

На правах рукописи

ЛЕВИН

Александр Александрович

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ АНИЗОТРОПНОГО
МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ РАЗРАБОТКЕ ПЛАСТОВ
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

06.15.11 - "Физические процессы горного
производства"

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Днепропетровск
1992



00819769 (/)

Робота виконана в Інституті
Академії наук України.

Научний консультант:

академик АН України,
доктор технічних наук, професор,
заслужений діяч науки України
Космодамианський А.С.

Офіційні опоненти :

доктор фізико-математических наук, професор, член-корреспондент АН України	Щульга Н.А.
доктор технічних наук, професор	Зорин А.Н.
доктор технічних наук, професор	Алексеев А.Д..

Ведущая организация - Производственное объединение
"Донецкуголь"

Защита состоится "18" сентября 1992 г.

в 13 час. на заседании специализированного совета Д 016.40.01
при Институте геотехнической механики АН Украины (320096, г. Днепр-
петровск, ул.Симферопольская, 2а, ИГТМ АН Украины).

О диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института
геотехнической механики АН Украины.

Автореферат разослан "13" ноября 1992 г.

Ученый секретарь
специализированного совета,
кандидат технических наук

Шакунов И.А.

Др-26.136

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. При разработке пластов полезных ископаемых в массиве нарушается установившееся равновесие горных пород, происходят процессы перераспределения напряжений, деформаций и внутренней энергии. В этой связи возникает актуальная проблема исследования распределения напряжений и деформаций вокруг очистной выработки с учетом анизотропии упругих и пластических свойств массива с целью ее поддержания и сохранения от разрушения, механического обоснования выбора технологии выемки пласта, борьбы с динамическими явлениями, оптимального проектирования вновь строящихся подземных сооружений, горной техники и управления горным давлением.

Цель работы – установить закономерности процессов перераспределения напряжений и деформаций, происходящих в анизотропном массиве горных пород при различных стадиях разработки пластов полезных ископаемых.

Идея работы состоит в создании аналитических методов решения смешанных задач теории упругости и пластичности анизотропного тела, позволивших исследовать класс задач геомеханики массива с очистной выработкой с учетом анизотропии упругих и пластических свойств горных пород.

Объект исследований – массив горных пород при различных технологических стадиях выемки полезного ископаемого. При этом учитывалась анизотропия упругих свойств пород и пластическая анизотропия разрабатываемых пластов.

Методы исследований. Решение задач о напряженно-деформированном состоянии анизотропного массива горных пород проведено аналитическими методами теории упругости и пластичности анизотропного тела при использовании аппарата аналитических функций усложненных комплексных переменных. Реализация построенных решений осуществлялась на ЭВМ.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Методика построения общего решения задач о напряженно-деформированном состоянии анизотропного массива горных пород при ведении очистных работ по пласту полезного ископаемого, заключающаяся в сведении смешанной статической и динамической задачи теории упругости для полуплоскости к смешанной задаче Калдыша-Седова.

Построение решения задачи о напряженно-деформированном состоянии анизотропного массива горных пород со сдвиговыми треда-

Либ. И. В. Стефанюк
АН УРСР

нами при нелинейном условии связи между касательной и нормальной компонентами тензора напряжений, когда смешанная задача теории упругости для анизотропной плоскости с разрезами сведена к видоизменной задаче Дирихле.

Определение динамического и статического полей напряжений и скоростей смещений краевой части разрабатываемого анизотропного пласта на основании решения смешанных задач о сжатии анизотропного пластического слоя между шероховатыми плитами.

2. Установление несущей способности разрабатываемого пласта с параметром пластической анизотропии Хилла, лежащим в интервале $(0, 1)$, которая оказалась меньше несущей способности аналогичного изотропного пласта. У пластов с отрицательным и уменьшающимся параметром пластической анизотропии несущая способность увеличивается и всегда превышает несущую способность изотропного пласта. Увеличение скорости сближения горных пород кровли и почвы приводит к увеличению концентрации сжимающих напряжений в краевой части разрабатываемого пласта.

3. В анизотропном массиве на контуре кровли и почвы в области выработанного пространства появляются растягивающие тангенциальные напряжения более высокой интенсивности, чем в изотропном массиве. Если угол плоскости изотропии $\phi \neq 0$, то в анизотропном массиве часть контура горной выработки подвержена растяжению, а другая часть - сжатию.

Напряженное состояние пород кровли и почвы в области выработанного пространства асимметрично относительно геометрического центра горной выработки.

4. Для пласта с отрицательным и уменьшающимся параметром пластической анизотропии Хилла зона его пластических деформаций уменьшается, а концентрация напряжений в его краевой части увеличивается. Для пласта с положительным параметром пластической анизотропии, который возрастает от 0 до 1, протяженность зоны его пластических деформаций увеличивается, а концентрация напряжений снижается.

5. Максимальные тангенциальные напряжения над пластом (при $\phi = 0$) превосходят максимальные нормальные к пласту напряжения. Для анизотропных пород максимум касательных напряжений достигается на более близком расстоянии от пласта, чем в случае изотропного массива.

В анизотропном массиве горных пород существенно уменьшается первичной посадки кровли и наблюдается более интенсивная

конвергенция пород кровли и почвы по сравнению с изотропными горными породами.

6. После первичной посадки кровли в области контакта горных пород кровли и почвы происходит процесс восстановления горного давления. При увеличении фронта очистных работ осуществляется процесс поперечного сдвижения массива горных пород с накоплением тангенциальных перемещений, приводящий к негативному проявлению горного давления. Указанному процессу сдвижения препятствует трение, возникающее в области силового взаимодействия пород кровли и почвы за счет восстанавливающегося горного давления. Для горных пород с характеристикой трения, лежащей в диапазоне от 0 до $-\tau_{xy}^0$ (естественные касательные напряжения), по мере развития фронта очистных работ тангенциальные перемещения возрастают. При выборе закладочного материала, прочность которого $\sigma_{hp} = 2|\tau_{xy}^0|$, с развитием фронта очистных работ величина тангенциальных перемещений всегда фиксирована и равна одной и той же величине, равной максимальному перемещению при начальной стадии отработки пласта.

7. При разработке пласта в анизотропном массиве, у которого угол ϕ (характеристика напластования) меняется от 0° до 45° увеличивается протяженность призабойной пластической зоны. Увеличение мощности закладочного материала приводит к уменьшению протяженности призабойной пластической области разрабатываемого пласта. Наличие крепи в выработанном пространстве приводит к увеличению шага обрушения кровли, причем максимальное увеличение шага обрушения реализуется для массива с характеристикой $\phi = 45^\circ$, но в целом протяженность пластической области пласта снижается. Длина разгруженной части пласта уменьшается, если предел пластичности при сдвиге для материала пласта увеличивается.

В анизотропном массиве при разработке пологого, наклонного и крутого пласта с плавным сближением боковых пород величина свободно зависящей кровли существенно меньше этой же величины для изотропного массива. При этом всегда имеется неоднородное распределение тангенциальных напряжений на контуре кровли (почвы) и точка раздела знаков этих напряжений.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, полученных в диссертации решений, проверялась путем строгого удовлетворения граничных условий; осуществления предельного перехода к изотропному массиву в его статическом состоянии с целью получения ранее известных формул, впервые найденных Г.И. Баренблаттом, С.А. Христиановичем, С.В. Кузнецовым, Е. Найром, Л.М. Кв-

чановым, Л.Прандтлем. Достоверность результатов и выводов обеспечена строгим использованием уравнений упругого и пластического деформирования анизотропного массива и сравнения результатов диссертационной работы с экспериментальными данными МакНИИ, что нашло подтверждение в нормативных документах по безопасному ведению горных работ на угольных пластах.

Научная новизна работы состоит в следующем.

Разработана методика построения общего решения задачи о напряженно-деформированном состоянии анизотропного массива горных пород при ведении очистных работ по пласту полезного ископаемого, заключающийся в сведении смешанной статической и динамической задачи теории упругости для полуплоскости к смешанной задаче Келдыша-Седова.

Разработана методика решения задачи о напряженно-деформированном состоянии анизотропного массива горных пород со сдвиговыми трещинами с нелинейным условием связи между касательной и нормальной компонентами тензора напряжений при скольжении берегов дефекта.

