релаксационных процессов. Граничными

условиями являлись постоянство во времени вертикальной компоненты тензора напряжений и отсутствие горизонтальных смещений. Для описания уравнения состояния массива горных пород привлечены различные реологические среды: Максвелла, Кельвина-Фойгта, Пойтинга-Томсона, Бингама, Шведова, Шоффилда-Скотт-Блера и др. (М. Рейнер, 1965 г.) и среда с наследственной ползучестью, что позволило охватить обширный класс моделей. Исследование релаксации напряжений показало, что, хотя коэффициент бокового распора и увеличивается, но, как правило, он не достигает единицы (исключением являются реологические модели типа вязких жидкостей, где тензор напряжений становится шаровым). Оценки показывают, что для реальных горных пород с учетом релаксации коэффициент бокового распора в поле гравитации изменяется от $0,2 \div 0,3$ для песчаников до $0,5 \div 0,7$ у аргиллитов, что хорошо согласуется с результатами экспериментальных исследований ВНИМИ (Б. В. Матвеев, Ю. М. Карташов, 1969 г.).

3.3. Напряжения в массиве, содержащем дизъюнктивные нарушения, являются результатом сложных генетических процессов осадконакопления и литификации с последующими геологическими преобразованиями. Особая роль в распределении напряжений принадлежит разрывным нарушениям типа надвига и сброса.

Рассматривается массив с произвольным исходным полем напряжений как однородная упругая изотропная плоскость, ослабленная нарушением в виде прямолинейной трещины с сомкнутыми берегами, взаимодействующими по закону сухого трения Кулона. Влияние нарушений локализуется в области, ограниченной цилиндрической поверхностью с нормальным сечением в форме вытянутого овала и диаметром, равным 2—2,5 характерных линейных размера нарушения.

Большие аномалии напряжений наблюдаются вблизи изолинии уровня нулевого перемещения по сместителю (у флексур), причем наиболее опасно висячее крыло надвига, где напряжения могут увеличиваться в 3—4 раза и явиться причиной снижения устойчивости выработки или возникновения горных ударов.

Если геологический регион, где ведутся горные работы, тектонически не активен и превалируют гравитационные силы, то из упругого распределения напряжений можно найти нижнюю оценку коэффициента бокового распора, а при учете релаксационных процессов — верхнюю. При решении краевых задач горной геомеханики следует учитывать возможность существенных различий в ориентировке и амплитуде главных напряжений в различных пластах и в окрестности дизъюнктивов.

4. Устойчивость породных обнажений горных выработок

Чтобы оценить устойчивость незакрепленной выработки, необходимо определить напряжения на ее контуре, сравнить их с прочностью пород, оценить характер разрушений и выявить наиболее опасные участки контура по вывалообразованию.

4.1. Расчет напряжений на контуре выработки произвольной формы связан со сложным решением плоской задачи теории упругости, что делает его весьма громоздким и малодоступным. Это потребовало разработки инженерного метода определения напряжений на контуре протяженных выработок выпуклой формы при произвольном исходном поле напряжений. Сущность метода определения неизвестной тангенциальной компоненты тензора напряжений плоскодеформированного и плосконапряженного контура состоит в сравнении радиуса кривизны реального контура выработки в заданной точке с радиусом кривизны эллипса сравнения. Эллипс сравнения, для которого напряжения на контуре известны из точного решения теории упругости, — это отверстие эллиптической формы с соотношением полуосей, равным соотношению вертикального и горизонтального радиуса выработки, и площадью, равной площади сечения выработки.

С помощью метода вариации формы границы вначале проектный контур выработки заменяется эквивалентным эллиптическим, а затем во втором приближении учитываются местные отклонения реального контура от эллипса сравнения. При этом дополнительные возмущения напряжений линейно зависят от приведенной кривизны проектного контура в данной точке. Проверка расчетного метода показала, что отклонения от точных решений теорий упругости не превышает $10 \div 15\%$.

4.2. Прочность горных пород с учетом их структурной нарушенности существенно влияет на устойчивость выработки. Структурная нарушенность массива учитывалась на основе анализа предельных состояний в зависимости от возможной морфологии поверхностей ослабления. В общем случае направление смещений на поверхности ослабления не совпадает с направлением максимальных сдвигающих усилий. При произвольном спектре различно ориентированных искажений поверхности ослабления выделение опасного по разрушению направления можно произвести с помощью обобщенных векторных диаграмм прочности. В частном случае изотропии поверхности ослаблений можно пользоваться графическими построениями, предложенными Г. Н. Кузнецовым (1961 г.). Разработана методика определения векторной диаграммы прочности в лабораторных и полевых условиях на необработанных зернах пород с помощью прибора ППЭИ-2м.

4.3. Паспорт устойчивости выработки представляет собой совокупность графических и расчетных материалов по сопоставлению эпюр напряженного состояния и прочности пород контура выработки и служит для выявления различных по устойчивости участков породных обнажений, их характера разрушения. Графические построения по наложению эпюр рекомендуется производить на развертке контура выработки. Разработана методика построения паспорта устойчивости выработки и программа для ведения расчетов на ЭВМ.

В лабораторных условиях поляризационно-оптическим методом исследована зависимость формы и размеров зоны разрушений пород от распределения напряжений вокруг выработки. Сущность моделирования разрушения пород вокруг выработки сводилась к последовательному выпиливанию участка контура, где напряжения превышали заранее заданное значение, равное прочности породы. Таким образом, имитация «разрушения» производилась в полном соответствии с изменением напряжений на контуре переменной формы, что позволило решить моделированием сложную нелинейную задачу механики разрушения. Установлены закономерности разрушения контура, связанные с увеличением приведенной кривизны на участке разрушения: при разрушении от растягивающих напряжений устойчивость выработки возрастает, а при разрушении от сжимающих напряжений — убывает. Это хорошо согласуется с натурными наблюдениями и предлагаемой классификацией форм проявлений горного давления.

При разрушении от растягивающих напряжений над выработкой образуется свод естественного равновесия, размер которого зависит от действующих в кровле напряжений и прочности пород на растяжение. Предложены зависимости по выбору типа крепи и определению нагрузки при вывало- и сводообразовании.

