

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ  
ИНСТИТУТ ГИДРОМЕХАНИКИ**

**На правах рукописи**

**ПОЛИЩУК Сергей Зиновьевич**

**РАЗВИТИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ РАСЧЕТА  
УСТОЙЧИВОСТИ И РАЦИОНАЛЬНЫХ  
ПАРАМЕТРОВ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК**

**Специальность 05.15.11 — «Физические  
процессы горного производства»**

**А в т о р е ф е р а т**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

ДВ 57.403

Работа выполнена в Институте проблем природопользования  
и экологии НАН Украины.

Научный консультант:

доктор технических наук, профессор,  
академик Украинской экологической  
академии наук

ШАПАРЬ А.Г.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор  
доктор технических наук, профессор  
доктор технических наук

ФЕДОРЕНКО П.И.

ШАШЕНКО А.Н.

ШПОРТЬКО В.П.

Ведущая организация: Марганецкий Государственный Горно-  
обогатительный комбинат министерства  
промышленности Украины

Защита состоится "14" декабря 1994 г.  
в "10" часов на заседании Специализированного совета  
Д.016.56.02 Института гидромеханики НАН Украины по адресу:  
252057, г. Киев-57, ул. Желябова, 8/4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института  
гидромеханики НАН Украины.

Автореферат разослан "10" ноября 1994 г.

Учёный секретарь  
Специализированного совета,  
кандидат технических наук,  
ст.научн. сотрудник

ПЛУЖНИК В.И.

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00756114 (0)

ЛНБ ім. В. Стефаніка  
АН України

4В - 31. 463

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Дальнейшее развитие открытого способа разработки месторождений, позволяющего удовлетворить основные потребности общества в минеральном сырье, (более 3/4 объёма горных работ на Украине и в других странах СНГ выполняется в карьерах), связано с увеличением глубины и простираения карьеров, усложнением горно-геологических условий разработки. Это происходит на фоне возрастающих требований к охране окружающей среды и рациональному использованию природных ресурсов.

При достигнутых масштабах разработки изменение конструкции бортов даже в незначительных пределах оказывает существенное влияние на её эффективность. Например, для карьеров глубиной порядка 300 м повышение результирующего угла наклона бортов только на 3° приводит к уменьшению объёмов вскрышных работ на 7-10 млн. м<sup>3</sup> на каждый километр фронта горных работ.

В этой связи совершенствование конструктивных параметров открытых горных выработок приобретает всё большее значение.

В конечном итоге масштаб разработки и оказываемое технологическое воздействие характеризуется площадью изымаемых земель и объёмом вовлекаемых в разработку пород. Значением этих показателей определяется степень и интенсивность воздействия всех технологических процессов открытых горных работ на окружающую природную среду и человека. Вместе с тем, анализ предшествующего опыта показывает, что сдерживающими факторами для разработки новых технических решений, существенно рационализирующих геометрические параметры бортов карьеров, являются недостаточная изученность и учёт закономерностей состояния горного массива в процессе ведения горных работ, несовершенство методов прогноза и расчёта параметров откосов, особенно в трёхмерной постановке.

Следовательно, разработка и совершенствование методов расчёта устойчивости и конструктивных параметров открытых горных выработок является актуальной научной проблемой.

Решению указанной проблемы, имеющей важное социальное и народнохозяйственное значение, посвящена настоящая диссертационная работа. В основу диссертации положены результаты, полу-

ченные автором в процессе теоретических исследований напряжённого состояния и устойчивости бортов карьеров, геомеханических аспектов нетрадиционных и ресурсосберегающих технологий, занимающих важное место в планах научно-исследовательских работ ИПЭ НАН Украины.

Целью работы является разработка и развитие теоретических основ расчёта устойчивости, рациональных параметров и формы горных выработок для повышения эффективности открытой разработки на основе совершенствования существующих инженерных методов и разработки новых численно-аналитических способов оценки состояния горного массива.

Идея работы заключается в комплексном использовании взаимодополняемых инженерных и численно-аналитических методов оценки напряжённого состояния и устойчивости горного массива для расчёта рациональных параметров открытых горных выработок.

Методы исследований. Применен комплекс современных методов исследований, отвечающий поставленным цели и задачам диссертации. В диссертационной работе использовались: методы математического анализа при аналитическом описании и исследовании геомеханических объектов и процессов; методы теории упругости, включая метод конечных элементов, для анализа напряжённого состояния горного массива и обоснования нетрадиционных технологических решений; методы механики горных пород при разработке расчётных критериев оценки состояния горного массива; методы вычислительной техники и программирования при численной реализации поставленных задач; общенаучные методы анализа и синтеза при оценке влияния объёмного фактора на напряжённое состояние и устойчивость горного массива; экспериментальный метод моделирования на эквивалентных материалах и натуральных наблюдений для проверки достоверности результатов теоретических исследований.

Автор защищает следующие научные положения:

I. Комплексный подход к обоснованию и выбору рациональных параметров бортов карьеров предусматривает выполнение геомеханических исследований по взаимосвязанным направлениям: оптимизация конструктивных параметров и формы открытых горных

выработок, управление состоянием горного массива, обоснование нетрадиционных малоотходных и ресурсосберегающих технологий и способов на основе анализа напряжённого состояния, устойчивости и параметров карьерных массивов в их взаимосвязи.

2. Задачу оптимизации конструктивных параметров бортов карьеров ступенчатого профиля наиболее целесообразно рассматривать по отношению к основным структурным элементам борта, включающим одиночные уступы, их парные сочетания, а также весь борт в целом. Глобальным критерием оптимальности решения является достижение равномерно-нормативного распределения прочности по всем структурным элементам конструкции.

3. Преобладающая тенденция роста абсолютных значений компонент напряжённого состояния массива при одновременном снижении неравномерности поля напряжений предопределяет, в целом, более благоприятные условия устойчивости объёмных откосов по сравнению с плоскими аналогами. Количественным показателем положительного влияния фактора объёмности служит, главным образом, отношение инварианта тензора напряжений  $I_I$  к максимальным касательным напряжениям  $\tau_{max}$ .

4. Влияние фактора объёмности на параметры горных выработок носит существенный характер при значениях коэффициента Пуассона пород  $\nu$  не менее 0,2; углов откосов  $\alpha$  не менее  $30^\circ$  и углов внутреннего трения  $\beta$  не менее  $10-15^\circ$ , а также при отношениях радиуса кривизны  $R$  или длины участка сопряжения  $L$  к высоте борта  $H$  не менее 1,5-2, возрастающая с ростом параметров  $\alpha$ ,  $\nu$ ,  $\beta$ ,  $H$  и убыванием параметров  $R$  и  $L$ . При этом относительные величины поправок к углам откосов уступов, определённым из решения плоской задачи, могут достигать 20-25%.

5. Эффективность технологических воздействий в процессе управления состоянием горного массива возможно характеризовать интегральным изменением коэффициентов запаса устойчивости за счёт изменения геометрических параметров выработки ( $H$ ,  $\alpha$ ), прочностных показателей пород ( $C$ ,  $\beta$ ) и напряжённого состояния массива.

Обоснованность и достоверность научных положений,  
выводов и рекомендаций диссертации.

Научные результаты диссертационной работы получены на основе фундаментальных положений механики горных пород и теории упругости с использованием аппарата математического анализа. Их достоверность подтверждается применением апробированных методов исследований, экспериментальными исследованиями на эквивалентных материалах и оценкой степени соответствия теоретических и экспериментальных данных (отклонение в результатах не превысило 15 %); исследованиями, связанными с оценкой погрешности при использовании численного метода (погрешность не более 5 %); сопоставимостью результатов исследований с данными других авторов и соответствием результатов теоретических расчётов с данными теории и практики горных работ, а также результатами практического использования рекомендаций диссертационной работы на карьерах Украины.

Научная новизна. В диссертационной работе впервые предметно рассмотрен и развит комплексный геомеханический подход к расчёту рациональных параметров и формы открытых горных выработок.

Впервые дана общая постановка оптимизационной задачи и разработана методика оптимизации конструктивных параметров бортов карьеров и отвалов по различным критериям. Получены частные аналитические решения задачи.

Установлены основные закономерности пространственного напряжённого состояния и устойчивости открытых горных выработок, на этой основе изучен и впервые аналитически описан механизм влияния фактора объёмности на напряжённое состояние, устойчивость и параметры горного массива.

Предложен критерий оценки устойчивости откосов, обобщающий известные выражения на случай пространственного деформирования горных пород. Разработана методика решения объёмных задач устойчивости бортов карьеров с учётом их конфигурации. Впервые аналитически описаны условия устойчивости круговых вертикальных выработок.

Установлено, что при дифференциальном и интегральном подходах к оценке устойчивости откосов значения предельной высоты вертикального обнажения различаются в 2 раза. Пока-

зана нецелесообразность введения запаса устойчивости в прочностные характеристики пород, так как это приводит к необоснованному занижению запаса прочности.