Разработана методика решения смешанных задач о сжатии анизотропного пластического слоя между шероховатыми плитами при воздействии торцовой нагрузки.

В результате применения указанных методов установлены новые качественные закономерности и количественные различия в распределении напряжений и смещений в анизотропном массиве горных пород при разработке пласта по сравнению с аналогичными результатами для изотропного массива.

Научное значение работы состоит в разработке методики решения неклассических смешанных задач теории упругости и пластичности анизотропного тела, позволивших впервые получить решение большого класса задач геомеханики, связанных с различными технологическими стадиями разработки пласта полезного ископаемого в очистном забое анизотропного массива горных пород.

Практическое значение работы состоит в прогнозировании проявления горного давления при выемке пласта полезного ископаемого, расчете основных параметров разгрузочных зон в массиве и поля напряжений вокруг возникших полостей с целью охраны горных выработок; в оценке свободно зависящей кровли, глубины призабойной пластической области пласта, разгруженной части пласта, зон разгрузки и зон с повышенным горным давлением, опорного давления на пласт, распределения компонентов тензора напряжений в массиве, направления разработки пологого, наклонного и крутого пласта в зависимости

от физико-механических свойств массива, горно-геологических и технологических параметров разработки пласта.

Реализация работы осуществлена в виде использования результатов в разработках МакНИИ, которые вошли в "Инструкцию по безопасному ведению горных работ на пластах, опасных по внезапным выбросам угля, породы и газа". - М., 1989, - пункт 6.6. - С.106-108.; пункт 1.6.4. - С.13.

Результаты использованы в научно-исследовательских работах МакНИИ: проблема ЦО 11610 "Разработать и внедрить региональные и локальные способы предотвращения выбросов угля, породы и газа в очистных и подготовительных забоях Донецкого бассейна" (Постановление Госкомитета Совета Министров СССР по науке и технике от 03.12.75 №670); отраслевой заказ по научно-технической программе 171410, заказ Госуглепрома Украины №1719201020 "Создать и осуществить широкое внедрение новых (усовершенствованных) способов и технических средств обеспечения безопасных и здоровых условий труда на угольных шахтах". Работа №1740084000 "Разработать способ двухстадийного комбайнового проведения выработок по особо выбросоопасным угольным пластам, основанный на предварительном проведении разгрузочной выработки во вмещающих породах" (1991 г., 1992 г.).

Апробация работы. Полученные в диссертации результаты докладывались на общем собрании Отделения математики, механики и кибернетики АН УССР (Днепропетровск, 1975 г.); на конференции молодых ученых, посвященной 10-летию образования Донецкого научного центра АН УССР (Донецк, 1976 г.); на 5-9 Всесоюзных конференциях по механике горных пород (Москва, 1974 г.; Фрунзе, 1978 г.; Днепропетровск, 1981 г.; Тбилиси, 1985 г.; Фрунзе, 1989 г.); на 6 Всесоюзной конференции по комплексным исследованиям физических свойств горных пород и процессов (Москва, 1977 г.); на 6 Всесоюзном семинаре по исследованию горного давления и способов охраны капитальных и подготовительных выработок (Новосибирск, 1978 г.); на 3-ем семинаре по аналитическим методам механики горных пород (Новосибирск, 1980 г.); на конференции "Концентрация напряжений" (Донецк, 1983 г.); на 3-7 Всесоюзной научной школе "Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках" (Симферополь, 1981 г., 1983 г., 1985 г., 1987 г., 1990 г.); на второй школе-семинаре "Методы математического моделирования в научных исследованиях" (Донецк, 1990 г.); на объединенном научном семинаре кафедры теории упругости и вычислительной математики, кафедры теоретической механики Донецкого гос-

университета и лаборатории прикладной механики сплошной среды Института прикладной математики и механики АН Украины по механике сплошной среды под руководством академика АН Украины А.С.Космодамианского (Донецк, 1975-1992 г.г.).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в тридцати шести статьях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, девяти глав, заключения, списка литературы и приложения; изложена на 348 страницах машинописного текста. Библиографический список насчитывает 233 источника.

Излагаемые в диссертации исследования связаны с планами научно-исследовательских работ Института прикладной математики и механики АН Украины с 1971 г. по настоящее время по следующим основным темам и программам: "Динамические задачи для сред с усложненными свойствами", выполненную по постановлению Президиума АН УССР от 17.12.1978 г., № 501, № 79004752, 1982 г.; "Напряженное состояние упругих и упруго-пластических сред при статических и динамических воздействиях", № Гос. рег. 01830008312, 1986 г.; "Разработать методы решения прикладных упругих и упруго-пластических задач механики горных пород и механики грунтов", выполненную по постановлению Президиума АН УССР № 451 от 29-30.12.1986 г., № Гос.рег. 01870065623; "Разработать методы решения прикладных упругих и упруго-пластических задач механики горных пород и механики грунтов", выполненную по постановлению Президиума АН УССР от 30.01.90 г., № Гос. рег. 01.9.00018552; программе фундаментальных научно-исследовательских работ приоритетного направления Отделения геологии, геофизики, геохимии и горных наук АН СССР 12.9 "Разработка месторождений и обогащение полезных ископаемых", часть программы 12.9.1 "Разработка месторождений твердых полезных ископаемых", проблема 12.9.1.3 "Закономерности проявления горного давления и динамического разрушения горных пород в массиве", Москва, 1988 г.; государственная научно-техническая программа Украины по направлению "4.Научные технологии", разработка "4.1.2.9. Исследовать напряженно-деформированное состояние анизотропных горных пород и перераспределение внутренней энергии массива при разработке газонасыщенных выбросоопасных угольных пластов на больших глубинах с целью управления горным давлением" (Постановление ГК по вопросам науки и технологии Украины № 12 от 4.05.92).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Состояние проблемы. Задачи исследований.

При разработке пластов полезных ископаемых в массиве нарушается установившееся равновесное состояние горных пород, возникают процессы перераспределения напряжений, деформаций и внутренней энергии. Эти обстоятельства вызывают потребность в развитии экспериментальных и аналитических методов исследования проявления горного давления в массиве на больших глубинах.

Экспериментальные и аналитические исследования в этом направлении проведены в работах Айталиева Ш.М., Алексева А.Д., Аннина Б.Д., Баренблатта Г.И., Булата А.Ф., Виноградова В.В., Гузя А.Н., Динника А.Н., Ержанова Ж.С., Ефремова Э.И., Зорина А.Н., Каминского А.А., Качанова Л.М., Колесникова В.Г., Космодамианского А.С., Кузнецова С.В., Курлани М.В., Лехницкого С.Г., Миренкова В.Е., Мухелишвили Н.И., Никифоровского В.С., Подильчука Ю.Н., Потуряева В.Н., Савина Г.Н., Усаченко Б.М., Хорошуна Л.П., Христиановича С.А., Шемякина Е.И., Шульги Н.А., Ярембаша И.Ф. и других.

В случае плоской деформации массива основная система дифференциальных уравнений статического деформирования анизотропного массива сводится к решению уравнения четвертого порядка в частных производных с постоянными коэффициентами. Общее решение этого дифференциального уравнения зависит от корней характеристического уравнения четвертой степени и представимо через две аналитические функции усложненных комплексных переменных. Напряжения и перемещения представимы формулами С.Г. Лехницкого:

$$\sigma_x = 2\text{Re} [\mu_1^2 \Phi(z_1) + \mu_2^2 \Psi(z_2)], \quad (1)$$

$$\sigma_y = 2\text{Re} [\Phi(z_1) + \Psi(z_2)], \quad \tau_{xy} = -2\text{Re} [\mu_1 \Phi(z_1) + \mu_2 \Psi(z_2)]$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 2\text{Re} [p_1 \Phi(z_1) + p_2 \Psi(z_2)], \quad \frac{\partial v}{\partial x} = 2\text{Re} [q_1 \Phi(z_1) + q_2 \Psi(z_2)].$$

Здесь $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy})$ - компоненты тензора напряжений, (u, v) - компоненты вектора перемещения вдоль осей x и y , $z_1 = x + \mu_1 y$, $z_2 = x + \mu_2 y$ - введенные С.Г. Лехницким усложненные комплексные переменные, p_j и q_j - постоянные, зависящие от упругих свойств массива ($j = 1, 2$).