Паспорт устойчивости выработки является расчетным обоснованием для составления паспорта крепления и позволяет определить тип крепи (ограждающая, поддерживающая или грузонесущая) и ее параметры при сводообразовании. Применение паспорта устойчивости позволит расширить объем применения облегченных типов крепи на 200—400 км выработок в год и получить значительный экономический эффект.

5. Решение неосесимметричного класса задач горной геомеханики и расчет проявлений горного давления в капитальной выработке

5.1. Обоснование расчетной схемы и получение порождающего решения задачи о взаимодействии системы «крепь — массив» производится на основе последних экспериментальных данных о свойствах материалов с ниспадающей ветвью

диаграммы загрузки. Вначале получено формально корректное решение осесимметричной плоской упругопластической задачи для круглой выработки с равномерным отпором крепи в изотропном, гидростатически нагруженном массиве. Для компонент девиатора тензоров напряжений и деформаций закон связи принят кусочно-линейный, а для шаровых составляющих — упругий. Анализ этого решения показал, что зону неупругих деформаций (ЗНД) необходимо разделить на две подзоны — частичной и полной потери сплошности породы. В то же время для получения расчетного метода, пригодного для практического использования, необходимо несколько упростить расчетную схему, что можно сделать, применив видоизмененную модель Д. В. Хоббса (1966 г.) поведения породы на ниспадающей ветви загрузки:

$$(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + 4\tau_{r\theta}^2 = \sin^2 \rho \left\{ \sigma_\theta + \left[1 + \frac{\mu + 2}{A - 1} \frac{\sigma_\infty}{2p} \right] \sigma_r \right\}^2, \quad (5.1)$$

что совместно с уравнениями равновесия в полярной системе координат при граничных условиях $\sigma_r = q$ при $r = 1$ позволяет получить порождающее решение о распределении напряжений в ЗНД

$$\sigma_r = qr^\mu; \quad \sigma_\theta = (\mu + 1)qr^\mu; \quad \tau_{r\theta} = 0 \quad (5.2)$$

и ее безразмерный радиус

$$r_* = \left[\frac{2p - \sigma_\infty}{(A + 1)q} \right]^{1/\mu}, \quad (5.3)$$

где

$$A = \frac{1 + \sin \sigma}{1 - \sin \sigma}; \quad \mu = 2 \frac{(A - 1)p + \sigma_\infty}{2p - \sigma_\infty};$$

ρ — угол внутреннего трения горной породы; p — исходное напряженное состояние массива; σ_∞ — длительная прочность горных пород в массиве на одноосное сжатие; σ_r , σ_θ и $\tau_{r\theta}$ — компоненты тензора напряжений в полярной системе координат r , θ с началом в центре выработки.

На границе ЗНД сохраняется непрерывность радиальных и тангенциальных напряжений и смещений.

5.2 — 5.6. Исследование закономерностей влияния неосесимметричных факторов на форму и размеры зоны неупругих деформаций производилось асимптотическим методом малого параметра путем последовательного отказа от принятых в порождающем решении (5.2) идеализаций расчетной схемы, которые, хотя и являются общепринятыми в подобного рода решениях, заметно снижают достоверность результатов расчетов.

Основная идея решения неосесимметричного класса задач горной геомеханики заключалась в следующем. Исследуемый неосесимметричный фактор вводился в порождающее решение с помощью малого параметра, как правило, в виде комплексного ряда Фурье. Сначала рассматривалось статическое равновесие пластической области вокруг отверстия в соответствии с уравнениями равновесия при плоской деформации в полярной системе координат

$$\begin{aligned}\sigma_{r,r} + r^{-1}(\tau_{r\theta,\theta} + \sigma_r - \sigma_\theta) &= -\varepsilon_r \gamma \sin \theta; \\ \tau_{r\theta,r} + r^{-1}(\sigma_{\theta,\theta} + 2\tau_{r\theta}) &= -\varepsilon_r \gamma \cos \theta,\end{aligned}\quad (5.4)$$

где запятой обозначено дифференцирование, ε_r — малый параметр при учете сил гравитации, γ — объемный вес пород.

Напряжения в пластической области представлялись рядами по степеням малого параметра

$$\sigma_{ij} = \sum_{k=0}^{\infty} \varepsilon^k \sigma_{ij}^{(k)}, \quad (ij = r, \theta) \quad (5.5)$$

и выражались через функцию напряжений

$$\sigma_r^{(k)} = r^{-1}U_{,r}^{(k)} + r^{-2}U_{,\theta\theta}^{(k)}; \quad \sigma_\theta^{(k)} = U_{,rr}^{(k)}; \quad \tau_{r\theta}^{(k)} = -(r^{-1}U_{,\theta}^{(k)})_{,r}, \quad (5.6)$$

которая также находилась в виде разложения по степеням малого параметра из дифференциальных уравнений в частных производных второго или третьего порядка. Решения этих дифференциальных уравнений получались в бесконечных рядах, комплексные коэффициенты которых определялись из граничных условий задачи. Затем задача сводилась к отысканию границы ЗНД и функций Н. И. Мусхелишвили, голоморфных во всей плоскости вне границы и непрерывных вплоть до нее. Граничные значения этих функций определялись по функции в пластической области.

Конформно отображая внешность границы ЗНД на внешность единичного круга с помощью функции в виде ряда по степеням малого параметра, воспользовавшись значениями функций Н. И. Мусхелишвили на бесконечности и теоремой Ж. Лиувилля, определялись искомые функции и неизвестные коэффициенты, характеризующие форму упругопластической границы.

Используя принцип суперпозиции, действительный при учете первых степеней разложения по малому параметру, получена обобщенная формула для определения формы ЗНД с учетом всех действующих факторов (таблица).