Практическая ценность работы, в целом, состоит в возможности применения результатов исследований для рационализации параметров открытых горных выработок. Эти исследования направлены на уменьшение изъятия земель под горный отвод и объёмов горных пород, подлежащих выемке, снижение вероятности оползневых явлений и, в целом - снижение отрицательного влияния открытых горных работ на окружающую среду и повышение их эффективности. Наиболее практически ценные результаты, полученные автором, заключаются в следующем:

- разработано прикладное многоцелевое программное обеспечение по расчёту устойчивости и параметров открытых горных выработок на ПЭВМ в различных горно-геологических условиях;
- разработаны рекомендации по оценке влияния объёмного фактора на устойчивость и параметры карьерных массивов и определены условия, при которых это влияние существенно;
- оценены погрешности инженерных расчётов, возникающие при использовании "метода отсеков" и введении коэффициента устойчивости в прочностные показатели пород, и даны рекомендации по учёту этих погрешностей при расчётах устойчивости откосов;
- определена взаимосвязь между радиусом кривизны и глубиной вертикальной выработки, при которой её интегральная устойчивость сохраняется без крепления;
- даны рекомендации по расчёту оптимальных конструктивных параметров бортов ступенчатого профиля;
- разработаны рекомендации по рациональным параметрам открытых горных выработок в различных технологических ситуациях.

#### Реализация работы.

Результаты работы использованы институтом "Кривбаспроект" при выполнении рабочего проекта вскрытия и разработки нижних горизонтов карьера ИнГЖа, а также при обосновании проектных решений по карьерам месторождения им. Ломоносова ПО "Поморалмаз" (Архангельская область).

Рекомендации диссертационной работы использованы на Ин-

гулецком ГОКе при разработке противооползневых мероприятий и на Грушевском карьере МГОКа при обосновании способа повышения устойчивости торцовых участков бортов карьеров (фактический экономический эффект от внедрения способа за 1987-1988 г.г. составил 328 тыс.руб.).

Пакет инженерных прикладных программ по расчёту устойчивости откосов внедрен на Верхнеднепровском ГМК. Результаты исследований по оптимизации параметров бортов карьеров внедрены на Марганецком ГОКе (фактический экономический эффект от внедрения рекомендаций в 1992 г. составил свыше 2 млн.крб., в 1993 г. - более 900 млн.крб.).

Апробация работы. Содержание работы и её отдельные положения докладывались на Всесоюзной научно-технической конференции "Совершенствование технологии, механизации и организации производства при добыче угля" (г. Люберцы, 1983 г.), ряде городских, областных и республиканских научно-технических конференциях молодых учёных и специалистов (г.Днепропетровск, 1983-1985 г.г.), на III Всесоюзном семинаре по горной геофизике (г. Батуми, 1985 г.), Всесоюзном совещании "Малоотходные и ресурсосберегающие технологии открытой разработки месторождений (Мельниковские чтения)" (г.Днепропетровск, 1988 г.), на IV Всесоюзной конференции "Проблемы механики горных пород" (г.Фрунзе, 1989 г.), Международной конференции "Экология и рынок" (г.Днепропетровск, 1992 г.), Всеукраинской научно-практической конференции "Теория и практика решений экологических проблем в горнодобывающей и металлургической промышленности" (г.Днепропетровск, 1993 г.), Международной конференции "Проблемы промышленной экологии и безопасности" (г.Севастополь, 1993 г.), на X Международной конференции по механике горных пород (г.Москва, 1993 г.), технических совещаниях институтов "Кривбасспроект", "Джгипроурода", Марганецкого, Орджоникидзевого и Ингулецкого ГОКов, Верхнеднепровского ГМК (гг.Кривой Рог, Харьков, Марганец, Орджоникидзе, Вольногорск, 1985-1993гг.) на научных семинарах Института геотехнической механики АН Украины (г.Днепропетровск, 1985-1987 г.г.), Всесоюзного научно-исследовательского института горной геомеханики и маркшейдерии (г.Ленинград, 1986-1987 г.г.), Института проблем природопользования и экологии АН Украины (г.Днепропетровск, 1992-

1993 г.г.).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 33 печатных трудах соискателя, в т.ч. одной монографии и одном авторском свидетельстве.

Объём работы. Диссертация состоит из введения, шести разделов, заключения, изложенных на 364 страницах машинописного текста, содержит 61 рисунок, 9 таблиц, список литературы из 176 наименований и 3 приложения.

Автор выражает глубокую признательность проф. А.Г. Шапарю за научные консультации в процессе подготовки работы.

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

При ведении открытых горных работ только от 2 до 50 % вовлекаемой в разработку горной массы используется как полезное ископаемое. Следствием этого является повреждение отдельных или всех компонентов окружающей среды. Естественно, что интенсивность воздействия на среду любого из сопутствующих техногенных факторов определяется масштабом открытой разработки. С этих позиций именно совершенствование конструктивных параметров открытых горных выработок обеспечивает снижение уровня техногенного воздействия всех технологических процессов открытых горных работ на окружающую среду и человека.

Очевидно, что решение этой проблемы условно возможно разделить на три взаимосвязанных направления: геомеханическое, технологическое и технолого-геомеханическое.

Первое из них предусматривает расчёт и выбор оптимальных (рациональных) геометрических параметров открытых горных выработок в различных горно-геологических условиях. Второе - обоснование и разработку новых ресурсосберегающих, нетрадиционных и малоотходных технологий. Технолого-геомеханическое направление связано с теорией и практикой управления состоянием горного массива.

Для практической реализации этих направлений исследований необходимо, кроме непосредственного метода расчёта устойчивости откосов, располагать взаимосвязанными методами расчёта их напряжённого состояния, конструктивных параметров и формы.

Большой вклад в развитие научного направления по проблеме управления устойчивостью бортов карьеров и отвалов внесли: Астафьев Ю.П., Березанцев В.Г., Галустьян Э.Л., Гальперин А.М., Гольдштейн М.Н., Демин А.М., Зотеев В.Г., Ильин А.И., Крячко О.Ю., Николашин Ю.М., Певзнер М.Е., Попов С.И., Попов Р.В., Ревазов М.А., Резников М.А., Ржевский В.В., Сапожников В.Т., Соколовский В.В., Фисенко Г.Л., Цветков В.К., Цимбаревич П.М., Шапарь А.Г., Шашенко А.Н., Шпортько В.П.

Актуальность исследований в этом направлении не ослабевает, тем более, что проблема расчёта оптимальных параметров открытых горных выработок до последнего времени не получила должного внимания в теории. По выполненной укрупнённой оценке уточнение коэффициента запаса устойчивости бортов карьера только на 5 %, в конечном итоге, может позволить уменьшить объём извлекаемой горной массы и площадь карьера от 1,5 до 20 % в зависимости от горно-геологических условий разработки.

Большинство исследователей сходится во мнении, что разработка научных основ управления состоянием массивов является весьма перспективным путём решения проблемы создания малоотходных и ресурсосберегающих технологий открытой разработки месторождений. Решение проблем управления состоянием природных и техногенных массивов включает исследования эффективности и закономерностей влияния различных воздействий и разработку методов оценки этого влияния на состояние уступов и бортов карьеров.

Осуществляемое технологическое воздействие не может характеризоваться совокупным действием следующих факторов: изменением геометрических параметров бортов и отвалов; изменением конфигурации массива в плане; изменением физико-механических свойств пород. Причём действие любого из этих факторов связано, как правило, и с изменением первичного напряжённого состояния горного массива. Поэтому задачу оценки влияния различных технологических воздействий на массив, по мнению автора, следует рассматривать в плане оценки изменения коэффициента запаса устойчивости массива при изменении его напряжённого состояния, прочностных характеристик и геометрических показателей.

Количественно оценка эффективности того или иного спосо-

ба управления состоянием горного массива невозможна без установления закономерностей взаимосвязи изменения напряжённого состояния и устойчивости. Точно также определение параметров того или иного технологического воздействия на массив невозможно без оценки влияния заданного поля напряжений (вызванного этим воздействием) на устойчивость массива. Конкретные теоретические проработки этого вопроса до настоящего времени отсутствовали.

Предпосылки такой постановки задачи особенно отчётливо проявляются сейчас, когда для оценки устойчивости откосов всё шире применяются решения, полученные численными методами механики сплошной и дискретной среды. Эти решения эффективно использованы при анализе напряжённого состояния и устойчивости горного массива. Возможность получения численного (а в некоторых случаях и аналитического) решения о распределении напряжений в откосах открывает широкие перспективы в плане использования выявленных закономерностей напряжённо-деформированного состояния горного массива. Вместе с тем, до настоящего времени именно вопросы взаимосвязи изменения запаса прочности массива с изменением его напряжённого состояния недостаточно изучены.