Задача определения напряженно-деформированного состояния ани-

зотропного массива при плоской деформации сводится к отысканию двух функций $\Phi(z_1)$ и $\Psi(z_2)$ усложненных комплексных переменных из соответствующих граничных условий.

Изучение состояния проблемы позволило сформулировать следующие новые задачи:

1. Исследование состояния анизотропного массива горных пород с трещинами.

2. Исследование поля напряжений, скоростей смещений в краевой части разрабатываемого пласта при его пластическом деформировании.

3. Исследование напряженно-деформированного состояния анизотропного массива при начальной стадии разработки пласта полезного ископаемого.

4. Исследование напряженно-деформированного состояния анизотропного и изотропного массивов при начальной стадии разработки наклонного пласта полезного ископаемого.

5. Определение напряженно-деформированного состояния анизотропного массива после первичной посадки кровли.

6. Анализ напряженно-деформированного состояния анизотропного массива горных пород при выработанном пространстве с полуграничной зоной взаимодействия кровли и почвы.

7. Исследование напряженно-деформированного состояния анизотропного массива при разработке пласта полезного ископаемого с учетом закладки выработанного пространства, наличия охранных целиков и закрепления очистной выработки.

8. Исследование напряженно-деформированного состояния массива при скоростном подвигании забоя пласта.

Изложим подробно полученные результаты.

Исследование состояния анизотропного массива горных пород с трещинами. Особенностью поведения трещин сдвига в сжатых за счет гравитационных сил массивах является наложение и взаимодействие их верхнего и нижнего берегов. С механической точки зрения здесь сохраняются непрерывными нормальные перемещения, а также нормальные и касательные напряжения. При этом допускается разрыв тангенциального перемещения (скольжение берегов). При скольжении берегов возникает трение, препятствующее этому сдвигению. Силовое взаимодействие берегов трещины при скольжении описывается нелинейной зависимостью между касательной и нормальной компонентами тензора напряжений.

Рассмотрена трещина протяженности $2a$, берега которой при наложении допускают проскальзывание. В концевой части дефекта вдоль

линии его продолжения горная порода переходит в предельное равновесное состояние. Координата границы области предельного равновесия обозначена через x_* . Величина x_* заранее неизвестна и подлежит определению. Граничные условия на контуре трещины на ее продолжении при $-x_* < x < x_*$ имеют вид

$$\begin{aligned} [\sigma_y^0] = [\nu] = [\tau_{xy}^0] &= 0, \quad |x| < x_*, \\ \tau_{xy}^{e1} &= \operatorname{tg} \rho_c \sigma_y^{e1}, \quad |x| < a; \\ \tau_{xy}^{e2} &= -k_m + \operatorname{tg} \rho_m \sigma_y^{e2}, \quad a < |x| < x_*. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь ρ_c - угол внутреннего трения для взаимодействующих поверхностей дефекта, k_m и ρ_m - коэффициент сцепления и угол внутреннего трения для сплошной горной породы.

Решение граничной задачи (2) при зависимостях (1) в классе ограниченных функций получается таким:

$$\begin{aligned} \Phi(z_1) = & \frac{\tau_{xy}^0}{2(\mu_1 - \mu_2)} + \frac{1}{2\pi t(\mu_1 - \mu_2)} \left\{ T_m \left[\ln \frac{t\sqrt{z_1^2 - x_*^2} \sqrt{x_*^2 - a^2} - z_1 a - x_*^2}{x_*(-a - z_1)} \right. \right. \\ & - \ln \frac{t\sqrt{z_1^2 - x_*^2} \sqrt{x_*^2 - a^2} + z_1 a - x_*^2}{x_*(z_1 - a)} \left. \right] - T_c \left[\ln \frac{t\sqrt{z_1^2 - x_*^2} \sqrt{x_*^2 - a^2} + z_1 a - x_*^2}{x_*(a - z_1)} \right. \\ & \left. \left. - \ln \frac{t\sqrt{z_1^2 - x_*^2} \sqrt{x_*^2 - a^2} - z_1 a - x_*^2}{x_*(-a - z_1)} \right] \right\}, \quad (3) \end{aligned}$$

$$\Phi(z_2) = -\Phi(z_1).$$

Здесь

$$T_c = -\operatorname{tg} \rho_c \sigma_y^0, \quad T_m = k_m + \operatorname{tg} \rho_m \sigma_y^0.$$

Условие ограниченности напряженного состояния массива привело к следующему соотношению:

$$\frac{x_*}{a} = \operatorname{sec} \left[\frac{\pi}{2} \left| \frac{\tau_{xy}^0}{T_m + T_c} \right| \right].$$

Эта формула определяет протяженность зоны предельного равновесия массива в окрестности вершины трещины.

Исследование поля напряжений, скоростей смещений в кривой части разрабатываемого пласта при его пластическом деформировании.
Основная система дифференциальных уравнений пластического те-

чения Мизеса-Хилла для ортотропного массива, отнесенная к главным осям, имеет вид

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = \rho \left[\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right],$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = \rho \left[\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right],$$

$$\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2}{4(1-c_p)} + \tau_{xy}^2 = T^2, \quad \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{(1-c_p)(\partial u/\partial x - \partial v/\partial y)}{\partial u/\partial y - \partial v/\partial x} = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2\tau_{xy}}.$$

Здесь T - предел текучести при сдвиге по отношению к плоскости xOy , а c_p - характеристика анизотропии массива, которая представлялась так:

$$c_p = 1 - \frac{N(F + G)}{2(FG + GH + HF)}, \quad (5)$$

$$2F = \frac{1}{Y^2} + \frac{1}{Z^2} - \frac{1}{X^2}, \quad 2H = \frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} - \frac{1}{Z^2},$$

$$2G = \frac{1}{Z^2} + \frac{1}{X^2} - \frac{1}{Y^2}, \quad 2N = \frac{1}{T^2}.$$

В формулах (5) X, Y, Z - пределы текучести при сжатии в главных направлениях анизотропии. Величина c_p может принимать численные значения от $-\infty$ до $+1$; $c_p = 0$ соответствует изотропному массиву.

Уравнения (4) содержат пять неизвестных функций $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}, u, v$ и два параметра, характеризующие анизотропию массива c_p и T , которые находятся экспериментально.

Рассмотрена следующая смешанная динамическая задача теории пластичности для слоя. Торцовая поверхность $x=0$ фиксирована ($u=0$) и свободна от касательных напряжений. На свободной торцовой поверхности $x=l$ отсутствуют нормальная и касательная компоненты напряжений. На контактной поверхности пласт-порода развиваются постоянные касательные напряжения $\tau_{xy} = \tau_{xy}^0$ при $y = \pm h$, h - полумощность пласта; породы надвигаются на пласт с постоянной скоростью \dot{v} при $y = \pm h$.

Построено решение указанной краевой задачи.

Это решение существенно отличается от квазистатического реше-

ния Прандтля для изотропного слоя при достаточно высоких скоростях сближения пород V.

При учете пластической анизотропии в пласте, когда параметр c_p находится в интервале $(0,1)$, концентрация нормальных напряжений снижается, а при отрицательных c_p сжимающие нормальные напряжения увеличиваются. Если параметр пластической анизотропии лежит в интервале $(-\infty,0)$ и уменьшается, то касательные напряжения уменьшаются по сравнению с линейным распределением в решении Прандтля.

Наличие сдвиговой нагрузки, действующей на вмещающие породы, приводит к существенному уменьшению несущей способности пласта. Если параметр c_p лежит в интервале $(1,0)$, то несущая способность анизотропного пласта меньше несущей способности изотропного пласта. Если же $c_p < 0$, то несущая способность пласта возрастает.

Исследование напряженно-деформированного состояния анизотропного массива при начальной стадии разработки пласта полезного ископаемого.

Вначале рассматривалось решение смешанной задачи теории упругости для полуплоскости.

Предполагалось, что анизотропная среда с одной плоскостью упругой симметрии занимает верхнюю полуплоскость.