Исследование формы зоны неупругих деформаций вокруг выработки

Возмущающий фактор и его аналитическое представление	Коэффициенты формы упругопластической границы	Форма ЗНД
<p>Разнокомпонентность исходного поля напряжений массива $\lambda \approx 1$</p> <p>Анизотропия и неоднородность прочностных свойств пород</p> $c(\theta) = \frac{\mu - A + 1}{A - 1} [1 + \varepsilon_2 f(\theta)];$ $f(\theta) = \sum_{-\infty}^{\infty} w_k e^{ik\theta}$	$\delta_2^{(1)} = \frac{1 - \lambda}{1 + \gamma} (2 + \nu)$ $\delta_k^{(2)} = -2 \frac{\mu - A + 1}{\mu (\mu + 1) (\mu + 2)} \frac{\bar{w}_k}{k^2} \times$ $\times (M_k^* + 2 \operatorname{Re} N_k^* r_*^{-\lambda} k)$	<p>Эллипс с большой осью вдоль σ_{\min}</p> <p>Удлинение в направлении, перпендикулярном напластованию пород</p>
<p>Массовые силы в зоне неупругих деформаций</p> $\sigma_{r,r} + \gamma^{-1} (\tau_{r,\theta} + \sigma_r - \sigma_\theta) = -\varepsilon_3 \gamma \sin \theta$	$\delta_1^{(3)} = i \frac{\gamma}{2\mu q r_* (\mu - 2) (2\mu - 1)}; \quad q_* = q \pm \frac{\gamma a}{\mu - 1}$	<p>Овал, сдвинутый вверх</p>
<p>Неравномерность отпора крепи</p> $N = \sum_{-\infty}^{\infty} f_k e^{ik\theta}; \quad T = \sum_{-\infty}^{\infty} \varphi_k e^{ik\theta};$ $f_k = f_{-k}; \quad \varphi_k = -\varphi_{-k}$	$\delta_k^{(4)} = -\frac{2 f_k \operatorname{Re} (M_k^* r_*^{\lambda} k^{-2})}{\mu p}$	<p>Искажения в соответствии с осями N и T</p>
<p>Некруговая форма выработки</p> $r_0 = 1 + \varepsilon_5 f(\theta) = 1 + \varepsilon_5 \sum_{-\infty}^{\infty} w_k e^{ik\theta};$ $w_k = \pi^{-1} \int_{-\pi}^{\pi} f(\theta) e^{ik\theta} d\theta$	$\delta_k^{(5)} = 4 \frac{\bar{w}_k}{\mu + 2} \operatorname{Re} (M_k^* r_*^{-\lambda} k)$	<p>Искажения в соответствии с реальным контуром выработки</p>

$$z = \omega(\zeta) = r_* \left(\zeta + \sum_{j=1}^5 \varepsilon_j e^{i\theta_j} \sum_{k=0}^{\infty} \delta_k^{(j)} \zeta^{1-k} \right), \quad (5.7)$$

где ζ — аффикс единичной окружности; i — мнимая единица; ε_j — малый параметр, соответствующий j -му фактору; θ_j — угол отклонения оси симметрии j -го фактора от вертикали; $\delta_k^{(j)}$ — коэффициенты искажения формы ЗНД для j -го фактора.

Решения неосесимметричных задач получены в достаточно общем виде: для горных пород с ниспадающей ветвью диаграммы загрузки, для идеально пластичных материалов и сыпучей среды.

Анализ влияния изученных факторов на форму ЗНД показал следующее (см. таблицу):

1. Негидростатичность исходного поля напряжений была учтена с помощью точного решения упругопластической задачи по методу, предложенному А. Г. Протосеней (1972 г.). ЗНД принимает форму эллипса, вытянутого по направлению действия минимального главного напряжения.

2. Прочностная анизотропия резко проявляется в слоистых породах при наличии ориентированных систем трещин, ослаблений и неоднородных включений, а ее аналитическое представление получено разложением удельной силы сцепления породы в комплексный ряд Фурье. Коэффициенты разложения можно получить из векторных диаграмм прочности породы, построенных с помощью прибора ППЭИ-2м (см. пп. 2.2 и 4.2).

Форма ЗНД представляет собой цилиндрическую поверхность с сечением, большая ось которого вытянута перпендикулярно напластованию горных пород. Степень «отклика» границы ЗНД на возмущающее влияние прочностной анизотропии быстро затухает с возрастанием номера гармоники разложения функции прочности в комплексный ряд Фурье, поэтому в практических расчетах есть смысл рассматривать гармоники не выше четвертого порядка.

При номере гармоники $k=1$ прочностная анизотропия пород приобретает особый физический смысл прочностной неоднородности, под которой понимается изменение средневзвешенной прочности пород вокруг выработки по полярному углу. Решение позволяет оценить амплитуду конгруэнтного сдвига ЗНД в сторону пород с пониженной прочностью. Степень влияния прочностной неоднородности весьма ощутима.

3. При значительном развитии ЗНД вокруг выработки собственный вес среды в пластической области приводит при малых значениях отпора крепи к сдвигу границы ЗНД вверх по отвесной линии. Количественная оценка этого эффекта методом малого параметра для критических ситуаций (обрушение

пород) не вполне пригодна, поэтому получена оценка сверху, позволяющая вычислить эффективный отпор крепи в кровле (—) и почве (+) выработки радиуса a , закрепленной крепью с конструктивным отпором q :

$$q_* = q \pm \frac{\gamma a}{\mu - 1}. \quad (5.8)$$

Зависимость (5.8) дает очень важную в практическом отношении оценку минимальной грузонесущей способности крепи, устанавливаемой в выработке.

4. Взаимодействие крепи с массивом при неравномерном ее отпоре удобно представить в виде вектора поверхностных усилий, разлагая нормальную и касательную его компоненты в ряд Фурье. При неравномерном отпоре крепи установлены следующие закономерности: а) граница ЗНД ближе к контуру выработки там, где вектор поверхностных усилий больше; б) чем больше ЗНД, тем меньше влияние неравномерности отпора; в) чем выше гармоника неравномерности отпора, тем меньше ее влияние на форму ЗНД, что позволяет ограничиться первыми тремя гармониками разложения вектора в ряд Фурье.

