

622.271

Д 30 А. М. ДЕМИН О. И. ШУШКИНА

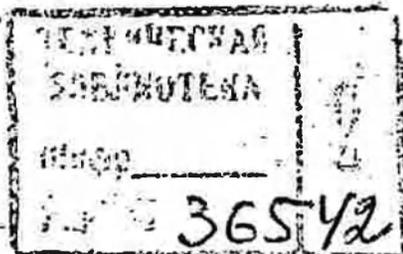
**НАПРЯЖЕННОЕ
СОСТОЯНИЕ
И УСТОЙЧИВОСТЬ
ОТВАЛОВ
В КАРЬЕРАХ**

20052

622.271
Д 30

А. М. ДЕМИН, О. И. ШУШКИНА

НАПРЯЖЕННОЕ
СОСТОЯНИЕ
И УСТОЙЧИВОСТЬ
ОТВАЛОВ В КАРЬЕРАХ



МОСКВА «НЕДРА» 1978

Демин А. М., Шушкина О. И. Напряженное состояние и устойчивость отвалов в карьерах. М., «Недра», 1978. 159 с.

В книге изложены материалы исследований устойчивости внутренних отвалов, сложенных из вскрышных пород разрезов Кузбасса. Исследования проведены комплексным методом — моделированием, натурными наблюдениями на разрезах и инженерными расчетами.

Моделированием определены закономерности распределения напряжений в приоткосной зоне, исследованы деформации отвалов в лабораторных и полевых условиях. Установлены критерии для определения вероятной поверхности разрушения и разработан способ ее построения.

На основе установленных закономерностей распределения напряжений в приоткосной зоне предложен способ расчета устойчивости выработок и отвалов.

В результате практического использования разработанной методики даны рекомендации по расширению области применения бестранспортной системы разработки на пластах с углом падения до $18-20^\circ$, по совершенствованию схем экскавации путем подрезки отвалов под углом $45-50^\circ$, по определению величин коэффициента запаса устойчивости для нагруженных отвалов, а также размеров охранных зон и берм безопасности.

Книга предназначена для работников проектных и научно-исследовательских институтов и для инженерно-технических работников карьеров.

Табл. 30, ил. 75, список лит. — 101 назв.

Д $\frac{30703-167}{013(01)-78}$ 126-78

© Издательство «Недра», 1978

ПРЕДИСЛОВИЕ

Проблема оценки устойчивости откосов открытых горных выработок и отвалов имеет как научное, так и практическое значение. Ее актуальность возрастает в связи с увеличением глубины карьеров, что требует создания уступов по возможности большей высоты и крутизны и размещения в отвалах значительных объемов вскрышных пород.

Для определения устойчивых параметров откосов уступов и отвалов используют методы моделирования и расчетные методы, причем в настоящее время применяют в основном последние. Анализ литературы показал, что развитие методов расчета устойчивости склонов и откосов имеет большую историю. Основы теории предельного равновесия сыпучей среды были заложены еще Кулоном более 200 лет тому назад. Им получена зависимость между касательными и нормальными напряжениями в грунте, что послужило началом многочисленных исследований в этом направлении. Первый способ расчета устойчивости откоса был предложен Франсэ [10]. Петерсоном (1916 г.) и Фелениусом (1926 г.) были разработаны способы расчета, с помощью которых можно оценить коэффициент запаса устойчивости при заданном положении поверхности разрушения круглоцилиндрической формы. Поворотным этапом явилось обоснованное Н. М. Герсевановым в 1934 г. предложение использовать для расчета деформаций и напряжений в грунтовой среде теорию упругости.

В 1942 г. В. В. Соколовский разработал точный метод расчета устойчивости откосов, основанный на теории предельного равновесия сыпучей среды. В дальнейшем большую актуальность приобрело решение смешанной задачи теории упругости и теории предельно напряженного состояния грунта.

Оценка методов расчета с учетом специфики открытых горных работ проводилась Г. Л. Фисенко, Ю. Н. Малушицким и др. В монографии А. М. Демина [22] дается подробная классификация существующих расчетных методов. Основные методические принципы оценки устойчивости откосов бортов карьеров и отвалов за рубежом изложены в работе [24].

Среди множества расчетных методов наибольшее предпочтение отдают широко известному методу предельно напряженного состояния, разработанному В. В. Соколовским и С. С. Голушкевичем [74, 17]. Однако этот метод очень трудоемок и, кроме того, рассматривает лишь откос неограниченной высоты. Несмотря на математическую строгость, область его применения в инженерных расчетах устойчивости отвалов ограничена.

Способы расчета устойчивых параметров отвалов в специфических условиях гористого рельефа и на пологих и наклонных пластах предлагали Ц. Х. Абегап, В. П. Грибков, Г. А. Григорян, В. Д. Иванов, В. В. Камшилов, И. И. Попов, Ю. Г. Скабичевский, К. Шуберт и другие исследователи.

Среди множества существующих способов построения поверхности разрушения и оценки устойчивости откосов выделяются две группы, в первой из которых поверхность разрушения определяется теоретически, во второй ведется случайный ее поиск методом подбора.

Анализ расчетных методов и способов построения поверхностей разрушения показал, что в настоящее время нет достаточно обоснованного и надежного способа оценки устойчивости отвалов на пологом и наклонном основании. Имеющиеся расчетные методы дают заниженные параметры отвалов, при которых применение бестранспортной системы разработки неэкономично.

В большинстве случаев не учитывается реальное напряженное состояние массивов горных пород. В то же время всесторонняя оценка устойчивости отвалов невозможна без анализа их напряженного состояния, а ни один из существующих многочисленных методов расчета не позволяет определить распределение напряжений в открытой горной выработке или отвале, поскольку установление характера распределения напряжений в откосах является сложной задачей, не решенной до сих пор. Даже в случае, если материал, из которого слагается откос, работает в пределах упругости, точное аналитическое решение известно лишь для бесконечного клина [13] или осесимметричной выемки [90].

Поскольку измерить напряжения непосредственно в массивах пород из-за отсутствия работоспособной аппаратуры в настоящее время практически не представляется возможным, для решения задач устойчивости открытых горных выработок и отвалов все большее

применение находит моделирование, позволяющее экспериментально получать картину распределения напряжений. Как показывает опыт советских и зарубежных исследователей, методы моделирования вполне оправданы и требуют дальнейшего совершенствования. При этом результаты моделирования должны сопоставляться с натурными исследованиями и проверяться теоретическими расчетами. Инженерное решение задачи о распределении напряжений вблизи откоса конечных размеров было получено впервые на основе моделирования [23].

Целью выполненной работы является изыскание возможностей повышения устойчивости отвалов и выработок на основе изучения их напряженного состояния. Для достижения поставленной цели нужно было решить следующие задачи: определить компоненты плоского поля напряжений вблизи откосов конечных размеров; установить закономерности их распределения в приоткосном массиве; разработать способ расчета устойчивости отвалов по напряжениям; проверить преимущества этого способа на решении ряда конкретных вопросов.

Основным методом было моделирование на оптически активном материале — игдантипе с тензосеткой, вспомогательным — моделирование на эпоксимале с замораживанием напряжений в поле центробежных сил и на агарине под действием силы тяжести модели. Для проверки полученных результатов использованы метод оптически активных материалов в его классическом виде, метод натуральных наблюдений и полевое моделирование.

Одним из главных практических приложений работы явилось обоснование возможности расширения области применения наиболее перспективной бестранспортной системы разработки пластов с углом падения свыше $10-12^\circ$. Эта проблема имеет большое экономическое значение в связи с наметившейся в последние годы тенденцией уменьшения удельного веса бестранспортной системы по угольным комбинатам на 6—9, а в отдельных случаях до 20% [40] из-за неблагоприятных инженерно-геологических условий.

Авторы выражают признательность профессорам Л. И. Барону, В. Ф. Трумбачеву и канд. геол.-минер. наук А. А. Шарню за советы при подготовке данной рукописи, а также благодарны проф. И. И. Попову за ценные замечания при ее рецензировании и В. С. Вагровскому за помощь в организации натуральных наблюдений.

1. МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

1.1. Основные понятия и определения

Главная задача, рассматриваемая в этом разделе, — исследование условий обеспечения устойчивости выработок и отвалов в течение необходимого времени. Она решается на основе изучения закономерностей напряженно-деформированного состояния ненарушенных и сыпучих сред, в которых проводятся горные выработки. Комплекс знаний об устойчивости выработок формируется как синтез ряда наук — соответствующих разделов геологии, механики, математики и горного дела. Поэтому здесь используются различные методы — как экспериментальные (моделирование, натурные наблюдения, определение свойств пород и массивов), так и теоретические.

Частными задачами при исследовании устойчивости открытых горных выработок и отвалов являются:

определение параметров систем разработки, обеспечивающих необходимую устойчивость выработок при минимально допустимых значениях коэффициентов запаса устойчивости;

установление областей эффективного применения горных машин.

Массив горных пород при разработке полезных ископаемых открытым способом представляет собой часть толщи, непосредственно примыкающей к горным выработкам или отвалам и находящейся в зоне их влияния. В ряде случаев на него воздействуют дополнительные внешние нагрузки (отвалы горных пород, горнотранспортное оборудование, взрывные работы). Следует различать массивы горных пород в естественном залегании и искусственно созданные — отвалы. Влияние угла откоса открытой выработки или отвала проявляется в некоторой зоне. Поскольку размеры этой зоны существенно зависят от угла откоса, целесообразно назвать ее зоной влияния откоса или приоткосной зоной. Внутренняя граница этой зоны отделяет основание от откоса.

Напряженное состояние и свойства пород в нетрону-

том массиве и в приоткосной зоне неодинаковы и зависят от параметров п срока существования выработки. В зоне влияния откоса создается особое напряженное состояние, характеризующееся возникновением очагов концентрации напряжений. В этой зоне располагается вероятная поверхность разрушения, объединяющая очаги концентрации напряжений.

Установление местоположения приоткосной зоны имеет большое значение для оценки устойчивости горных выработок и отвалов. В частности, зная расположение зоны влияния откоса на верхней площадке уступа, можно установить размеры охранной зоны.

Под деформацией открытой горной выработки (отвала) * будем понимать изменение первоначальной формы контура выработки в результате сдвижения прилегающих к ней пород. С точки зрения нарушения сплошности формы выработки эти деформации могут быть неразрывными и разрывными.

Основными причинами деформаций открытых горных выработок являются: несоответствие параметров выработок и напряженного состояния, обусловленного этими параметрами, — прочности пород в приоткосной зоне; уменьшение прочности пород в приоткосной зоне под влиянием увлажнения и разуплотнения или разупрочнения.

Горная выработка считается устойчивой, если разрывные деформации не возникают или не превышают допустимых, обеспечивающих ее нормальную эксплуатацию. Нарушение устойчивости выработки означает невозможность ее нормальной эксплуатации и наступает в тот момент, когда разрывные деформации возникают или превосходят допустимые. Эти деформации проявляются под действием силы тяжести. Кроме сил тяжести, на устойчивость выработок влияют нагрузки от горного и транспортного оборудования, а также от отвалов.

Нагруженным является уступ, на который действует внешняя нагрузка, расположенная на верхней площадке уступа в пределах зоны ее действия.

По ширине следует различать следующие нагрузки. Точечная, шириной в несколько сантиметров, например нагрузка от автосамосвала; ограниченной ширины, 3—

* Все определения, касающиеся горных выработок, применимы также к отвалам.

12 м, например нагрузка от экскаваторов, ж.-д. транспорта, и полубесконечная — более 12 м, например нагрузка от отвалов, располагающихся на бортах. Точечную нагрузку можно рассматривать как сосредоточенную, остальные — как распределенные.

Давление, возникающее в процессе работы оборудования, будем называть динамическим в отличие от статического, соответствующего нерабочему состоянию оборудования.

Коэффициент запаса устойчивости по теории К. Терцаги рассматривается как отношение суммы удерживающих к сумме сдвигающих сил или напряжений.

1.2. Устойчивость отвалов в карьерах

Из множества литературных источников, в которых рассматриваются вопросы устойчивости отвалов, лишь незначительная часть содержит сведения об условиях отвалообразования на косогорах и наклонных пластах.

Среди отечественных карьеров, где производилось отвалообразование на косогорах, можно назвать, к примеру, такие, как: «Агаракский», «Дашкесанский», «Каджаранский», «Алтын-Топканский», «Сорский» комбината «Апатит» и др. За рубежом отвалообразование в условиях гористого рельефа осуществлялось на рудниках «Бингам-Юта», «Уинстона Стиклер» (США), «Нчанга» — Южная Африка и др. Высота откосов достигает 250—600 м [43, 65].

Рассмотрением условий устойчивости отвалов на пологом и наклонном основании занимались многие исследователи. В частности, Ю. Г. Скабичевским и И. И. Поповым [73, 66] установлены предельные углы наклона пластов — 10—11°, при которых можно было применять бестранспортную систему на Богословских бурогольных разрезах, где почва пласта представлена обводненными глинистыми породами. В настоящее время бестранспортная система разработки проектируется и применяется на участках с углом падения пластов до 10—12°. Однако известны случаи устойчивости отвалов при прочном основании на пластах с углом падения более 12°: так, опыт работы разреза «Красногорский» (Кузбасс) показывает практическую возможность эффективной отработки по бестранспортной системе междупластной с углами падения до 14—16°, а в Канаде на

разрезах компании «Кайзер» бестранспортная система разработки в комбинации с другими используется при залегании пластов под углом до 25° [100].

На одном из карьеров в Чехословакии [99] была рассмотрена возможность создания отвалов на основании с углом наклона до 27° , представленном глинами и песчано-глинистыми породами мощностью 5-м. Графо-аналитическим способом и методом породных блоков (призм) исследована степень устойчивости одно- и двухъярусных отвалов высотой 40 м и доказана необходимость отсыпки предотвала высотой 15 м при ширине бермы безопасности 40 м. Однако эти расчеты произведены для рыхлых песчано-глинистых пород и основаны на анализе сил без учета напряженного состояния отвалов.

Вопрос о возможности размещения отвалов на наклонном основании до сих пор является спорным, и в литературе встречаются прямо противоположные точки зрения. К примеру, выполненные для разрезов Томусинского месторождения Кузбасса (КузНИУИ) расчеты предельных высот отвалов по способу В. В. Камшилова показали возможность отработки по бестранспортной системе вскрыши мощностью только 23—25 м при угле падения пласта 12° , так как высота отвала в данном случае не должна превышать 31 м. При таких параметрах отвалов нецелесообразно использование бестранспортной системы для разработки междупластий с углом падения более 12° .

Такой вывод имеется и в работе В. В. Камшилова [36], где автор, оценив устойчивость внутренних отвалов на наклонном основании, установил, что создание отвалов при углах наклона основания свыше $15\text{--}16^\circ$ нецелесообразно ни по условиям устойчивости, ни по технологическим соображениям, так как малая высота отвалов (6—12-м) не позволяет эффективно использовать оборудование.

Напротив, целесообразность создания внутренних отвалов при углах падения пластов до $18\text{--}20^\circ$ показана в работе А. И. Яковенко [95], который предложил применять систему нисходящих опорных подступов на всем протяжении нерабочего борта, имеющих определенную высоту и ширину горизонтальной площадки. Система опорных подступов нашла практическое применение, например на Коркинских разрезах по лежащему

Сову пласта с углом падения 25—27° оставлялись не отработанными восемь угольных уступов. Высота их достигала 10—12 м, ширина горизонтальных площадок — 20—25 м. Емкость внутренних отвалов составляла свыше 1 млн. м³, угол откоса не превышал 36°. Отвалы были устойчивы в течение 8 лет.

Максимальный угол падения пластов, при котором целесообразно внутреннее отвалообразование, А. И. Яковенко рекомендует устанавливать из экономического сравнения внешнего и внутреннего отвалообразования, а расчет устойчивости системы опорных подступов производить графическим способом, анализируя силы активного и пассивного давления.

Как уже отмечалось, предельным углом падения пластов, обрабатываемых по бестранспортной системе, в настоящее время является угол 12°. Для его увеличения рядом исследователей предлагались различные мероприятия. В частности, И. И. Попов рекомендовал создавать противооползневые перемычки, применение которых позволило применять бестранспортную систему разработки на участках с углом падения пластов до 15—16° [66]. Это мероприятие успешно осуществлялось при разработке Богословского месторождения. Создание упорной противооползневой дамбы позволило эффективно обработать Веселовское бурогольное месторождение, где происходило постоянное оползание внутренних отвалов по наклонному основанию (6—7°) и объем оползших масс в течение 8 лет достиг 10—12 млн. м³ [39].

Для предотвращения оползания внутренних отвалов оставляли предохранительные целики, но далеко не всегда это мероприятие было целесообразно. Известны случаи, когда целики раздавливались оползшими массами пород. Так, на Волчанском разрезе № 4 в условиях глубоких оползней подстилающих пород предохранительный целик с запасами более 270 тыс. т был разрушен, что привело к значительным потерям угля [71].

При обработке свиты пластов применение породных перемычек и целиков осложняет организацию добычных работ.

Очень часто для предупреждения оползней внутренних отвалов их высоту снижают за счет выемки части вскрыши передовым уступом по транспортной системе, что применялось, например, на Кимовском и Ушаков-

ском угольных разрезах Подмосковного бассейна: Однако такое мероприятие неэффективно, поскольку приводит к удорожанию вскрышных работ.

В практике, например, Уральских карьеров были случаи, когда поверхность, по которой происходили оползневые подвижки, взрывали. Иногда исследователи предлагали проводить инженерную подготовку основания отвалов — террасирование почвы пласта. В работе В. П. Грибкова [19] определены оптимальные параметры внутренних отвалов бурогоугольного разреза «Кумертауский» и целесообразные размеры террасирования основания отвалов. Аналитическими расчетами по способу Л. Н. Бернацкого и графоаналитическим способом касательных напряжений оценена степень влияния террасирования почвы пласта на устойчивость внутренних отвалов при специальном и обыкновенном предельном равновесии сыпучей отвальной среды, состоящей из песчано-глинистых и глинистых пород третичного и четвертичного возраста.

Сведения о подготовке основания отвалов взрывным способом и рекомендации общего характера по взрыванию почвы пласта для увеличения сил трения, препятствующих скольжению пород отвалов по контакту с основанием, можно найти в работах [11, 16]: Идея создания выемок в почве пласта при наклонном его залегании для повышения устойчивости отвалов предложена в 1963 г. В. С. Вагоровским применительно к разрезу «Красногорский». Однако эти мероприятия требуют соответствующего обоснования, основанного на экспериментальных и теоретических исследованиях.

В некоторых случаях во избежание выдавливания основания и нарушения устойчивости отвалов было рекомендовано предварительное осушение и уплотнение пород [99].

На необходимость осушения пород отвалов при наклонном основании как одну из мер, повышающих их устойчивость, указывали также М. Л. Рудаков, И. И. Попов и А. И. Ли [71]. Они предлагали производить срезку почвы пласта, устраивая при этом в основании отвала специальные пороги для укладки дренажных труб.

В зарубежной практике применялся разворот фронта работ под углом к простираанию как мероприятие, повышающее устойчивость откосов.

Для повышения эффективности бестранспортной системы разработки применяют подрезку* ярусов отвала. Впервые расчетное обоснование возможности частичной (на 25—30% от общей высоты яруса) подрезки внутреннего отвала под углом 50° было дано А. В. Пашкевичем [63] применительно к условиям Черемховского месторождения. В работе О. Ю. Крячко [42] для тех же условий обосновывается возможность частичной подрезки отвалов под углом $50—55^\circ$. Частичная подрезка отвалов широко применяется на Райчихинском бурогольном месторождении.

Практическая возможность полной подрезки нижнего яруса отвала на всю его высоту под углами, превышающими угол естественного откоса, доказана опытом работы разреза «Красногорский», где в последние годы для расширения области применения бестранспортной системы разработки и для увеличения емкости внутренних отвалов подрезают их нижние ярусы, однако теоретическое обоснование правомерности этого мероприятия отсутствует.

Проведенный анализ литературы по состоянию вопроса устойчивости отвалов показал, что, несмотря на большую важность проблемы устойчивости отвалов особенно на пологом и наклонном основании, у исследователей нет однозначного решения этого вопроса. Встречаются явно противоречивые мнения о целесообразности размещения отвалов на основании с углом наклона более 12° .

Рекомендуемые и применяемые мероприятия по повышению устойчивости отвалов (террасирование, выемки) и эффективности бестранспортной системы (подрезка ярусов отвала) не имеют надежного экспериментального и теоретического обоснования.

Обзор существующих методов, применяемых для расчетов параметров отвалов, показал, что методика оценки условий устойчивости отвалов на пологом и наклонном основании разработана в настоящее время недостаточно. Определенные по существующим способам

* Нами под подрезкой нижнего яруса отвала понимается формирование технологического угла откоса яруса, превышающего угол естественного откоса, в результате переэкскавации пород, перемещенных из вскрышного уступа в сторону отвала взрывом или экскаватором.

параметры отвалов явно занижены и не отвечают выдвинутым требованиям расширения области рационального применения бестранспортной системы разработки в условиях наклонного залегания пластов.

Кроме того, совершенно очевидно, что всесторонняя оценка устойчивости отвалов невозможна без анализа их напряженного состояния, что приводит к необходимости использовать экспериментальные методы исследования, и в первую очередь моделирование.

К лабораторным методам моделирования относят: поляризационно-оптический метод, метод тензометрической сетки, стереотензометрический метод, моделирование эквивалентными материалами, центробежное моделирование, метод электрогидродинамических аналогий и др. Натурное крупномасштабное моделирование осуществляют в полевых условиях. Полевыми методами исследований являются: натурные замеры, испытание грунтов штампами, пробными нагрузками, опорными плитами; методы разгрузки и восстановления давлений; геофизические, звукометрические и др.

В то время как способ моделирования процессов сдвижения горных пород, возникающих вследствие ведения подземных горных работ, развивается в последние 35—40 лет, моделирование деформаций откосов в карьерах применяется лишь в течение 18—20 лет. Первые работы были выполнены В. П. Запольским и Л. Р. Майминым [29] — центробежное моделирование, В. Т. Сапожниковым [72] — моделирование эквивалентными материалами и Чжу Жуй-гэном [92] — моделирование оптически активными и эквивалентными материалами, причем полностью все компоненты напряженного состояния не определялись, получали в основном значения максимального касательного напряжения τ_{\max} и изоклины.

Анализ литературы показал, что большинство работ по моделированию устойчивости открытых горных выработок посвящено изучению напряженного состояния ненарушенных массивов пород. Моделирование отвалов исследователи осуществляли сравнительно редко.

Породы отвалов моделировали в основном эквивалентными материалами на стендах и в центрифугах (работы Ц. Х. Абеяна, П. К. Чекалина, А. М. Демина, В. П. Запольского, Л. Р. Маймина, Ю. Н. Малюшицкого, Л. П. Загоруйко).

Для изучения распределения напряжений в насыпной массе многие исследователи стремятся использовать поляризационно-оптический метод. Известны попытки проводить исследование напряжений в теле насыпной плотины. Так; в Японии К. Акаи [97] использовал оптический метод при изучении вопроса о распределении напряжений в земляной насыпи и ее основании. В качестве оптически активного материала служил фенолит.

Метод фотоупругости для измерения напряжений в земляных массах использовал также Мурояма и др. [58]. Для этого в сухую песчаную массу было помещено большое число очень малых полых цилиндрических образцов (зондов) из оптически чувствительного материала. Напряжения после нагружения песчаной насыпи замораживали, а затем измеряли на поляризационно-оптической установке. Результаты замеров подтверждены теоретическими расчетами напряжений по формулам Буссинеска и Фрелиха. Эти результаты отличались от расчетных на некоторую постоянную величину:

Предложенный метод в отличие от обычных методов позволяет получать величины и направления главных напряжений в сухой песчаной насыпи, очень близкие к реальным.