Начало прямоугольной системы координат xOy помещалось в точке O . На действительной оси x располагались непересекающиеся конечные отрезки (a_k, b_k) . При этом $k = 1, n$; $a_1 < b_1 < \dots < a_n < b_n$. Конечная часть границы L , образованная объединением отрезков (a_k, b_k) , обозначалась через L_1 . Совокупность отрезков (b_k, a_{k+1}) обозначалась через L_2 , где $a_{n+1} = a_1$. В связи с этим рассматривались следующие граничные условия задачи для верхней полуплоскости:

$$\sigma_y^+ = P(t), \quad t \in L_1; \quad v^+ = \omega(t), \quad t \in L_2; \quad \tau_{xy}^+ = \varphi(t), \quad t \in L. \quad (6)$$

Здесь функция $\omega(t)$ дифференцируема. Считалось, что $P(t)$, $\omega'(t)$, $\varphi(t)$ удовлетворяют условию Гельдера на контурах L_1, L_2 и L , включая бесконечно удаленную точку, где $\omega'(\infty) = \varphi(\infty) = 0$.

Общее решение граничной задачи (6), разрывное во всех точках раздела граничных условий и исчезающее на бесконечности, получено в следующем виде:

$$P(z) = \frac{1}{\pi i X_0(z)} \int_L X^+(t) h_0(t) (t-z)^{-1} dt + \Phi_0(z),$$

$$\Phi_0(z) = (c_1 z^{n-1} + c_2 z^{n-2} + \dots + c_n) / X_0(z) ,$$

$$X_0(z) = \prod_{k=1}^n [(z - \alpha_k)(z - \beta_k)]^{l_k} ,$$

$$h_0(t) = -\frac{1}{2} [P(t) + P_0(t)] , \quad t \in L_1 ,$$

$$h_0(t) = -\frac{1}{2} \left[\frac{\omega'(t) + \omega_0(t)}{\beta} \right] , \quad t \in L_2 , \quad (7)$$

$$P_0(t) = 2 \operatorname{Re} [q_2 \mu_2^{-1} \Phi_T(t)] , \quad \omega_0(t) = 2 \operatorname{Re} [q_2 \mu_2^{-1} \Phi_T(t)] ,$$

$$\beta = \frac{\beta_{22}}{2l} \left[\frac{1}{\mu_1} - \frac{1}{\mu_1} + \frac{1}{\mu_2} - \frac{1}{\mu_2} \right] ,$$

$$\Phi_T(t) = (2\pi l)^{-1} \int_L \varphi(\tau_0) (\tau_0 - t)^{-1} d\tau_0 + \frac{1}{2} \varphi(t) .$$

Здесь c_1, \dots, c_n - произвольные вещественные постоянные, β_{22} - приведенная упругая постоянная .

С помощью решения (7) восстанавливались функции $\Phi(z_1)$ и $\Phi(z_2)$:

$$\Phi(z_1) = \frac{\mu_2}{\mu_2 - \mu_1} P(z_1) , \quad (8)$$

$$\Phi(z_2) = -\frac{\mu_1}{\mu_2 - \mu_1} P(z_2) - (2\pi l)^{-1} \int_L \varphi(t) (t - z_2)^{-1} dt .$$

Для определения n вещественных постоянных c_1, \dots, c_n получено n условий

$$\omega(\beta_k) - \omega(\alpha_k) = -2 \int_{\alpha_k}^{\beta_k} \left\{ \beta \operatorname{Im} P(t) + \operatorname{Re} [q_2 \mu_2^{-1} \Phi_T(t)] \right\} dt , \quad k = \overline{1, n} . \quad (9)$$

Эти условия образуют систему n линейных алгебраических уравнений для определения введенных постоянных .

Везде считалось, что $\Phi(\infty) = \Psi(\infty) = 0$.

Рассмотрено поперечное сечение наклонного пластиа полезного ископаемого. Отклонение расположения пластиа относительно горизонта составляло угол α . Угол ϕ фиксировал положение плоскостей изотро-

нии горных пород. Координаты положений забоя пласта были обозначены через $-x_1, x_1$; мощность пласта была равна $2h$, а глубина горизонта - H .

В краевых областях $(-x_2, x_1)$ и (x_1, x_2) пласт находился в пластическом состоянии. Выработка в направлении оси z являлась весьма протяженной.

Это позволило при изучении напряженного состояния массива воспользоваться основными уравнениями плоской деформации анизотропного тела.

Исходное состояние массива вызвано его собственным весом и в системе координат xOy имеет вид

$$\sigma_y^0 = -m\eta\zeta^0, \quad \sigma_x^0 = -n\eta\zeta^0, \quad \tau_{xy}^0 = -l\eta\zeta^0. \quad (10)$$

Здесь

$$\zeta^0 = H - x \sin\alpha - y \cos\alpha, \quad m = \frac{1+\lambda}{2} + \frac{1-\lambda}{2} \cos 2\alpha,$$

$$n = \frac{1+\lambda}{2} - \frac{1-\lambda}{2} \cos 2\alpha, \quad l = \frac{1-\lambda}{2} \sin 2\alpha,$$

λ - коэффициент бокового распора, величина которого близка к единице.

Рассмотрена начальная стадия отработки горизонтального пласта полезного ископаемого в упруго-пластической постановке. Массив горных пород считался трансверсально-изотропной средой, плоскости изотропии которой составляли угол ψ с пластообразной залежью. Введенная система координат xOy не совпадала с главными направлениями упругости массива. Параметры μ_1 и μ_2 , характеризующие анизотропию упругих свойств горных пород, в рассмотренном случае являлись комплексными и определялись так:

$$\mu_1 = \alpha_1 + i\beta_1 = \frac{1/2 \sin 2\psi (1 - (\beta_1^0)^2)}{\cos^2 \psi + (\beta_1^0)^2 \sin^2 \psi} + i \frac{\beta_1^0}{\cos^2 \psi + (\beta_1^0)^2 \sin^2 \psi}, \quad (11)$$

$$\mu_2 = \alpha_2 + i\beta_2 = \frac{1/2 \sin 2\psi (1 - (\beta_2^0)^2)}{\cos^2 \psi + (\beta_2^0)^2 \sin^2 \psi} + i \frac{\beta_2^0}{\cos^2 \psi + (\beta_2^0)^2 \sin^2 \psi}.$$

Компоненты тензора напряжений представлялись в виде

$$\sigma_x^e = \sigma_x^0 + \sigma_x, \quad \sigma_y^e = \sigma_y^0 + \sigma_y, \quad \tau_{xy}^e = \tau_{xy}^0 + \tau_{xy}. \quad (12)$$

При этом напряжения $\sigma_x^0, \sigma_y^0, \tau_{xy}^0$ относились к сплошному массиву, а добавочные напряжения отражали возникновение выработки.

На части границы полуплоскости имели место условия для

вертикальных перемещений:

$$v = h, \quad -\infty < x < -x_2, \quad x_2 < x < \infty.$$

Для свободной кривли отсутствовала нормальная компонента тензора напряжений

$$\sigma_y = \gamma H \quad (-x_1 < x < x_1).$$

В призабойных зонах пласта имела место аналогия с решением Прандтля для пластического слоя:

$$\sigma_y = \gamma H - (ax + c), \quad x_1 < x < x_2,$$

$$\sigma_y = \gamma H - (a_1 x + c_1), \quad -x_2 < x < -x_1.$$

При этом

$$-a_1 = a, \quad c = c_1 = T_n \left[\sqrt{1 - c_p} \pi/2 - x_1/h \right].$$

Вдоль всей границы полуплоскости отсутствовали касательные напряжения:

$$\tau_{xy} = 0, \quad -\infty < x < \infty.$$

Решение смешанной задачи искалось в классе ограниченных функций. На основании использования решения (7), (8) получены следующие формулы для комплексных потенциалов:

$$\Phi(z_1) = \frac{\mu_1}{\mu_2 - \mu_1} \left[\frac{\gamma H}{2} + \frac{a_1 z + a}{2\pi i} \ln \frac{i\sqrt{z_1^2 - x_2^2} \sqrt{x_2^2 - x_1^2} - z x_1 - x_2^2}{x_2(-x_1 - z_1)} - \frac{ax + c}{2\pi i} \ln \frac{i\sqrt{z_1^2 - x_2^2} \sqrt{x_2^2 - x_1^2} + z_1 x_1 - x_2^2}{-x_2(x_1 - z_1)} \right].$$

$$\Phi(z_2) = -\frac{\mu_1}{\mu_2} \Phi(z_1). \quad (13)$$

Условие локального влияния разработки пласта на напряженное состояние массива представлялось так:

$$\frac{\gamma H}{2} + \frac{a_1 - a}{2\pi} \sqrt{x_2^2 - x_1^2} + \frac{c_1}{\pi} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{x_2 + x_1}{x_2 - x_1}} - \frac{c_1}{2} - \frac{c}{\pi} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{x_2 - x_1}{x_2 + x_1}} = 0. \quad (14)$$

Граничные условия для перемещений привели к решению transcendентного уравнения. Уравнение (14) позволило определять неиз-

вестную границу призабойной пластической зоны x_2 в зависимости от глубины H , мощности пласта $2h$, исходного горного давления, пролета выработанного пространства $2x_1$ и анизотропии пластичности в пласте полезного ископаемого.