5. Учет некруговой формы отверстия показал, что граница ЗНД в основном стремится повторить форму выработки и по мере роста ЗНД быстро стремится к круговой форме. Исходя из особенностей поведения решения, можно учесть возмущения контура выработки гармониками не выше четвертого порядка, что вполне достаточно для практических расчетов. Область пригодности решения ограничена случаем касания границы ЗНД и контура выработки.

Выполняя обобщение результатов исследований в этом направлении, можно заключить, что изученные факторы существенно различаются по своему влиянию на ЗНД. Наиболее «дальнодействующими», а потому и важнейшими, являются разнокомпонентность исходного поля напряжения массива и прочностная анизотропия горных пород. Неравномерность отпора крепи и некруговой контур выработки заметно сказываются на форме ЗНД лишь при незначительном ее развитии и быстро (по степенному закону) их влияние затухает по мере роста радиуса ЗНД, что позволяет их назвать факторами «ближнего действия». Массовые силы в ЗНД следует учитывать при незначительном конструктивном отпоре крепи и достаточном развитии ЗНД.

5.7. Деформации и смещения массива горных пород в выработку определялись, основываясь на результатах шахтных инструментальных наблюдений, основных закономерностях разрушения и деформирования горных пород на ниспадающем участке диаграммы загрузки и решениях неосесим-

метричных задач горной геомеханики. При этом вокруг выработки различаются: упругая зона, зона неупругих деформаций, где породы находятся на ниспадающей ветви диаграммы нагружения, и зона разрушения, где породы почти полностью теряют сплошность. Правильность такого подхода подтверждается исследованиями И. Л. Черняка, Е. И. Шемякина и др.

Смещения определялись из условий плоской деформации и в упругой зоне находились по известным зависимостям. Смещения в ЗНД находились исходя из ассоциированного закона пластичности, который для сред с внутренним трением позволяет учесть дилатансию материала. Размеры зоны разрушения вычислялись из экспериментально заданного соотношения деформаций сдвига, разделяющих ниспадающую ветвь диаграммы нагружения на пластическую и запредельную части. В зоне разрушения смещения определялись из условия ограничения дилатансии пород с учетом нарушения приконтурного слоя выработки буровзрывными работами. На границах между зонами соблюдается условие непрерывности деформаций.

Расчетный метод скорректирован с учетом полученных несимметричных решений и случая больших деформаций породного контура, что позволяет определить смещения в произвольной точке массива горных пород вокруг выработки. Проведено сопоставление расчетных смещений с данными шахтных наблюдений, показавшее их вполне удовлетворительное качественное и количественное совпадение. Для определения рациональных параметров крепи капитальных выработок все расчеты можно вести на ЭВМ с помощью разработанной программы.

6. Кинетика и реономные параметры хрупкого разрушения горных пород

6.1. Исследование кинетики хрупкого разрушения горных пород с позиций термофлуктуационной концепции прочности проводилось на основе использования понятия поврежденности как меры сплошности материала (Л. М. Качанов, 1958 г.; Ю. М. Работнов, 1966 г.; В. В. Новожилов, 1972 г.).

На основе классической статистики Больцмана о термофлуктуации энергии получено фундаментальное дифференциальное уравнение длительной прочности и долговечности с учетом роста и залечивания дефектов в материале

$$\frac{d\omega}{dt} = (1 - \omega) A_a \exp\left(+\frac{\alpha\sigma}{1 - \omega}\right) - \omega A_b \exp\left(\frac{-\beta\sigma}{1 - \omega}\right); \quad (6.1)$$

где A_a , A_b , α , β — термодинамические и структурные параметры материала, явно выражающиеся через температуру,

энергию активации разрыва и восстановления связи и т. д.; $0 \leq \omega \leq 1$ — поврежденность, интегральная мера потери сплошности материала, причем разрушению соответствует $\omega = 1$.

Уравнение (6.1) непригодно для практических расчетов ввиду сложности интегрирования и трудоемкости раскрытия неопределенности типа $0 \cdot \infty$, которая появляется при $\omega = 1$, и было заменено с помощью анализа его фазового портрета аппроксимационными соотношениями роста ($\sigma > B_*$) и залечивания ($\sigma < B_*$) поврежденности

$$\frac{d\omega}{dt} = \alpha_* \left(\frac{\sigma}{B_*} - 1 \right) (1 - \omega)^{-n}; \quad (6.2)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = -\beta_* \omega \left[1 - \frac{\sigma}{B_*} (1 - \omega)^{-n} \right],$$

где α_* и β_* — реологические параметры, зависящие от типа, структуры и свойств материала; n — показатель интенсивности трещинообразования; B_* — пороговое значение напряжений, разделяющее области роста и залечивания поврежденности при нагружении материала.

Уравнения (6.2) являются не только удобными математическими аппроксимациями, но и обладают вполне определенным физическим содержанием, что позволяет хорошо описывать реально наблюдаемые эффекты длительной прочности и долговечности материалов при произвольных законах их загрузки. Для различных режимов загрузки получены обобщенные кривые длительной прочности горных пород в безразмерных координатах.

6.2. Экспериментальное исследование реономных параметров прочности горных пород проводилось с целью проверки обобщенного уравнения длительной прочности (6.2) при сжатии и растяжении.

Для длительных испытаний горных пород на прямое растяжение и сжатие были разработаны методика, необходимые технические средства и оборудование в виде экспериментальных установок шестисекционного типа, обеспечивающих заданные законы загрузки. Были найдены реономные параметры разрушения 13 типов горных пород и каменных материалов, доказано, что вид кривой длительной прочности в безразмерных координатах одинаков для растяжения и сжатия и зависит лишь от закона изменения внешней нагрузки. Результаты лабораторных исследований хорошо согласуются с теоретическими выводами и подтверждаются экспериментальными данными других исследователей (Е. Н. Ставрогин, М. П. Мохначев и др.).