Представляют интерес попытки определения напряжений в массиве, подверженном обрушению, с помощью гранулированных материалов, предпринятые Дж. Геерстма [14].

Для этих целей использованы пластмассовые стержни, расположенные между двумя параллельными прозрачными стенками из perspexa. Нагрузку прикладывали сбоку и сверху или снизу. Был снят кинофильм, с помощью которого пытались наблюдать как концентрацию напряжений, так и поле смещений, для чего использован метод фотоупругости. Концентрация напряжений обнаруживалась в виде освещенных мест, интенсивность свечения которых зависела от расположения стержней относительно направления нагрузки и от ее величины.

Этот метод развит слабо, недостаточно обоснован и в настоящее время нет законченной теории определения деформаций в массиве рыхлых горных пород, подверженных обрушению, даже для плоской задачи.

Т. Г. Яковлева [96]) провела исследования устойчивости железнодорожных насыпей с помощью центробежного метода. В. М. Тубольцевым и А. Н. Шаниной [84]

на плоских моделях из эпоксимала при нагружении их в центрифуге исследовано распределение напряжений в насыпи от действия сил собственного веса.

Применение метода фотоупругости при изучении напряжений в плотинах из грунта и камня, крупнообломочного и местного материала описано в работах [10, 44, 81] и др.

В частности, В. И. Титова [81] провела эксперименты по определению напряженного состояния плотин из местных материалов методом фотоупругости на моделях из пгдантина. Она рассмотрела также методику пересчета напряжений для ряда величин напора на плотину и объемных масс материалов при условии подобия формы ядра и боковых призм.

Метод фотоупругости для определения параметров устойчивости открытых горных выработок использовали С. Н. Никитин, В. Д. Морозов, Н. Б. Темникова [59], Я. Д. Аленькин [3] и др.

Круг решаемых задач существенно расширяется при использовании поляризационно-оптического метода совместно с центробежным моделированием.

Анализ литературы показал, что используемые методы моделирования (метод эквивалентных материалов и центробежное моделирование) не дают картины распределения напряжений в отвалах. В этой связи заслуживает внимание возможность применения фотоупругих моделей для анализа напряженного состояния сыпучих сред — земляных насыпей и камнепобросных плотин, доказанная рядом исследователей.

1.3. Способы и методика моделирования

Наиболее распространенным среди лабораторных методов моделирования напряженного состояния откосов открытых горных выработок является поляризационно-оптический метод. Основанный на законах фотоупругости, он позволяет определить характер распределения напряжений в массивах горных пород под влиянием горных выработок. Пользуясь этим простым и универсальным методом, на моделях из оптически активных материалов можно получить картину распределения напряжений в однородных и квазиоднородных породах, выявить положение зон наибольшей концентрации напряжений и потенциальных поверхностей разрушения,

изучить общую картину деформаций массива, проследить характер разрушения материала, измерить величины деформаций и углов наклона векторов смещения для любой точки массива, имеющего разнообразное строение.

Целесообразность применения оптического метода в инженерной геологии и горном деле обусловлена еще и тем обстоятельством, что по результатам исследований можно достаточно точно оценивать устойчивость естественных склонов и инженерных сооружений, в том числе откосов открытых горных выработок, чего нельзя сказать о существующих многочисленных расчетных методах, базирующихся на ряде порой необоснованных допущений. В процессе исследований установлено, что во многих случаях с помощью поляризационно-оптического метода можно получить не только качественную, но и количественную оценку поля напряжений, что имеет большое значение при выборе расчетной схемы определения устойчивых параметров откосов.

Правомерность применения метода фотоупругости для моделирования напряженного состояния вблизи откосов обосновывается следующими соображениями.

Во-первых, решение задач устойчивости откосов методами теории предельного равновесия [17, 74] показало, что приоткосный массив может находиться под действием собственного веса в упругом и предельном напряженном состояниях. Высота уступа, находящегося в упругом состоянии, соответствует высоте вертикального откоса и вычисляется по известной формуле $H_{90} = \sigma_{сж} / \gamma$. Как показали расчеты, глубины массивов, находящихся в упругом состоянии, в зависимости от физико-механических свойств пород изменяются от 6—12 до 50—300 м и более. Таким образом, несомненна возможность применения метода фотоупругости для уступов, а в скальных породах — для бортов карьера.

Во-вторых, на основании имеющихся данных КузНИУИ о гранулометрическом составе скальных пород отвалов в табл. 1 приводятся относительные ошибки в определении напряжений на моделях из оптически активных материалов в процентах, вычисленные с учетом критерия Ф. Р. Ясинского по формуле [81].

$$\Delta = 100 \sqrt{\frac{r}{L}}, \quad (1.1)$$

где r — размеры частиц, мм; L — длина откоса яруса отвала, мм.

Таким образом, ошибки измерений, связанные с неоднородностью гранулометрического состава отвалов, в среднем составляли 8% и не превышали 14%, т. е. размеров погрешностей, связанных с определением физико-механических свойств пород.

Таблица 1

Относительные ошибки для высот ярусов отвала 30—32 м при угле откоса 35°, %	Фракции, мм
1,3—1,4	10
6,7—7,1	250
7,4—7,7	300
9,5—10,0	500
13,4—14,2	1000

— Наконец, для предельных случаев может быть использовано положение, разработанное Ж. С. Ержановым для незакрепленных подземных выработок, который показал, что во времени меняются свойства пород, а не напряженное состояние.

Как известно; поляризационно-оптический метод, основанный на эффекте Брюстера, позволяет довольно просто определить величины максимальных касательных напряжений; нахождение же основных компонентов напряжений производится довольно трудоемкими вычислениями. Кроме того, при моделировании устойчивости открытых горных выработок нагрузки от собственного веса материала обычно недостаточны для четкого выявления картины поля напряжений и, как показали опыты А. А. Шария, проведенные в МГУ им. М. В. Ломоносова, за время, в течение которого ведутся измерения (обычно 2—3 дня), в материале модели развиваются деформации, превышающие предел упругости. При этом величина ползучести обратно пропорциональна модулю упругости материала.

В этой связи весьма перспективным является метод тензометрической сетки (Н. С. Розанов) [70], основанный на законе Гука и условии Митчела-Леви. Этот метод позволяет определить величины вертикальных, горизонтальных и касательных напряжений.

По данному методу определяют также деформации элементов сетки, нанесенной на поверхность модели из податливых материалов, и затем соответствующие им напряжения. Причем можно решать как плоские, так и объемные задачи. Наиболее удобной является сетка с квадратными ячейками.

Метод тензометрической сетки отличается простотой, наглядностью проведения опытов, не требует громоздкого и сложного оборудования. Но самое главное его достоинство состоит в том, что получаемые результаты не зависят от предыдущих определений, а это особенно важно для исследования неоднородных моделей.

Ряд исследователей методом тензосетки определял напряженное состояние естественных склонов, а также откосов правильной геометрической формы [23, 33]. Кроме того, его применяли при изучении напряжений в гидротехнических сооружениях, в частности по данному методу исследовали арочные плотины ГЭС Наглу, Нурекской и др.

Большие исследования по усовершенствованию метода тензометрической сетки выполнены А. А. Шарием [93].

В работах [35, 30, 32] и других использован метод тензометрической сетки совместно с поляризационно-оптическим методом, что значительно ускорило проведение опытов и повысило точность результатов. В этом случае методом тензосетки определены величины вертикальных и горизонтальных напряжений, а поляризационно-оптическим — касательные напряжения.

Разновидностью метода тензометрической сетки является стереотензометрический метод изучения деформаций на моделях из оптически активных материалов (А. А. Махорин, Б. М. Фаминцин), который позволяет с помощью круговых ячеек замерить на стереокомпараторе оси эллипса деформаций при бинокулярном сопоставлении фотоснимков исходной и деформированной модели. Стереотензометрическим методом изучено на модели из гипса напряженное состояние естественного склона долины р. Ингури [50]. Однако этот метод имеет пока ограниченное применение из-за отсутствия специальной аппаратуры.

Для моделирования массивов горных пород обычно применяют низкомолекулярные оптически чувствительные материалы, проявляющие под действием сил тяжести

достаточно высокий эффект двойного лучепреломления (при методе фотоупругости) или достаточно большие деформации модели (при методах тензо- и стереотензо-сетки). К ним относятся материалы на основе желатина (игдантин, тугорин), агар-агара (агарин), студни ацетилцеллюлозы в бензиловом спирте, полиэфирстирольный материал и эпоксиэпели [79, 31, 34, 46, 62, 75, 83].

Оптически активные материалы должны удовлетворять многим требованиям. Основные из них следующие: прозрачность, оптическая однородность и изотропность; высокая оптическая чувствительность; отсутствие начальных напряжений; достаточная жесткость; отсутствие заметной ползучести; линейная зависимость между напряжениями, деформациями и разностью хода лучей; подобие физико-механическим характеристикам пород (объемная масса, модуль упругости и др.), а также равенство относительных деформаций и коэффициентов Пуассона; возможность изменения модуля деформации в широких пределах для моделирования скальных пород с высоким модулем упругости; возможность механической обработки и изготовления моделей; малая стоимость и многократное использование.

Исходя из этих требований, а также учитывая то, что теория линейно-деформируемых тел, согласно выводам В. И. Титовой [81], основанном на расчетах Н. М. Герсеванова и Д. Е. Польшина, с достаточной точностью может быть применена для определения напряжений в раздельнозернистых породах, авторами при моделировании отвалов были использованы низкокомодульные материалы — игдантин и агарин и высококомодульные — эпоксимал. Ни один из известных материалов, кроме самих пород, (как отмечали Г. Н. Кузнецов, А. Т. Назаров и др.), не в состоянии удовлетворить необходимому в моделировании комплексу критериев подобия, а поэтому модели всегда изготавливаются лишь с частичным подобием; и до сих пор не установлено, насколько выполнение некоторых условий в конечном счете повлияет на результаты эксперимента.

К преимуществам выбранных материалов относится, например, то, что игдантин, обладая высокой оптической активностью, не требует больших затрат на изготовление, прост в применении, пригоден для создания сложных моделей, может использоваться неоднократно. Мо-

дуль упругости его достигает 5 кгс/см^2 , в связи с этим можно моделировать породы различной крепости.

Агарин, хотя и обладает меньшей оптической активностью, но имеет такое преимущество, как способность разрушаться, причем по характеру разрушения он подобен большинству горных пород и ввиду своей хрупкости может использоваться как эквивалентный материал для изучения характера разрушения. Приготовление его также не вызывает трудностей, чего нельзя сказать, к примеру, о тугорине, который был применен при моделировании откосов, сложенных глинистыми породами [79].

Студни ацетилцеллюлозы в бензиловом спирте нами не использовались, поскольку при малых ее концентрациях зависимость между деформациями и напряжениями не является линейной, а с увеличением концентрации соответственно возрастает вязкость студня, что затрудняет изготовление крупных моделей.

Из высокомодульных материалов для моделирования в центрифуге методом «замораживания» напряжений применяется эпоксимал — материал, изготавливаемый на основе эпоксидной смолы ЭД-6 с малеиновым ангидридом и дибутилфталатом, причем первый является отвердителем, второй — пластификатором.

Упругие характеристики эпоксимала изменяются от 40—50 до 3000 кгс/см^2 , что позволяет моделировать как жесткие породы (изверженные и метаморфические), так и относительно мягкие (твердые глины, мергели, алевролиты и т. п.).

На моделях из низко- и высокомодульных материалов нами решалась плоская задача, основным положением которой является то обстоятельство, что при заданных внешних нагрузках упругое напряженное состояние односвязного тела зависит только от граничных условий и не зависит от упругих констант материалов, из которых оно изготовлено (условие Митчела-Левин).

Следовательно, при моделировании плоской задачи модуль упругости и коэффициент Пуассона не влияют на напряженное состояние.

Как указывалось, основным объектом исследований явилось Талдинское месторождение Кузбасса. Анализ данных о геологическом строении и физико-механических свойствах пород месторождения позволил обнару-

жить определенную аналогию с другими месторождениями Кузбасса, к примеру, с Томусинским.

При анализе установлено, что внутренние отвалы разрезов Южного Кузбасса представлены песчаниками, алевролитами и аргиллитами. В основании отвалов большей частью залегают прочные песчаники и алевролиты, иногда слабые породы — углистые аргиллиты. Таким образом, потребовалось четыре разновидности оптически чувствительных материалов (с разными модулями) для имитации четырех типов различных пород: основания отвалов, слабого прослоя, смеси пород отвалов и угольного целика.

Физико-механические свойства пород угольных разрезов Кузбасса, в частности, модули упругости E , коэффициенты Пуассона μ , объемные массы γ , заимствовались из различных литературных источников. Были проанализированы результаты определения этих величин рядом исследователей [38, 48, 68], а также отчеты КузНИУИ.

При отсутствии экспериментальных данных использованы корреляционные зависимости [7, 12, 77] для расчета величин E и μ через модуль сдвига G , сопротивление сжатию $\sigma_{сж}$ или другие показатели.

Сведения об имеющихся и рассчитанных с помощью корреляционных связей физико-механических характеристиках моделируемых пород разрезов Кузбасса приведены в табл. 2.

Упругие характеристики материала моделей выбирались с учетом подобия модели и натуры.

Ввиду сложности объекта исследования, а также учитывая, что задача определения всех компонентов плоского поля напряжений вблизи откоса конечной высоты решалась впервые, было использовано несколько лабораторных методов исследований. В качестве основного применялся метод тензометрической сетки, а для сопоставления — оптический метод в комплексе с центробежным и метод эквивалентных материалов (полевое моделирование).

При установлении критериев подобия материалов модели и натуры было произведено комплексное исследование следующих упругих и прочностных свойств пород: модуля упругости, коэффициента Пуассона, объемной массы, коэффициента крепости пород по шкале проф. М. М. Протодьяконова, модуля сдвига, сопро-

Таблица 2

Породы	$E, \text{ кгс/см}^2 \cdot 10^3$	μ	$\gamma, \text{ т/м}^3$	ρ
Основание отвалов: песчаники	173—336**	0,17—0,36	2,2	3—11
алевролиты	288	0,27		7,4
Смесь пород отвалов: песчаники, алевролиты, аргиллиты	Нет данных	Нет данных	1,70	Нет данных
Слабый слой: углистый аргиллит	5—10	0,26—0,40	1,59	2—4
	8	0,33		2,9
Целик: уголь	20—100	0,18—0,20	0,97	0,8—3,0
	70	0,20		1,5

* Коэффициент крепости по шкале проф. М. М. Протоdjяконова.

** В числителе—минимальные и максимальные значения, в знаменателе—средние арифметические.

твления сжатю, сцепления, угла внутреннего трения и влажности.

Всего было изготовлено 43 модели отвалов, из них 24 модели из игдантина (12 моделей одноярусных и 12 трехъярусных отвалов), пять из агарнна, шесть из эпоксимала и восемь из эквивалентных материалов (реальных пород отвалов).

Некоторые игдантинные модели выполнены в трех вариантах, в первом нижний ярус имел угол наклона $35-37^\circ$ (номера моделей с индексом «а»), во втором он был подрезан под углом 45° (индекс «б») и в третьем — под 60° (индекс «в»).

При моделировании соблюдалось геометрическое и силовое подобие, а также считалось, что условие Митчела-Левн выполняется, так как исследовались плоские модели отвалов, в которых не создавались специально ослабленные поверхности и зоны. Кроме того, коэффициент Пуассона для образцов пород нарушенной структуры несколько больше, чем в монолитных породах, и близок к коэффициенту Пуассона материала модели.

Большая часть моделей изготавливалась из игдантина. Несмотря на достаточную упругость, в этом ма-

тернале со временем проявляется ползучесть. Поэтому многие исследователи считают, что его нельзя применять для оптического моделирования. Однако, как установлено [93], для метода тензометрической сетки расчеты, основанные на теории упругости, вполне допустимы. За тот срок, который необходим для проведения эксперимента (10—15 мин), согласно [93], ползучесть в игдантине не проявляется.

Исследованиями С. Н. Максимова и А. А. Шария [45] в области масштабов моделирования определены границы жесткости игдантина, приемлемые для создания моделей. Так, нижней границей модуля упругости является материал с $E=0,35$ кгс/см², при более низких значениях модуля игдантин обладает способностью чрезвычайно быстро проявлять деформации ползучести под действием сил собственного веса. Верхняя граница жесткости игдантина определяется величиной модуля упругости, равной 2,0—2,5 кгс/см². С увеличением жесткости материала возрастает в верхней части модели зона незамеряемых напряжений, поэтому нет смысла применять игдантин с высоким модулем упругости.

В данных исследованиях модуль упругости игдантина был выбран, исходя из указанных соображений и с учетом соблюдения подобия модели и натуре, что обеспечивало минимальные размеры зон допустимых деформаций.

Для приготовления слоистых моделей использован игдантин с модулями упругости, находящимися в пределах от 0,37 до 1,48 кгс/см². В табл. 3 приведены основные свойства четырех разновидностей игдантина, имитирующего исследуемые породы.

Процентное содержание составных компонентов игдантина для заданных модулей определено согласно существующей методике [52, 89]. Для предупреждения загнивания и порчи игдантина в него добавлялся β-нафтол.

Определение физико-механических свойств игдантина осуществлено по тарировочным образцам, изготовленным из того же материала, что и исследуемая модель. Измеренный образец был помещен в установку [89] для изучения температурных зависимостей оптико-механических свойств оптически чувствительных материалов, где велись испытания. К образцу прикладывали нагрузку (замеряли деформации растяжения).

Таблица 3

Породы	Физико-механические свойства пород и игдантина							
	f	$\nu, \text{Т/м}^2$	% -ное содержание			$E, \text{кгс/см}^2$	μ	$\gamma, \text{Т/м}^3$
			желатина	глицерина	воды			
Основания отвалов: алевролиты, аргиллиты	6—8	2,20	24	30	46	1,48	0,39	1,15
Смесь пород отвалов	—	1,70	17	30	53	0,73	0,44	1,15
Слабый слой: углистые аргилли- ты	2,0	1,59	14	30	56	0,49	0,46	1,12
Уголь	1,5	0,97	12	30	58	0,37	0,47	1,12

С помощью поляризационного компаратора ПК-6 и компенсатора КПК (Берека) определялась разность хода лучей в отдельных точках образца.

Образцы исследовали при комнатной температуре, при которой испытывали модель, причем для каждого слоя модели исследовано не менее трех образцов, а затем определены средние арифметические значения модуля упругости игдантина.

Такое определение упругих характеристик материала модели возможно уже после ее заливки и изготовления. При моделировании неоднородных слоистых массивов горных пород необходимо приготавливать материал с заранее заданными упругими свойствами. Первоначально их устанавливают исходя из выбора определенного соотношения составных компонентов игдантина. Однако материал может применяться неоднократно, а при переварке исходные свойства изменяются, поэтому возникает необходимость определения упругих характеристик игдантина в процессе его приготовления. В МГУ им. М. В. Ломоносова для этих целей использован график зависимости модуля упругости игдантина в жидком состоянии ($E, \text{кгс/см}^2$) при постоянной температуре (50°C) от времени наполнения ковша — вискозиметра ($t, \text{мин}$) (рис. 1.). В наших экспериментах также применен самодельный сосуд-ковш диаметром 72 мм, высотой 82 мм, в дно которого была впаяна трубка диаметром 8 мм. По скорости наполне-

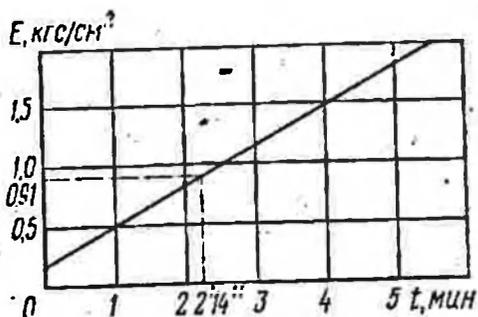
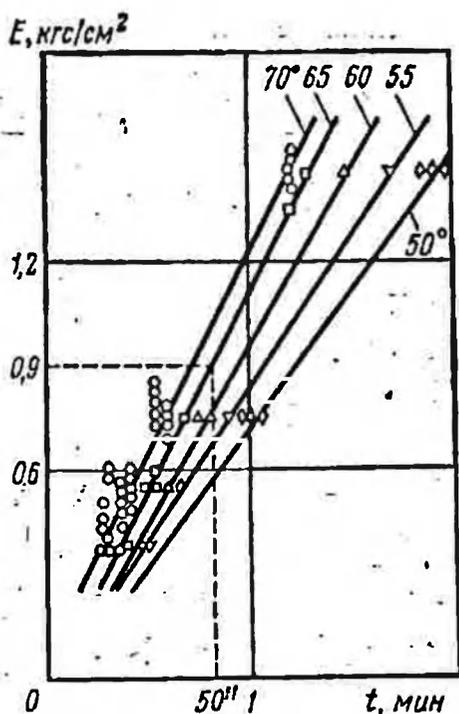


Рис. 1. Зависимость модуля упругости игдантина от времени наполнения ковша — вискозиметра при $T=50^{\circ}\text{C}$

Рис. 2. Зависимости модуля упругости игдантина от времени вытекания из вискозиметра ВЗ-4 при различной температуре.



ния ковша с помощью графика (см. рис. 1) определяли модуль упругости игдантина.

Однако этот способ занимал много времени, так как температура расплавленной смеси игдантина достигает $80-90^{\circ}$, а для того, чтобы пользоваться графиком, материал надо остудить до 50° . Если же определенный модуль упругости не соответствовал заданной величине, то он изменялся путем добавления той или иной составляющей, и процесс повторялся.

Для ускорения процесса приготовления игдантина с заданными упругими характеристиками проведена серия опытов по определению величины E при более высоких температурах. Так, для образцов игдантина с различными значениями модуля упругости (0,37; 0,49; 0,73; 0,91; 1,48; 1,84) вискозиметром ВЗ-4 исследованы зависимости времени вытекания игдантина от температуры. Полученные графики представлены на рис. 2. Они позволяют оценить величину модуля упругости игдантина в жидком состоянии при температуре от 70 , до 50°C , что значительно сокращает время приготовления моделей.