Величина пролета зависящей кровли массива при $\phi \neq 0$ получилась такой:

$$2x_0^* = \frac{2h}{\beta_{22} (\beta_1/\mu_1 \bar{\mu}_1 + \beta_2/\mu_2 \bar{\mu}_2) \gamma H}$$

Поле напряжений σ_x в области свободного зависания пород при $\phi \neq 0$ определялось так:

$$\sigma_x = \gamma H \left[(\beta_1 \beta_2 - \alpha_1 \alpha_2 - \lambda) + (\alpha_1 \beta_2 + \alpha_2 \beta_1) \frac{x}{\sqrt{x_0^2 - x^2}} \right], \quad |x| < x_0.$$

В диссертации приведены результаты численного расчета протяженности призабойной пластической зоны для двух пластов: пласт "Смоляниновский", уголь марки "К", шахта им. Скопинского, п/о "Донецкуголь", $H = 930$ м; пласт "Безыменный", шахта "Красный Октябрь", п/о "Орджоникидзеуголь", уголь марки "Т", $H = 790$ м. Установлено существенное влияние пластической анизотропии угля на протяженность зоны неупругих деформаций пласта. Так при $x_1/2h = 20$, $H/2h = 930$, $T_n = 140$, $C_p = 0$, $(x_2 - x_1)/x_1 = 0,139$; если $T_n = 225$, $C_p = -1,25$, то $(x_2 - x_1)/x_1 = 0,020$. При $x_1/2h = 20$, $H/2h = 790$, $T_n = 125$, $C_p = 0$, $(x_2 - x_1)/x_1 = 0,140$; если $T_n = 175$, $C_p = -1,25$, то $(x_2 - x_1)/x_1 = 0,090$. Здесь величина T_n имеет размерность ($\text{кгс}/\text{см}^2$), величина $2h = 1$ м, $\gamma = 2,5$ тс/м³.

По мере уменьшения параметра C_p от 0 до $-\infty$ протяженность зоны пластических деформаций залежи уменьшается по сравнению с зоной для изотропного пласта. Если же параметр C_p увеличивается в интервале $(0, 1)$, то протяженность пластической зоны увеличивается. Это подтверждается следующими численными данными. Если $H/2h = 1000$, $x_1/2h = 20$, $T_n = 125$ $\text{кгс}/\text{см}^2$, то при $C_p = -10$, $x_2/x_1 = 1,091$; $C_p = -1$, $x_2/x_1 = 1,147$; $C_p = 0$, $x_2/x_1 = 1,161$; $C_p = 0,95$, $x_2/x_1 = 1,190$; $2h = 1$ м. При увеличении длины свободного пролета кровли $2x_1$ увеличивается протяженность призабойной пластической области. Увеличение глубины разработки пласта H приводит к увеличению длины пластической области. Так при $x_1/2h = 20$ и $H/2h = 500$, $(x_2 - x_1)/2h = 7$; в случае $H/2h = 1000$, $(x_2 - x_1)/2h = 12,1$, здесь $2h = 1$ м.

Исследование напряженно-деформированного состояния анизотропного и изотропного массивов при начальной стадии разработки на-

клонного пласта пологого ископаемого.

Построено решение задачи для анизотропного массива в упругой постановке. Эта задача была сформулирована для плоскости с разрезом, которая для искомым комплексных потенциалов усложненных комплексных переменных свелась к видоизмененной задаче Дирихле. Установлено, что конвергенция контура горной выработки принимает максимальное значение в окрестности центра горной выработки.

Максимальное значение пролета выработанного пространства получено в виде

$$2x_0^* = - \frac{2h}{\gamma \Pi \left[m\beta - \frac{l}{2l} (\mu_1 \mu_2 - \bar{\mu}_1 \bar{\mu}_2) \right]} \quad (15)$$

Выяснено, что увеличение глубины ведения горных работ и учет анизотропии свойств массива уменьшает значение $2x_0^*$. Увеличение модуля упругости горных пород E_1 и коэффициента Пуассона ν_1 в плоскости изотропии приводит к увеличению величины $2x_0^*$. Уменьшение E_2 относительно E_1 приводит к уменьшению $2x_0^*$. Изменение угла наклона пласта от 0° до 90° при фиксированных свойствах пород, когда $\lambda < 1$, приводит к увеличению $2x_0^*$.

Упрощенная формула для тангенциальных напряжений вблизи контура горной выработки представлена так:

$$\sigma_x^{\pm} = \gamma \Pi \left\{ \left[m(\beta_1 \beta_2 - \alpha_1 \alpha_2) - l(\alpha_1 + \alpha_2) - n \right] \pm \right. \\ \left. \pm \left[m(\alpha_1 \beta_2 + \alpha_2 \beta_1) + l(\beta_1 + \beta_2) \right] \frac{x}{\sqrt{x_0^2 - x^2}} \right\}, \quad \phi \neq 0. \quad (16)$$

Из формулы (16) следует, что для анизотропного массива напряжение σ_x всегда меняет знак.

Изучено напряженно-деформированное состояние анизотропного массива при разработке наклонного пласта в случае, когда коэффициент бокового распора был равен единице. При этом учитывалось, что в кривых частях пласт находился в пластическом состоянии. Решение задачи построено в классе ограниченных функций.

Для определения неизвестных протяженностей призабойных пластических областей $(x_2^* - x_1)/2h$ и $(x_2 - x_1)/2h$ была построена система двух трансцендентных уравнений. По физической сути эта система состояла из условия локального влияния выработки на напряженное состояние массива и условия для перемещений, связанных с наличием пласта мощности $2h$. Проведено численное решение этой системы, позволявшее дать оценку влияния угла наклона пласта на протяженность

призобойных пластических областей при различных значениях пролета выработанного пространства вплоть до первичной посадки лавы. Численный расчет системы трансцендентных уравнений привел к следующим результатам. Так при $x_1/2h = 20$ и $\alpha = 0^\circ$ ($x_2^* - x_1$)/ $2h = 7$, $(x_2 - x_1)/2h = 7$; $\alpha = 45^\circ$, $(x_2^* - x_1)/2h = 7,3$, $(x_2 - x_1)/2h = 6,7$; $\alpha = 80^\circ$, $(x_2^* - x_1)/2h = 7,6$, $(x_2 - x_1)/2h = 6,2$.

Изучено распределение напряжений и зон разгрузки в массиве при ведении очистных работ по пласту.

Исследование напряженно-деформированного состояния анизотропного массива после первичной посадки кровли. В этом случае область смыкания пород кровли и почвы 2а является конечной и нарастающей по мере развития фронта очистных работ по пласту 2Л.

Построено упругое решение задачи о напряженном состоянии трансверсально-изотропного массива при разработке горизонтального пласта, когда происходит процесс взаимодействия пород кровли и почвы. Это решение выражалось через два потенциала усложненных комплексных переменных. Для определения неизвестной величины контакта пород кровли получено уравнение

$$L \int_{\alpha_0}^1 \sqrt{\frac{t^2 - \alpha^2}{1 - t^2}} dt = - \frac{h}{\gamma \mu \beta} \quad (17)$$

При этом $\alpha_0 = \alpha/L$, $\beta = -\beta_{2z} \left[\beta_1 / (\alpha_1^2 + \beta_1^2) + \beta_2 / (\alpha_2^2 + \beta_2^2) \right]$.