6.3. Кинетика разрушения массива горных пород в окрестности капитальной выработки исследовалась на основе ре-

зультатов пп. 6.1 и 6.2, для чего была впервые поставлена, сформулирована и решена задача о движении фронта хрупкого разрушения вокруг круглого отверстия в гидростатическом поле напряжений. Получено дифференциальное уравнение движения фронта хрупкого разрушения, эквивалентное дифференциальному уравнению с запаздывающим аргументом. Поскольку в окрестности закрепленной выработки интегрирование в квадратурах этого уравнения невыполнимо, был использован численный метод решения шагами по времени, что для k -го момента времени приводит к системе уравнений

$$\frac{dr_k}{dt} = \frac{r_k}{2t_{0k}} \left(1 - \frac{\ln S_k}{S_k - 1} \right); \quad (6.3)$$

$$t_{0k}^{-1} = \frac{\alpha_* \sqrt{A}}{(A-1)\sigma_\infty} [2p - \sigma_\infty - (A+1)q_* r_k^{\mu_k}]; \quad (6.4)$$

$$S_k = \frac{A+1}{(A-1)p + \sigma_\infty} (p - q_* r_k^{\mu_k}); \quad (6.5)$$

$$(\mu_k - A + 1) q_* r_k^{\mu_k} = \sigma_\infty. \quad (6.6)$$

Поскольку выполнение всех расчетов трудоемко и требует больших затрат времени, была разработана программа, позволяющая с помощью ЭВМ определить смещения массива горных пород на различном расстоянии от контура выработки в любой момент времени, найти радиусы зоны неупругих деформаций и разрушения пород. Сопоставление расчетных графиков смещений контура во времени с данными натурных наблюдений показало удовлетворительное для практических целей совпадение со средним отклонением $\pm 30\%$.

6.4. Исследование статики и кинетики процессов разрушения и деформирования горных пород в подготовительных выработках проводилось с учетом изменчивости исходного поля напряжений вокруг выработки по мере приближения очистного забоя. На основе исследований В. И. Моссаковского и П. А. Загубиженко (1954 г.) произведена оценка изменения напряженного состояния массива горных пород в окрестности очистного забоя, разрабатывающего наклонный пласт, когда на участке смыкания кровли с почвой их взаимодействие подчинено законам трения Кулона, причем координаты участков контакта произвольны. В зависимости от особенностей управления кровлей в лаве опорное давление (вертикальная компонента Y_Y тензора напряжений) для полого залегания пласта определяется по формуле (впереди лавы — плюс, в обрушенном пространстве — минус)

$$Y_Y = p \sqrt{1 \pm \frac{L}{|x|}}, \quad \left(\left| x + \frac{L}{2} \right| \geq \frac{L}{2} \right), \quad (6.7)$$

где p — вертикальная компонента исходного поля напряжений массива горных пород; x — расстояние рассматриваемой точки от забоя лавы; L — параметр поведения кровли в лаве

$$L = 0,5l_{\text{п}} + l_{\text{к}} + x_*, \quad (6.8)$$

где $l_{\text{п}}$ — шаг посадки основной кровли; $l_{\text{к}}$ — ширина призабойного пространства; x_* — половина ширины раздавленной зоны угля в лаве.

Влияние лавы усложняет расчетный алгоритм прогноза смещений в подготовительной выработке, поскольку требуется учесть всю предысторию изменения напряжений в массиве и развития смещений в выработку за время ее существования. Поэтому на основе зависимостей, описывающих кинетику развития разрушения пород в капитальной выработке, разработан алгоритм расчета неупругого деформирования массива горных пород в подготовительной выработке с учетом вредного влияния очистных работ до подхода лавы. Анализируются особенности применения вычислительных процедур, разработанная программа их реализации на ЭВМ. Проведено сопоставление расчетов для разных горнотехнических условий с результатами шахтных замеров, свидетельствующее об их удовлетворительной сходимости.

7. Разработка способов и средств управления горным давлением в подземных выработках

7.1. Расчет параметров крепи капитальных и подготовительных выработок базируется на всем комплексе выполненных исследований статики и кинетики необратимых процессов разрушения пород и смещения их в выработку. Выбор типа крепи (оградительная поддерживающая или грузонесущая конструкции) и режима ее работы (жесткий или податливый) производится в зависимости от категории устойчивости породного контура и на основе технико-экономического анализа. Расчетные методы проявления горного давления сводятся к построению паспорта устойчивости контура выработки и применению разработанных алгоритмов для ведения вычислений на ЭВМ, при этом детерминированная компонента определяемого показателя начинает превалировать над стохастической по мере перехода от расчетов вывало- и сводообразования к определению параметров грузонесущей крепи в условиях образования ЗНД.

Разработаны рекомендации в виде таблиц для выбора параметров крепи капитальных и подготовительных выработок, исследовано влияние различных факторов (ширина выработки, отпор крепи, время, скорость движения лавы, шаг обрушения основной кровли и т. д.). Разработанные расчетные методы охватывают довольно широкую область горнотехнических

условий (подготовительные выработки при столбовой и сплошной системе разработок, наклонные выработки в целиках, развитие горного давления при перекреплении, при усилении крепи и т. д.) и позволяют выбрать целесообразные способы управления горным давлением.

7.2. Способ управления горным давлением активной разгрузкой и последующим упрочнением пород. Одним из основных технических противоречий проблемы крепления горных выработок является использование в крепи дефицитных дорогостоящих материалов с прочностью значительно меньшей, чем прочность горных пород. Начиная с периода ведения работ на малых глубинах, когда крепь выполняла вспомогательные функции, повсеместно утвердился и стал традиционным подход к управлению горным давлением, основанный на пассивном ожидании его развития и затем ликвидации последствий его проявления. Эта позиция объективно должна смениться активным вмешательством в процессы проявлений горного давления и управления ими.

В сложных горно-геологических условиях необходимо возводить мощные грузонесущие крепи, причем режим их работы в капитальных выработках должен быть близок к жесткому. Для этих условий предложен активный способ воздействия на массив вокруг выработки, основанный на управлении напряженным состоянием и прочностью горных пород. Сущность способа заключается в создании мощной монолитной конструкции из разгруженных от начальных напряжений и укрепленных горных пород (крепь «Монолит»). Разгрузка пород осуществляется после установки щита-опалубки камуфлетным взрыванием зарядов ВВ вокруг выработки или на отдельном ее участке, а грузонесущая конструкция создается из разгруженных разбитых трещинами пород после скрепления их упрочняющим раствором, вводимым через инъекторы.