Для контроля проведено определение модуля упругости игдантина тремя способами: в жидком состоянии в процессе приготовления вискозиметром ВЗ-4 (см. рис. 2), перед заливкой игдантина в рамы-формы

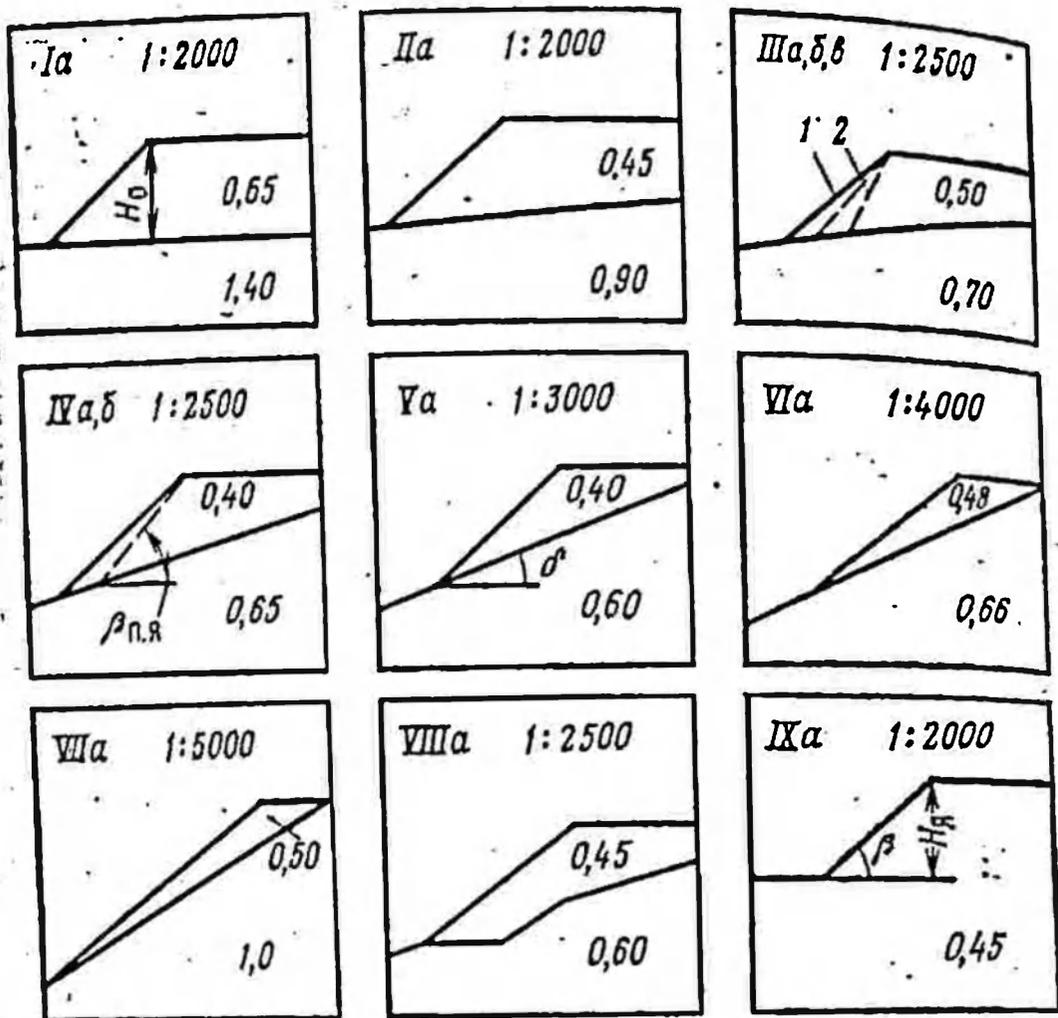


Рис. 3. Модели одноярусных отвалов из игдантина:
 1 — контур модели отвала, 2 — контур подрезки яруса отвала.
 Масштаб рисунков в 10 раз меньше, чем моделей

при температуре плюс 50°C (температура заливки) по графику (см. рис. 1) и после изготовления модели на тарировочных образцах, испытываемых на растяжение.

Приготовленный согласно существующей методике [46, 52] игдантин заливали в рамы-формы.

Методом тензометрической сетки исследованы все игдантиновые модели. Модели одноярусных отвалов испытаны в раме-форме размером $0,50 \times 0,50 \times 0,02$ м (рис. 3). Они изготовлены в масштабе 1:200 — 1:500. Размеры рамок и масштаб моделирования выбирали согласно методическим указаниям [30] и исходя из конструктивных соображений.

Высота отвала H_0 составляла 30 м, угол естественного откоса 37° , угол наклона основания. (δ) изменялся

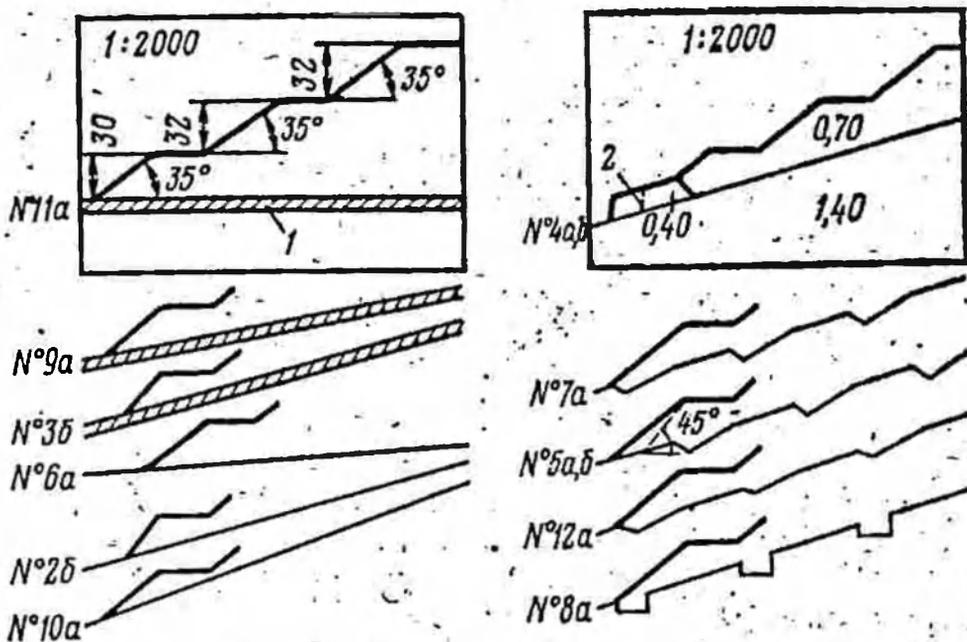


Рис. 4. Модели многоярусных отвалов из игдантина:
 1 — слабый слой, 2 — контур-срезы
 Масштаб рисунков в 10 раз меньше, чем моделей.

от 0 до 30° . В модели III была произведена подрезка яруса под углами $\beta_n = 45^\circ$ (IIIб) и $\beta_n = 60^\circ$ (IIIв); а в модели IV — под углом 45° (IVб). Модель VIIa на наклонном основании (15°) имитировала выемку в почве пласта. Однородная модель отвала IXa представляла собой откос с углом $\beta = 35^\circ$ и высотой яруса H_j равной 28 м.

Арабскими цифрами на рисунке показаны значения модуля упругости игдантина, применяемого для моделирования одноярусных отвалов, в кгс/см² (см. рис. 3).

Для исследования трехъярусных отвалов (рис. 4) была использована рама-форма размером $1,20 \times 0,70 \times 0,02$ м. Модели выполнены в масштабе 1:200. Углы откосов ярусов равнялись 35° : (в моделях 3б, 2б и 5б нижний ярус был подрезан под углом 45°). Высота ярусов с первого по третий — соответственно 30, 32 и 32 м.

Первые три модели (11a, 9a, и 3б) были трехслойными, основание в модели 11a горизонтальное, в модели 9a пологое с углом наклона 5° и в модели 3б наклонное (15°). В двухслойных моделях 6a, 2б и 10a угол наклона основания был равен соответственно 5, 10 и 20° . Модель 4a имитировала угольный целик ши-

риной 40 м, оставленный для предупреждения оползания отвала по почве пласта с углом падения 15°. В основании отвалов с углом наклона 15° моделей 7а, 5а, б, 12а и 8а созданы предохранительные выемки различной формы, размеров и местоположения.

Значения упругих констант игдантина, из которого изготовлены трехъярусные модели отвалов, представлены в табл. 4 и 5.

Модули упругости игдантина модели 4а, б показаны на рис. 4.

Величина объемной массы игдантина с модулями упругости менее 0,70 кгс/см² составляла 1,12 г/см³, а игдантина с модулями упругости 0,70—1,40 кгс/см² — 1,15 г/см³. Коэффициент Пуассона изменялся от 0,35 при модуле упругости 2,0 кгс/см² до 0,47 при модуле упругости игдантина 0,34 кгс/см².

На моделях одноярусных отвалов изучалось влияние угла наклона основания и подрезки, а на моделях

Таблица 4

Номер модели	δ, градус	E, кгс/см ² игдантина для имитации		
		пород отвалов	слабого слоя	основания отвалов
11а	0	0,50	0,40	1,00
9а	10	0,40	0,28	0,60
35	15	0,70	0,50	1,40

Таблица 5

Номер модели	δ, градус	E, кгс/см ² игдантина для имитации	
		пород отвалов	основания отвалов
6а	5	0,45	0,90
26	15	1,10	1,91
10а	20	0,48	0,66
7а	15	0,50	0,70
5а, б	15	0,65	1,40
12а	15	0,45	0,60
8а	15	0,40	0,65

многоярусных отвалов — влияние слабого слоя, угольного целика, выемок в основании и подрезки нижнего яруса на устойчивость отвала.

Применение метода тензометрической сетки позволяет решать целый ряд важных вопросов, касающихся напряженного состояния массивов горных пород. Однако возможности его не безграничны. В частности, остается открытым вопрос о моделировании контактных условий. Пользуясь методом тензометрической сетки, напряжения в неоднородных моделях отвалов можно измерить лишь вблизи контакта.

Поэтому полученные результаты необходимо проверять другими методами и сопоставлять с фактическими данными. Для контроля метода тензосетки было осуществлено моделирование на центрифуге с «замораживанием» напряжений, для чего использовались модели из эпоксимала.

На моделях из агарина и пород внутренних отвалов разреза «Красногорский» исследовался характер процесса деформаций отвалов.

2. ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ПРИОТКОСНОЙ ЗОНЕ

2.1. Определение компонентов напряжений

Как отмечалось, в качестве основного метода исследований использован метод тензометрической сетки. Сущность его состоит в том, что на поверхность модели из весьма податливого материала до ее нагружения наносится сетка. Затем модель испытывают в плоском напряженном состоянии. По определенным относительным деформациям ячеек сетки рассчитывают напряжения в модели по следующим формулам:

$$\begin{aligned}\sigma_{y_m} &= \frac{E}{1-\mu^2} (\delta_y + \mu\delta_x); \\ \sigma_{x_m} &= \frac{E}{1-\mu^2} (\delta_x + \mu\delta_y); \\ \tau_{xy_m} &= \frac{E}{2(1+\mu)} (\delta_c + \delta_d).\end{aligned}\tag{2.1}$$

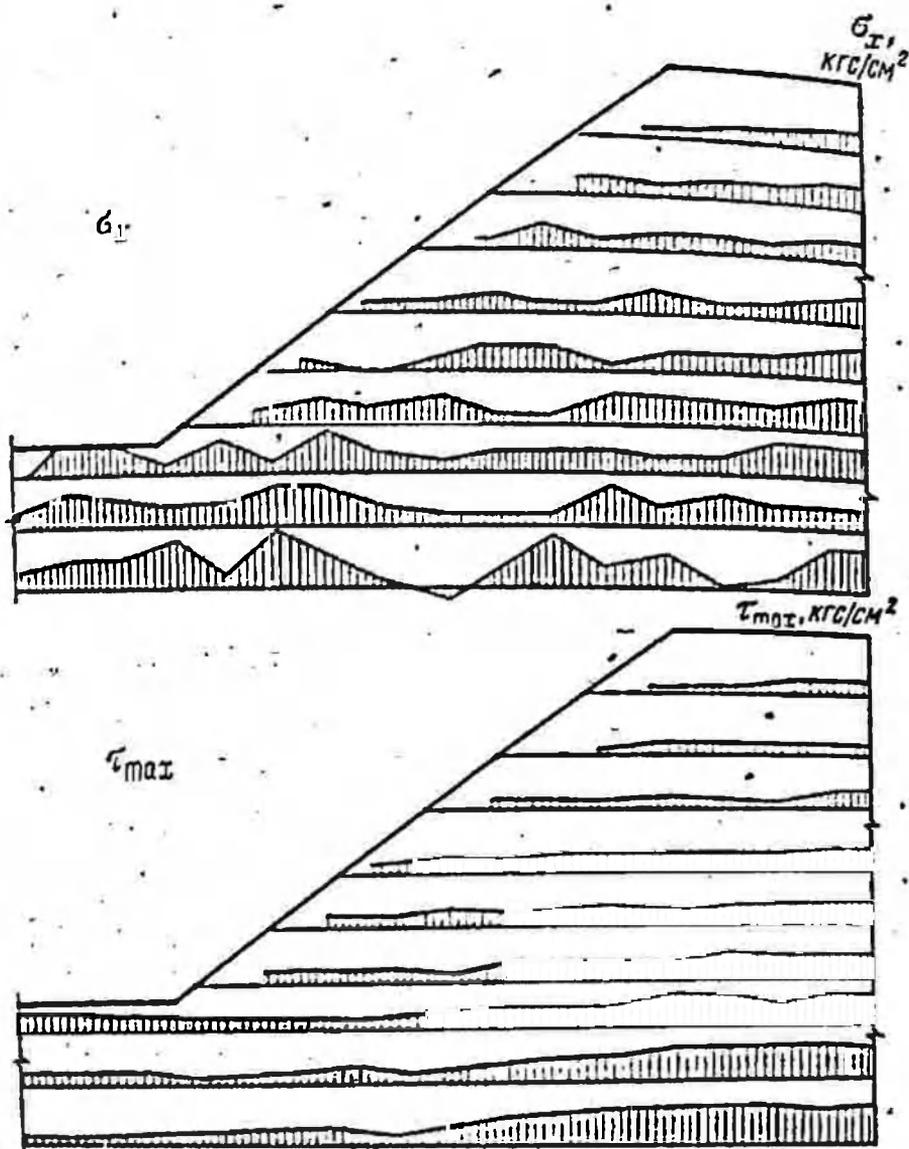
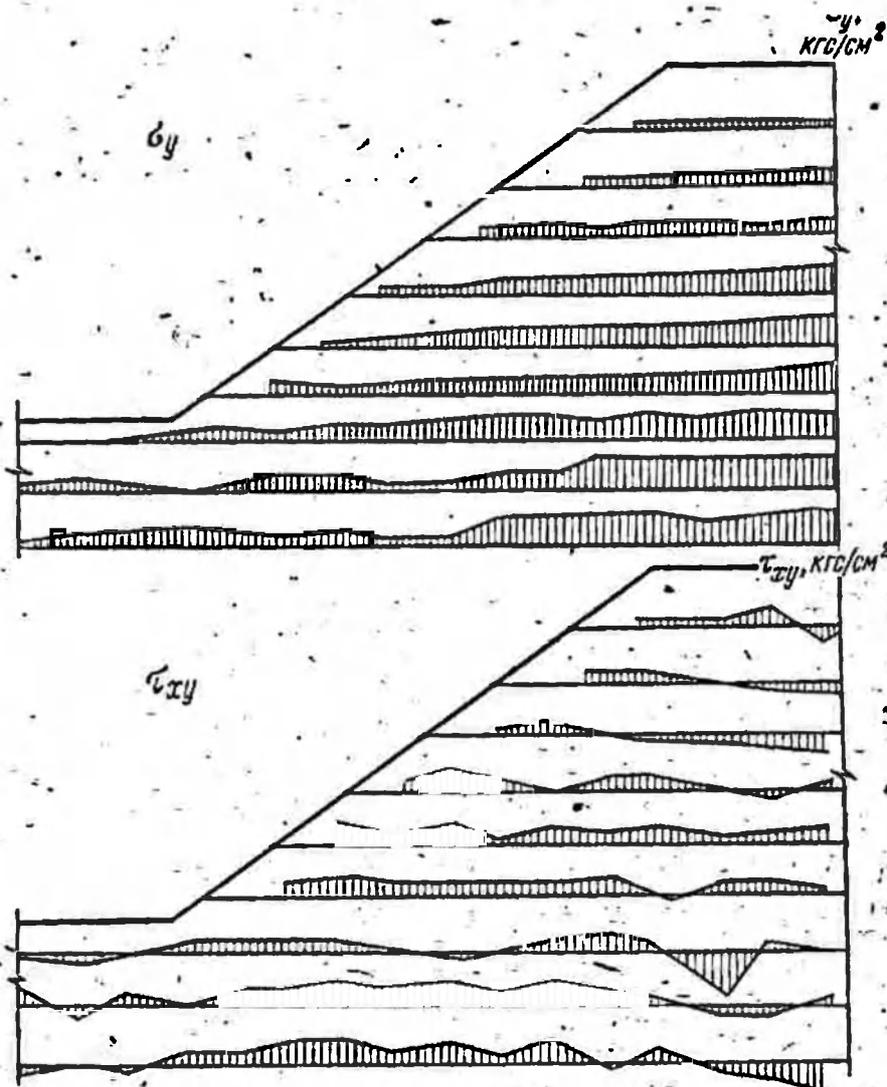


Рис. 5. Эпюры компонентов напряжений

где σ_{ym} , σ_{xm} и τ_{xym} — соответственно вертикальные, горизонтальные и касательные напряжения в модели, кгс/см^2 ; E и ν — соответственно модуль упругости (кгс/см^2) и коэффициент Пуассона материала модели; δ_y , δ_x — относительные деформации сторон ячеек; δ_c , δ_d — относительные деформации диагоналей ячеек.

Для пересчета напряжений на натуру, согласно работе [76], использованы общепринятые коэффициенты подобия, т. е., в формулы (2.1) введен коэффициент

$$K = \frac{l_n}{l_m} \frac{\gamma_n}{\gamma_m} \quad (2.2)$$



В модели однородного откоса

где l_n, l_m — линейные размеры природы и модели, м;
 γ_n, γ_m — объемные массы природы и модели, т/м^3 .
 Таким образом,

$$\begin{aligned}
 \sigma_{yn} &= K\sigma_{ym} \\
 \sigma_{xn} &= K\sigma_{xm} \\
 \tau_{xyn} &= K\tau_{xym}
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

Величины и направления главных напряжений σ_1 и σ_2 определены по известным формулам:

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}, \quad (2.4)$$

$$\operatorname{tg} 2\alpha_\sigma = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \quad (2.5)$$

где α_σ — угол между положительным направлением оси x и направлением σ_1 , отсчитываемый против часовой стрелки ($0^\circ \leq \alpha_\sigma \leq 180^\circ$).

По снятым отпечаткам замерены величины деформаций с помощью контрольной линейки (КЛ), цена деления которой составляла 0,2 мм. Поскольку стороны квадратной ячейки равны 2 см, получалось, что каждое деление соответствовало 0,01 относительной деформации.

Минимальные относительные деформации, которые можно замерить с помощью линейки при таких размерах ячеек и точности измерений, не превышали 0,005.

Ввиду того что клише само имело погрешности, т. е. не всегда стороны квадрата строго равны 2 см, приходилось измерять контрольный отпечаток, а затем уже вторичный и вычислять деформации сторон под действием сил тяжести с учетом имеющихся погрешностей контрольного отпечатка. При условии абсолютной точности применяемого клише отпадет необходимость снятия и замеров контрольного отпечатка, что сократит время определения деформаций в 2 раза. Измеряемые величины деформаций записывались в клетках, а затем для расчета напряжений переносились в журнал.

Число экспериментальных точек, в которых замерены деформации для пересчета на напряжения, в каждой из одноярусных моделей достигало 210, а в многоярусных 900. Общее число точек в моделях одноярусных отвалов составляло 1300—1800, а в моделях многоярусных отвалов более 7000.

В процессе обработки экспериментальных данных по деформациям во всех моделях отвалов были рассчитаны следующие величины напряжений: нормальные (горизонтальные и вертикальные) σ_x и σ_y , касательные τ_{xy} , максимальные касательные τ_{\max} и главные (максимальные и минимальные) σ_1 и σ_2 , а также значения углов α_σ .

Обработка экспериментальных данных, полученных с помощью метода тензометрической сетки, позволила изучить напряженное состояние моделей отвалов и оце-

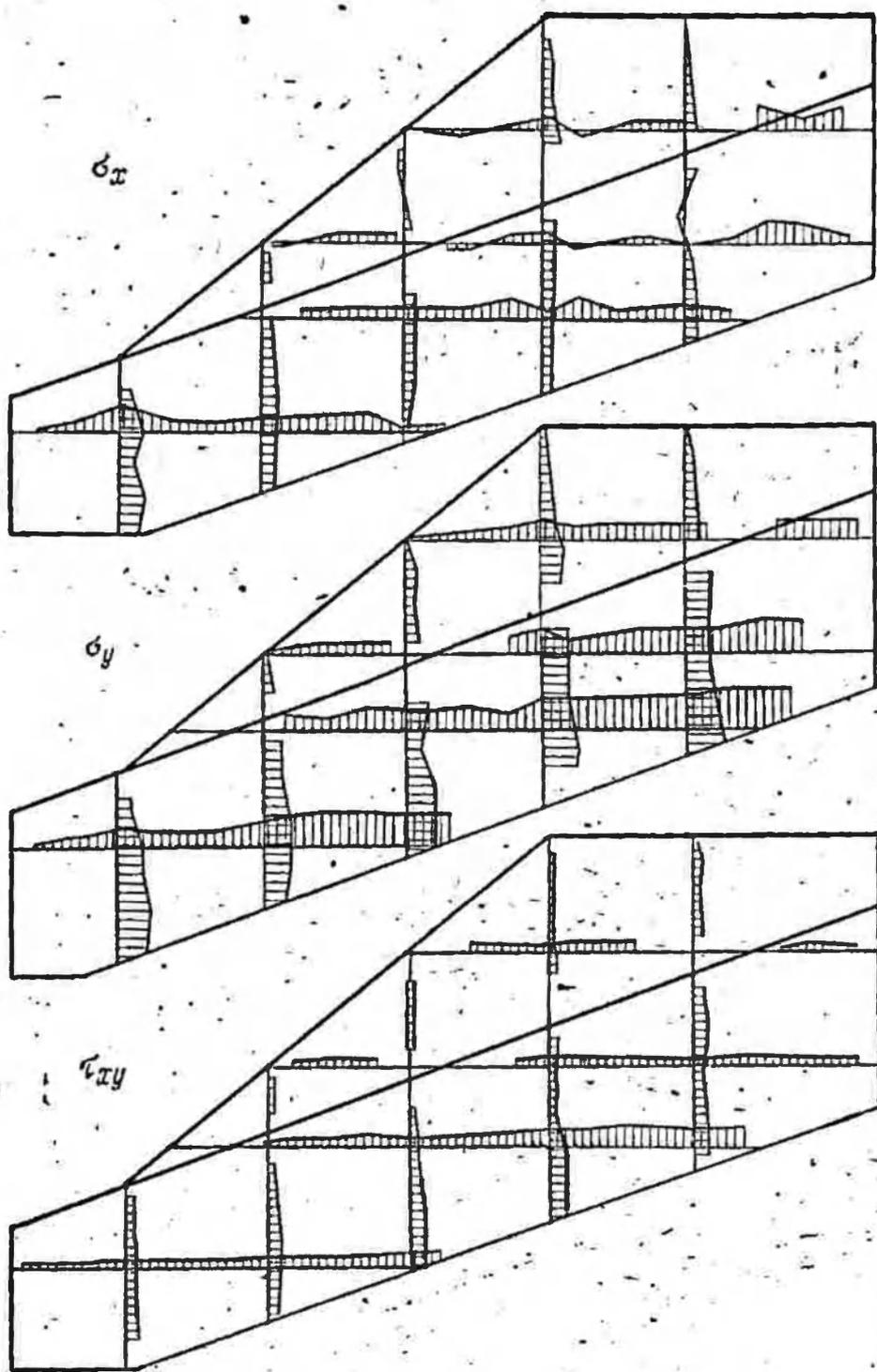
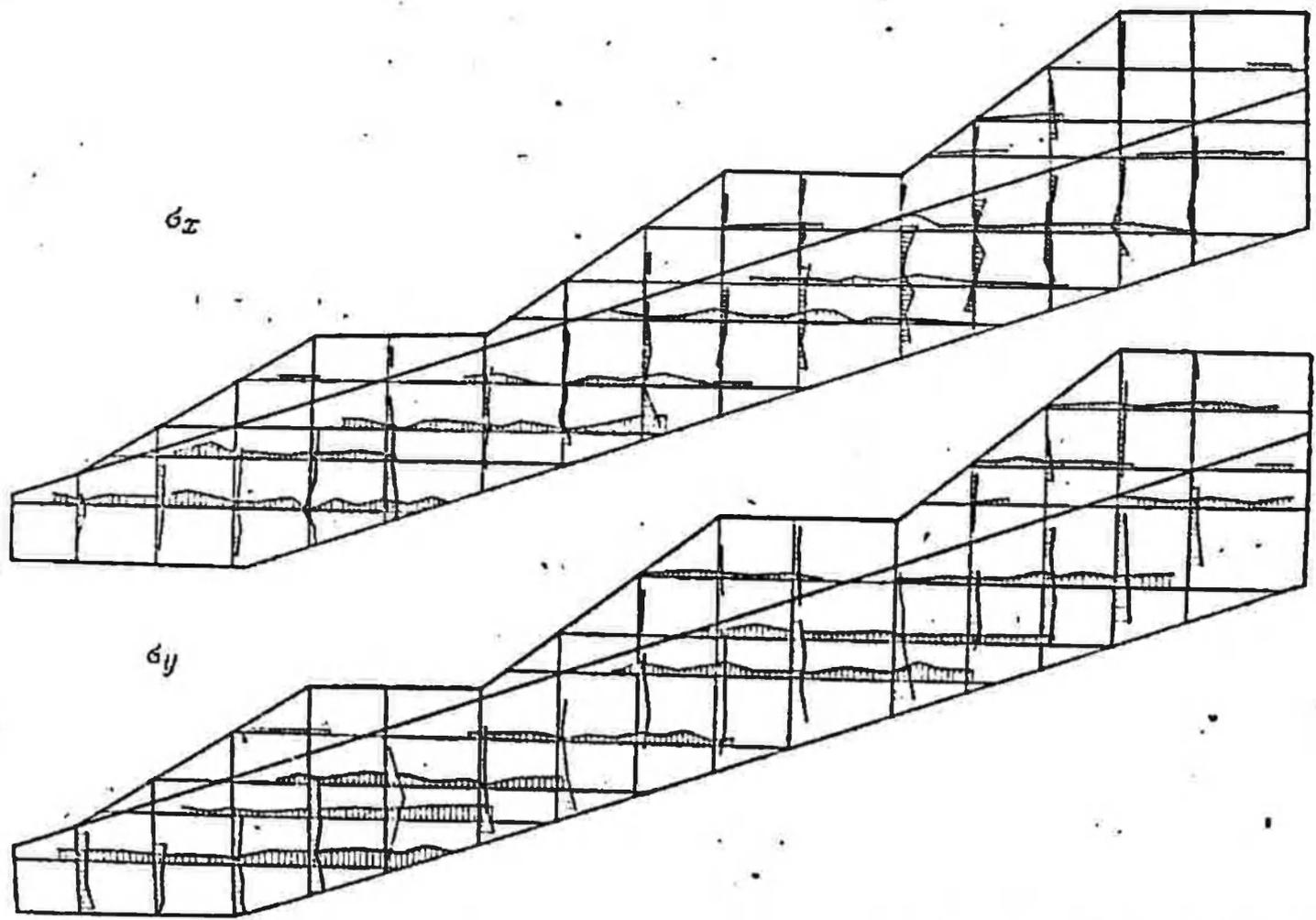