Таким образом, идея комплексности и универсальности при постановке и решении задач управления состоянием массива, в свою очередь, приводит к выводу о том, что наиболее приемлемый подход к оценке эффективности управляющих воздействий должен быть основан на исследовании напряжённого состояния устойчивости и параметров горного массива в их взаимосвязи. Такая постановка задачи предъявляет особые, специфические требования к используемым расчётным методам устойчивости. Реализация таких задач в полной мере возможна только на основе объединения численно-аналитических и инженерных методов расчёта устойчивости при условии совершенствования как тех, так и других.

Вопросы совместного расчёта устойчивости и напряжённого состояния откосов в плоской постановке получили численно-аналитическое развитие в работах д.т.н. Цветкова В.К. Для условий объёмной задачи такие решения до настоящего времени отсутствовали. Известные рекомендации ВНИИ по оценке влияния

фактора объёмности не учитывают напряжённого состояния массива и позволяют оценить интегрально приращение к результирующему углу наклона борта карьера, не рассматривая его конфигурацию.

Учитывая современное состояние исследований в области геомеханики открытых горных выработок, нельзя уже признать достаточными те разработки, которые ограничиваются лишь рекомендациями относительно результирующего угла наклона борта карьера.

Рассмотрение реальной конфигурации (формы) борта карьера позволяет перейти к постановке задачи определения его оптимальных конструктивных параметров. Основные результаты здесь получены для условий глубоких карьеров. Методика построения рационального профиля в этом случае заключается в том, чтобы вписаться идеализированный профиль (выпуклый, двугранный, в форме циклоиды и др.). Значения параметров бортов с определённой погрешностью приближаются к оптимальным. Эта же задача рассматривалась д.т.н. М.А.Резниковым с использованием вариационного метода. Однако, отсутствие аналитического решения и дополнительные погрешности расчётов, связанные с использованием вариационного метода, не позволяют однозначно рекомендовать эти численные решения в инженерной практике.

С учётом вышеизложенного в работе сформулированы следующие задачи исследований:

1. Выполнить аналитические исследования по совершенствованию инженерных методов расчёта устойчивости откосов и разработать прикладное программное обеспечение, реализующее инженерные методики.

2. Выполнить численно-аналитический анализ объёмного напряжённого состояния открытых горных выработок и разработать способы расчёта их конструктивных параметров.

3. Разработать аналитические способы оценки изменения параметров горных выработок при изменении напряжённого состояния и запаса устойчивости горного массива.

4. Сформулировать задачу оптимизации геометрических параметров бортов карьеров и разработать численно-аналитическую методику их расчёта.

5. Осуществить теоретико-экспериментальное обоснование и

практическую проверку достоверности полученных результатов.

6. Обосновать рациональные параметры открытых горных выработок в конкретных геотехнологических ситуациях на базе разработанных численно-аналитических способов и методов их расчёта.

Упор в исследованиях сделан на использование и разработку аналитических и численно-аналитических методов, базирующихся на основных положениях механики горных пород и использующих аппарат математического анализа.

Исторически в теории расчёта устойчивости откосов можно выделить два различных подхода к оценке состояния массива, условно "метод сил" и "метод напряжений". "Метод напряжений" ( $\eta_n$ ) в основе своей исходит из дифференциальной оценки прочности массива в точке. "Метод сил" ( $\eta_s$ ) предполагает интегральную оценку устойчивости с вычислением сдвигающих и удерживающих усилий для призмы возможного обрушения. Математические выражения для коэффициентов запаса устойчивости  $\eta_n$  и  $\eta_s$  в самом общем случае имеют вид:

$$\eta_n = \frac{c + \operatorname{tg} \rho \sigma_n}{\tau_n}, \quad \eta_s = \frac{cL + \operatorname{tg} \rho NV}{T} \quad (I)$$

где  $c$  - сцепление в массиве;

$\rho$  - угол внутреннего трения пород;

$\sigma_n, \tau_n$  - нормальная и касательная составляющие напряжения на площадке с нормалью  $n$  ;

$N$  - результирующая сила нормального давления от веса призмы возможного обрушения по линии (поверхности) скольжения;

$T$  - сдвигающее усилие.

В диссертационной работе показана целесообразность совместного использования выражений (I) для более обоснованной и полной оценки состояния массива. В этой связи был проведен сопоставительный анализ этих методик. Установлено, что наибольшую степень достоверности результатов при использовании выражения для  $\eta_s$  следует ожидать при достаточно больших значениях  $\alpha$ ,  $\rho$  и  $c/\rho H$ , а также при значениях  $\alpha$ , относительно близких к  $\rho$ . При относительно небольших значениях  $\alpha$  и  $\rho$ , а также при значительной разнице ( $\alpha - \rho$ ) "метод сил" дает, как правило, завышенные зна-

чения коэффициентов устойчивости. Это обстоятельство необходимо учитывать на практике.

В плане совершенствования инженерных методов автором показано, что при расчётах устойчивости по методу алгебраического сложения сил ("метод сил") в расчётные зависимости целесообразно вводить величину  $\psi_c$ , определяющую угол наклона касательной линии к линии скольжения под центром тяжести призмы возможного обрушения. Установлено, что значение этой величины с достаточной для практики точностью возможно принять равным  $(\alpha + \beta) / 2$ .

В процессе проведенных теоретических исследований автором показано, что при интегральной оценке прочности вертикального откоса предельная высота его обнажения вдвое превосходит величину  $H_{90} = 2c / \gamma \operatorname{tg}(45^\circ - \beta / 2)$ , характеризующую дифференциальный подход к оценке прочности массива. В этой связи при оценке длительной устойчивости вертикальных откосов по методу алгебраического сложения сил (плоская задача) следует пользоваться величиной  $2H_{90}$ .

Отдельное внимание в диссертационной работе уделено оценке погрешностей инженерных методов расчёта устойчивости. Определены условия, при которых дополнительные погрешности, заложенные "внутри" инженерных методов существенным образом влияют на точность получаемых результатов. Установлено, что использование разбиения на отсеки вместо точного интегрирования и введение запаса прочности в прочностные показатели всегда занижает фактическое значение коэффициента устойчивости откоса. Отклонения могут достигать 40-50%. Таким образом, при расчётах коэффициентов устойчивости по методу алгебраического сложения сил для получения более достоверных результатов следует использовать результаты точного интегрирования по призме возможного обрушения и не вводить априори запас прочности в величины сцепления и угла внутреннего трения пород. Этот теоретический результат имеет существенное практическое значение, т.к. позволяет исключить дополнительно необоснованный разнос бортов карьеров.

В рамках используемых инженерных подходов в диссертационной работе разработаны достаточно универсальные методики по расчёту устойчивости слоистых и нагруженных откосов, реа-

лизованные на ПЭВМ. Установлено, что замена слоистого откоса однородным при расчётах устойчивости в большей степени влияет на величину призмы возможного обрушения, чем на значение коэффициента запаса устойчивости.

Полученные автором численно-аналитические результаты по исследованию и совершенствованию инженерных методов расчёта устойчивости, с одной стороны, послужили основой для постановки и реализации задач оптимизации конструктивных параметров открытых горных выработок, а с другой - имеют самостоятельное практическое значение.

Комплекс инженерных вычислительных программ по расчёту устойчивости слоистых откосов на ПЭВМ внедрён на Верхнеднепровском ГМК. Разработанные программы позволяют оперативно определить по заданным параметрам борта карьера или отвала величину запаса прочности, а также решить обратную задачу устойчивости.

Как известно, традиционно используемые инженерные методы оценки устойчивости откосов не предусматривают нахождения рациональной конструкции борта карьера многоступенчатого профиля. Естественно, что такое положение вещей ни в коей мере не может удовлетворить запросам инженерной практики. Основные затруднения здесь связаны с необходимостью совместного решения двух вариационных задач: при оценке устойчивости бортов карьеров и нахождении его рациональной формы.

Как следствие, анализ большинства проектных и фактических конструктивных решений по параметрам уступов и бортов карьеров свидетельствует о том, что принятые параметры далеки от оптимальных. В этой связи, в диссертационной работе предложен общий подход к постановке и решению задач оптимизации (рационализации) конструктивных параметров бортов карьеров ступенчатого профиля. В геомеханическом и технологическом аспектах предложенный подход в наибольшей степени адекватен условиям, характерным для карьеров с мягкими покрывающими породами и горизонтальным залеганием полезных ископаемых (например, карьеры Никопольского марганцеворудного бассейна), в то же время не исключено его применение и в других горно-геологических условиях, в частности, - Кривбасса. В диссертационной работе сформулированы следующие принци-

альные положения.