Разработаны геотехнические параметры крепи «Монолит». Нагрузка со стороны массива определялась решением задачи о взаимодействии крепи с породами с учетом кинетики разрушения пород и образования ЗНД, растущей во времени. Для ведения расчетов разработана программа для ЭВМ, даются рекомендации в табличной форме, исследовано влияние основных факторов (глубина, время установки, прочность пород и пр.). Разработаны технологические карты по возведению различных модификаций крепи «Монолит», обладающей высоким коэффициентом конструктивного качества при низких стоимости, удельной материалоемкости и трудоемкости.

Одним из вариантов частичного осуществления предложенного способа управления горным давлением, который прошел успешную опытно-промышленную проверку в сложных горно-геологических условиях шахты «Донецкая», является способ борьбы с пучением почвы разгрузкой и упрочнением

пород. Разработаны и исследованы параметры способа в различных технологических вариантах. Способ закладывается в проекты строительства новых шахт, позволяет упростить технологию и повысить темпы проведения выработок, значительно снизить стоимость возведения обратных сводов, обеспечивая экономическую эффективность 100—130 руб/м.

7.3. Разгрузка пород от напряжений в пластовых выработках щелями переменной жесткости предложена как видоизменение способа скважинной разгрузки Донуги. Сущность способа состоит в создании из выработки по пласту угля периодически расположенных полостей, которые чередуются с перемычками переменного размера. Разгрузочные щели выполняются разработанной КГМИ буронарезной штангой и позволяют управлять распределением напряжений в окрестности выработки. Щелевая разгрузка прошла обнадеживающую промышленную проверку в западных штреках № 9 и 11 гор. 580 м ш. им. И. П. Баракова и рекомендуется к внедрению в дополнение к существующим способам охраны подготовительных выработок.

7.4. Охрана выработок бутовыми полосами высокой прочности с предварительным распором предложена нами для повышения устойчивости подготовительных выработок в зоне влияния лавы с целью их повторного использования. Для этого вдоль выработки после прохода лавы образуют бутовую полосу путем бурения и взрывания шпуров в почве выработанного пространства, а после образования бутовой полосы производят ее предварительный распор взрыванием зарядов ВВ над ней. Одновременно тем самым инициируется обрушение зависшей породной консоли вдоль выработки, что уменьшает величину опорного давления.

Опытно-промышленные испытания и внедрение нового способа охраны проведены в транспортных штреках лавы № 3 и 5 гор. 447 ш. «Ореховская». Разработанные рекомендации и их внедрение позволили полностью предотвратить перекрепление и поддирку почвы в штреках, обеспечить их высокую устойчивость при отказе от целиков, улучшить состояние сопряжения лавы со штреком, повысить темпы угледобычи и безопасность работ.

7.5. Технико-экономическая эффективность реализации разработок в горнодобывающей промышленности:

— внедрение портативного прибора для экспресс-испытаний горных пород ППЭИ-2м с целью получения представительных данных линейными инженерно-техническими работниками о свойствах пород для принятия оперативных решений по управлению геомеханическими процессами и повышения безопасности работ позволяет получить, с учетом годовой потребности в количестве 550 шт., свыше 300 тыс. руб. в год;

— внедрение метода построения и расчета паспорта устойчивости породного контура горных выработок позволит расширить объем применения облегченных типов крепи (анкерные, набрызгбетонные и пр.) на 200—250 км выработок в год, что дает экономический эффект в размере 2,0÷2,5 млн. руб.;

— внедрение расчетных методов проявлений горного давления и параметров крепи приведет к ежегодной экономии 6÷8 млн. руб. за счет повышения надежности проектных решений, устранения необходимости ремонтов и перекрепления выработок;

— способ управления горным давлением разгрузкой пород от напряжений и последующим их упрочнением (крепь «Монолит») основан на управлении напряжениями вокруг выработок и использовании природной прочности горных пород, ему присущи высокий коэффициент конструктивного качества при малой трудоемкости и стоимости крепи, что при возможном годовом объеме внедрения 200—300 км выработок позволит получить экономическую эффективность 40—60 млн. руб., а за счет внедрения способа борьбы с пучением почвы в 150—200 км выработок годовая эффективность составляет свыше 20,0 млн. руб.;

— способ охраны горных выработок, сохраняемых за лавой, бутовой полосой с предварительным распором и щелями переменной жесткости обеспечивает управление консолю основной кровли вдоль выработки и создание опор высокой прочности, что при внедрении на 20 шахтопластах Донбасса даст экономическую эффективность свыше 5 млн. руб.

Таким образом, экономический потенциал выполненных исследований составляет 70—95 млн. руб. в год, в том числе к концу будущей XI пятилетки возможный экономический эффект от внедрения разработок ожидается в размере 12—16 млн. руб. в год.

Заключение

Диссертационная работа посвящена изучению узловых вопросов физики горных пород и горной геомеханики — исследованию проблемы статики и кинетики неупругого деформирования и разрушения пород в подземных выработках с единых методических позиций механики сплошной среды с целью разработки способов и средств управления горным давлением и инженерных методов расчета его проявлений.

Выполненный цикл исследований затрагивает в той или иной мере большинство объектов горной геомеханики, причем методической спецификой данной работы является использование аналитического подхода с последующими проверкой и корректировкой окончательных выводов лабораторными, натурными и производственными экспериментами. По-ви-

димому, такое положение характерно для ситуации, когда основным объектом исследования является не формализованная структура, а реальная проблема в ее многообразии и сложности. Наиболее важные научные и практические результаты исследования заключаются в следующем:

А. В теоретических исследованиях

1. Получены аналитические оценки влияния на исходное поле напряжений массива его кусочно-неоднородного строения (слоистости), реологических свойств пород и структурных особенностей в виде дизъюнктивных нарушений.