Рис. 6. Эпюры компонентов напряжений по горизонтальным и вертикальным сечениям в модели Va



3*

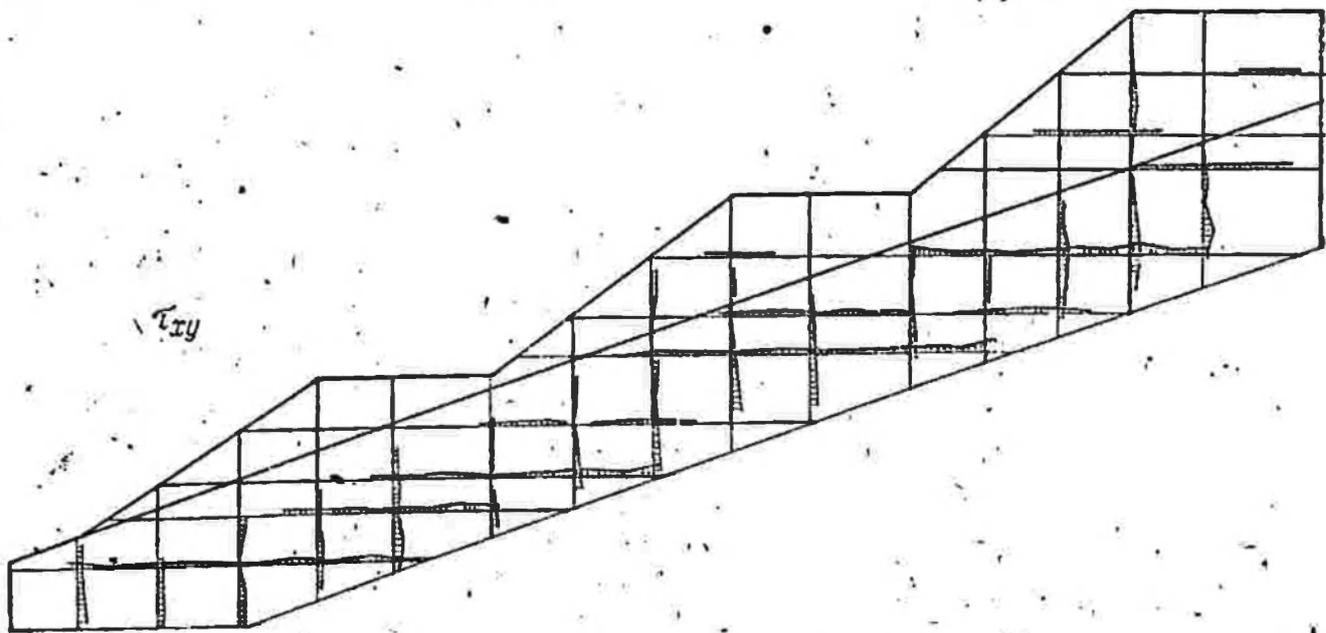


Рис. 7. Эпюры величин напряжений в модели 10а

нить влияние ряда факторов на распределение напряжений в отвалах, поскольку были определены все компоненты поля напряжений в любой точке по сетке 2×2 см. В результате обработки многочисленных экспериментальных данных (общее число точек достигало 9 тысяч) были получены все компоненты поля напряжений в любом элементе модели независимо друг от друга, которые затем анализировались и использовались при расчетах устойчивости отвалов.

Для анализа распределения напряжений были построены эпюры напряжений по горизонтальным и вертикальным сечениям для всех моделей. На рис. 5 показаны эпюры компонентов нормальных и касательных напряжений по горизонтальным сечениям в однородной модели с углом откоса 35° .

На рис. 6 показаны эпюры σ_x , σ_y и τ_{max} в модели одноярусного отвала на наклонном (20°) основании, а на рис. 7 — те же эпюры в модели трехъярусного отвала.

Кроме того, были построены изолинии компонентов напряжений в моделях одноярусных (рис. 8 и 9) и трехъярусных отвалов (рис. 10).

Метод тензометрической сетки может быть значительно усовершенствован, а его точность повышена за счет улучшения качества отпечатков с клише, а также применения машинной обработки результатов измерений. В частности, для обработки данных составлена программа к ЭВМ «Минск-32».

2.2. Особенности напряженного состояния в приоткосной зоне

Существующие упрощенные представления о напряженном состоянии пород в массиве, прилегающем к откосу, включают три концепции. Согласно первой, напряженное состояние считается одноосным, т. е. в расчет принимаются только вертикальные компоненты нормальных напряжений или вертикальные нагрузки. Вторая концепция предполагает, что напряженное состояние вблизи откоса соответствует геостатическому по А. И. Диннику [25]. Наконец, согласно третьей концепции, сформулированной для откосов неограниченной высоты и равноустойчивой формы, имеет место сложное

напряженное состояние: одноосное в упругой зоне, геостатическое в зоне минимальных напряжений и смешанное в зоне Прандтля и максимальных напряжений.

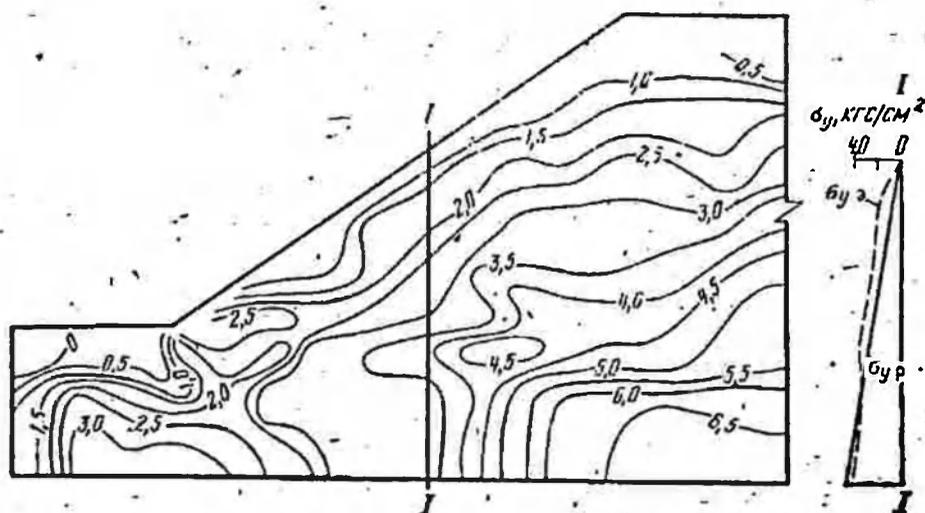


Рис. 8. Изолинии σ_y в модели однородного откоса и эпюра по сечению I—I

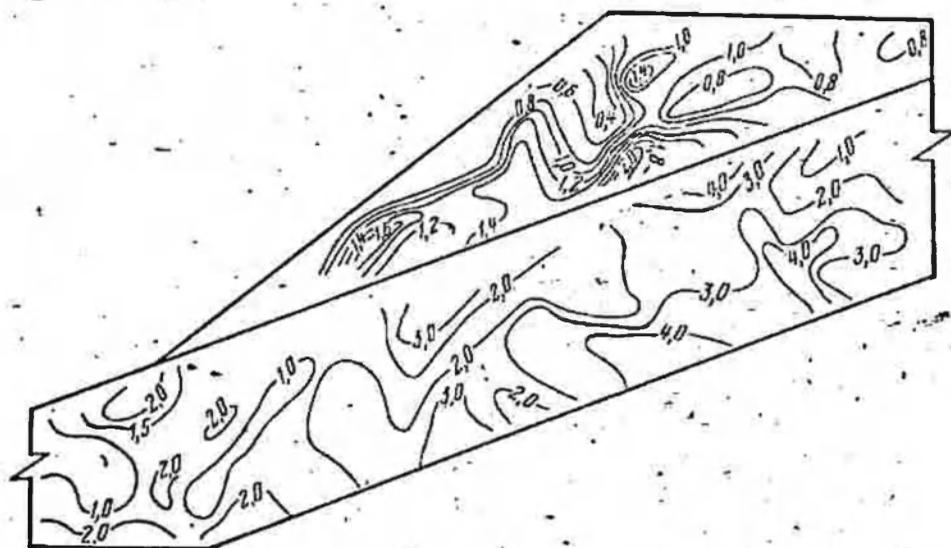


Рис. 9. Изолинии τ_{\max} в модели Va

Проведенное моделирование позволило впервые изучить напряженное состояние в приоткосных зонах моделей отвалов конечной высоты. Как видно (см.

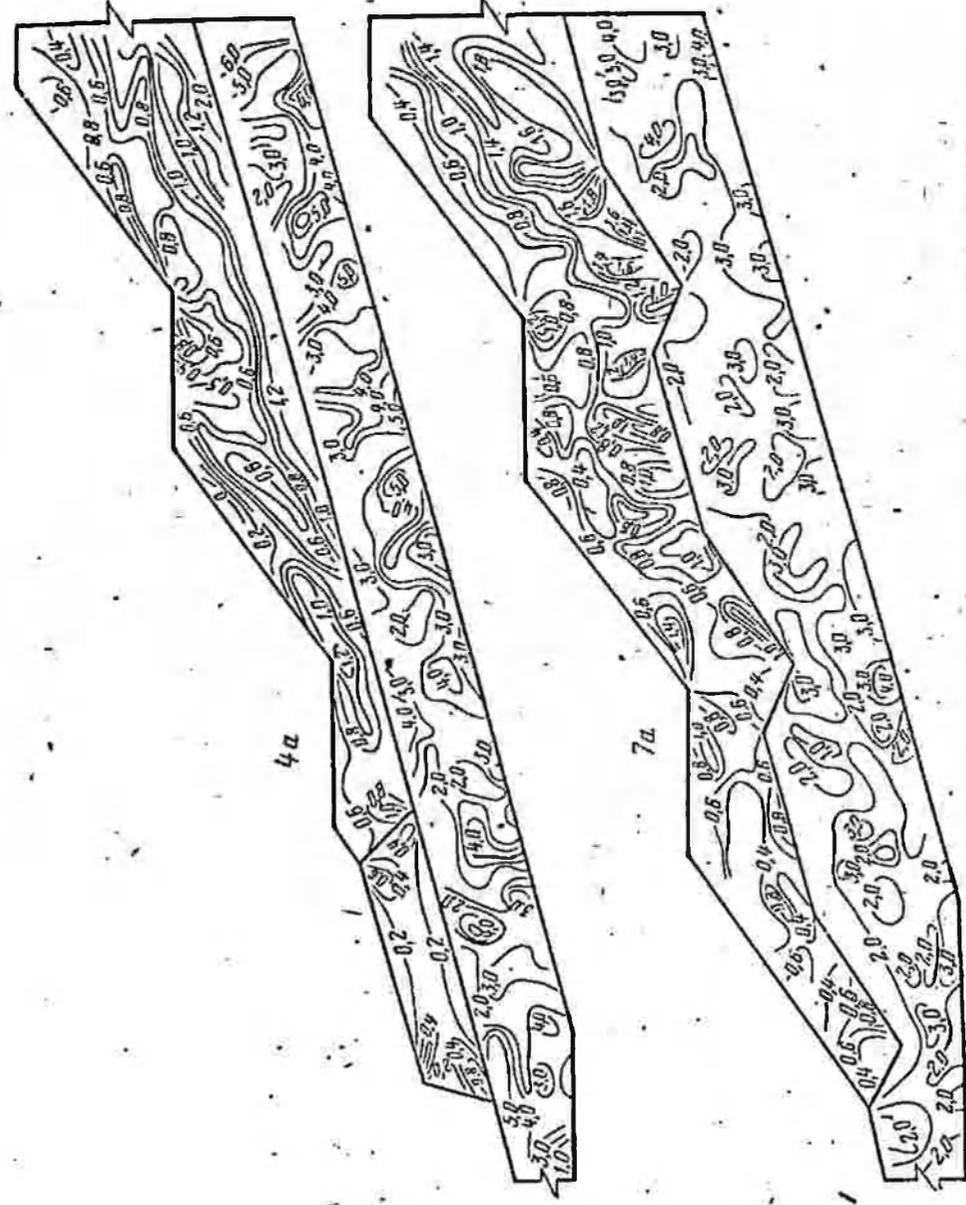
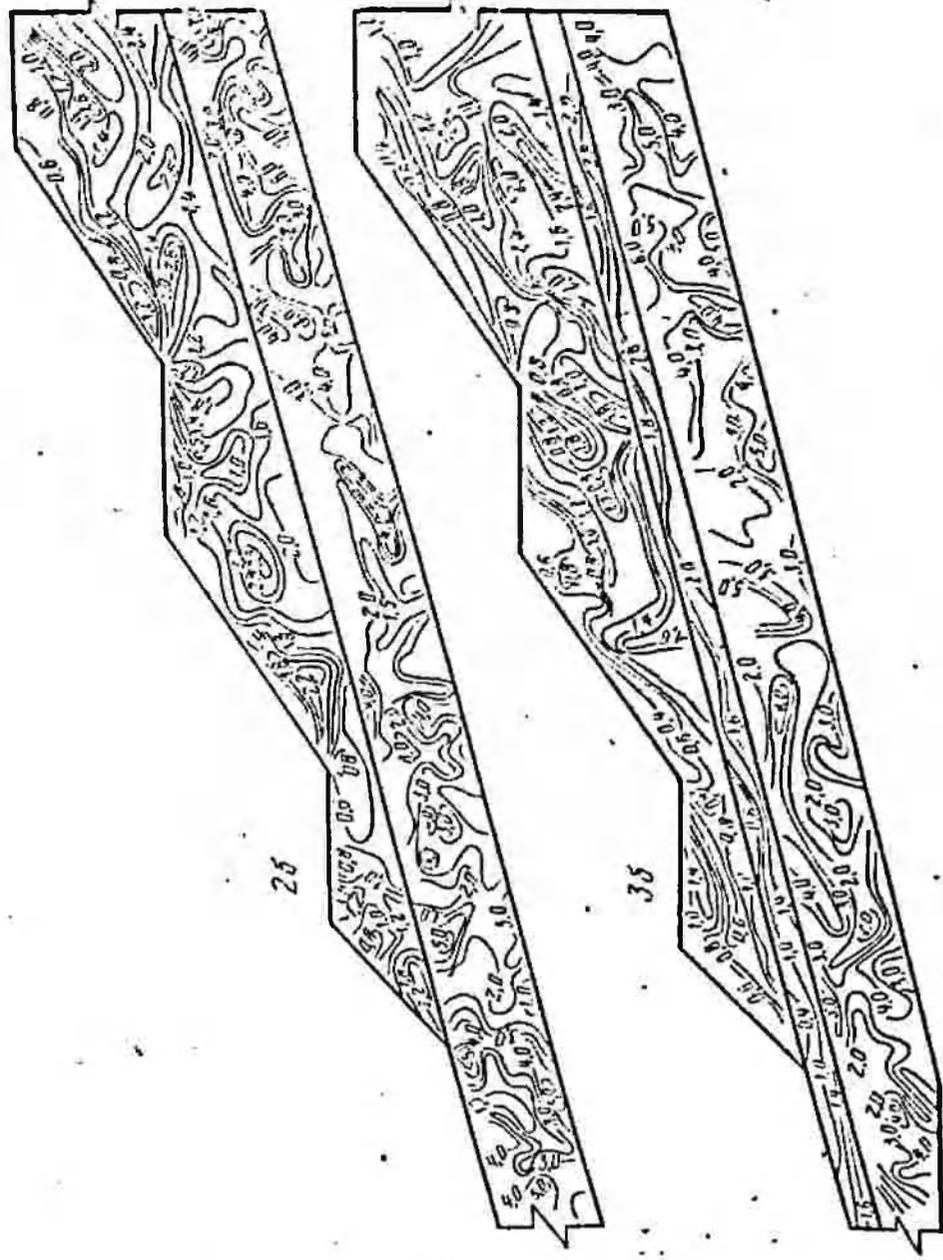


Рис. 10. Изолинии Γ_{max} в моделях многоярусных отвалов

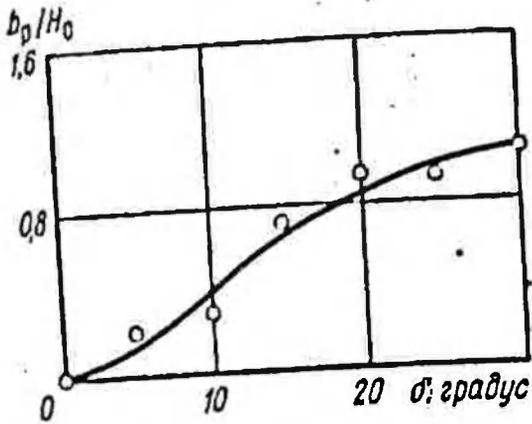


Рис. 11. Зависимость ширины зоны растягивающих горизонтальных напряжений от угла наклона основания в моделях одноярусных отвалов

рис. 5), у нижней бровки уступа и в его подошве вертикальные напряжения значительно меньше горизонтальных, что может привести к горизонтальным перемещениям при деформации откоса. Ввиду малого угла откоса (35°) в модели отсутствует зона растягивающих горизонтальных напряжений, хотя в определенной области отмечаются минимальные значения величины σ_x .

Некоторая концентрация максимальных касательных напряжений обнаруживается в основании отвалов вблизи нижней бровки откоса. Эта концентрация характерна также для неоднородных моделей (см. рис. 10).

Характер распределения вертикальных напряжений близок к гидростатическому, однако имеют место некоторые отклонения. Так, по вертикальному сечению II—II эпюра экспериментальных вертикальных напряжений σ_{y_2} и рассчитанных по γh (σ_{y_1}) очень близки, но в любом другом сечении по откосу в сторону его нижней бровки (сечение I—I) величины σ_{y_2} превышают величины вертикальных напряжений, определенные как произведение γh (см. рис. 8). Здесь h — расстояние по вертикали до точки, в которой рассчитывается напряжение.

При анализе распределения горизонтальных напряжений была установлена зона (по верхней площадке) растягивающих напряжений (b_p). В этой зоне могут возникать трещины отрыва. Изменение ширины зоны, отнесенное к высоте отвала при различных углах наклона его основания, иллюстрируется кривой (рис. 11). Ширина зоны растягивающих напряжений колеблется от нуля при горизонтальном основании до $1,1 H_0$ при наклоне основания под углом 30° . Эта зона исчезает, если в подошве отвала сделать выемку, как в модели VIIIa.

Кроме зоны растягивающих горизонтальных напряжений в моделях отвалов существуют зоны одноосного сжатия и зоны, где горизонтальные напряжения являются сжимающими (у нижней бровки в подошве отвалов);

здесь могут наблюдаться явления выпирания пород. Причем экспериментальная величина σ_x существенно отличается от определенной расчетным путем по формуле

$$\sigma_x = \frac{\mu}{1-\mu} \gamma h. \quad (2.6)$$

В табл. 6 приводятся экспериментальные $\sigma_{xэ}$ и расчетные $\sigma_{xр}$ величины напряжений, действующих по поверхности разрушения* в модели одноярусного откоса на горизонтальном основании при $\mu = 0,45$.

Таблица 6

Номер блока	$\frac{h_T}{H_{отк}}$	$\sigma_{xэ}$	$\sigma_{xр}$	$\frac{\sigma_{xэ} - \sigma_{xр}}{\sigma_{xэ}}, \%$
I	0,99	-0,1	0,3	-400
II	0,94	0,6	0,9	-50
III	0,87	1,9	1,3	+32
IV	0,76	2,0	1,5	+25
V	0,63	0,9	1,7	-89
VI	0,46	0,7	1,7	-140
VII	0,23	0,9	1,0	-11
VIII	0,05	0,7	0,2	+72

Данные табл. 6 свидетельствуют о том, что расчет горизонтальных напряжений в зоне влияния откоса по формуле (2.6) будет ошибочным, так как обнаруживается существенная разница между расчетными и экспериментальными значениями σ_x . Так, исключая минимальный и максимальный процент отклонения, среднюю величину отклонения можно оценить примерно в 80%.

На рис. 12 показано изменение напряжений по поверхности разрушения в зоне влияния откоса в модели отвала, расположенного на горизонтальном основании.