Во-первых, борт карьера следует рассматривать как систему взаимосвязанных структурных элементов; во-вторых, при расчётах устойчивости борта и обосновании его рациональных параметров необходимо располагать данными о запасе прочности по всем его структурным элементам; в-третьих, алгоритм поиска рациональной конструкции борта должен предусматривать перераспределение запаса прочности по его структурным элементам с целью выравнивания значений всех структурных коэффициентов запаса устойчивости.

Если коэффициенты запаса устойчивости всех структурных элементов борта будут строго соответствовать принятым нормативным значениям, то принимается, что борт карьера будет находиться в идеально равномерно нормативном устойчивом состоянии. Таким образом, при таком выборе параметров борта (отвала) нет возможности дальнейшего совершенствования его конструктивных параметров для принятых нормативов устойчивости. Следовательно, полученное решение будет оптимальным и максимально использующим ресурс несущей способности конструкции. Степень приближения фактического распределения прочности по структурным элементам борта к равномерно-нормативному распределению устойчивости возможно оценить с помощью известных приёмов математической статистики и теории вероятностей. Следовательно, представление борта карьера как системы структурных элементов предопределяет введение нового коэффициента - средне-нормативного коэффициента запаса устойчивости конструкции.

Установлено, что из всех структурных элементов борта в качестве базовых целесообразно выделять только основные, включающие обособленные уступы, борт в целом и все попарно сочетающиеся уступы. Сформулированная оптимизационная задача в математическом плане эквивалентна нахождению экстремума функции многих переменных с ограничениями (задача Лагранжа). Разработан детальный алгоритм численной реализации задачи на ЭВМ. Установлено, что в общем случае невозможно рационализировать конструкцию борта карьера, отвечающую одновременно двум критериям: достижения максимального результирующего угла наклона борта карьера и минимума объёмов

вскрышных работ по его формированию. Попутно доказано, что максимальные значения ширины берм и результирующего угла наклона борта достигаются, в большинстве случаев, при равных значениях высот и углов откосов уступов, слагающих борт.

Для  $2n$  ступенчатого борта, образованного парными сочетаниями уступов с высотами  $H_1 \neq H_2$ , получено аналитическое решение задачи. Например, для случая 2-х ступенчатого борта минимальный объём вскрышных работ по формированию борта будет иметь место при условии

$$H_1/H_2 = \frac{\alpha + (\alpha^2 + 3(1+\alpha))^{1/2}}{3(1+\alpha)}, \quad (2)$$

где 
$$\alpha = \frac{\beta/2 - \mathcal{D}}{\alpha^* H + \beta/2},$$

$\alpha^*, \beta, \mathcal{D}$  - коэффициенты аппроксимации зависимостей  $B = B(H, H_1)$ ,  $\alpha = \alpha(H, H_1)$ , определяемые значениями физико-механических свойств пород и принятыми нормативными значениями прочности;

$H = H_1 + H_2$  - высота борта;

$H_1$  - высота нижнего уступа.

Исследованиями установлено, что решение уравнения (2) всегда лежит в интервале (1/3, 2/3).

Как уже отмечалось выше, решение объёмных задач о распределении напряжений в массиве является одним из основных направлений исследований по управлению состоянием горного массива. В этой связи, актуальным является исследование закономерностей пространственного напряжённого состояния горных выработок.

В качестве инструмента исследований в диссертационной работе использован эффективный и достаточно широко апробированный численный метод расчёта напряжённого состояния горного массива - метод конечных элементов. С помощью специальных приёмов удалось разработать экономичный вычислительный алгоритм как с точки зрения объёма памяти, так и времени расчёта. Это позволило, в свою очередь, исходя из целей работы, провести многовариантные сопоставительные расчёты плоских и

объёмных геомеханических моделей уступов и бортов карьеров. В качестве основных использованы две расчётные схемы: модель сопрягавшихся бортов и модель кругового в плане борта (карьера). Анализ этих двух полярных моделей позволяет интерполировать получаемые сопоставительные результаты на случай произвольной реальной конфигурации борта карьера в плане.

Показано, что реализованная методика с большей эффективностью может быть использована для сопоставительного анализа напряжённого состояния в плоских и объёмных моделях, т.е. скорее для оценки фактора объёмности, чем для непосредственной количественной оценки напряжений в массиве. Такая постановка задачи, тем более, актуальна в связи с необходимостью оценки влияния технологических воздействий на состояние массива. Для рассмотренных объёмных моделей (по отношению к плоским аналогам) выявлена преобладающая тенденция роста абсолютных значений напряжений при одновременном снижении их неравномерности. Выявлены устойчиво ориентированные локальные области массива, где следует прогнозировать отрицательное влияние объёмного фактора на устойчивость горного массива. Количественную и качественную картину изменения напряжённого состояния возможно проследить с помощью введенных коэффициентов влияния объёмного фактора, определяющих относительное изменение компонент напряжений в объёмной задаче по отношению к плоской. Разнородная картина изменения напряжённого состояния предопределила необходимость интегральной оценки фактора объёмности. В этой связи установлены удобные для практического использования графические и аналитические зависимости, интегрально описывающие влияние объёмного фактора. Различные компоненты напряжённого состояния характеризуются своими диапазонами изменения. Наиболее значительно могут изменяться наименьшие главные напряжения

$\sigma_{min}$ . Менее всего изменяются максимальные касательные напряжения  $\tau_{max}$ . В большинстве случаев их изменением возможно пренебречь. Промежуточные главные напряжения  $\sigma_{cp}$  также изменяются существенным образом. В некоторых случаях их изменение преобладает. Установлено существенное влияние коэффициента Пуассона на характер изменения напряжений. В целом, наблюдается тенденция к возрастанию величины относи-

тельного изменения главных нормальных напряжений и к убыванию аналогичных величин для максимальных касательных напряжений при возрастании  $\nu$  и  $\alpha$ .

На основании проведенного анализа обоснован расчётный критерий оценки устойчивости в объёмной задаче (208), учитывающий промежуточное главное напряжение посредством введения в расчётные зависимости первого инварианта тензора напряжений  $I_1$ . Известное аналитическое выражение, основанное на критерии Кулона-Мора и используемое для оценки устойчивости массива в условиях плоской задачи (211), является частным случаем рекомендованного в диссертационной работе. Показано, что напряжённое состояние оказывает влияние на величину запаса устойчивости массива посредством следующих параметров:  $1/\tau_{max}$ ,  $\sigma_{min}/\tau_{max}$ ,  $\sigma_{cp}/\tau_{max}$ . Причём два последних параметра могут быть заменены более общим  $I_1/\tau_{max}$ , имеющим определяющее значение.

Для определения величины приращения устойчивости за счёт изменения напряжённого состояния массива установлены удобные для практического использования аналитические выражения. Приращение запаса прочности  $\Delta\eta$  сложным образом зависит от совокупности величин  $c, \rho, \gamma, H, \alpha, \nu, \{\sigma_i\}, L, R/H, \theta$  ( $\theta$  - угол сопряжения бортов). Наиболее существенно влияние на значение  $\Delta\eta$  углов  $\alpha$  и  $\rho$ , а также величины  $\nu$ . Однозначно показано, что в исследуемом интервале исходных величин с ростом параметров  $\rho$ ,  $\alpha$  и  $\nu$  происходит возрастание величины  $\Delta\eta$ . В частности, существенное положительное влияние сопряжения на устойчивость отмечается при значениях величин  $\nu$  не менее 0,2 и углов  $\rho$  не менее 10-15°.

Совокупность проведенных исследований позволила вскрыть и численно-аналитически описать механизм влияния фактора объёмности на состояние открытых горных выработок.