2. Исходя из анализа поведения горных пород при разрушении на ниспадающей ветви диаграммы загрузки проанализированы характерные особенности упругопластических задач с учетом радиальной прочностной неоднородности, получено порождающее решение задачи о размерах зоны неупругих деформаций (ЗНД) и распределении напряжений в массиве вокруг одиночной протяженной горной выработки. Рассмотрение пластической и дилатансионной схем поведения пород в ЗНД позволило оценить входящие в решение параметры, разработать метод расчета смещений массива в выработку и довести его до уровня инженерного алгоритма.

3. На основе порождающего решения упругопластической задачи сформулирован и решен ряд неосесимметричных задач горной геомеханики, позволяющих установить закономерности влияния основных горнотехнических факторов на форму и размеры ЗНД. Полученные решения рассмотренного класса неосесимметричных задач представлены в достаточно общем виде (в том числе для идеальнопластичной и сыпучей сред) и позволяют обобщить расчетные методы проявлений горного давления на широкий диапазон изменения горно-геологических условий.

4. С общетеоретических позиций физики твердого тела получено фундаментальное дифференциальное уравнение длительной прочности и долговечности, обобщающее на основе статистики Больцмана о флуктуации энергии, описание процессов роста и залечивания микродефектов в материале. Выполнен анализ уравнения долговечности, которое методом сравнения фазовых портретов заменено удобным с точки зрения приложений аппроксимационным дифференциальным соотношением. Для различных режимов загрузки получены обобщенные кривые длительной прочности горных пород в безразмерных координатах.

5. Впервые сформулирован и решен новый класс задач кинетики разрушения горных пород в окрестности горной выработки, исследованы закономерности движения фронта хрупкого разрушения, установлены определяющие условия квазиста-

тического равновесия массива в любой момент времени образования ЗНД. Установлены закономерности развития проявлений горного давления в выработке во времени, которые качественно и количественно согласуются с результатами натуральных исследований.

Таким образом, в теоретических исследованиях стержневыми направлениями являлись изучение закономерностей процессов статики и кинетики разрушения и неупругого деформирования горных пород в подземных выработках с использованием методов механики сплошной среды и физики твердого тела (горных пород).

Б. В экспериментальных исследованиях

1. Проведен комплекс шахтных инструментальных наблюдений на замерных станциях, оборудованных контурными и глубинными реперами, по усложненной методике в движущейся системе координат, уточнен механизм деформирования пород в выработку и с помощью экспериментально установленных закономерностей и эффектов проверена достоверность расчетных схем и аналитических исследований.

2. Методом фотоупругости вскрыты и обоснованы закономерности разрушения породного контура выработки, связанные с изменением формы выработки и перераспределением напряжений. Показано и обосновано изменение устойчивости выработки при разрушении: от растягивающих напряжений — в сторону образования сводов естественного равновесия, а от сжимающих напряжений — в направлении формирования ЗНД.

3. Разработаны методика, необходимые технические средства и оборудование для исследования реономных параметров прочности горных пород. Новые разработки отличаются от известных тем, что дают возможность впервые изучить реологию разрушения горных пород с позиций термофлуктуационной концепции прочности.

4. Предложен и подробно разработан новый способ определения прочностных свойств горных пород на образцах из кернов с необработанными торцами. Для определения физико-механических свойств пород проведено усовершенствование испытательной и измерительной техники.

В. Практическое приложение исследований

1. Предложена классификация проявлений горного давления в подземных выработках, основанная на объединении общих и локальных критериев устойчивости, разработано руководство по расчетному обоснованию паспорта устойчивости породного контура.

2. На основании теоретических и экспериментальных исследований по решению задач статики и кинетики разрушения пород и смещения их в выработку разработаны расчетные методы прогнозирования горного давления в капитальных и подготовительных выработках (в зоне вредного влияния очистных работ). Разработаны рекомендации по выбору параметров крепи, составлены алгоритмы для ведения расчетов с помощью ЭВМ.

3. Разработан и исследован активный способ воздействия на массив вокруг подземной выработки, основанный на управлении напряженным состоянием и прочностью горных пород, сущность которого заключается в создании вокруг горной выработки или на отдельном участке ее контура мощной конструкции из разгруженных и упрочненных пород (крепь «Монолит»). Обоснован механизм процесса управления горным давлением, определены геотехнические и технологические параметры крепи «Монолит», рекомендации переданы для конкретного проектирования в Гипрошахты Минуглепрома СССР.

4. Предложен, обоснован и разработан новый способ охраны подготовительных выработок бутовыми полосами с предварительным распором и разгрузкой краевой зоны пласта. Разработанные технологические параметры способа прошли успешную опытно-промышленную проверку и внедрение.

5. Разработаны методика и оборудование в виде портативного прибора для экспресс-испытаний ППЭИ-2м для получения оперативной информации о физико-механических свойствах горных пород в лабораторных и полевых условиях.

6. Реальный экономический эффект, полученный в процессе опытно-промышленных испытаний и внедрения разработок, составляет 685 тыс. руб.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Заславский Ю. З., Проявкин Е. Т., Литвинский Г. Г. Сборные железобетонные и монолитные бетонные крепи в горизонтальных выработках глубоких шахт. — «Уголь Украины», 1966, № 12, с. 50—51.

2. Литвинский Г. Г. Исследование влияния забутовки на формирование величины и распределение нагрузки на крепь. — «Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых», СО АН СССР, 1967, № 6, с. 128—131.

3. Заславский Ю. З., Литвинский Г. Г. Экономическая эффективность повышения марки бетона при креплении горных выработок. — «Шахтное строительство», 1967, № 10, с. 18—20.

4. Литвинский Г. Г., Коган Л. П. Исследование коэффициента бокового распора горного массива с позиций реологии. — В сб. «Давления и механические напряжения в развитии состава, структуры и рельефа литосферы». Л., «Недра», 1969, с. 205—208.

5. Литвинский Г. Г., Дружко Е. Б. Исследование геотехниче-

ских параметров упрочнения разрушенных вокруг выработки пород. — «Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых», СО АН СССР, 1970, № 6, с. 3—7.