Установлено, что в области смыкания пород формируется процесс восстановления горного давления. При этом напряжения σ_x в случае $\varphi = 0$ являются растягивающими. Они зависят от физико-механических свойств пород кровли и коэффициента бокового распора. В области зависания пород кровли также имеет место процесс растяжения пород. Вблизи координаты забоя давление пород нарастает. При этом напряжения σ_x превосходят напряжения σ_y . Учет анизотропии упругих свойств массива приводит к качественному изменению воляжжающих в массиве напряжений.

Исследовано напряженно-деформированное состояние трансверсально-изотропного массива при разработке пласта после первичной посадки кровли с учетом поперечного сдвига.

При разработке пологого или наклонного пласта в массиве имеет место произвольная ориентация главных естественных напряжений относительно направления фронта очистных работ. В этом случае при изучении деформирования массива было выделено нормальное и попе-

речное сдвигание его пород.

Выявлено, что в области контакта горных пород кровли и почвы происходит процесс образования горного давления (асимптотическое восстановление снизу горного давления в разгруженной области). С другой стороны, за счет проведения очистных работ в целом по пласту при наличии естественных касательных напряжений осуществлялся процесс поперечного сдвигания массива горных пород. Указанному процессу сдвигания массива препятствует трение, возникающее в области контакта. Трение формировалось за счет восстанавливающегося горного давления в области силового взаимодействия пород кровли и почвы. Вышеизложенное позволило сформулировать две группы смешанных граничных условий. Первая группа представлена так:

$$v^{(1)} = h, \quad |x| > L; \quad v = 0, \quad |x| < a; \quad (18)$$

$$\sigma_y^{(1)} = -\sigma_y^0, \quad a < |x| < L; \quad \tau_{xy}^{(1)} = 0, \quad |x| < a.$$

Вторая группа условий описывалась в виде

$$[v^{(2)}] = [\sigma_y^{(2)}] = [\tau_{xy}^{(2)}] = 0, \quad |x| < L; \quad (19)$$

$$\tau_{xy}^{(2) \pm} = -\tau_{xy}^0, \quad a < |x| < L;$$

$$\tau_{xy}^{(2) \pm} = -\tau_{xy}^0 - T \sqrt{\frac{a^2 - x^2}{L^2 - x^2}}, \quad |x| < a.$$

Здесь квадратными скобками обозначены скачки стоящих внутри них величин $T = -\sigma_y^0 \operatorname{tg} \rho$, ρ - угол внутреннего трения для взаимодействующих пород.

Связность задачи о нормальном и поперечном деформировании (18), (19) обусловлена видом граничных условий (19) для касательных напряжений при $|x| < a$, где трение определено горным давлением в области контакта пород почвы и кровли. Отсюда следует, что в третьем условии (19) в зависимости от постановки граничной задачи о нормальном деформировании массива (упруго-пластическая задача, закладка выработанного пространства, наличие крепи и т.д.) появляется достаточно сложная функциональная зависимость. Поэтому был предложен набор аппроксимирующих функций и соответствующих им решений при граничных условиях вида (19) с целью эффективного построения решения задачи о поперечном деформировании массива.

Построены решения граничных задач (18) и (19). В частности, получены следующие формулы для тангенциальных напряжений и перемещений:

$$\sigma_x^{(2)} = (\beta_1^0 + \beta_2^0)(-\tau_{xy}^0 - T) \frac{x}{\sqrt{L^2 - x^2}}, \quad 0 < x < a; \quad (20)$$

$$\sigma_x^{(2)} = (\beta_1^0 + \beta_2^0) \left[-\tau_{xy}^0 \frac{x}{\sqrt{L^2 - x^2}} - T \left(-\sqrt{\frac{L^2 - a^2}{L^2 - x^2}} + \frac{x}{\sqrt{L^2 - x^2}} \right) \right], \quad a < x < L;$$

$$\frac{u}{a_*} = \beta_{11}^0 (\beta_1^0 + \beta_2^0) \left[(\tau_{xy}^0 + T) \sqrt{L^2 - x^2} - T \int_x^L \sqrt{(t^2 - a^2)/(L^2 - t^2)} dt \right], \quad a < x < L;$$

$$\frac{u}{a_*} = \beta_{11}^0 (\beta_1^0 + \beta_2^0) \left[(\tau_{xy}^0 + T) \sqrt{L^2 - x^2} - c \right], \quad 0 < x < a.$$

$$\text{Здесь } c = T \int_a^L \sqrt{(t^2 - a^2)/(L^2 - t^2)} dt.$$

Максимальное значение для перемещений достигается при $x = 0$. Выяснено, что если величина T лежит в диапазоне от 0 до $-\tau_{xy}^0$, то в процессе развития фронта очистных работ величина $u(0)$ нарастает. При $T = |\tau_{xy}^0|$ величина $u(x)$ в области $|x| < a$ всегда фиксирована и по мере развития фронта очистных работ равна одной и той же величине, равной максимальному перемещению $u(0)$ при начальной стадии отработки пласта.

Анализ напряженно-деформированного состояния анизотропного массива горных пород при выработанном пространстве с полуграниченной зоной взаимодействия кровли и почвы.

Найдены формулы для величины пролета свободно зависящей кровли. Проанализировано влияние анизотропии свойств массива на его напряженное состояние.

Комплексные потенциалы усложненных комплексных переменных, описывающие напряженное состояние анизотропного массива при разработке горизонтального пласта с учетом пластических деформаций его краевой части (x_1, x_2) , находились на основании следующих граничных условий:

$$v = 0, \quad -\infty < x < 0; \quad \sigma_y = \gamma H, \quad 0 < x < x_1;$$

$$\sigma_y = \gamma H - (\alpha x + c), \quad x_1 < x < x_*; \quad (21)$$

$$v = h, \quad x_* < x < \infty; \quad \tau_{xy} = 0, \quad |x| < \infty.$$

Решение краевой задачи при граничных условиях (21) представлялось так:

$$\Phi(z_1) = \frac{\mu_2}{\mu_2 - \mu_1} F(z_1), \quad \Psi(z_2) = -\frac{\mu_1}{\mu_2 - \mu_1} F(z_2), \quad (22)$$

$$F(z) = f(z, x_1, x_*, \gamma H, \alpha, c, F_j, v_j, G_j).$$

Протяженность свободно зависящей кровли и длина области пластического состояния пласта определялась из системы двух трансцендентных уравнений:

$$f_1(x_1, x_*, \gamma H, c, T_n, h) = 0, \quad f_2(x_1, x_*, \gamma H, c, T_n, v_j, G_j, h) = 0. \quad (23)$$

Установлено, что анизотропия упругих свойств горных пород и угол наклона плоскостей изотропии ϕ оказывают существенное влияние на уменьшение численного значения шага обрушения кровли x_* и протяженности призабойной пластической области $(x_* - x_1)$.

Построено упругое решение о напряженном состоянии анизотропного массива с наклонной очистной выработкой. Получено разрешающее уравнение для оценки шага обрушения. Найдена формула для давления горных пород на пласт. Рассмотрен частный случай, когда массив горных пород являлся изотропным. Определена длина призабойной пластической зоны пласта и шаг обрушения кровли. Проведен анализ влияния угла наклона пласта на напряженное состояние массива.

Исследование напряженно-деформированного состояния анизотропного массива при разработке пласта полезного ископаемого с учетом закладки выработанного пространства, наличия охранных целиков и закрепления очистной выработки.

Рассмотрено ведение очистных работ по пласту с закладкой выработанного пространства. Граница призабойной пластической области пласта и давление пород на закладочный слой считались неизвестными. Задача сведена к нахождению совместного решения сингулярного интегрального уравнения и системы двух трансцендентных уравнений.

Найдено также давление на закладочный слой со стороны боковых пород.

Исследовалось напряженно-деформированное состояние анизотропного массива с охранным целиком в выработанном пространстве. Считалось, что целик находится в пластическом состоянии. Построено

решение указанной задачи. Из условия ограниченности решения определялась протяженность пластической зоны пласта. Установлено, что наличие целика приводит к уменьшению концентрации напряжений в краевой части разрабатываемого пласта. Получена оценка минимальной ширины целика в зависимости от глубины ведения горных работ и физико-механических свойств пласта, когда концентрация напряжений в массиве получается минимальной.