На основе полученных выше результатов в диссертационной работе разработана методика решения объёмных задач устойчивости, позволяющая учесть в расчётах реальную конфигурацию борта карьера, а не ограничиться лишь вычислением поправки к результирующему углу откоса борта, как это принято в существующих методиках. Её сущность заключается в последова-

тельном выполнении следующих этапов:

а) определяется резерв устойчивости за счёт влияния объёмного фактора

$$\Delta\eta = \frac{tg\varphi}{3c\cos\varphi} \left( \frac{\bar{I}_1^{об}}{\bar{\tau}_{max}^{об}} - \frac{\bar{I}_1^{пл}}{\bar{\tau}_{max}^{пл}} \right), \quad (3)$$

где  $\bar{I}_1$ ,  $\bar{\tau}_{max}$  - усреднённые по расчётной области значения первого инварианта тензора напряжений и максимального касательного напряжения  $\tau_{max}$  в плоской (индекс "пл.") и объёмной (индекс "об.") задачах;

б) определяется суммарное приращение  $\Delta\alpha\delta$  к результирующему углу наклона борта  $\alpha\delta$ , определяемое величиной  $\Delta\eta$

$$\Delta\alpha\delta = \frac{2\Delta\eta}{(\eta_0 \operatorname{ctg}\varphi_0 + tg\varphi)}; \quad (4)$$

в) вычисляется верхняя граница возможного сокращения ширины берм  $\Delta B$

$$\Delta B = H\delta [\operatorname{ctg}\alpha\delta - \operatorname{ctg}(\alpha\delta + \Delta\alpha\delta)], \quad (5)$$

$H\delta$  - высота борта;

г) для бортов, где влияние объёмного фактора не распространяется на высоту  $H\delta$  по всей протяжённости, определяем высоту  $h$  влияния объёмного фактора. В частном случае карьера, кругового в плане  $h = H\delta$ . Исходя из технологических соображений, выделяем уступы по высоте  $h$ , изменять параметры которых возможно и изменяем бермы соответствующих уступов. При этом величина суммарного изменения не должна превышать  $\Delta B$ ;

д) если по каким-либо соображениям суммарное изменение ширины берм  $\Delta B^s$  меньше  $\Delta B$ , то определяем изменение результирующего угла наклона борта  $\Delta\alpha\delta'$

$$\Delta \alpha'_s = \text{arccctg} \left( \text{ctg} \delta_s - \frac{\Delta B^s}{H} \right) - \alpha_s ; \quad (6)$$

е) по значению  $\Delta \alpha'_s$  определяем величину  $\Delta \eta'$  и остаточный резерв прочности  $\Delta \eta^o = \Delta \eta - \Delta \eta'$

$$\Delta \eta' = \frac{\Delta \alpha'_s}{2} (\eta_o \text{ctg} \varphi_c + \text{tg} \rho) ; \quad (7)$$

ж) определяемся с теми уступами, углы откоса которых возможно изменить и для каждого уступа с измененным углом откоса на величину  $\Delta \alpha_i$  определяем снижение запаса прочности  $\Delta \eta_i$  по формулам, аналогичным вышеприведенным;

з) проверяем выполнение условия  $\sum \Delta \eta_i \leq \Delta \eta^o$  и в случае его невыполнения уменьшаем значения  $\Delta \alpha_i$  для выполнения неравенства; отстраиваем новый профиль борта и проверяем выполнение условия  $\alpha_{\text{рез}} \leq \alpha_s + \Delta \alpha_s$  ( $\alpha_{\text{рез}}$  - результирующий угол наклона борта карьера). Если это условие не соблюдено, то производится вторичная корректировка параметров борта.

Все построения следует производить при условии, чтобы изменение параметров вышележащих уступов было не значительней изменения параметров нижележащих уступов.

Автором исследованы и определены условия, при которых влияние фактора объёмности на степень возможной корректировки геометрических параметров бортов наиболее существенно. Установлено, что относительные величины поправок к углам откосов могут составлять 20-25 %. Выражение для определения приращения к углу откоса  $\alpha$  за счёт кривизны борта в плане представимо в виде

$$\Delta \alpha = \frac{2}{3} \cdot \frac{(\bar{I}_1 / \bar{I}_{\text{max}})^{\alpha \delta} - (\bar{I}_1 / \bar{I}_{\text{max}})^{\eta \rho}}{\cos \rho (\eta \text{ctg} \varphi_c \text{ctg} \rho + 1)} \quad (8)$$

На основании полученных в диссертационной работе результатов следует ожидать, что наибольшая степень влияния фактора объёмности будет иметь место для вертикальных кру-

говых выемок.

В этой связи аналитическому исследованию этого вопроса з работе посвящен отдельный раздел. Такое исследование предполагает существование зависимости  $\eta_{\text{нл}} = f(c, \rho, \gamma, H)$  при  $\alpha = 90^\circ$  в явном виде. Для случая прямолинейной линии скольжения автором установлены следующие аналитические выражения

$$\eta_{\text{нл}} = \frac{4c}{\gamma H} \sqrt{1 + \frac{\gamma H}{2c} \operatorname{tg} \rho}, \quad (9)$$

$$H = \frac{4c}{\delta \eta_{\text{нл}}} \operatorname{ctg}(45^\circ - \rho_2/2), \quad \rho_2 = \operatorname{arctg}(\operatorname{tg} \rho/2).$$

Таким образом, при  $\eta = 1$  величина  $H = 2H_{90}$ .

Основываясь на идее соединения численно-аналитического и инженерного подходов, установлена следующая взаимосвязь

$$\frac{2\nu(2c/\delta H + \operatorname{tg} \rho)}{(1+\nu)\cos \rho} e^{-1,55 \frac{R}{H}} + \frac{4c}{\gamma H} \sqrt{1 + \frac{\gamma H}{2c} \operatorname{tg} \rho} = \eta_{\text{н}}. \quad (10)$$

Показано, что с ростом величины  $\rho$  и  $\nu$  область существования взаимосвязи  $R(H)$  расширяется, смещаясь при этом в сторону больших значений  $H$ . Величина  $H_{\text{нр}}$ , определяющая предельную глубину выработки, до которой ещё возможно компенсировать падение устойчивости с глубиной путём соответствующего выбора радиуса кривизны выработки, определяется из выражения (10) при условии  $R = 0$ . Для реальных значений  $\eta_{\text{н}}$ ,  $c$ ,  $\gamma$ ,  $\nu$ ,  $\rho$  величина  $H_{\text{нр}}$  может превосходить величину  $H_{90}$  на порядок и более. При экстремальной оценке для  $\rho = 45^\circ$ ,  $\eta_{\text{н}} = 1$ ,  $\nu = 0,5$ . Отношение  $H_{\text{нр}}/H_{90}$  достигает  $10^3$ .

Обоснованию достоверности полученных результатов посвящён самостоятельный раздел диссертационной работы.

С использованием эквивалентных материалов моделировалось пространственное напряженное состояние сопрягающихся бортов карьеров. Используемая в работе методика лабораторного эксперимента позволила в значительной степени уменьшить ожидаемые погрешности за счёт сопоставления относительных

величин изменения напряжений в объёмной модели по отношению к условно плоской. Максимальное отличие в значениях коэффициентов влияния объёмного фактора для вертикальных сжимающих напряжений по данным численных расчётов на ЭВМ и эксперимента не превысило 15 %.

Качественным теоретическим анализом распределения напряжений в плоской и осесимметрической задачах подтверждены основные выводы о влиянии фактора объёмности на устойчивость горного массива, сделанные выше. Аналитически установлена следующая взаимосвязь

$$\frac{\Delta \eta}{\eta} = \left\{ \frac{(\frac{3}{4} - \frac{3}{\pi^2})(1-\nu)^2 [\mu_1 - \nu/(1-\nu)]}{(1-\nu/2 + \frac{1+\nu}{2}\mu_1)^2 + \frac{3}{\pi^2}(1-\nu)^2(\mu_1 - \frac{\nu}{1-\nu})^2} \right\}^{1/2} \quad (II)$$

где  $\mu_1$  - отношение горизонтальных (радиальных) напряжений к вертикальным.

Из выражения ( II ) следует, что максимальное влияние фактора объёмности на величину запаса прочности для осесимметричных выемок составляет 20 %, что согласуется с ранее полученными результатами.

Проведена серия сопоставительных расчётов по установленным в работе зависимостям для условий, имевших место при моделировании на объёмных моделях во ВНИИ. По условиям экспериментов для определённого состава эквивалентного материала с заданными свойствами проводилась серия испытаний при различных значениях геометрических параметров  $\alpha, H, R, L$ .

Путём обратных расчётов для фиксированного состава эквивалентного материала определялся коэффициент Пуассона смеси.

В таблице приведены результаты расчётов для одной из серии эквивалентных материалов.

Результаты проведенных теоретических исследований позволили перейти к обоснованию рациональных параметров открытых горных выработок в различных горно-геологических условиях и технологических ситуациях. За период с 1986 по 1993 годы с участием автора разработан целый ряд рекомендаций, используемых на карьерах Марганецкого и Орджоникидзевского ГСЖов,

Таблица

Результаты обратных расчётов коэффициента  $\nu$  для смеси эквивалентного материала (состав: кварцевый песок - 97 %, машинное масло - 3 %, свойства: сцепление - 5 г/см<sup>2</sup>, угол внутреннего трения - 25°, плотность  $\gamma = 1,6$  г/см<sup>3</sup>)

№ пп	1	2	3	4	5	6	7	8
$\alpha$	63	63	63	63	55	55	55	55
$\Delta\alpha$	8	12	16	27	12	16	21	35
$\frac{R}{H}$	$\frac{102}{74}$	$\frac{67}{74}$	$\frac{30}{74}$	$\frac{22}{74}$	$\frac{102}{84}$	$\frac{67}{84}$	$\frac{30}{84}$	$\frac{20}{84}$
$\nu$	0,20	0,22	0,21	0,21	0,22	0,23	0,23	0,22

Кривбасса, Верхнеднепровского ГМК и ряда других.