Анализ экспериментальных данных при изучении характера распределения вертикальных напряжений показал, что в зоне влияния откоса вертикальная составляющая напряжений отклоняется от гидростатического закона распределения напряжений, а в подошве отвалов у нижней бровки величины вертикальных напряжений

* Способ построения поверхности разрушения описан в 3 разделе.

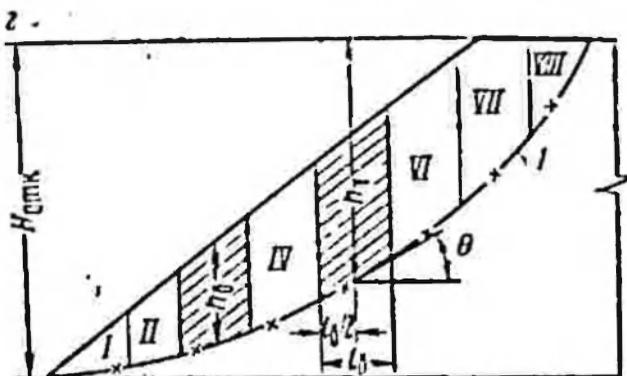
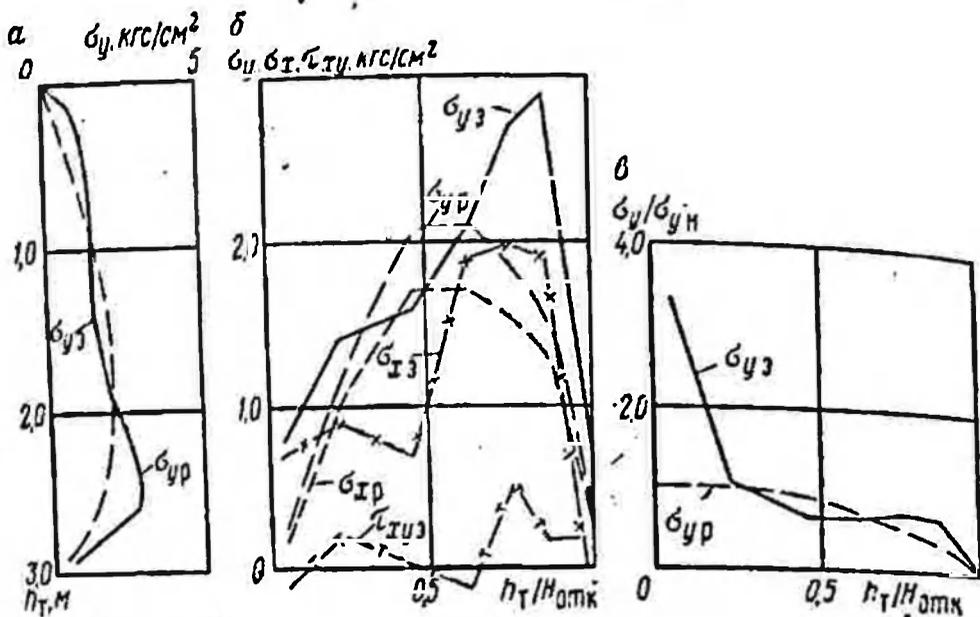


Рис. 12. Распределение напряжений по поверхности разрушения в модели отвала, расположенного на горизонтальном основании, в зависимости от:

а — h_T ; б и в — $h_T/H_{отк}$; г — схема к определению $h_T/H_{отк}$; 1 — поверхность разрушения

меньше горизонтальных. На это обстоятельство ранее обратил внимание И. В. Федоров [85], который при моделировании откосов оптическим методом обнаружил существенное несоответствие вертикальной составляющей, определенной экспериментально, и рассчитанной как произведение γh .

В качестве примера на рис. 12,а (модель расположена на горизонтальном основании) показан характер распределения вертикальных составляющих напряжений, определенных экспериментально (σ_{y3}) и как произведение ($\sigma_{yр} = \gamma h$), в зависимости от h_T .

Распределение компонентов напряжений в зоне влияния откоса по поверхности разрушения в зависимо-

сти от безразмерной величины $\frac{h_T}{H_{отк}}$ представлено на рис. 12,б. Существенная разница между экспериментальными и расчетными кривыми вполне очевидна. Расчетная схема приоткосного массива показана на рис. 12,г, где h_T — расстояние от верхней бровки уступа до нижней границы расчетного блока; $H_{отк}$ — высота откоса; h_0 — высота и l_0 — ширина блока; θ — угол наклона площадки скольжения к горизонту. Римскими цифрами обозначены номера блоков. На рис. 12,в' показана зависимость коэффициентов концентрации напряжений $\left(\frac{\sigma_{уз}}{\sigma_{уц}} \text{ и } \frac{\sigma_{ур}}{\sigma_{уц}}\right)$ от безразмерной величины $h_T/H_{отк}$. Как видно, экспериментальная вертикальная составляющая $\sigma_{уз}$ значительно отличается от расчетной $\sigma_{ур}$, о чем свидетельствуют также данные табл. 7 (величины напряжений даны в кгс/см²).

Таблица 7

Номер блока	$\frac{h_T}{H_{отк}}$	$\sigma_{уз}$	$\sigma_{ур}$	$\frac{\sigma_{уз} - \sigma_{ур}}{\sigma_{уз}}, \%$
I	0,99	0,8	0,38	28
II	0,94	1,6	1,04	35
III	0,87	2,9	1,53	54
IV	0,76	2,7	1,86	31
V	0,63	2,1	2,08	1
VI	0,46	1,6	2,08	30
VII	0,23	1,4	1,15	18
VIII	0,05	0,8	0,24	70

В среднем расхождение между экспериментальными и расчетными значениями σ_y составляет около 30%, а для σ_x 60%.

Обработка всех данных моделирования позволила установить, что вертикальные нормальные напряжения могут быть как меньше, так и больше величины γh ; значения коэффициента бокового давления являются переменными, изменяющимися в весьма широких пределах, а касательные напряжения не всегда равны нулю:

$$\sigma_y = k_y \gamma h; \sigma_x = k_x \gamma h; \tau_{xy} = k_{xy} \gamma h. \quad (2.7)$$

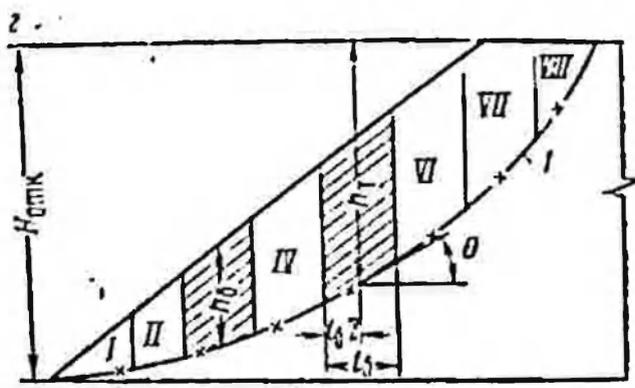
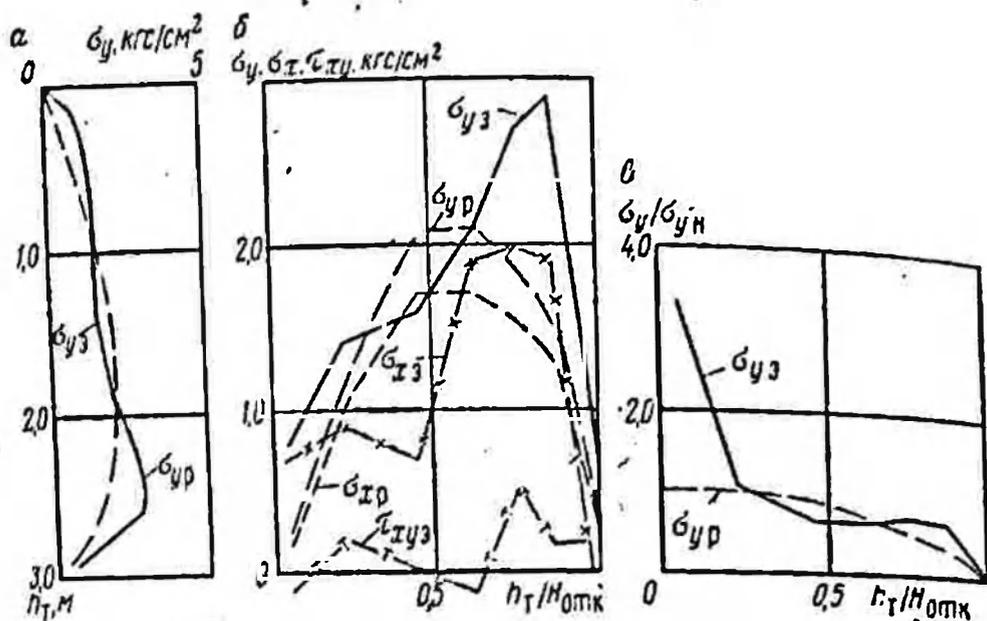


Рис. 12. Распределение напряжений по поверхности разрушения в модели отвала, расположенного на горизонтальном основании, в зависимости от:
 а — h_T ; б и в — $h_T/H_{отк}$; з — схема к определению $h_T/H_{отк}$; I — поверхность разрушения

меньше горизонтальных. На это обстоятельство ранее обратил внимание И. В. Федоров [85], который при моделировании откосов оптическим методом обнаружил существенное несоответствие вертикальной составляющей, определенной экспериментально, и рассчитанной как произведение γh .

В качестве примера на рис. 12,а (модель расположена на горизонтальном основании) показан характер распределения вертикальных составляющих напряжений, определенных экспериментально (σ_{y3}) и как произведение ($\sigma_{yр} = \gamma h$), в зависимости от h_T .

Распределение компонентов напряжений в зоне влияния откоса по поверхности разрушения в зависимо-

сти от безразмерной величины $\frac{h_T}{H_{отк}}$ представлено на рис. 12,б. Существенная разница между экспериментальными и расчетными кривыми вполне очевидна. Расчетная схема приоткосного массива показана на рис. 12,г, где h_T — расстояние от верхней бровки уступа до нижней границы расчетного блока; $H_{отк}$ — высота откоса; h_6 — высота и l_6 — ширина блока; θ — угол наклона площадки скольжения к горизонту. Римскими цифрами обозначены номера блоков. На рис. 12,в показана зависимость коэффициентов концентрации напряжений $\left(\frac{\sigma_{уз}}{\sigma_{уц}} \text{ и } \frac{\sigma_{ур}}{\sigma_{уц}}\right)$ от безразмерной величины $h_T/H_{отк}$. Как видно, экспериментальная вертикальная составляющая $\sigma_{уз}$ значительно отличается от расчетной $\sigma_{ур}$, о чем свидетельствуют также данные табл. 7 (величины напряжений даны в кгс/см²).

Таблица 7

Номер блока	$\frac{h_T}{H_{отк}}$	$\sigma_{уз}$	$\sigma_{ур}$	$\frac{\sigma_{уз} - \sigma_{ур}}{\sigma_{уз}}, \%$
I	0,99	0,8	0,38	28
II	0,94	1,6	1,04	35
III	0,87	2,9	1,53	54
IV	0,76	2,7	1,86	31
V	0,63	2,1	2,08	1
VI	0,46	1,6	2,08	30
VII	0,23	1,4	1,15	18
VIII	0,05	0,8	0,24	70

В среднем расхождение между экспериментальными и расчетными значениями σ_y составляет около 30%, а для σ_x 60%.

Обработка всех данных моделирования позволила установить, что вертикальные нормальные напряжения могут быть как меньше, так и больше величины γh ; значения коэффициента бокового давления являются переменными, изменяющимися в весьма широких пределах, а касательные напряжения не всегда равны нулю:

$$\sigma_y = k_y \gamma h; \quad \sigma_x = k_x \gamma h; \quad \tau_{xy} = k_{xy} \gamma h. \quad (2.7)$$

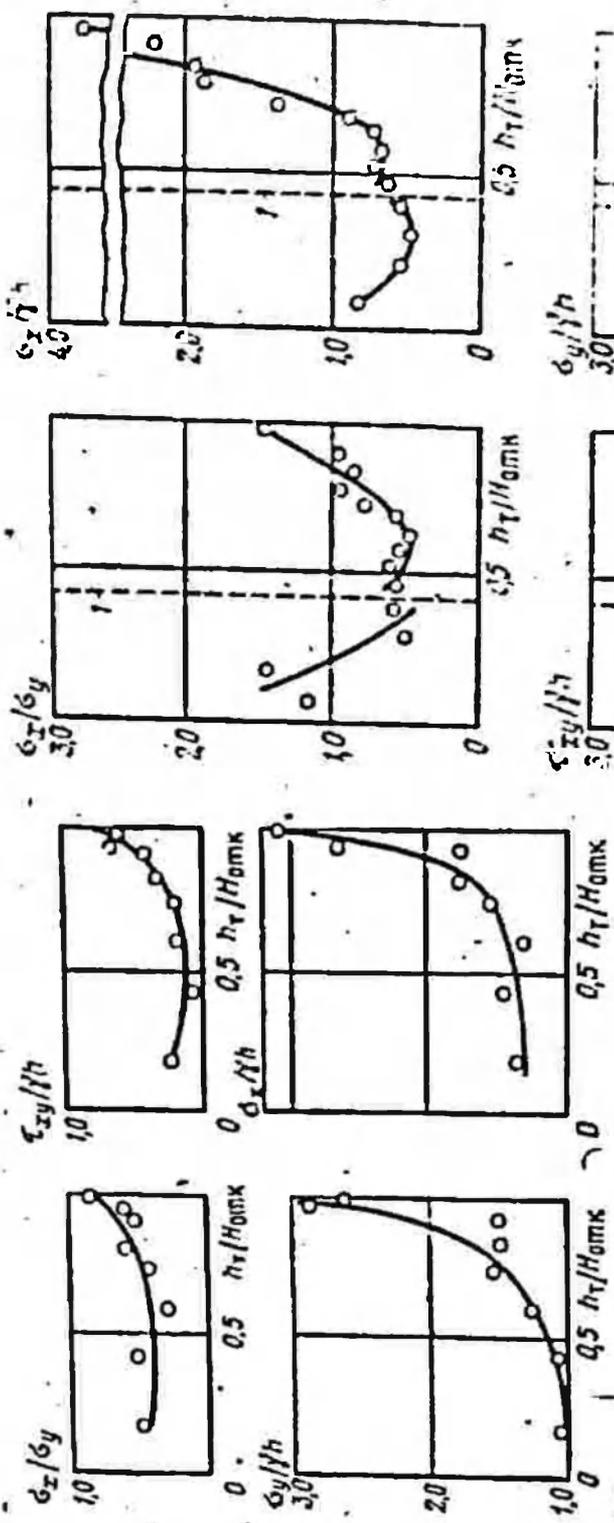


Рис. 13. Распределение напряжений по поверхности разрушения в модели однородного откоса

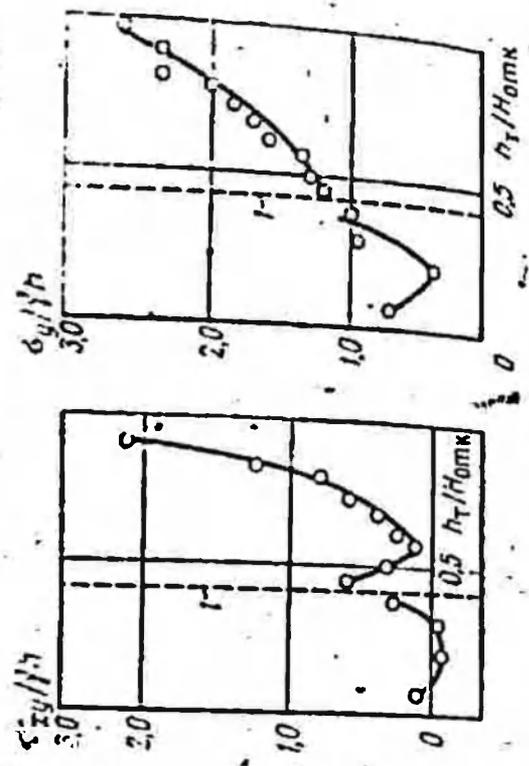


Рис. 14. Распределение напряжений по поверхности разрушения в модели с углом наклона основания 25°. 1 -- граница контакта

Значения коэффициентов при γ/h в формулах (2.7) изменяются по вероятной поверхности разрушения в однородных откосах в следующих пределах: $k_y = 0,4 \div 3,4$; $k_x = -0,2 \div 4,1$; $k_{xy} = -0,4 \div 3,7$.

На рис. 13 и 14 показано изменение напряжений по поверхности разрушения в моделях одноярусных отвалов, на рис. 15 — в модели трехъярусного отвала, расположенного на основании с углом наклона 15° .

Изучалось также влияние на распределение напряжений в моделях отвалов таких факторов, как: угол наклона основания отвалов, подрезка нижнего яруса под углом 45° , наличие слабого слоя в основании отвалов, целика и предохранительных выемок в почве пласта.

Как установлено при анализе экспериментальных данных, рассмотренные основные факторы вызывают перераспределение напряжений в моделях отвалов и тем самым влияют на их устойчивость. Так, с изменением угла наклона основания меняются величины максимальных касательных напряжений, области их концентрации и общая картина распределения напряжений в моделях отвалов. Наличие слабого слоя в подошве отвалов несколько снижает порядок величин τ_{\max} (см. рис. 10), однако это не означает, что условия в модели 3б по сравнению с моделью 2б более благоприятные (при прочих равных условиях). Максимальные касательные напряжения достигают больших значений в самом слабом слое, и в случае превышения их допустимых значений возможна деформация отвала с выдавливанием пород слабого основания.

Сопоставляя модель 2б с моделью 4а, в которой исследовался эффект от предохранительного целика, со всеми моделями, имитирующими различные выемки в основании отвалов (см. рис. 10), можно утверждать, что как целик, так и выемки существенно влияют на характер распределения напряжений и способствуют значительному снижению величин максимальных касательных напряжений, повышая тем самым устойчивость отвалов, причем наибольший эффект наблюдается в нижнем ярусе и несколько слабее он проявляется в верхних ярусах отвалов. Количественная оценка влияния рассмотренных факторов на устойчивость внутренних отвалов будет рассмотрена ниже, в следующей главе, но даже качественный анализ дал вполне определенные результаты.

На основе анализа экспериментальных данных о на-

Пряженном состоянии отвалов, полученных с помощью метода тензометрической сетки, был исследован характер распределения напряжений в моделях отвалов.

Во-первых, установлено, что напряженное состояние в приоткосной зоне существенно отличается от распределения напряжений в полуплоскости.

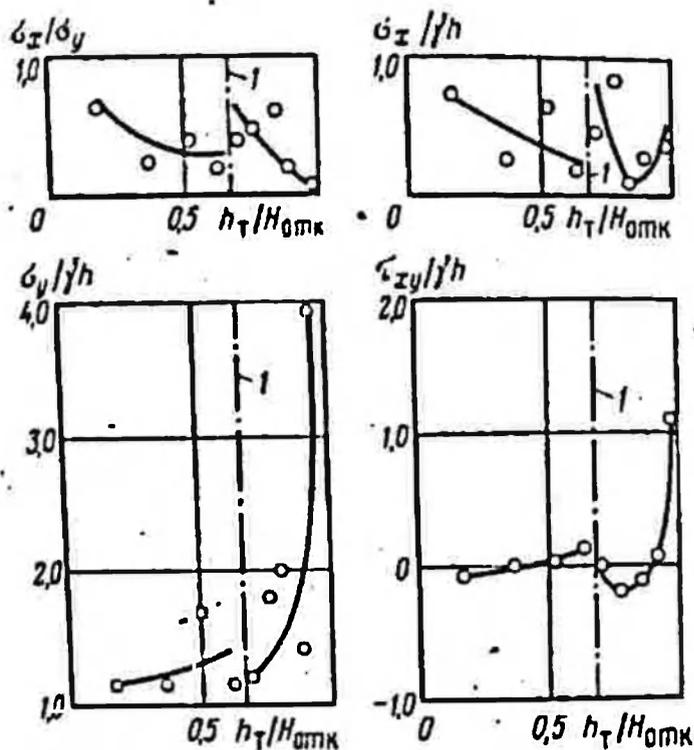


Рис. 15. Распределение напряжений в модели трехъярусного отвала на основании с углом наклона 15° :

1 — граница контакта

Во-вторых, в приоткосной зоне существуют области экстремальных значений составляющих напряжений: минимальных горизонтальных σ_x , максимальных вертикальных σ_y и касательных τ_{max} , в которых должны располагаться наиболее вероятные поверхности разрушения.

В-третьих, моделирование отвалов позволило оценить степень влияния ряда основных факторов (угол падения пласта, целики, выемки в подошве и др.) на напряженное состояние отвалов; в свою очередь, обуславливающее их устойчивость.

Таким образом, в результате проведенных экспериментов была впервые получена количественная картина поля напряжений в отвалах конечной высоты, позволив-

шая решить задачу оценки степени устойчивости отвалов на пологом и наклонном основании. Методика количественной оценки устойчивости отвалов по экспериментальным данным будет рассмотрена в следующей главе.

2.3. Способ определения размеров приоткосной зоны

Для оценки устойчивости открытых горных выработок и отвалов большое значение имеет знание характера распределения напряжений в приоткосной части массива, в частности, определение зоны влияния откоса на напряженное состояние массива.

Качественное исследование зонального распределения поля напряжений было выполнено в МГМИ (Магнитогорский горно-металлургический институт) [27, 26]. В работе [22] дается количественная оценка ширины зоны влияния откоса для крутых откосов с углами 45° и более. Например, для вертикального откоса ширина зоны его влияния по верху равна высоте откоса $H_{\text{отк}}$, а по низу — $0,5 H_{\text{отк}}$.

Зона влияния откоса устанавливалась по двум вариантам критерия: $\sigma_x/\sigma_y = \text{const}$ и вертикальности направления вектора σ_1 .