6. Литвинский Г. Г., Дружко Е. Б. Шахтные инструментальные наблюдения за развитием зоны неупругих деформаций вокруг капитальных горных выработок. — «Проектирование и строительство угольных предприятий», 1970, № 3, с. 34—38.

7. Литвинский Г. Г., Дружко Е. Б., Коган Л. П. Исследование влияния горногеологических условий на проявление горного давления в капитальных выработках. — В сб. «Разработка месторождений полезных ископаемых», вып. 23. Киев, «Техника», 1970, с. 13—16.

8. Литвинский Г. Г. К вопросу о механизме хрупкого разрушения в задачах о развитии зоны неупругих деформаций. Тезисы Всес. науч. конференции «Физика горных пород и процессов». М., МГИ, 1971, с. 93—94.

9. Литвинский Г. Г. Деформационные характеристики и напряженное состояние наклонно-слоистого горного массива. — В сб. «Разработка месторождений полезных ископаемых», вып. 27. Киев, «Техника», 1971, с. 12—21.

10. Литвинский Г. Г., Дружко Е. Б., Захарченко И. Н. Эффективная область охраны выработок упрочнением вмещающих пород. — «Уголь Украины», 1972, № 10, с. 48—49.

11. Литвинский Г. Г., Дружко Е. Б. Прочностные свойства затампированных пород. — «Проектирование и реконструкция угольных предприятий», 1972, № 10, с. 17—19.

12. Литвинский Г. Г. Механизм хрупкого разрушения и длительная прочность горных пород. — В сб. «Разработка месторождений полезных ископаемых», вып. 33. Киев, «Техника», 1973, с. 6—10.

13. Литвинский Г. Г., Курман С. А. Исследование параметров функции повреждаемости горных пород. Тезисы Всес. науч. конф. «Физика горных пород и процессов». М., МГИ, 1974, с. 17.

14. Литвинский Г. Г., Коган Л. П. Коэффициент бокового распора при различных реологических моделях горного массива. — В сб. «Вопросы теоретической и экспериментальной реологии горных пород», вып. 3. Киев, «Наукова Думка», 1974, с. 28—32.

15. Литвинский Г. Г. Кинетика хрупкого разрушения породного массива в окрестности горной выработки. — «Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых», 1974, № 5, с. 15—22.

16. Литвинский Г. Г., Захарченко И. Н. Опытные промышленные испытания борьбы с пучением почвы активной разгрузкой с последующим упрочнением пород. — «Уголь Украины», 1974, № 8, с. 17—18.

17. Литвинский Г. Г., Захарченко И. Н. Новый метод борьбы с пучением почвы горных выработок. — «Шахтное строительство», 1974, № 9, с. 9—11.

18. Литвинский Г. Г. Учет структурной нарушенности горных пород при оценке устойчивости горных выработок. Тезисы Всес. науч.-технич. семинара «Опыт создания и внедрения крепей для капитальных выработок глубоких шахт». Л.—М., ЛГИ, 1974, с. 154—155.

19. Литвинский Г. Г. Крепь «Монолит» из разгруженных и упрочненных пород. Тезисы Всес. науч.-технич. семинара «Расчет и конструирование крепи». Л.—М., ЛГИ, 1974, с. 101—104.

20. Литвинский Г. Г. Параметры хрупкого разрушения и условия возникновения горных ударов. — В сб. «Разработка месторождений полезных ископаемых», вып. 35. Киев, «Техника», 1974, с. 31—37.

21. Литвинский Г. Г. Инженерный метод оценки концентрации напряжений на контуре горных выработок различной формы. — В сб. «Разработка месторождений полезных ископаемых», вып. 38. Киев, «Техника», 1974, с. 61—69.

22. Литвинский Г. Г., Курман С. А. Исследование хрупкого разрушения материалов с позиций кинетики снижения сплошности. Тезисы

VI Всес. конф. по прочности и пластичности. АН СССР. М., МИСиС, 1975, с. 33.

23. Литвинский Г. Г. Закономерности движения фронта хрупкого разрушения и формирование зоны неупругих деформаций вокруг горной выработки. — В сб. «Горное давление в капитальных и подготовительных выработках». Новосибирск, ИГД СО АН СССР, 1975, с. 17—22.

24. Литвинский Г. Г. Поле напряжений в горном массиве и устойчивость выработок в зоне разрывных нарушений. — В сб. «Горное давление в капитальных и подготовительных выработках». Новосибирск, ИГД СО АН СССР, 1975, с. 34—39.

25. Литвинский Г. Г., Бабюк Г. В. Исследование характера разрушения пород вокруг выработки. — «Технология добычи угля подземным способом», 1975, № 11, с. 10—11.

26. Литвинский Г. Г., Курман С. А. О термоактивационной концепции разрушения горных пород в переменном поле напряжений. Тезисы VI Всес. конф. «Термомеханические методы разрушения горных пород». Днепропетровск, ИГТМ АН УССР, 1976, с. 57—58.

27. Литвинский Г. Г., Бабюк Г. В., Земляченко А. П. Охрана подготовительных выработок бутовыми полосами с разгрузкой краевой зоны пласта. — «Уголь», 1976, № 9, с. 39—42.

28. Литвинский Г. Г. Крепь «Монолит» из разгруженных пород массива для выработок глубоких шахт. Тезисы Всес. семинара «Проведение и крепление горных выработок в неустойчивых горных породах». М., ЦНИЭИуголь, 1976, с. 23—26.

29. Литвинский Г. Г. Решение неосесимметричного класса упруго-пластических задач горной геомеханики. Тезисы Всес. науч. конф. «Комплексные исследования физических свойств горных пород». М., МГИ, 1977, с. 37.

30. Литвинский Г. Г., Курман С. А. Захват для растяжения образцов горных пород. Авторское свидетельство № 467185. Бюллетень изобретений, 1975, № 14.

31. Литвинский Г. Г., Курман С. А. Устройство для испытания горных пород на сжатие. Авторское свидетельство № 554409. Бюллетень изобретений, 1977, № 14.