Характерная особенность современного этапа ведения горных работ на карьерах МГОКа состоит в проявлении комплекса взаимовлияющих факторов, определяющих горно-геологические условия разработки месторождения. Например, формирование Северного борта Грушевского карьера осуществляется в слабоустойчивых, переслабленных породах балки Грушевской в зоне влияния подземных горных работ. В этой связи, на основании проведенных исследований был предложен способ повышения устойчивости торцовых участков бортов карьеров в оползнеопасном районе. Дополнительный резерв для увеличения устойчивости торцов достигается за счёт уменьшения протяжённости уступов между рабочим бортом и отвалом, создания призмы упора из отвальных пород и сокращения времени стояния борта в непригруженном состоянии. Параметры нерабочего борта и призмы упора определены с учётом объёмного фактора.

В гораздо более благоприятных условиях устойчивости находится Южный борт карьера. Расчётами было установлено, что существует принципиальная возможность увеличения результирующего угла наклона борта карьера на 1-2°. Проведенный анализ показал, каким образом наиболее целесообразна реализация этой возможности. При этом, в качестве основополагающего использовался критерий обеспечения наиболее равномерного запаса проч-

ности по всем структурным элементам борта. В каждом из рекомендованных вариантов обеспечивается возможность дополнительного извлечения не менее 15 тыс. т марганцевой руды в год при уменьшении общего коэффициента вскрыши по карьеру. Кроме того, возможно уменьшение земельного отвода под карьер на 0,2 га/год.

Основываясь на установленных закономерностях напряжённо-го состояния массива, обоснованы основные параметры способа приконтурной выемки полезного ископаемого, основанного на идее кратковременной подработки борта на небольшом участке без нарушения общей его устойчивости, выемки на этом участке руды и последующей компенсации ослабления путём пригрузки борта вскрышными породами.

Определены аналитические взаимосвязи между длиной  $L$  и шириной  $A_n$  подработки борта

$$L = H_y \left( 2 - \frac{1}{B} \operatorname{arctg} \frac{A_n \sin^2 \alpha}{H - 0,5 A_n \sin 2\alpha} \right), \quad (12)$$

$$A_n = \sin^2 \alpha \operatorname{ctg} [B(2 - L/H_y)] + 0,5 \sin 2\alpha,$$

$$B = \frac{2 \operatorname{tg} \beta}{3 \cos \beta} \frac{k_\sigma(v, \alpha_y)}{(1 + 0,5 \operatorname{ctg} \alpha_y)(\eta \operatorname{ctg} \varphi + \operatorname{tg} \beta)},$$

где

$H_y, \alpha_y$  - высота и угол откоса уступа;  
 $k_\sigma$  - коэффициент влияния объёмного фактора.

Выражения (12) определяют максимально допустимые параметры  $A_n, L$ , при которых устойчивость обнажения может сохраняться за счёт действия объёмного фактора без пригрузки подработанного участка вскрышными породами.

Установлено, что при выборе параметров приторцовой выемки необходимо различать четыре различные технологические ситуации, определяемые значением длины подработки. Практическое использование полученных результатов позволило повысить точность расчётов, их соответствие меняющимся горно-техни-

ческими условиями и эффективность реализации способа.

К настоящему времени применение способа на Марганецком ГОКе позволило извлечь дополнительно более 300 тыс. т ранее безвозвратно теряемой высококачественной марганцевой руды.

Результаты диссертационной работы использованы и при обосновании технологии разработки крутопадающих месторождений с внутренним отвалообразованием. Наряду со многими технологическими аспектами, присущими этой технологии, существует один немаловажный геомеханический аспект, связанный с существенным положительным влиянием фактора объёмности на условия устойчивости бортов карьера. В результате проведенного теоретического анализа оценена степень этого влияния на глубину карьера. Определено, что предельная глубина карьера, до которой объёмный фактор компенсирует ухудшение устойчивости с глубиной, определяется из выражения

$$H_{max} = H_0 \left( \frac{1}{2} + \chi + \sqrt{\left(\frac{1}{2} + \chi\right)^2 - \chi b / H_0} \right), \quad (13)$$

где 
$$\chi = \frac{\operatorname{tg} \beta}{3 \cos \beta} \frac{k_{\sigma}(\nu, \alpha, \theta)}{(\eta - \operatorname{ctg} \varphi_c \operatorname{tg} \beta)},$$

$H_0$  - первоначальная глубина карьера;

$b$  - протяжённость карьера по дну.

Проведенный анализ показал, что при наиболее реальных значениях определяющих параметров значение отношения  $H_{max}/H_0$  составляет 1,1 - 1,5.

Таким образом, определение предельных параметров карьера необходимо производить на основе решения пространственной задачи. Учёт полученного результата на практике позволит существенно повысить эффективность использования данной технологии на глубоких карьерах.

Анализ, проведенный для условий Кривбасса, позволил установить, что приращение углов наклона бортов за счёт влияния объёмного фактора при соответствующих параметрах карьера может достигать  $10^{\circ}$ .

Таким образом, использование закономерностей пространственного напряжённого состояния горного массива открывает

широкие перспективы для повышения эффективности технологических решений.

Открытая разработка месторождений карьером предусматривает, как правило, выемку вскрышных пород по объёму во много раз превышающем объём добываемого полезного ископаемого. Это предопределяет значительные затраты на производство вскрышных работ и отчуждение больших площадей земли под отвалы, что оказывает отрицательное влияние на окружающую среду. В этой связи, в работе выполнено геомеханическое обоснование безвскрышного способа разработки крутопадающих месторождений на примере отработки кимберлитовых трубок месторождения им. Ломоносова (Архангельская область). Обоснована принципиальная возможность его реализации, определены основные параметры крепления выработки диаметром 300 м и глубиной 500 м. Проведенные исследования показали, что в настоящее время не существует достаточно универсальной методики расчёта крепи вертикальных стволов, тем более, что имеет место следующий парадокс. Ряд известных в литературе методов расчёта давления на крепь ствола даёт расчётную нагрузку, отличную от нуля, и в случае, когда устойчивость будет обеспечена и без крепления выработки.

В этой связи, автором предложено аналитическое выражение для определения давления  $P$  на крепь вертикальных стволов с учётом того обстоятельства, что выработка может сохранять устойчивость и без крепления

$$P = \begin{cases} \gamma_H \frac{\eta_H - \Delta\eta_{об} - 2 \left[ \frac{2c}{\gamma_H} \operatorname{ctg} \delta \left( 1 + \frac{2c}{\gamma_H} \operatorname{ctg} \delta \right) \right]^{1/2}}{2\eta_H - \Delta\eta_{об} + \operatorname{tg} \delta \left( 1 + \frac{\gamma_H \operatorname{tg} \delta}{2c} \right)^{1/2}}, & (14) \\ 0 & \text{при } 2\eta_H + \Delta\eta_{об} \geq \eta_H, \end{cases}$$

где  $\Delta\eta_{об}$  - приращение устойчивости за счёт влияния объёмного фактора (определяется из выражения (3)).

Величина  $P$  является сложной функцией переменных  $\eta_H, c, \delta, \gamma, H, R, \nu$ . Этот набор переменных является более полным, чем в традиционно используемых расчётных выражениях для определения величины  $P$ .

Проведенный в работе комплекс численно-аналитических

исследований явился теоретической основой для разработки способов оценки изменения состояния массива в процессе осуществления целенаправленных технологических воздействий, а также определения степени эффективности воздействия и возможных направлений оптимизации параметров воздействия.

В плане развития теоретических положений управления состоянием горного массива разработаны методы оценки влияния технологических воздействий на состояние массива. Для оценки изменения состояния массива при изменении его геометрических параметров и прочностных характеристик рекомендуется использовать установленные в диссертации аналитические выражения

$$\Delta\eta(\Delta\alpha, \Delta H, \Delta S, \Delta C) = -\frac{\Delta\alpha}{2}(\eta \operatorname{ctg}\varphi_c + \operatorname{tg}S) - \frac{\Delta H}{H + \Delta H} \times$$

$$(\eta - \operatorname{ctg}\varphi_c \operatorname{tg}S) + \left\{ \eta + \frac{\Delta C}{C_0}(\eta - \operatorname{tg}S_0 \operatorname{ctg}\varphi_c) + \operatorname{ctg}\varphi_c \times \right. \quad (15)$$

$$\left. [\operatorname{tg}S - \operatorname{tg}S_0] \left(1 - \frac{\Delta S}{2} \operatorname{ctg}\varphi_c\right) - \frac{\Delta S}{2} \operatorname{tg}S - \eta \right\}$$

Таким образом, влияние технологического воздействия на массив посредством изменения геометрических параметров отко-сов, прочностных показателей пород и напряженного состояния массива может быть оценено по выражению

$$\eta + \Delta\eta(\Delta S, \Delta C) + \Delta\eta(\Delta\alpha, \Delta H) + \Delta\eta(\Delta\sigma) = \eta \left\{ \begin{array}{l} \leq \\ \geq \end{array} \right\} \eta^* \quad (16)$$

где  $\eta, \eta_1$  - показатели начального и конечного состояния массива, соответственно;  
 $\eta^*$  - показатель, характеризующий требуемое состояние массива, достигаемое технологическим воздействием. Очевидно, значение  $\eta^*$  может быть меньше I при переводе массива в неустойчивое состояние, равняться I при управлении массивом в состоянии предельного равновесия и равняться нормативному значению коэффициента запаса устойчивости  $\eta_H$  при переводе массива в устойчивое состояние. По близости значений  $\eta_1$  и  $\eta^*$  возможно судить об эффективности данного технологического воздействия.