Изучено напряженное состояние анизотропного массива при ведении очистных работ с обрушением кровли, когда часть выработанного пространства закреплена.

Определены шаг обрушения и протяженность призабойной пластической зоны пласта в зависимости от физико-механических свойств горных пород и пласта, глубины и мощности пласта, реакции крепи и протяженности закрепленного выработанного пространства.

Изучен случай, когда технология выемки пласта полезного ископаемого предполагала закладку и закрепление выработанного пространства. Получена разрешающая система двух уравнений для определения шага обрушения и протяженности призабойной пластической зоны пласта в зависимости от свойств горных пород и пласта, реакции крепи и мощности возводимого закладочного материала. Построено решение указанной задачи как для изотропного, так и для анизотропного массива. Найдена формула для определения шага обрушения в зависимости от свойств массива, глубины ведения очистных работ, реакции крепи, мощности пласта и закладочного слоя. Построена система двух трансцендентных уравнений для определения положения забоя и протяженности призабойной пластической зоны пласта. Численный расчет для массива со свойствами $E_1 \cdot 10^{10} \text{ Па} = 1,074$; $E_2 \cdot 10^{10} \text{ Па} = 0,52$; $\nu_1 = 0,413$; $\nu_2 = 0,198$; $G_2 \cdot 10^{10} \text{ Па} = 0,12$ показал, что при $H/2h = 500$, $2h = 1 \text{ м}$, $T_n/\gamma H = 0,2$; $G_p = 0$; деформационные характеристики массива с выработкой равны $x_1/2h = 51,37$ и $x_2/2h = 63,42$, когда $\varphi = 0^\circ$, и $x_1/2h = 86,29$ и $x_2/2h = 100,53$, когда $\varphi = 45^\circ$.

Получены формулы

$$K_* = \frac{T_n \left[\sqrt{1 - c_p} \pi/2 + (x_2 - x_1)/h \right]}{\gamma H}, \quad (x_2 - x_1) = h \left[\gamma H/T_n - \sqrt{1 - c_p} \pi/2 \right]. \quad (24)$$

определяющие коэффициент максимального опорного давления на пласт K_* и протяженность $(x_2 - x_1)$ зоны разгрузки по пласту, когда напряжения $|\sigma_v|$ меньше исходного горного давления.

Проведенные численные расчеты выявили существенное влияние

закладки выработанного пространства на концентрацию напряжений в массиве при разработке пласта.

Исследование напряженно-деформированного состояния горного массива при скоростном подвигании забоя пласта.

Скорость движения системы координат, связанной с движущимся забоем, находилась в интервале от нуля до значения скорости поперечной волны.

В подвижной системе координат (x, y) динамические уравнения упругости были сведены к интегрированию уравнения четвертого порядка. Общее решение этого уравнения представлялось в виде реальной части суммы двух аналитических функций усложненных комплексных переменных. Компоненты тензора напряжений и вектора перемещения представлялись в форме, аналогичной введенной С.Г.Лехницким для плоского анизотропного тела.

Граничные условия в подвижной системе координат принимались такими:

$$v = 0, \quad x < 0 \quad ; \quad \sigma_y = \gamma H, \quad 0 < x < x_0;$$

$$v = h_p, \quad x > x_0 \quad ; \quad \tau_{xy} = 0, \quad |x| < \infty.$$

Получена формула для определения шага обрушения кровли.

При скоростях подвигания забоя пласта, приближающийся к скорости поперечной волны для пород массива, длина свободно зависящей кровли уменьшается. При этом на контуре свободно зависящей кровли имело место увеличение концентрации растягивающих напряжений относительно статического случая. По мере роста скорости подвигания эти напряжения также возрастают. В области пласта тангенциальные напряжения становились сжимающими и по абсолютной величине превосходили напряжения, формирующие опорное давление на пласт. Наблюдалось также увеличение концентрации касательных напряжений в массиве по сравнению со статическим случаем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации обобщены теоретические исследования формирования напряженно-деформированного состояния угольного пласта и массива при ведении очистных работ; выявлены закономерности перераспределения напряжений при очистных работах с учетом анизотропии массива и пластичности угля; дано решение крупной научной проблемы, состоящей в разработке теоретических основ геомеханики анизо-

трошного массива вблизи забоя лавы на различных стадиях очистных работ и разработке расчетных методик и алгоритмов для обоснования и определения технологических решений по обеспечению эффективности и безопасности очистных работ, имеющих важное народнохозяйственное значение.

В диссертации получены следующие основные результаты.

1. Разработаны методики решения задач о напряженно-деформированном состоянии анизотропного горного массива при разработке пластов полезных ископаемых.

2. Исследованы динамическое и статическое поля напряжений и скоростей смещений при пластическом деформировании краевой части разрабатываемого пласта.

3. Изучено напряженно-деформированное состояние анизотропного массива горных пород при начальной стадии разработки горизонтального пласта.

Выяснено влияние анизотропии упругих свойств вмещающих пород и пластической анизотропии пласта, его глубины залегания и мощности на смещения кровли, а также на шаг первичной посадки кровли.

4. Определены напряжения и смещения в анизотропном массиве при разработке наклонного пласта. Исследовано влияние угла падения пласта в связи с анизотропией свойств массива на распределение в нем напряжений.

5. Исследовано напряженно-деформированное состояние анизотропного массива горных пород после первичной посадки кровли с учетом нормального и поперечного сдвижения пород.

Обоснованы свойства закладочного массива в зависимости от характеристик процессов сдвижения.

6. Изучено напряженно-деформированное состояние анизотропного массива при разработке пологого, наклонного и крутого пласта с плавным опусканием пород кровли.

Исследовано влияние анизотропии свойств массива на протяженность свободно зависящей кровли, глубины призабойной пластической области пласта, опускания кровли, формирования зон разгрузки и зон с повышенным горным давлением, опорного давления на пласт, а также распределение компонентов тензора напряжений в массиве.

Выяснен вопрос о направлении разработки наклонного пласта в зависимости от физико-механических свойств горных пород.

7. Исследовано влияние закладочного материала и крепи выработанного пространства на формирование протяженности призабойной пластической области пласта и влияние опорного давления на пласт

при его разработке в анизотропном массиве. Обоснованы минимальные размеры оставленных охранных целиков.

8. Изучено напряженно-деформированное состояние изотропного массива при высокоскоростном подвигании забоя пласта. Задача сведена к рассмотрению анизотропного массива в статической постановке. Описано влияние скорости подвигания забоя пласта на формирование напряженного состояния массива, опускание кровли, области растяжений пород, шага обрушения, а также опорного давления.

Основное содержание диссертации изложено
в следующих работах

1. Левшин А.А. К расчету поля напряжений горного массива при разработке наклонных пластов //Тезисы докладов V Всесоюзной конференции по механике горных пород (Москва, 7-9 января 1975 г.)- М.: АН СССР, 1974.- С.35.

2. Левшин А.А. Напряженно-деформированное состояние горного массива при разработке наклонного угольного пласта // Физ.-техн. пробл. разраб. полезн. ископаемых.- 1975.- №6,- С.10-19.

3. Левшин А.А. Концентрация напряжений вокруг выработки при разработке наклонного угольного пласта // Механика тверд. тела. - Киев:Наук. думка, 1976. - Вып.8. - С.122 - 126.

4. Левшин А.А. К расчету поля напряжений горного массива при разработке наклонных угольных пластов// Прикладные задачи механики горных пород. - М.:Наука, 1977. - С.99- 101.

5. Бондаренко Н.В., Левшин А.А., Хапилова Н.С. К исследованию напряженного состояния горного массива, ослабленного одной и двумя выработками/ Комплексные исследования физических свойств горных пород. Всесоюзная научная конференция ВУЗов СССР с участием научн.-иссл. ин-тов 2-4 февраля 1977 г. Тез.докл.- М.:МГИ. - 1977. - §1. - С. 32.

6. Кузнецов С.В., Левшин А.А., Хапилова Н.С. Оценка влияния торцовой нагрузки на пластическое течение в слое между жесткими плитами//Физ.-техн. пробл. разраб. полезн. ископаемых.- 1978.- №1. - С.3 - 8.

7. Кузнецов С.В., Хапилова Н.С., Левшин А.А. Напряженно-деформированное состояние анизотропного горного массива с очистной и подготовительной выработками. - Новосибирск: Ин-т горного дела СО АН СССР, 1979.- С.85 - 89.