На рис. 16 представлены эпюры σ_x/σ_y по горизонтальным сечениям в однородной модели с углом откоса

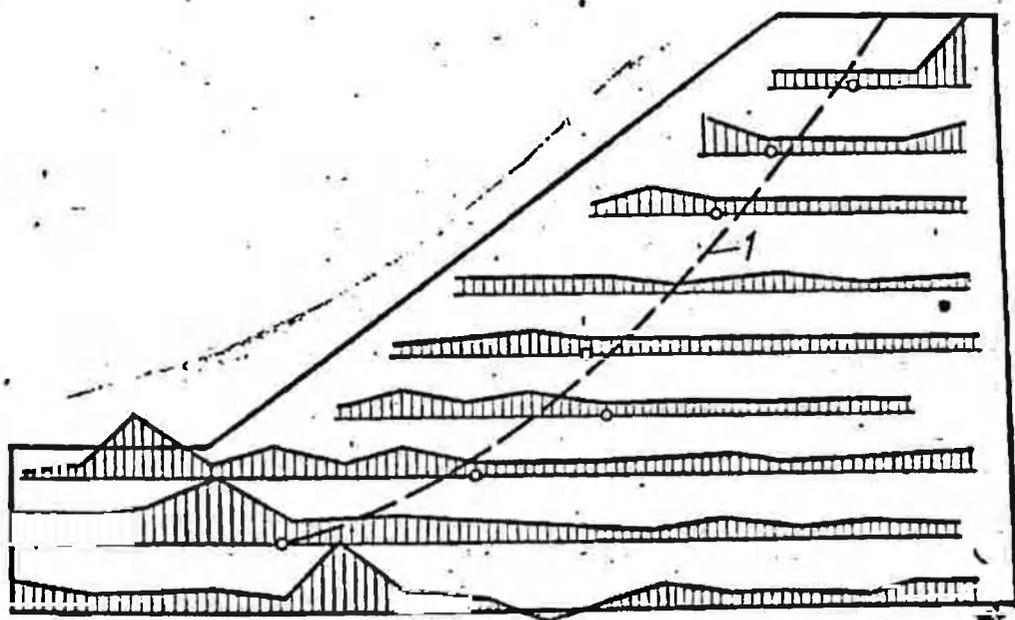


Рис. 16. Эпюры σ_x/σ_y в одноярусной модели с углом откоса 37° :

• 1 — граница приоткосной зоны

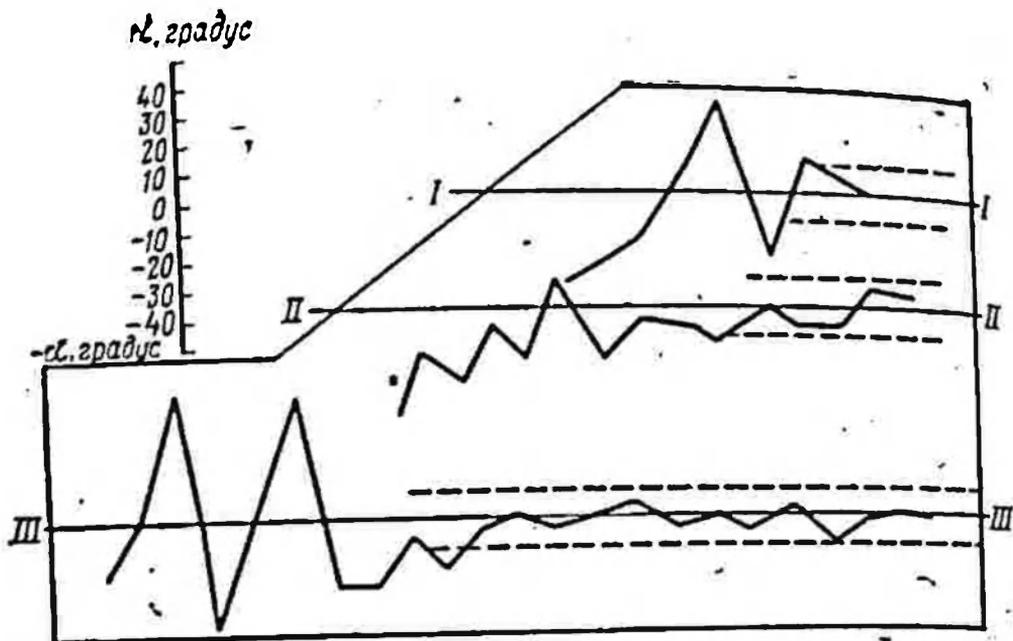


Рис. 17. Отклонение вектора σ_1 от вертикали по горизонтальным сечениям в модели откоса

37°. На рис. 17 показана схема модели однородного откоса, где в качестве примера даны три (из одиннадцати рассмотренных) сечения, по которым проанализировано отклонение вектора σ_1 от вертикали. Условно положительный угол α в масштабе, указанном на схеме, отложен вверх от сечения, а отрицательный вниз. С учетом возможных ошибок измерений напряжений (10—11%) граница приоткосной зоны определялась по первым (считая от откоса) точкам, где угол α отклонялся от вертикали в любую сторону на 9—10°. Эта зона допустимых отклонений ограничена пунктирными линиями.

На рис. 18 показана приоткосная зона в модели однородного откоса, ограниченная областью АБВГД. Линия БД считается условной границей, разделяющей массив, прилегающий к уступу и к его подошве; $b_{o.m}$ — ширина зоны влияния откоса в массиве уступа; $b_{o.n}$ — то же, в области, примыкающей к подошве уступа; h_T — текущая высота, измеряемая от горизонта верхней площадки уступа. Справа внизу показано положительное направление вектора σ_1 , отклоненного от вертикали на угол α .

Для проверки предложенного способа определения местоположения приоткосной зоны был использован дополнительный вариант критерия $\sigma_x/\sigma_y = \text{const}$. В этом случае граница зоны влияния откоса определялась также по точкам, где отношение σ_x/σ_y имело постоянное

значение (с учетом ошибок применяемого метода моделирования). Границы приоткосной зоны, установленные по этим двум критериям, близки друг к другу, и их расхождение находится в пределах точности определения напряжений в модели откоса.

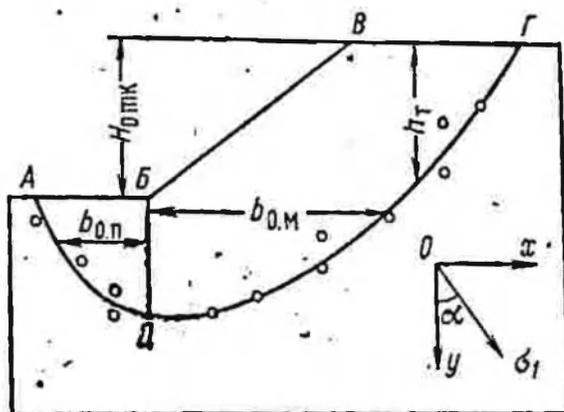


Рис. 18. Местоположение приоткосной зоны в модели откоса

В случае однородных моделей, согласно условию Митчела-Леви, распределение напряжений в них зависит от граничных условий, определяемых в данном случае углом откоса, и не зависит от упругих свойств материала модели.

Для установления влияния угла откоса выработки на размеры приоткосной зоны были проведены эксперименты на однородных моделях с углами откосов 90, 60, 45, 37 и 24°.

С учетом выбранного критерия на схемы моделей наносились экспериментальные значения напряжений. На рис. 19 представлена схема одной из моделей с опытными точками, отвечающими варианту критерия $\sigma_1 = 90^\circ$. Здесь b_m — расстояние по горизонтали от контура откоса или от линии ОВ до границы приоткосной зоны в области, прилегающей к массиву уступа; b_n — расстояние по горизонтали от линии ОВ до границы приоткосной зоны в области, прилегающей к подошве уступа; h — расстояние по вертикали от горизонта верхней площадки до рассматриваемой точки; H — высота уступа. Затем полученные точки переносились на графики, и способом средних строились зависимости $b_m/H = f_1(h/H)$ и $b_n/H = f_2(h/H)$, оконтуривающие границы приоткосной зоны. Для каждой модели были получены два графика, соответствующие двум вариантам принятого критерия. За расчетный принимался тот график, на котором значения приоткосной зоны были большими. Коэффициент вариации составил при этом 25—30%, а корреляционное отношение 0,7—0,8.

Пример подобной зависимости приведен на рис. 20.

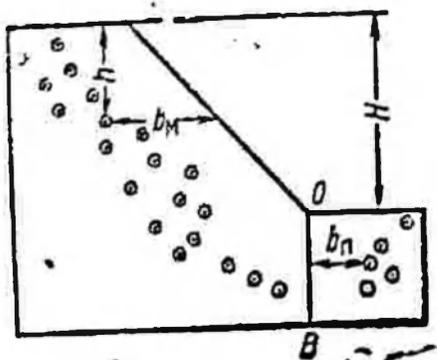


Рис. 19. Схема модели с углом откоса 45°

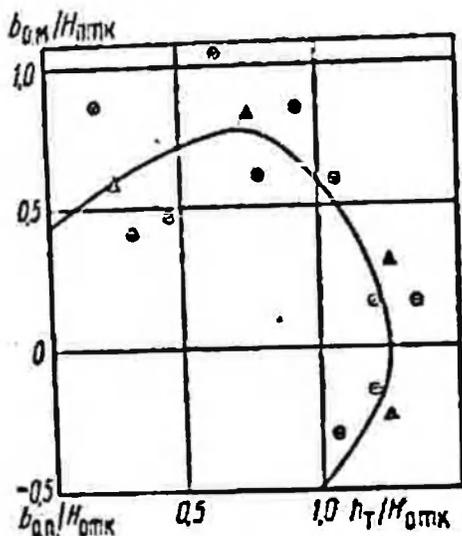


Рис. 20. График зависимости $b_{0.м}/H_{отк}$ и $b_{0.в}/H_{отк}$ от $h_г/H_{отк}$ для модели с углом откоса 60° , построенный по критерию $\sigma_x/\sigma_y = \text{const}$ (кружками обозначены опытные точки, треугольниками — средние по интервалам)

Используя такой график, можно построить контур приоткосной зоны для работ любой высоты, но с фиксированным углом откоса.

Для приближенного построения контура приоткосной зоны использован следующий упрощенный прием. На схеме рис. 21 показаны четыре принятые характерные точки, определяющие границу приоткосной зоны. Эти точки ограничивают следующие предельные размеры данной зоны: $b_{п.п}$ — ширина приоткосной зоны на нижней площадке уступа; $b_{м.п}$ — то же, в приоткосном массиве на горизонте нижней площадки; $b_{м.в}$ — то же, на верхней площадке уступа; $h_г$ — глубина расположения приоткосной зоны от нижней бровки уступа.

С использованием графиков, подобных приведенному на рис. 20, построены зависимости, показывающие изменение этих характерных точек от угла откоса уступа (см. график рис. 21). Зависимости при углах откоса менее 24° построены условно на основе линейной экстраполяции прямой 1 и поэтому нанесены простыми штриховыми линиями (см. рис. 21). Как видно из рисунка, при угле откоса уступа, равном 6° , граница зоны его влияния выходит в верхнюю и нижнюю бровки уступа. При дальнейшем выполаживании угла откоса границы зоны уменьшаются. Точки выхода границ зоны на откос перемещаются соответственно вверх (от нижней бровки уступа) и вниз (от верхней бровки) по контуру откоса, пока не сливаются друг с другом в точке при угле откоса, равном нулю.

По графику рис. 21 можно построить границу приоткосной зоны для уступов любой высоты, задавшись углом откоса, определив безразмерные координаты четырех характерных точек и соединив их плавной кривой.

Рекомендуемый способ построения границ приоткосной зоны может быть использован для решения широкого круга задач, связанных с устойчивостью открытых горных выработок и отвалов:

определение ширины охранных зон при расположении капитальных сооружений поверхностного комплекса вблизи бортов карьеров;

установление предельных границ зон укрепительных работ при закреплении ослабленных участков бортов карьеров;

нахождение зоны влияния откоса борта карьера при комбинированной открытой и подземной разработке месторождений;

определение границ зоны замера напряжений в приоткосном массиве при натурных исследованиях в карьере (величина этой зоны определяет объем полевых работ);

определение размеров моделей при моделировании устойчивости с тем, чтобы зона влияния откоса не ограничивалась искусственно их размерами.

Таким образом, на основе данных моделирования установлено, что размеры приоткосной зоны существенно уменьшаются с выполаживанием угла откоса. На основе полученных закономерностей разработан графиче-

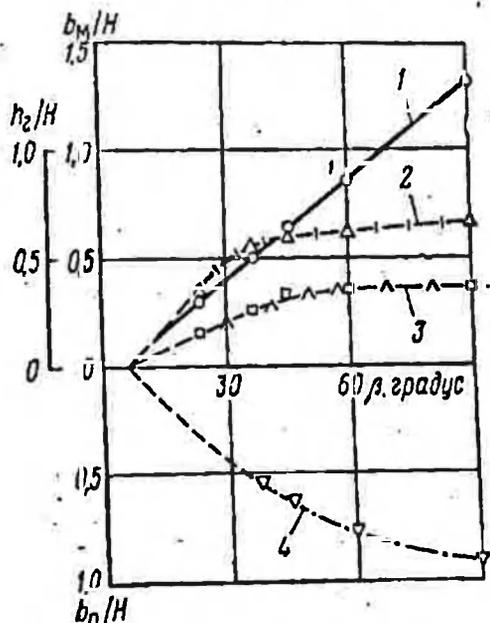
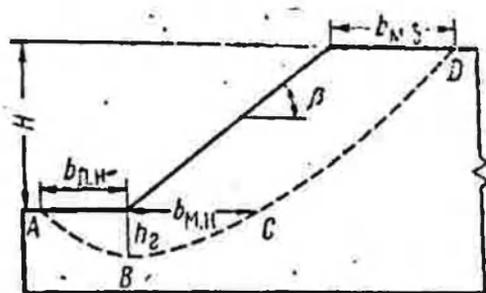


Рис. 21. Схема приоткосной зоны и графики зависимостей:

1 — $b_{п.н.}/H$; 2 — $b_{м.н.}/H$; 3 — h_2/H ; 4 — $b_{п.н.}/H$ от β

ский способ определения размеров приоткосной зоны в зависимости от угла откоса выработок.

2.4. Характеристика напряженного состояния, полученная другими способами

Для контроля метода тензометрической сетки и оценки достоверности полученных результатов был применен комплекс дополнительных методов исследований.

Как известно, поляризационно-оптический метод основан на свойстве большинства материалов (прозрачных и изотропных) приобретать под действием напряжений (деформаций) способность двойного лучепреломления, величина которого, связанная с напряжением, измеряется оптическим методом при просвечивании модели поляризованным светом.

Основной закон фотоупругости (закон Вертгейма), выражающий количественную связь между оптическим эффектом и разностью главных напряжений, имеет следующий вид:

$$\Gamma = c_{\sigma} d_m (\sigma_1 - \sigma_2), \quad (2.8)$$

где Γ — разность хода лучей, ангстрем; c_{σ} — относительный оптический коэффициент напряжений, 10^{-7} , см²/кгс; d_m — толщина модели, см.

Модель однородного откоса из игдантина (IХа) первоначально была исследована методом тензометрической сетки (как описано в предыдущем параграфе), а после снятия отпечатков и следов типографской краски методом фотоупругости. Модель была помещена в координатно-синхронный поляриметр КСП-5, предназначенный для измерений разности хода лучей методом компенсации. Этот метод самый точный, но весьма трудоемкий. Измерение оптической разности хода лучей в отдельных точках модели по заданным сечениям производилось компенсатором КПК (Берека).

Принцип измерения разности хода состоял в том, что к разности хода лучей, созданной моделью, компенсатором добавлялась разность хода, равная по величине искомой, но обратная по знаку. В этом случае результирующая разность хода лучей равнялась нулю, и при скрещенных поляроидах наблюдалось затемнение в измеряемых точках модели.

Направление главных напряжений определялось по параметру изоклины путем синхронного вращения поляризатора и анализатора до затемнения. Параметр изоклины φ_i устанавливался по лимбу поляриметра. Нулевой параметр изоклины соответствовал нулевому отсчету на лимбе.

Измерения производились по методике [89].

В результате расчетов получены величины максимальных касательных напряжений в модели однородного откоса по сетке 1×1 см. Для сравнения этих величин с рассчитанными методом тензометрической сетки построены эпюры τ_{\max} по горизонтальным сечениям (рис. 22). Как видно, сходимость величин τ_{\max} , полученных различными методами, вполне удовлетворительна, что позволило считать метод тензосетки достаточно приемлемым.

Кроме того, часть моделей отвалов 1—6 исследована оптическим методом при помощи «замораживания» напряжений в поле центробежных сил (рис. 23). Эксперименты были проведены в лаборатории оптического моделирования МИСИ (Московский инженерно-строительный институт) им. В. В. Куйбышева.

Сущность метода заключается в том, что модели при центрифугировании нагреваются, а затем постепенно охлаждаются. Воспроизведенное в них распределение напряжений остается «замороженным» в том виде, как оно было создано центробежными силами, моделирующими действие сил тяжести отвалов. Это распределение напряжений можно впоследствии наблюдать на оптической установке.

Для моделирования использовались высокомолекулярные оптически чувствительные материалы — эпоксималы. Они приготавливались в двух вариантах: породы отвалов имитировались эпоксималом на основе эпоксидной смолы ЭД-5 и с метилтетрагидрофталевым ангидридом в качестве отвердителя; для имитации пород основания отвалов в материал в качестве отвердителя добавлялся малеиновый ангидрид.

Определение оптических и упругих свойств эпоксималов (цены полосы и модуля упругости) осуществлялось по общепринятой методике на имеющихся в лаборатории МИСИ приборах и установках.

Модуль упругости E и цена полосы материала σ_0 исследованных моделей представлены в табл. 8.

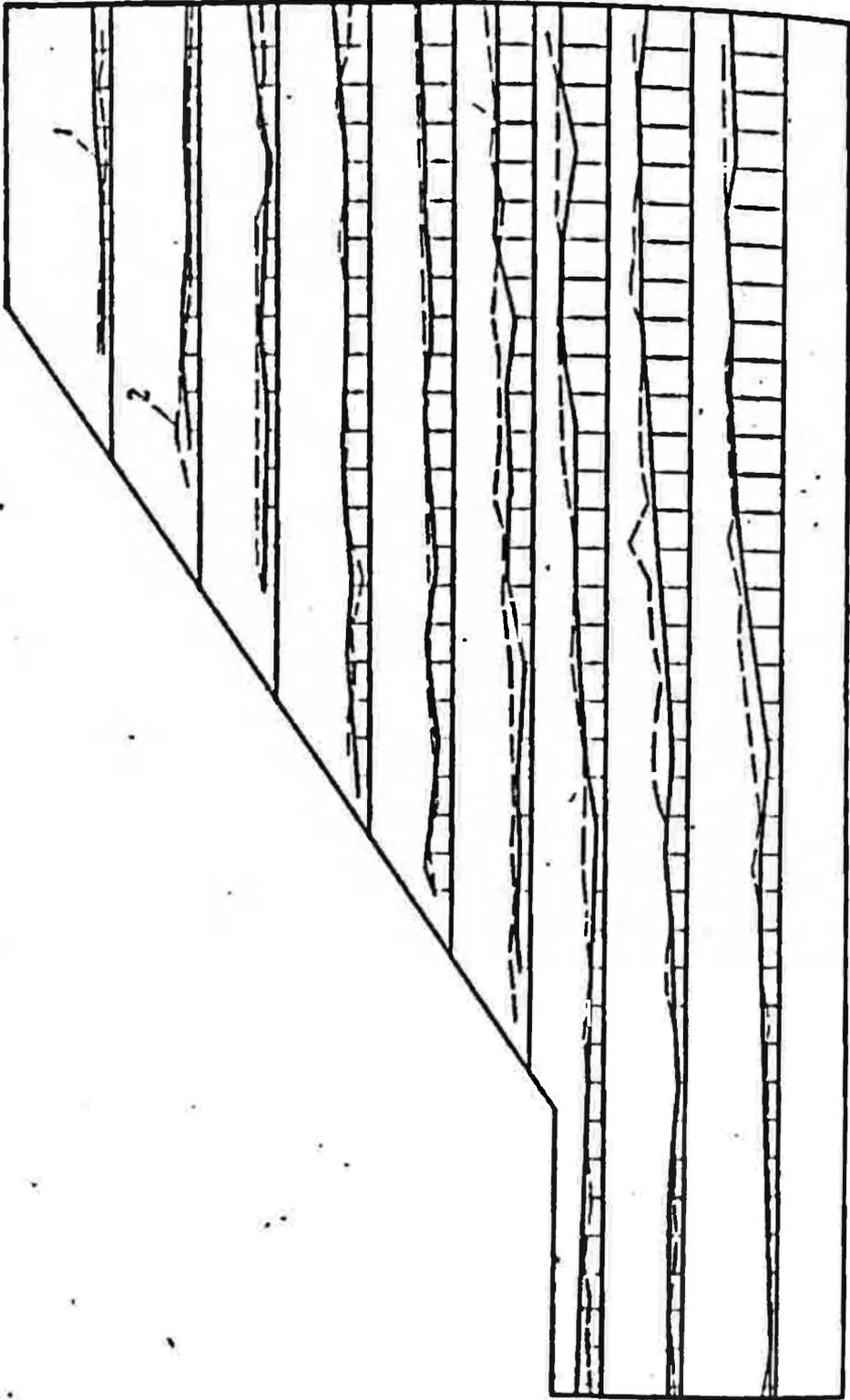


Рис. 22. Эпюры τ_{max} в однородной модели по данным метода тензомергической сетки / мм-тода фотоупругости 2

Объемная масса эпоксисмалов, имитирующих породы отвалов, равна $1,20 \text{ г/см}^3$, а пород основания отвалов— $1,28 \text{ г/см}^3$.

Расчеты показали, что модуль упругости эпоксисмалов при 120°C колеблется в пределах от 233 до 240 кгс/см^2 , а цена полосы — от 0,32 до $0,46 \text{ кгс/см}$.

Двухслойные модели в масштабе 1 : 2000 имитировали отвалы на наклонном основании (15°), углы откосов ярусов равнялись 35° , высота нижнего яруса — 30 м, а последующих — 32 м. Модели 2—5 характеризовались наличием в основании

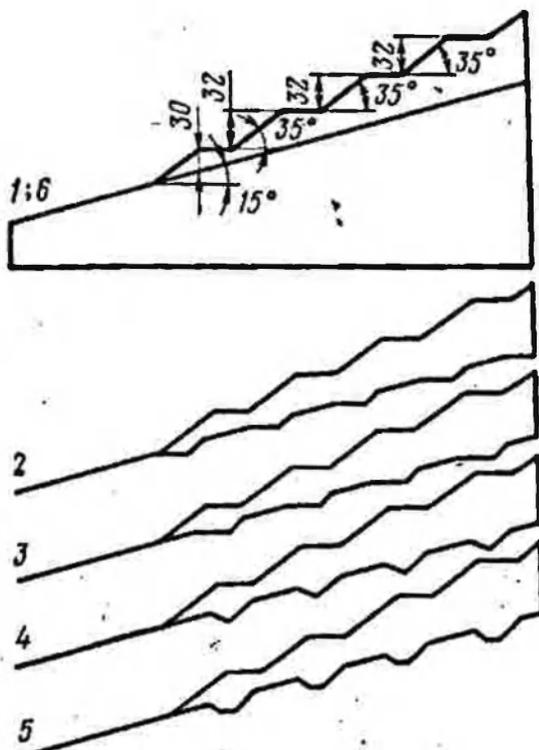


Рис. 23. Модели отвалов из эпоксисмала

отвала выемок различной конфигурации. Модель 6 аналогична модели 1 и являлась проверочной.

Модели помещали в специально изготовленное из текстолита загрузочное устройство и испытывали на

Таблица 8

Свойства материала	Номер модели				
	1	2	3	4	5
E , кгс/см^2 при $T=120^\circ\text{C}$	236*	235	235	235	233
	240	240	239	238	239
σ_0 , кгс/см	0,33*	0,32	0,32	0,32	0,33
	0,46	0,46	0,43	0,40	0,43
d_m , мм	9,8*	9,8	10,5	9,9	9,8
	10,6	10,7	10,5	10,3	10,5

* В числителе—для верхнего, в знаменателе—для нижнего слоя.