Выражения (15) могут быть также непосредственно использованы и при оценке погрешностей в определении коэффициента запаса устойчивости за счёт вариации геометрических параметров и прочностных характеристик массива.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации разработаны и обоснованы новые теоретические положения расчёта напряжённого состояния, устойчивости, рациональных конструктивных параметров и формы уступов и бортов карьеров, являющиеся значительным достижением в области геомеханики, управления состоянием горного массива и рационального природопользования при открытых горных работах, включающие развитие и совершенствование численно-аналитических методов расчёта устойчивости и параметров откосов, закономерности пространственного напряжённого состояния массива, методы оценки изменения состояния горного массива в процессе осуществления технологического воздействия и методику решения объёмных задач устойчивости откосов, геомеханическое обоснование нетрадиционных и малоотходных ресурсосберегающих технологий и способов открытой разработки месторождений. Разработанные положения позволили осуществить комплексный и научно-обоснованный подход к постановке и решению целого ряда научно-практических задач рационализации параметров открытых горных выработок на основе применения методов геомеханики и обеспечить повышение эффективности открытой разработки месторождений с учётом требований рационального природопользования. Практическая реализация результатов диссертационной работы обеспечивает: повышение устойчивости открытых горных выработок и снижение вероятности оползневых явлений бортов, наносимого ими ущерба; увеличение результирующих углов откосов и уменьшение изъятия под горный отвод остродефицитных земельных ресурсов; уменьшение объёмов вскрышных и отвальных работ за счёт выбора рациональных параметров карьерных массивов, затрат на их производство; уменьшение изъятия земель под отвалы; снижение отрицательного влияния открытых горных работ на окружающую природную среду.

Основные научные и практические результаты, полученные

автором, заключаются в следующем:

1. На базе основных положений механики горных пород и теории упругости с привлечением аппарата математического анализа в результате выполненных теоретических и экспериментальных исследований установлены закономерности пространственного напряжённого состояния и устойчивости открытых горных выработок. Аналитически описано изменение напряжённого состояния и устойчивости массива при переходе от плоской к объёмной задаче и выявлено влияние объёмного фактора на геометрические параметры открытых горных выработок, а также разработаны и обоснованы расчётные критерии оценки устойчивости в условиях объёмного деформирования. Установлено, что в большинстве случаев определяющим параметром, характеризующим фактор объёмности, является отношение  $I_1 / \tau_{max}$ .

2. На основании полученных аналитических зависимостей разработана методика решения объёмных задач устойчивости откосов, учитывающая реальную конфигурацию борта карьера. Исследованы и определены условия, при которых влияние фактора объёмности на возможность корректировки геометрических параметров бортов карьеров наиболее существенно. Установлено, что относительные величины поправки к углам откосов могут составлять 20-25 %.

3. Разработана методика расчёта пространственного напряжённого состояния горного массива, основанная на методе конечных элементов и позволяющая существенно расширить возможности численной реализации больших объёмных моделей и определены условия, при которых обеспечивается достоверность получаемых численных результатов. Показано, что реализованная методика с большой эффективностью может быть использована для сопоставительного анализа напряжённого состояния в геомеханических моделях, что является весьма актуальным при оценке влияния технологических воздействий на состояние массива и его параметры.

4. На основе разработки и совершенствования методов расчёта устойчивости откосов предложен общий аналитический подход к оценке влияния технологических воздействий на массив и развиты теоретические положения управления состоянием массивов при открытой разработке месторождений. Качест-

венно степень эффективности технологических воздействий на массив целесообразно характеризовать степенью изменения неравномерности поля напряжений, а количественно - величиной изменения запаса прочности массива.

Установлены аналитические зависимости, описывающие изменение состояния массива при изменении его геометрии и поля напряжений. Определено, что при дифференциальном и интегральном подходах к вычислению предельной высоты вертикального обнажения откоса, получаемые величины отличаются в 2 раза.

5. Доказана принципиальная возможность постановки и численной реализации оптимизационных задач устойчивости для неоднородных бортов ступенчатого профиля. Получено аналитически точное решение оптимизационной задачи для однородного двухступенчатого борта. Показано, что степень рациональности конструкции целесообразно характеризовать среднеструктурным коэффициентом запаса прочности конструкции и отклонением от этой величины коэффициентов устойчивости всех структурных элементов борта. Доказано, что в общем случае невозможно построить оптимальную конструкцию борта карьера, отвечающую одновременно критерию максимального результирующего угла откоса и минимума объемов вскрышных работ по формированию борта.

6. Доказаны большие возможности приложения методов геомеханики для рационализации открытых горных работ и даны конкретные примеры применения проведенных геомеханических исследований для обоснования нетрадиционных и ресурсосберегающих технологий открытой разработки месторождений. В процессе проведения этих исследований аналитически описаны основные параметры способа приторцовой выемки полезного ископаемого, основанного на эффекте объемного напряженного состояния. Установлено, что значение устойчивой глубины карьера, определенное с учётом влияния фактора объёмности, может превосходить эту величину, определенную без учёта этого влияния в 1,1 - 1,5 раза. Показана особая значимость данного вывода при обосновании параметров разработки крутопадающих месторождений с внутренним отвалообразованием. Выполнено геомеханическое обоснование безвскрышного способа разработки месторождений на примере отработки кимберлитовых трубок и пока-

зана принципиальная возможность его реализации. Попутно аналитически доказано, что в прочих горных породах вертикальная круговая выработка малого радиуса может сохранять свою интегральную устойчивость без крепления до очень больших глубин, на порядок и более превышающих величину  $H_{90}$ . В этой связи предложены аналитические выражения для определения давления на крепь вертикальных стволов, учитывающие положительное влияние фактора объёмности.

Разработан общий подход к оценке влияния технологических воздействий на массив в процессе управления его состоянием и приведены конкретные примеры расчёта рациональных параметров дополнительных полей напряжений.

7. Обоснованность и достоверность полученных результатов подтверждена проведенным комплексом теоретико-экспериментальных исследований, данными их практического использования на карьерах Украины. Результаты исследований использованы институтом "Кривбасспроект" при выполнении рабочего проекта вскрытия и разработки нижних горизонтов карьера ИнГЖКа (экономический эффект 860 тыс.руб.), Ингулецким ГОКом при разработке противооползневых мероприятий (экономический эффект 132 тыс.руб.), послужили теоретической основой для расчётов устойчивости и рационализации параметров бортов карьеров и отвалов Верхнеднепровского ГМК и Марганецкого ГОКа. Пакеты прикладных программ по расчёту устойчивости откосов в составе программного обеспечения по планированию горных работ с учётом требований рационального природопользования внедрены на ВДГМК.

На МГЖКе внедрены способ повышения устойчивости торцовых уступов бортов карьеров (фактический экономический эффект за 1987-1988 г.г. составил 328 тыс.руб.) и предложения по совершенствованию конструкции южного борта Грушевского карьера (фактический экономический эффект от внедрения предложений за 1992 г. составил свыше 2 млн.крб., в 1993 г. - более 900млн.крб.).