8. Левшин А.А. Напряженно-деформированное состояние анизот-

ропных горных пород вокруг очистной выработки// Изв. высш. учебн. заведений. Горный журнал. - 1979. - №2- С.22 - 26.

9. Левшин А.А. Решение одной смешанной задачи двумерной теории упругости для анизотропной полуплоскости // Динамика сплошной среды, 43. - Новосибирск: Ин-т гидродинамики СО АН СССР, 1979. - С.163 - 168.

10. Левшин А.А., Хапилова Н.С. Динамическая задача о пластическом течении слоя между жесткими плитами при воздействии торцевой нагрузки// Горные удары, методы оценки и контроля удароопасности массивов горных пород. - Фрунзе: Илим, 1979. - С.139-146.

11. Кузнецов С.В., Левшин А.А. К вопросу о развитии трещин в анизотропном массиве горных пород при разработке угольного пласта// Всесоюзная научная школа "Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках". - Симферополь, 1981. - С.39 -40.

12. Левшин А.А. Об одной смешанной задаче теории упругости для анизотропной полуплоскости// Изв. АН СССР, Механ. тв. тела. - 1981. - №5. - С.180-182.

13. Левшин А.А. Смешанная задача упругости для полуплоскости и одно ее приложение в механике горных пород// Теорет. и прикл. механика. Киев-Донецк: Вища школа. - 1982. - Вып.13. - С.29-35.

14. Левшин А.А. Метод расчета основных параметров наклонных разгрузочных полостей// Известия высш. учебн. заведений. Горный журнал. - 1983. - №4. - С.19 -23.

15. Левшин А.А. Концентрация напряжений в анизотропном массиве горных пород при разработке горизонтального пласта полезного ископаемого // Тезисы докладов Республиканского симпозиума "Концентрация напряжений." - Донецк, 1983. - С.26.

16. Бондаренко Н.В., Левшин А.А., Онопчук В.Н. Влияние фильтрации газа на напряженное состояние массива горных пород вблизи скважины//Известия высш. учебн. заведений. Горный журнал. - 1983. - №2. - С.31- 35.

17. Большинский М.И., Левшин А.А., Недосекин Б.Н. Исследование влияния наклонной разгрузочной щели на напряженно-деформированное состояние угольного пласта и вмещающих пород//Научн. труды МакНИИ. Способы и средства создания безопасных условий труда в шахтах. - Макеевка:Донбасс, 1984. - С.41-49

18. Левшин А.А., Ревва В.Н., Стариков Г.П. Об одном методе исследования механического состояния анизотропного массива горных пород при разработке пласта полезного ископаемого // Теорет. и

- прикл. механика. Киев - Донецк: Вища школа, 1984. - Вып.15. - С.114-118.
19. Левшин А.А., Недосекин Б.Н. Напряженно-деформированное состояние пород вокруг разгрузочных полостей // Разработка месторождений полезных ископаемых. Киев-Донецк: Техніка, 1985. - №72. - С.8.
20. Левшин А.А. Напряженно-деформированное состояние сжатых анизотропных тел с трещинами // Теорет. и прикл. механика. Киев-Донецк: Вища школа, 1986. - Вып.17. - С.33-41.
21. Космодемьянский А.С., Левшин А.А. Решение смешанной задачи теории упругости для анизотропной полуплоскости // Докл. АН УССР. - 1986. - №9. - С.34-37.
22. Левшин А.А., Стариков Г.П. Влияние анизотропии свойств массива горных пород на его напряженное состояние и протяженность пластической области разрабатываемого пласта // Теорет. и прикл. механика. Киев-Донецк: Вища школа, 1987. - Вып.18. - С.73-78.
23. Левшин А.А. Напряженное состояние массива при высокоскоростном подвигании забоя пласта // Всесоюзная научная школа. Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках. - Симферополь, 1987. - С.67-68.
24. Левшин А.А., Ложкин В.Н. Напряженно-деформированное состояние анизотропного массива горных пород при разработке пластообразной залежи // Прикладные задачи механики горных пород. - М.: Наука, 1987. - С.53-58.
25. Левшин А.А., Полушкин В.А., Федосенко Н.А. Охрана горных выработок при буровзрывной щелевой разгрузке // ЦНЭИ Уголь. - М.: Недра, 1987. - Вып.10. - С.17.
26. Левшин А.А., Сомалки М.Д. Пластическое течение осесимметричного слоя при воздействии торцовой нагрузки // Теорет. и прикл. механика. Харьков: Вища школа, 1988. - Вып.19. - С.106-111.
27. Калоеров С.А., Левшин А.А., Полушкин В.А. Напряженное состояние массива горных пород вокруг выработки с разгрузочной полостью // Теорет. и прикл. механика. Харьков: Вища школа, 1989. - Вып.20. - С. 31-36.
28. Левшин А.А., Шепеленко О.В. Смешанная динамическая задача для полуплоскости и ее приложение в механике горных пород // Теорет. и прикл. механика. Харьков: Основа, 1990. - Вып.21. - С.56-62
29. Левшин А.А. Деформирование анизотропного массива горных пород при разработке пластообразной залежи // Напряженное состояние массивов горных пород и управление горным давлением. - Фрунзе: Клим, 1990. - С.267-274.

30. Левшин А.А., Недосекин Б.Н. Оценка зоны разгрузки при про-
ведении подготовительной выработки // Разработка месторожд. полез.
ископаемых. Киев-Донецк: Техніка, 1990.

31. Дегтярь Р.В., Левшин А.А., Ярембаш И.Ф. Экспериментальная
впробация в шахтных условиях математического моделирования напря-
женно-деформированного состояния горных выработок // Методы матема-
тического моделирования в научных исследованиях. Тезисы докладов
II школы-семинара (9-11 сентября 1990 г.). - Донецк: Ин-т приклад-
ной математики и механики АН УССР, 1990. - С.33.

32. Кузнецов С.В., Левшин А.А. Деформирование анизотропного
массива горных пород при разработке пласта с учетом трения взаимо-
действующих пород // Методы математического моделирования в научных
исследованиях. Тезисы докладов II школы-семинара (9-11 сентября
1990 г.). - Донецк: Ин-т прикладной математики и механики АН УССР,
1990. - С.54.

33. Кузнецов С.В., Левшин А.А. Влияние трения на деформирование
анизотропного массива горных пород при разработке пласта // VII Все-
союзная научная школа "Деформирование и разрушение материалов с
дефектами и динамические явления в горных породах и выработках". -
Симферополь, 1990. - С.111.

34. Левшин А.А., Онопчук Б.Н. Напряженное состояние и сдвиге-
ние анизотропного массива горных пород при разработке пласта //
Разработка месторождений полезн. ископаемых. Киев-Донецк: Техніка,
1991. - Вып.90. - С.36-41.

35. Левшин А.А., Онопчук Б.Н. Методические указания к приме-
нению математических методов в задачах геомеханики (к вопросу
непрерывной математической подготовки студентов горных специаль-
ностей). - Донецк: ДПИ, 1991. - 40 с.

36. Левшин А.А., Онопчук Б.Н. Напряженно-деформированное сос-
тояние массива горных пород при разработке пласта с поверхностью
скольжения // Известия высш. учебн. заведений. Горный журнал. - 1992
- №2. - С.52-56.

Подписано в печать 05.II.92.

Формат 60x84/16. Бумага писчая. Offsetная печать.

Усл.п.л. 1,75. Заказ 574. 100экз. Бесплатно.

Р-т ИЭП АН Украины. 340048, г.Донецк, ул.Университетская, 77.

0510586

468833

Бесплатно.

Ав 26.136

Ав 26.136

Всего в 1944 г. издано 10,17 экз.
Всего в 1945 г. издано 10,17 экз.
Всего в 1946 г. издано 10,17 экз.
Всего в 1947 г. издано 10,17 экз.
Всего в 1948 г. издано 10,17 экз.
Всего в 1949 г. издано 10,17 экз.
Всего в 1950 г. издано 10,17 экз.
Всего в 1951 г. издано 10,17 экз.
Всего в 1952 г. издано 10,17 экз.
Всего в 1953 г. издано 10,17 экз.