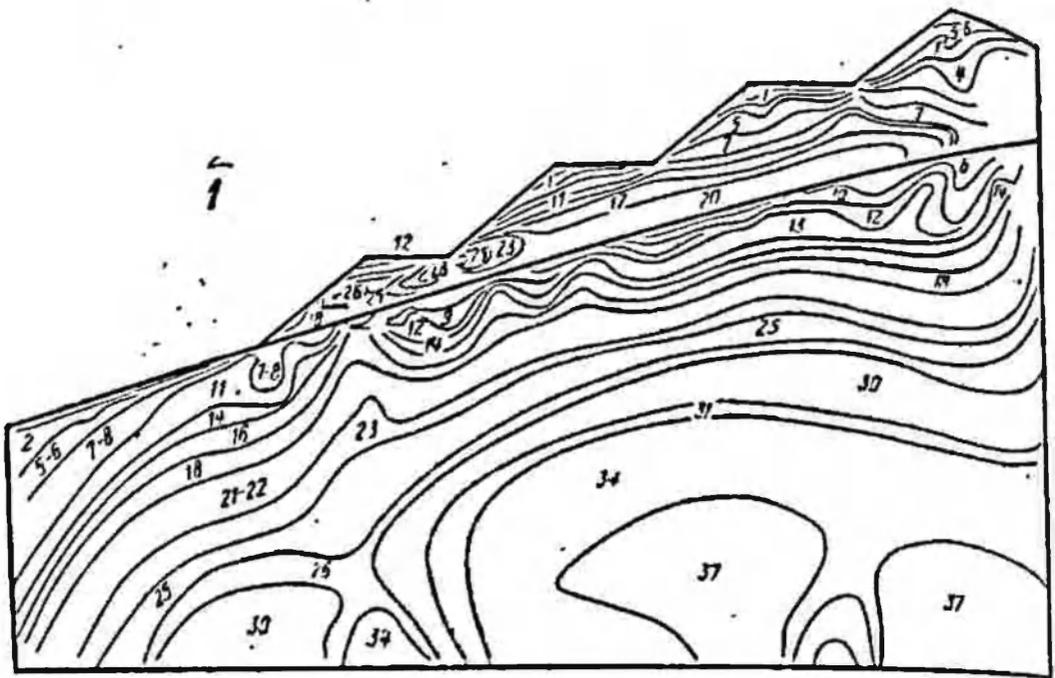


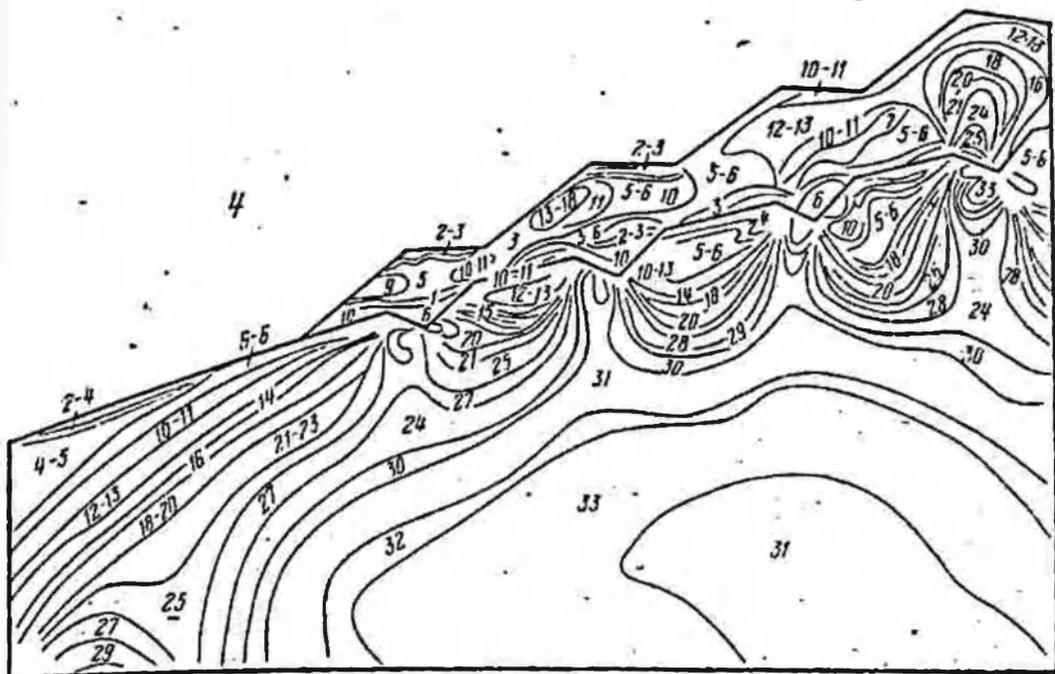
Рис. 24. Картина цветов изохром (порядковых

центрифуге, где сначала нагревали до температуры $120\text{--}140^\circ\text{C}$, а затем постепенно охлаждали.

В процессе центрифугирования температура постепенно поднималась, эпоксиамалы принимали высокоэластичные состояния и под действием собственного веса в поле центробежных сил модели деформировались — в них возникала картина распределения напряжений, которая при охлаждении до комнатной температуры «замораживалась», и в моделях полностью сохранялось напряженное состояние. Расшифровка полученной картины изохром производилась с помощью фотоэластициметра FP в лаборатории горного давления ИГД им. А. А. Скочинского.

Как известно, наиболее просто определение главных напряжений в моделях можно осуществлять по цветной картине изохром, полученной при белом источнике света. Этот метод прост, но содержит определенный элемент субъективизма при распознавании цветов, что приводит к ошибкам.

Достаточно точным и несложным является метод полос, который наиболее эффективен при исследовании моделей, изготовленных из материалов с высокой оптической чувствительностью, к каким относятся эпоксиамалы. Для определения напряжений по методу полос необходим монохроматический источник света, в кото-



номеров цветов) в моделях отвалов из эпоксимала

ром при скрещенных поляризаторе и анализаторе каждой темной полосы в модели соответствует разность хода в одну длину волны или в целое число длин волн.

Напряжение в модели определялось по формуле:

$$\sigma_M = \frac{\sigma_0}{a_M} n_p, \quad (2.9)$$

где σ_0 — цена полосы материала, кгс/см; n_p — порядок полосы.

Для пересчета напряжений на натуру использовалась формула

$$\sigma_n = \frac{l_n}{l_M} \frac{\gamma_n}{\gamma_M} \frac{1}{K_{ц}} \sigma_M, \quad (2.10)$$

где $K_{ц}$ — масштабный коэффициент центрифугирования.

Методом полос можно определить разность главных напряжений или величину τ_{max} .

С применением этих двух методов — сопоставления цветов и полос, произведен анализ напряженного состояния отвалов на наклонном основании (15°) при отсутствии и при наличии в основании отвалов предохранительных выемок. Как установлено, выемки в почве пласта существенно изменяют напряженное состояние отвала. Например, при сравнении моделей 1 и 4 (рис. 24) обнаружено, что выемки вызывают перерас-

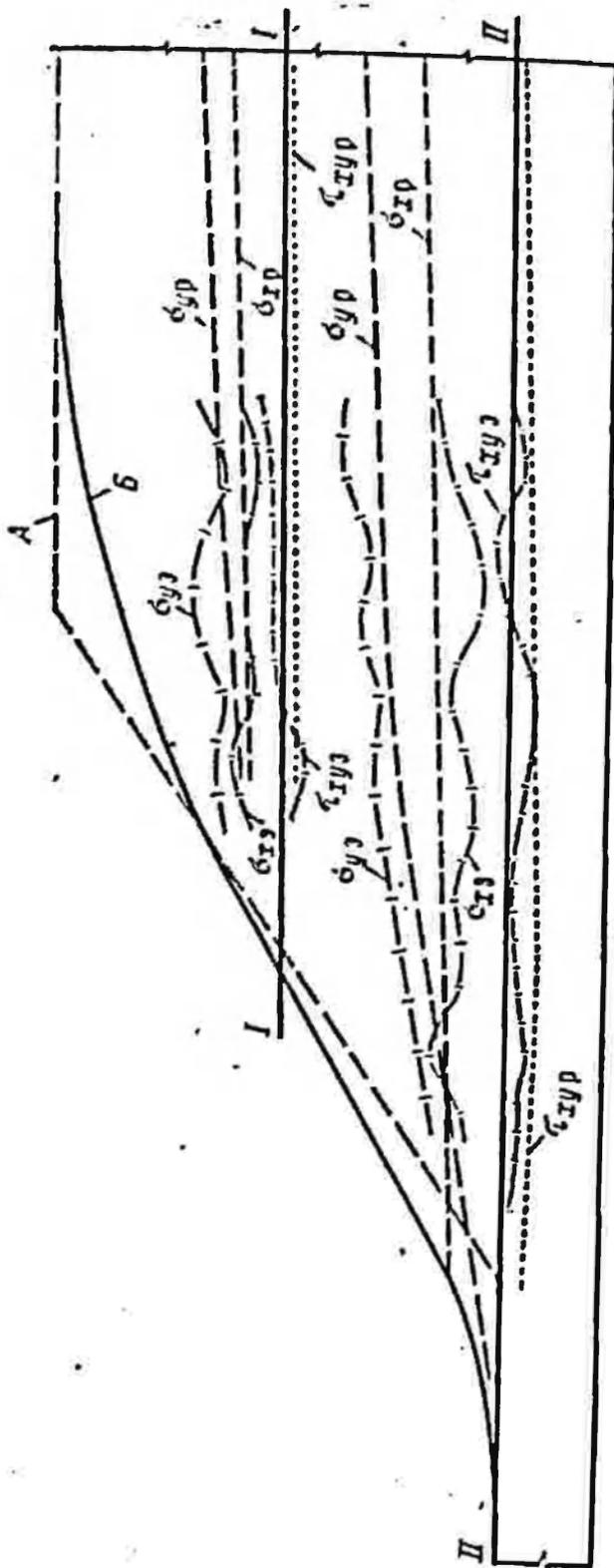


Рис. 25. Эпюры экспериментальных (индекс э) и теоретических (индекс р) значений напряжений в модели однородного откоса:

А — контур экспериментального откоса; Б — то же, теоретического

пределение напряжений, снижая порядок полосы на один и более, что соответствует уменьшению значений максимальных касательных напряжений в 2 раза и более, а это, в свою очередь, способствует повышению устойчивости отвала.

Проведенные эксперименты по моделированию отвалов методом фотоупругости хорошо согласуются с результатами, полученными с помощью метода тензосетки, что подтверждает правомерность его применения.

Моделирование отвалов с «замораживанием» напряжений в поле центробежных сил позволило изучить характер распределения напряжений в отвалах и его изменение в зависимости от наличия в их основании выемок. Модели отвалов из эпоксимала подтвердили обнаруженное методом тензосетки существенное влияние выемок в почве пласта на напряженное состояние внутренних отвалов, способствующее повышению их устойчивости. Сходимость результатов моделирования, полученных тремя различными методами, позволяет считать проведенные эксперименты вполне достоверными.

В заключение было проведено сравнение результатов моделирования способом тензосетки с точным решением задачи теории упругости, полученным В. К. Цветковым [90].

Сопоставление теоретических и экспериментальных напряжений по однозначным сечениям показало вполне удовлетворительную сходимость. Иллюстрацией к этому является рис. 25, где приводятся эпюры σ_x , σ_y и τ_{xy} по двум горизонтальным сечениям (I—I и II—II), построенные на основании лабораторного моделирования и теоретических расчетов.

2.5. Исследование деформаций отвалов в лабораторных и полевых условиях

Для изучения процесса развития деформаций откозов отвалов были проведены лабораторные и полевые опыты. Для лабораторных экспериментов использовался саморазрушающийся оптически активный материал — агарин, который помимо своих оптических свойств обладает способностью работать как эквивалентный материал.

Для приготовления агарина исходным продуктом является агар-агар. В студнях агарина выпадает большое

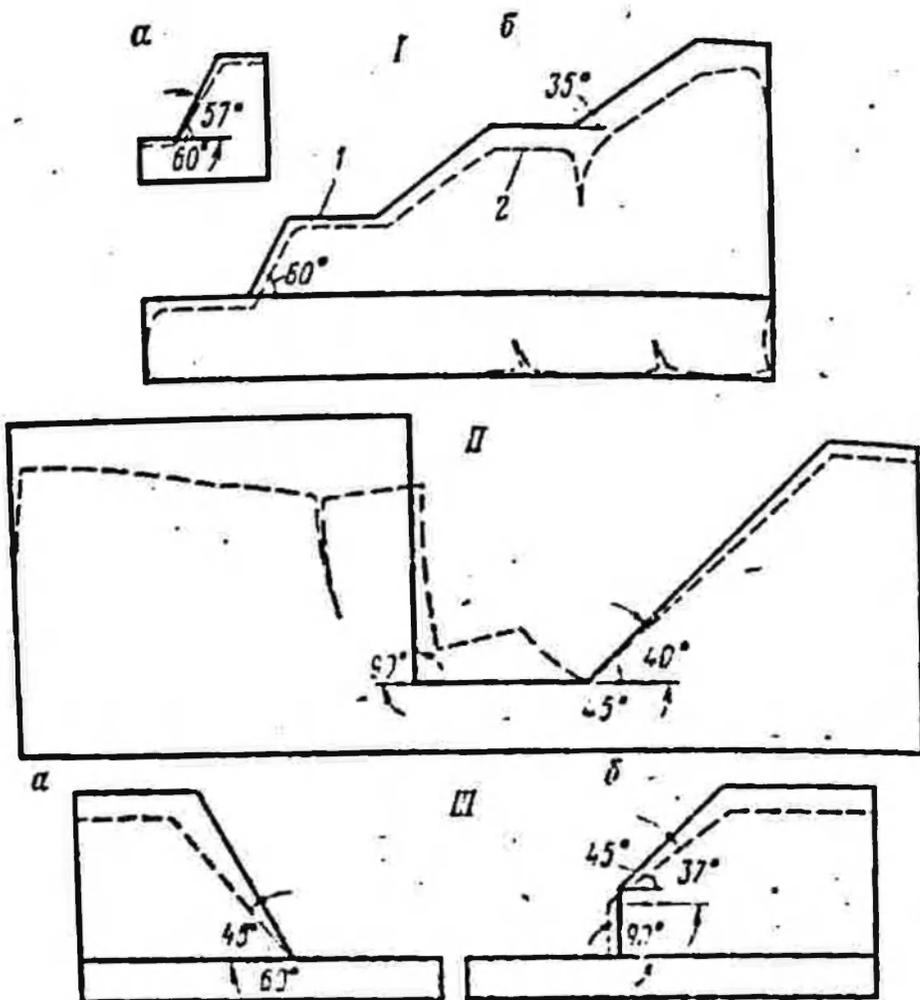


Рис. 26. Модели отвалов из агарина:
1 — первоначальный контур. 2 — конечный контур

количество хлопьев, поэтому материал становится мало-прозрачным. Учитывая трудность его осветления, авторы не задавались целью добиться прозрачности материала, а ставили перед собой задачу рассмотреть характер развития деформации отвалов на моделях из агарина, разрушающихся из-за его хрупкости.

Согласно методике [52, 89], агарин приготавливали в автоклаве, а затем заливали в раму-форму и одновременно в формочки для тарировочных образцов, предварительно нагретые до температуры расплавленного материала.

Хрупкость агарина зависит от процентного содержания в студне агар-агара; чем ниже этот процент, тем больше хрупкость.

На рис. 26 представлены схемы моделей отвалов из агарина. Модель Ia имитировала однородный отвал с углом подрезки 60° и высотой 30 м. Она изготовлена в масштабе 1:100 в раме-форме размером $0,50 \times 0,50 \times$

$\times 0,02$ м из следующего материала: агар-агара — 3%, глицерина — 5%, воды — 92%. Модель испытана в плоско-напряженном состоянии. Зафиксирована только осадка, разрушения откоса обнаружено не было.

Для приготовления второй модели из агарина использована рама-форма размером $1,20 \times 0,70 \times 0,02$. Модель представляла собой трехъярусный отвал на горизонтальном основании с углом откоса 35° , причем нижний ярус был подрезан под углом 60° , высота его равнялась 30 м, а последующих — 32 м (см. рис. 26, модель Iб). Процентное содержание компонентов для нижнего и верхнего слоев соответственно следующее: агар-агар — 2—3, глицерин — 3—5, вода — 92—93. Испытание тарировочных образцов показало, что агарин обладает прочностью на сжатие, равной 200—300 кгс/см².

Модель деформировалась, а спустя 1—1,5 сут с момента изготовления на горизонтальной площадке второго яруса отвала образовалась трещина. Ширина захвата составила 0,5 Н.

В следующей модели материал обладал более хрупкими свойствами (содержание агар-агара 1%). В однородном материале в масштабе 1 : 100 были вырезаны два откоса: слева под углом 90° высотой 20 м и справа под углом 45° высотой 18 м (см. рис. 26, модель II). При испытании модели обнаружено проявление деформации в вертикальном откосе. Ширина захвата составила 0,32 Н. В откосе с углом наклона 45° трещин на верхней площадке не было.

Модели отвалов, изготовленные из мелко-раздробленных кусков агарина на горизонтальном основании монолитного материала, обнаружили только оседание и выполаживание угла откоса (см. рис. 26, модели IIIа, б).

Анализируя результаты проведенных исследований по изучению процесса развития деформаций откосов на моделях из агарина, можно утверждать, что поскольку модели с углами откоса, равными 35 , 45 и 60° , не проявили признаков разрушения, а вертикальный откос обрушился, то критический угол его подрезки должен находиться в интервале от 60 до 90° , что хорошо согласуется с фактическими данными. Кроме того, опыты позволили получить величину ширины захвата оползней в относительных единицах, которая также близка к реально возможной [21].

Таким образом, установлена принципиальная возможность изучения развития процесса деформаций на моделях из агарина. В этой области следует идти в первую очередь по пути создания материалов, отвечающих нужным требованиям. Агарин должен быть достаточно хрупким, но не настолько, чтобы он разрушался в момент изготовления модели.

В полевых условиях (разрез «Красногорский») на небольших стендах размерами около $0,7 \times 0,1$ м было выполнено моделирование отвалов из натуральных материалов. Было изготовлено и испытано восемь моделей отвалов, отсыпавшихся на основание с углом падения от 8 до 20° . Основанием отвалов в первых четырех моделях служила плита песчаника, в моделях пятой и шестой — мелкие плиточки алевролита и углистого аргиллита и в последних двух — плита углистого аргиллита. Модели представляли собой отвальные конусы, отсыпанные из мелких фракций пород, слагающих внутренние отвалы на участках третьем и четвертом (первые четыре модели) и втором — шестом (остальные модели); процентное отношение песчаных и глинистых литологических разностей в моделях примерно соответствовало натурным условиям. Определенные в полевых условиях свойства пород, из которых были изготовлены модели отвалов, приводятся в табл. 9.

Эксперименты велись следующим образом. На подготовленное основание, имеющее определенный уклон, от-

Таблица 9

Показатели	Литологические разности пород	
	алевролит	песчаник
Естественная влажность, %	8,10	13,00
Объемная масса скелета, г/см ³	1,49	1,40
Объемная масса при естественной влажности, г/см ³	1,60	1,57
Удельная масса, г/см ³	3,18	2,54
Пористость, %	47	55
Состав крупных включений размером $1,5 \times 2,5 \times 1,0$ см, %	15—20	55
То же, размером $2,0 \times 1,7 \times 1,7$ см, %	—	10—15

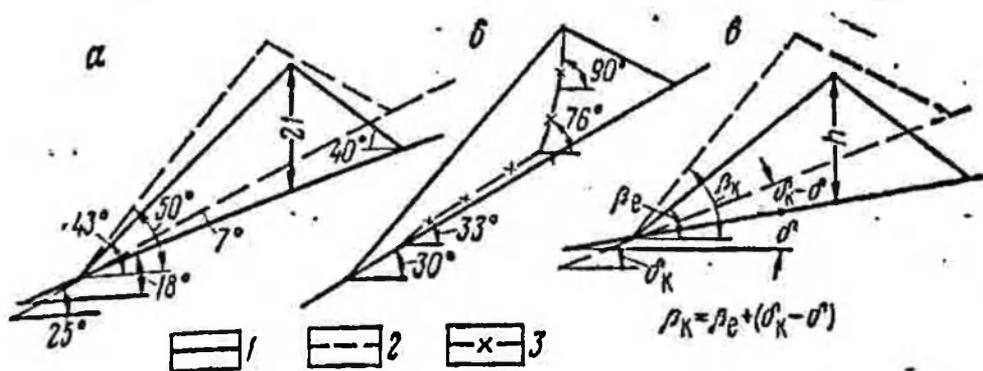


Рис. 27. Профили а и б и схема в деформаций в полевых моделях отвалов:

1 — начальное. 2 — конечное положение отвала, 3 — поверхность разрушения

сыпался конус из смеси пород высотой 15—21 см, что соответствовало линейному масштабу 1 : 200, замерялись углы откосов и высоты, а затем стенд медленно поднимали и фиксировали углы, при которых начинались деформации, а также конечные профили отвалов. Профили исследованных моделей представлены на рис. 27, а их характеристика приводится в табл. 10.

Как обнаружено, деформации отвалов в виде оползания пород начинаются с образования трещин заколов, возникающих как на гребне отвалов, так и за ним; ширина захвата колеблется от 0,25 до 0,64 H . Поверхность разрушения в верхней части наклонена под различными углами, изменяющимися в пределах от 46 до 90°. Наблюдающееся на практике деформирование откосов при угле 35—40° связано в первую очередь с превышением предельных значений высот отвалов.

В случае наличия слабых пород в подошве отвалов нарушение их устойчивости происходит при более низких значениях углов наклона основания.

Опыты показали, что критический угол откосов отвалов, при котором происходит их деформация, составляет 45—50° при прочном основании и 36—39° при слабом.

Было установлено влияние угла наклона основания отвалов в зависимости от состава пород, слагающих его. Так, деформации отвалов, отсыпаемых на слабое основание, состоящее из углистых аргиллитов (модели 6—8), возникают при углах наклона основания, равных 15—20°, а в отвалах, расположенных на песчанике (модели 1—5), критические углы наклона основания достигают 24—25°.

Таблица 10

Номер модели	Породы осваивания отвалов	Состав пород	h_M , см	β_E , градус	δ_K , градус	β_K , градус
1	Песчаник	П-70 АА-30	17	32	24—25	47—49
2	»	П-60 АА-40	21	43	25	50
3	»	АА-10	19	38	30	50
4	»	П-70 Ал-15-20 Ар-10-15	10—15	38—50	24	45—50
5	Ложная почва из плиточек алевролита	П-50 Ал-50	15	35	24	38
6	То же, из плиточек аргиллита	П-60 Ал-23 Ар-17	20	33	15	37
7	Углистый аргиллит	То же	18	37	20	42—45
8	То же, увлажнен	То же	15	34	17	36—39

Примечание. h_M — высота моделей отвалов; β_E — угол естественного откоса; δ_K — критический угол наклона основания; β_K — критический угол откоса яруса; П — песчаник; АА — алевролит и аргиллит; Ал — алевролит; Ар — аргиллит.

Углы естественных откосов отвалов не зависели от угла наклона основания.

Таким образом, в результате исследований процесса развития деформации отвалов как в лабораторных, так и в полевых условиях установлен общий характер протекания деформаций в зависимости от ряда факторов. Модели из агарина позволили определить, что деформации откосов под действием сил собственного веса могут возникать при углах откосов от 60° до 90° , причем ширина захвата по данным моделирования практически совпадает с фактическими величинами.

Полевое моделирование позволило наблюдать процесс протекания деформации отвала и фиксировать его положение до и после деформации.

Были также получены значения критических углов наклона откосов и углов наклона основания, и выявлено влияние наклона основания и состава пород, слагающих его, на устойчивость отвалов.

3. ПОСТРОЕНИЕ ВЕРОЯТНОЙ ПОВЕРХНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ

3.1. Критерии для определения вероятной поверхности разрушения

Напряженное состояние внутри приоткосной зоны не является однородным. Здесь можно выделить три области: разгрузки (вблизи контура откоса), экстремальных напряжений и переходную к зоне постоянных (геостатических) напряжений. Естественно, что вероятная поверхность разрушения должна располагаться в зоне экстремальных напряжений.