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Применение метода конечных элементов для оценки устойчивости откосов горных пород // Совершенствование технологии и организации производства при добыче угля. - М.,

- 1983, - С. 125-126.
2. Реализация объёмной модели борта карьера на ЭВМ / ИГТМ АН УССР. - Днепропетровск, 1985. - 7 с. - Деп. в ВИНТИ № 7456.
  3. Оценка влияния объёмного фактора на напряжённое состояние и устойчивость горного массива / ИГТМ АН УССР. - Днепропетровск, 1985. - 13 с. - Деп. в ВИНТИ № 7457.
  4. Влияние объёмного фактора на напряжённое состояние бортов карьеров и возможности нетрадиционных технологических решений // ФТППИ. - 1986. - № 1. - С. 37-43 (Соавт. Шапарь А.Г., Хазан В.Б.).
  5. Оценка устойчивости уступов и бортов карьеров при изменении напряжённого состояния горного массива / ИГТМ АН УССР, - Днепропетровск, 1988. - 12 с. Деп. в ВИНТИ № 6773.
  6. О влиянии физико-механических свойств горных пород на состояние и устойчивость массива при открытой разработке / Сб. науч.тр.: Разрушение горных пород. - Киев, 1988. - С. 73-77 (Соавт. Шапарь А.Г., Хазан В.Б.).
  7. Экспериментальное моделирование пространственного напряжённого состояния бортов карьеров / Изв.ВУЗов Горный журнал, - Свердловск, 1988. - № 8. - С. 25-30. (Соавт. Шапарь А.Г., Хазан В.Б., Новожилов С.М.).
  8. Расчёт устойчивости откосов методом алгебраического сложения сил // Основания, фундаменты и механика грунтов. - 1988. - № 4. - С. 23-25. (Соавт. Шапарь А.Г., Хазан В.Б., Мизюмский Д.В.).
  9. Оценка погрешности одного способа расчёта устойчивости откосов / ИГТМ АН УССР. - Днепропетровск, 1988. - 8 с. Деп. в ВИНТИ № 1720. (Соавт. Ткаченко И.В.).
  10. Управление состоянием массивов на открытых разработках / Киев: Наук.думка, 1988. - 248 с. (Соавт. Шапарь А.Г., Копач П.И., Краснопольский И.А.).
  11. Оценка устойчивости круговых в плане выемок с учётом напряжённого состояния горного массива / ИГТМ АН УССР. - Днепропетровск, 1989. - 7 с. - Деп. в ВИНТИ № 1335; (Соавт. Панин К.В.).
  12. Расчёт устойчивости круговых в плане карьеров с исполь-

- зованием метода конечных элементов // Сб. науч. тр.: Вопросы прочности и пластичности. - Днепропетровск, ДГУ, 1969. - С. 107-112.
13. Развитие гипотезы возникающих напряжений на случай пространственного деформирования горных пород / ОППФ ИГиМ АН УССР. - Днепропетровск, 1991. - 9 с. Деп. в ВИНИТИ № 518 (Соавт. Шапарь А.Г., Усаченко Б.М.).
14. Геомеханические аспекты расчёта устойчивости откосов и склонов на основе данных о пространственном напряженном состоянии горного массива // Механика горных склонов, откосов и подземных сооружений. Фрунзе, 1991. - С. 134-139.
15. К вопросу о взаимодействии статических и динамических полей напряжений в породах с различными свойствами / Повышение эффективности разрушения горных пород: Сб. науч. тр. / ИГиМ АН Украины. - Киев: Наук. думка, 1991. - С. 18-24. (Соавт. Краснопольский И.А.).
16. Способ совершенствования конструктивных параметров бортов карьеров и отвалов / ИПЭ АН Украины. - Днепропетровск, 1992. - 7 с. - Деп. в УкрИНТЭИ № 761. (Соавт. Шапарь А.Г., Кириченко Г.А., Надточенко Н.М.).
17. Пути совершенствования конструктивных параметров бортов карьеров с мягкими покрывающими породами / ИПЭ АН Украины. - Днепропетровск, Препринт 92-1. - 11 с. (Соавт. Шапарь А.Г., Кириченко Г.А., Надточенко Н.М.).
18. Совершенствование конструктивных параметров карьерных массивов для повышения эффективности землепользования в сложных горно-геологических условиях // В кн. Теория и практика решений экологических проблем в горнодобывающей и металлургической промышленности. - Днепропетровск, 1993. - С. 25 (Соавт. Барсуков И.М.).
19. Совершенствование планирования горных работ на карьерах ВДГМ на базе ПЭМ с учётом требований рационального природопользования / ИПЭ АН Украины. - Днепропетровск, 1992. - 12 с. Деп. в УкрИНТЭИ № 180 (Соавт. Лелюхина Е.В., Делова Е.Ю.).
20. Геомеханические аспекты рационализации открытой разработки месторождений / ИПЭ АН Украины. - Днепропетровск, Препринт, 1993. - 10 с.

21. Задачи геомеханики при обосновании ресурсосберегающих технологических решений открытой разработки месторождений / В кн. Теория и практика решений экологических проблем в горнодобывающей и металлургической промышленности. - Днепропетровск, 1993. - С. 24.
22. Возможности нетрадиционных геотехнологических решений по снижению землеемкости открытых горных работ / ИПЭ АН Украины. - Днепропетровск, 1993. - 15 с. Деп. в УкрИНТЭИ № 1069 .
23. Геомеханические вопросы разработки ресурсосберегающих технологий открытых горных работ / ИПЭ АН Украины . - Днепропетровск, 1993. - 11 с. Деп. в УкрИНТЭИ № 1070.
24. Геомеханическое обеспечение задач экологизации открытых горных работ / Проблемы промышленной экологии и безопасности: Матер. конференции. - Москва, 1993. - С. 46.
25. Геомеханические направления экологизации открытых горных работ / Матер. X Междунар. конф. по механике горных пород. - Москва, 1993. - С. 122-123. (Соавт. Шапарь А.Г.)
26. Геомеханическая оптимизация геометрических параметров открытых горных выработок / Горный журнал, 1993. - № 7.- С. 12-13 (Соавт. Шапарь А.Г., Налточенко Н.М., Кириченко Г.А.).
27. А.С. 1507970, СССР, МКИ Е 21С 39/00. Способ определения прочностных свойств горных пород / Ю.М.Николашин, В.Б.Хазан, С.З.Полищук (СССР). - № 4344174/24-03, Заявлено 17.12.87; Опубл. 15.09.89. Всл. № 34 // Открытия. Изобретения. - 1989. - № 34. - С. 125.

Всего по теме диссертации опубликовано 33 работы.



Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве: (4, 7 8, 9, 10, 11, 16, 17, 26) - постановка и решение задач, разработки методики исследований, анализ результатов; (6, 12, 15, 18, 19, 25) - обработка научных данных, решение задач, анализ результатов решений; (27) - разработка существенных признаков изобретения.

#### ANNOTATION

Polischuk S.Z. Development of theoretikal fundamentals on calculation of stability and rational parameters for the degree of doctor of technical sciences in speciality 05.15.11 "Physical processes in mining". Institute of Problems on Nature Management & Ecology, National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipropetrovsk, 1994.

The theoretical concepts on calculation of stressed state, stability, rational constructive parameters and form of surface mine benches and waelis are defended. Complex geomechanical approach to problem solution on parameter rationalization for surface mining workings was substantiated and realized. Numerical-analytical methods on bench stability calculation were developed, regularities of volumetric stressed massiv's state were described, geomechanical substantiation for resource-saving technological solutions is given. The dissertation results are implemented at Marganetsky and Inguletsky mining-and-processing integrated works, Verkhnedneprovsky state mining-and-metallurgical integrated works. The actual economic efficiency due to recommendations utilization at Grushevsky surface mine of Marganetsky state mining-and-processing integrated works in 1993 formed about 1 mlrd. krb.

33 scientific works are published, 1 monograph and author's certificate included.

- 35 -

## АННОТАЦИЯ

Полищук С.З. Развитие теоретических основ расчёта устойчивости и рациональных параметров открытых горных выработок. Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 05.15.11. "Физические процессы горного производства", Институт проблем природопользования и экологии НАН Украины, Днепропетровск, 1994.

Защищаются теоретические положения расчёта напряженного состояния, устойчивости, рациональных конструктивных параметров и формы уступов и бортов карьеров. Обоснован и реализован комплексный геомеханический подход к решению задач рационализации параметров открытых горных выработок. Развита численно-аналитические методы расчёта устойчивости откосов, описаны закономерности объёмного напряженного состояния массива, дано геомеханическое обоснование ресурсосберегающих технологических решений. Результаты диссертации внедрены на Марганецком и Ингулецком ГТЦКах, Верхнеднепровском ГТМКе. Фактический экономический эффект от использования рекомендаций на Грушевском карьере МТГЦКа в 1993 году составил около 1 млрд. карбованцев. Опубликовано 33 научных труда, в т.ч. 1 монография и 1 авторское свидетельство.

**Ключеві слова:** відкритий виробіток, борт кар'єру, стійкість, напружений стан, показники міцності, об'ємний фактор, оптимізація, ресурсозбереження, масив, управління станом.

#### АВТОРЕФЕРАТ

Відповідальний за випуск В. І. Плужник

Підписано до друку 04.11.94. Формат 60x84/16. Папір друкарський. Офсетний друк. Умовн. друк. арк. 2,09. Умовн. фарб.-відб. 2,09. Тираж 100. Замовлення N 537. Замовлене. Безкоштовно. Видавничо-поліграфічне орендне підприємство "Дніпро". ВПОП "Дніпро". 320070, м. Дніпропетровськ, вул. Серова, 7.



AB 31.463

**AB 31.463**