При моделировании процессов разрушения и анализе характера деформаций горных пород многими исследователями установлено, что начало разрушения связано с образованием трещин, которые совпадают с направлением касательных напряжений. В частности, согласно [57], модели из агарина позволили наблюдать характер разрушения вокруг очистного забоя при отработке пласта, проявляющегося первоначально в зонах концентрации максимальных касательных напряжений. Так, вблизи забоя, а затем в местах наибольших значений τ_{\max} появились трещины, которые распространялись со стороны кровли и почвы пласта по направлению к его се-

редние, и это направление совпадало с направлением наибольших значений τ_{\max} .

Анализ характера напряжений в откосах, проведенный В. Д. Морозовым и другими [27, 55], показал, что в приоткосной зоне существует область, в которой максимальные сдвигающие τ_{\max} и главные нормальные σ_1 напряжения имеют наибольшие величины, а горизонтальные σ_2 напряжения стремятся к нулю.

Эта область приурочена к линии максимальных напряжений [53], которые уменьшаются по обе стороны от нее.

Первоначально были проведены поверхности разрушения по экстремальным значениям величины напряжений: по максимальным значениям τ_{\max} и σ_y и минимальным — σ_x . Для этого по горизонтальным сечениям отыскивали точки с минимальными или максимальными значениями этих величин (первые, считая от откоса), а затем по точкам строили поверхности разрушения. Следует заметить, что все три поверхности располагались очень близко друг к другу, а коэффициенты запаса устойчивости, рассчитанные по трем поверхностям разрушения, отличались не более чем на 8—9%, т. е. практически с учетом точности метода были одинаковы.

Учитывая тот факт, что при моделировании процессов разрушения и анализе характера деформаций горных пород многими исследователями установлено совпадение трещин, образующихся в момент разрушения, с направлением максимальных касательных напряжений, в основу предлагаемого метода построения поверхности разрушения положена общепринятая теория прочности Кулона—Мора.

Таким образом, поверхность разрушения необходимо строить по первым (считая от откоса) максимальным значениям τ_{\max} .

Для проверки и обоснования правомерности рекомендуемого способа построения поверхности разрушения использовался известный в теории пластичности критерий предельного равновесия при переходе пород в пластическое состояние [47].

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{4} + \frac{c \operatorname{tg} \varphi}{2}. \quad (3.1)$$

На рис. 28 приводятся эпюры максимальных касательных напряжений, полученных экспериментальным и

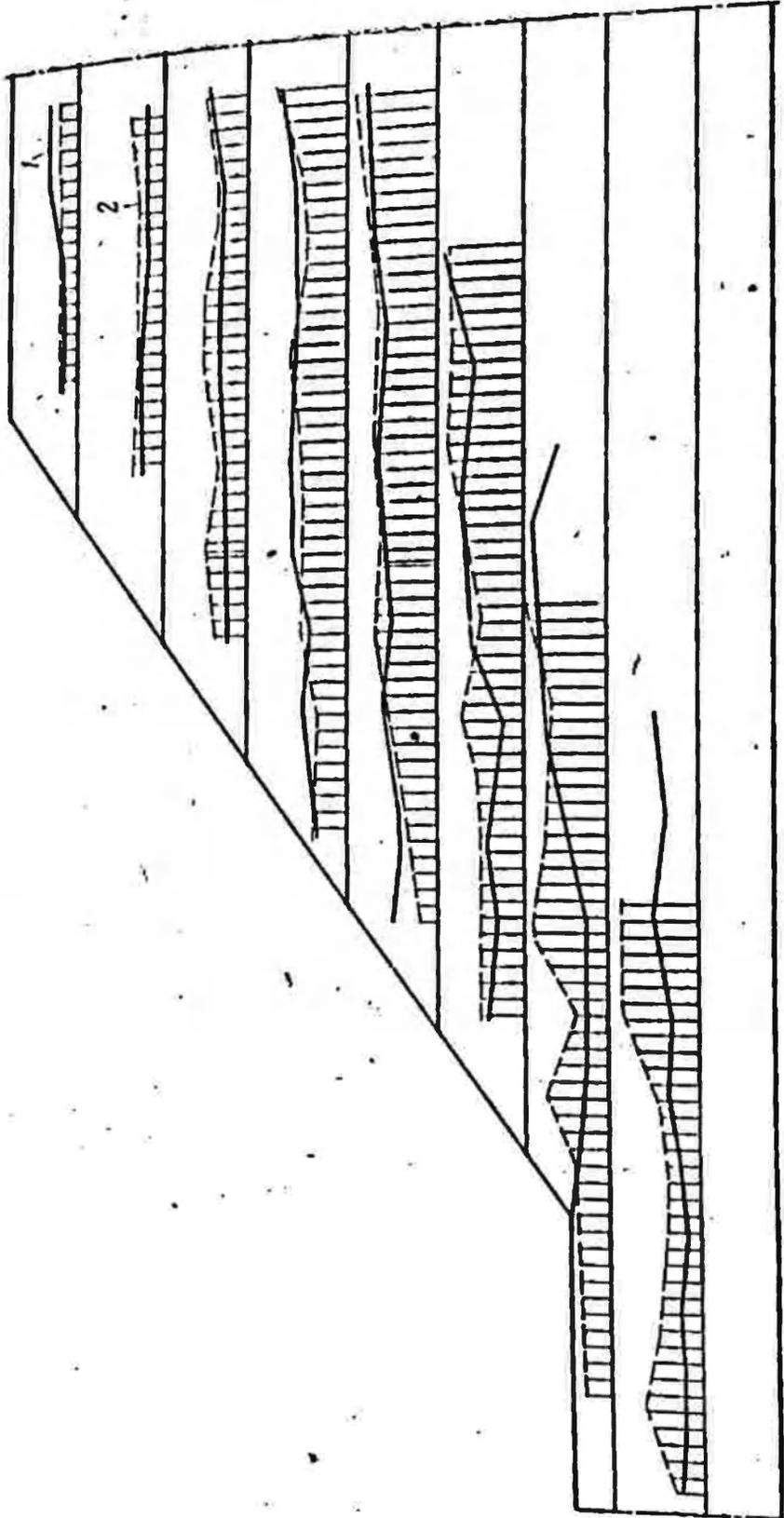


Рис. 28. Элюры экспериментальных 1 и расчетных 2 значений τ_{max} в модели однородного откоса

расчетным путем (по формуле 3.1). Как видно из рисунка, экспериментальные и расчетные значения τ_{\max} весьма близки.

3.2. Способ построения вероятной поверхности разрушения

Поверхность разрушения строилась, как указывалось выше, по первым (считая от откоса) максимальным значениям τ_{\max} (рис. 29). Однако в ряде случаев на отдельных сечениях в моделях прослеживались две точки с максимальными значениями τ_{\max} . При этом поверхность разрушения проводилась между этими точками.

Анализ построенных таким образом поверхностей разрушения показал, что они находятся от верхней бровки уступа на расстоянии, равном ширине захвата b (рис. 30), и имеют отрезок (c_{β}), наклоненный под углом $\alpha_{\beta} = (45^{\circ} + \varphi/2)$ (где φ — угол внутреннего трения пород, градус), к горизонту, переходящий затем в монотонную кривую. Последняя в нижней точке составляет с откосом угол $\alpha_{\eta} = (45^{\circ} - \varphi/2)$ в том случае, когда разность углов $(\beta - \delta)$ больше угла δ или пересекается с основанием отвала под углом α_{κ} , если эта разность равна или меньше данного угла, и дальше поверхность разрушения проходит по контакту до нижней бровки уступа на расстоянии l_{κ} от нее.

Для удобства практического применения предложенного способа были получены графические зависимости величин b , c_{β} , l_{κ} и L (длины откоса), отнесенных к высоте отвала H_p , и величины угла α_{κ} от угла наклона основания отвала δ , пользуясь которыми можно построить поверхность разрушения для отвала любой высоты,

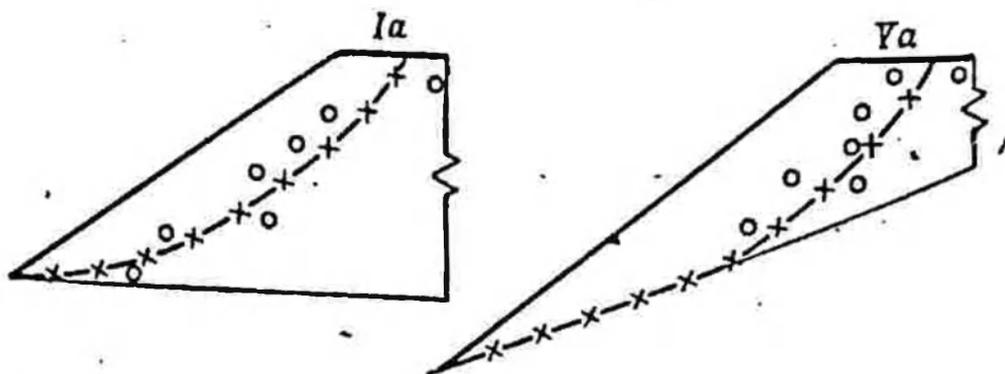


Рис. 29. Поверхности разрушения в моделях отвалов по экспериментальным данным

с углом естественного откоса $35-40^\circ$ и при различном угле наклона его основания (рис. 31).

Величина b/H_0 при увеличении угла наклона основания первоначально возрастает, но в дальнейшем при δ , равном от 25 до 37° , она резко уменьшается и стремится к нулю. Это связано с тем, что при очень больших значениях углов наклона основания для откосов отвалов постоянной высоты существенно уменьшается величина верхней площадки отвала, а при равенстве угла откоса и угла наклона основания отношение b/H_0 обращается в нуль, поскольку практически исчезает величина b . Все сказанное справедливо лишь для насыпных отвалов, т. е. когда угол наклона основания меньше угла откоса отвала.

Аналогичное явление наблюдается и с зависимостью угла α_b от угла δ (см. рис. 31).

Построение поверхности разрушения осуществляется следующим образом (см. рис. 30). Определив величину b по графику (см. рис. 31,а), откладываем ее от точки A и получаем точку B . Из последней под углом $\alpha_b = (45^\circ + \varphi/2)$ проводим линию, на которой наносим отрезок s_b , полученный по графику (см. рис. 31,б) и равный BD . Прямолинейную часть поверхности разрушения, совпадающую с контактом (l_k), устанавливаем по графику (см. рис. 31,в) (отрезок FE). С вершиной в точке E

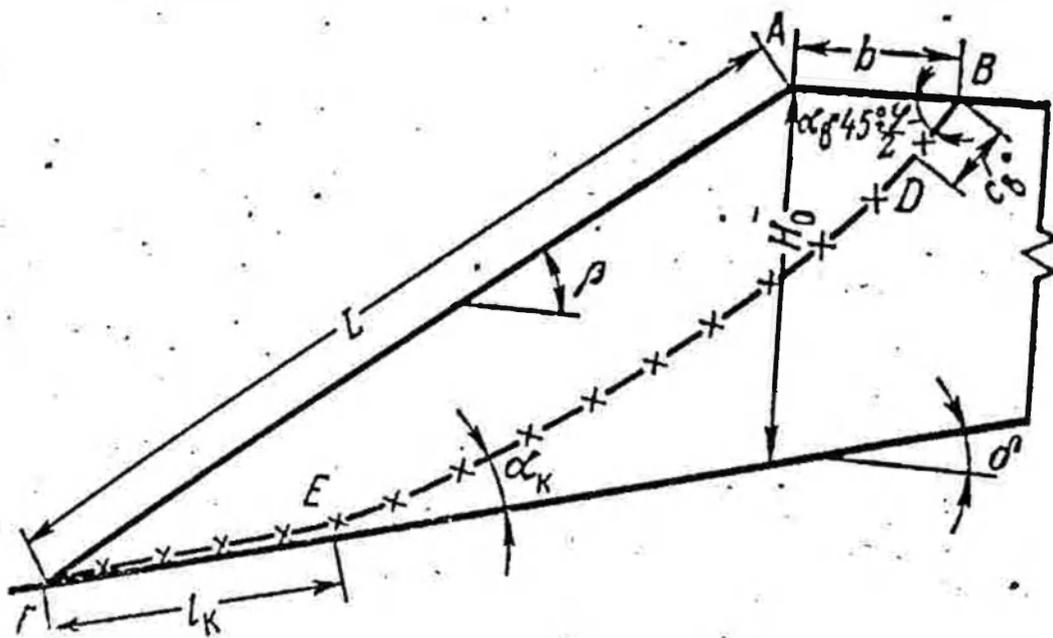


Рис. 30. Схема построения поверхности разрушения

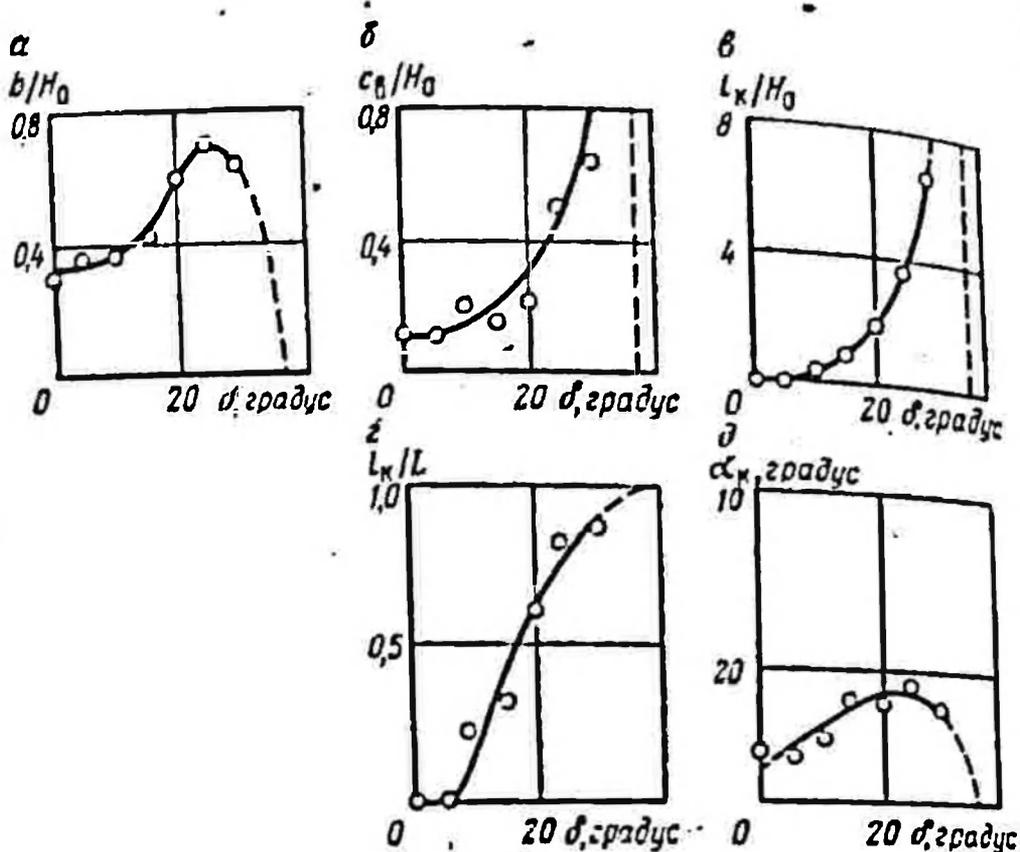


Рис. 31. Графические зависимости от угла наклона основания δ для построения поверхностей разрушения в одноярусных отвалах:

$$a - \frac{b}{H_0}; \quad b - \frac{c_n}{H_0}; \quad c - \frac{L_k}{H_0}; \quad d - \frac{L_k}{L}; \quad e - \alpha_n$$

строим угол α_n , определенный по графику (см. рис. 31, e). Затем точки E и D соединяем плавной кривой.

Более точное построение криволинейной части поверхности разрушения можно произвести путем установления радиуса кривизны. Для этого в точках касания E и D восстанавливают перпендикуляры до пересечения друг с другом. Затем из середины хорды ED восстанавливают перпендикуляр, равный полусумме двух первых, из конца которого, как из центра, проводится дуга ED .

Порядок построения иллюстрируется на следующем примере: $H_0=30$ м, $\beta_e=37^\circ$, $\delta=15^\circ$, $\varphi=30^\circ$.

Определяем ширину захвата по графику (см. рис. 31, a). Отношение $\frac{b}{H_0}$ для $\delta=15^\circ$ равно 0,4. Следовательно, ширина захвата составит 12 м. Откладываем в определенном масштабе эту величину от точки A и получаем точку B . Далее из точки B под углом $\alpha_n = (45 + \varphi/2) =$

$=60^\circ$ (в данном случае $\varphi=30^\circ$, поэтому угол α_n составит 60°) проводим линию, на которой наносим отрезок $s_b = BD = 6$ м, полученный с помощью графика (см. рис. 31, б). Прямолинейную часть поверхности разрушения, совпадающую с контактом (отрезок $l_k = FE$), устанавливаем по графику (см. рис. 31, в), $FE = 30$ м. С вершиной в точке E строим угол $\alpha_k = 17^\circ$, который определяем по графику (см. рис. 31, д). Затем точки E и D соединяем плавной кривой.

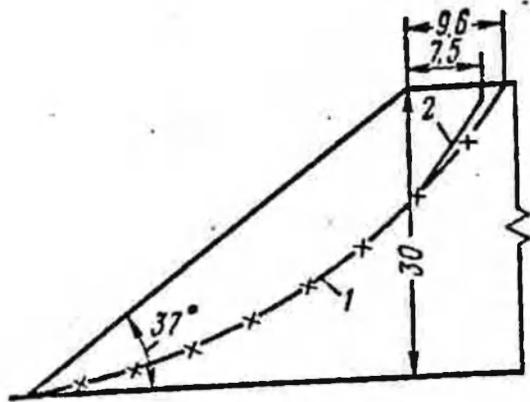


Рис. 32. Поверхности разрушения:

1 — экспериментальная, 2 — по рекомендациям ВНИМИ [87] в модели одноярусного отвала на горизонтальном основании

При значениях углов откосов отвалов более 40° , например для оценки устойчивости подрезанных откосов, нужно пользоваться графиком (см. рис. 31, г).

Для однородного отвала поверхность разрушения, определенная экспериментально (рис. 32, кривая 1), близко совпала с расчетной поверхностью, построенной по рекомендациям ВНИМИ (рис. 32, кривая 2). Расхождение наблюдалось только в верхней части, где ширина захвата по предлагаемому методу на 20% больше, чем по способу ВНИМИ. Согласно Ю. С. Козлову и В. Н. Земпсеву [37], для Богословского угольного месторождения, представленного переслаивающимися выветрелыми аргиллитами, песчанками, суглинками и галечниками, фактическая ширина призмы обрушения в среднем на 20% превышает расчетную, определенную по способу ВНИМИ, а угол наклона α_b равен $57-62^\circ$, что совпадает с экспериментальными данными.

Удовлетворительная сходимость теоретических, экспериментальных и фактических данных позволяет сделать вывод о правильности предложенного способа построения поверхности разрушения в отвалах на пологом и наклонном основании. Кроме того, наблюдается соответствие экспериментальных величин ширины захвата, отнесенных к высоте отвала, в случае контактных оползней подкласса Б-IV-б фактическим данным по оползням. Так, отношение b/H_0 , полученное экспериментальным

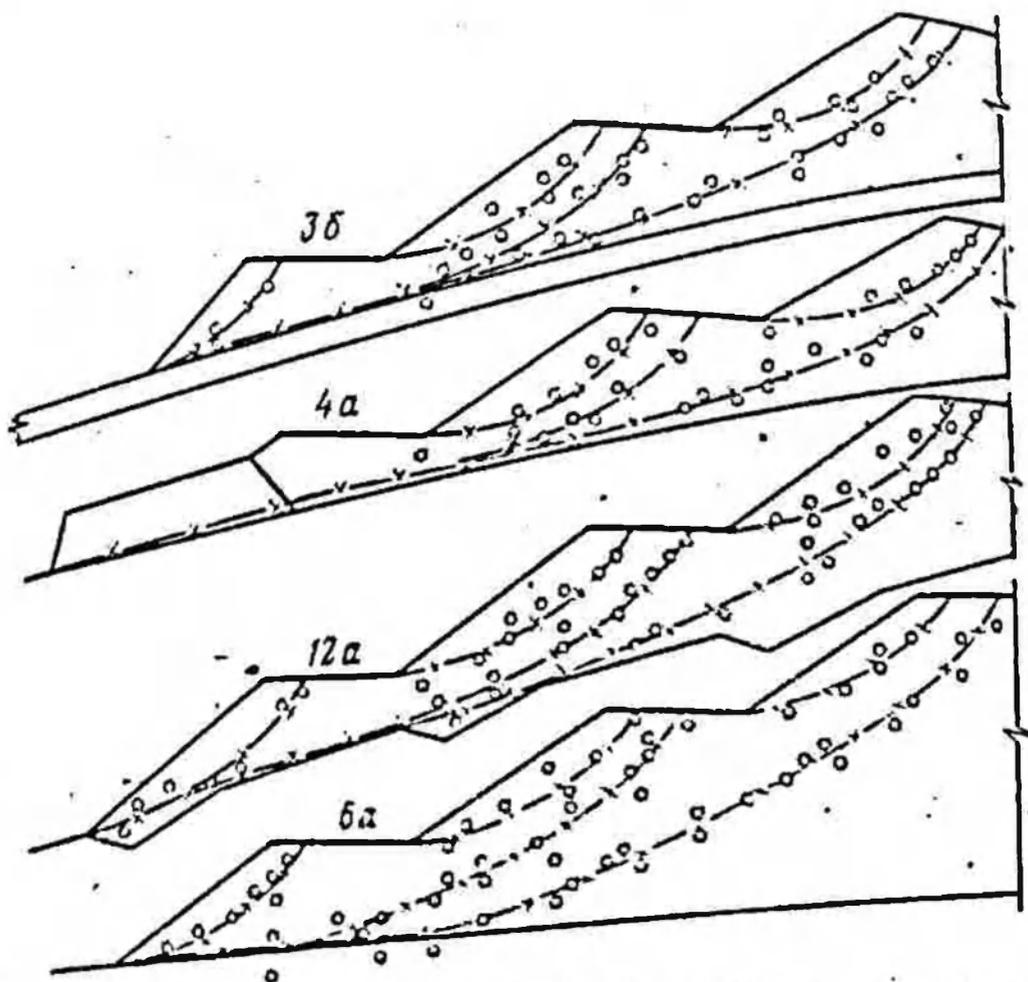


Рис. 33. Поверхности разрушения в моделях многоярусных отвалов по экспериментальным данным

путем, составляет 0,33—0,7, а согласно [22], оно равно 0,4—0,6.

Таким образом, предложенный способ построения поверхности разрушения, основанный на анализе напряженного состояния отвалов, позволяет определить местоположение поверхности разрушения в отвалах любой высоты на горизонтальном, пологом и наклонном (до 30°) прочном основании.

Аналогично строились поверхности разрушения в многоярусных отвалах. При этом установлено, что при определении положения поверхности разрушения в нижнем ярусе можно пользоваться графическими зависимостями, полученными для одноярусных отвалов. В двух- и трехъярусных отвалах поверхности разрушения проводились по последующим максимумам (считая от откоса) величин τ_{\max} . На рис. 33 показаны поверхности разрушения в некоторых моделях многоярусных отвалов.

Как обнаружено, ни наличие в основании слабого слоя, ни выемки практически не влияют (в пределах точности определения напряжений) на местоположение поверхности разрушения. Исключение составляет модель с целиком длинной, равной ширине заходки. В данном случае, при построении поверхности разрушения в двухъярусном отвале величину b/H_0 необходимо увеличить на 25%, а l_k/H_0 — на 40%, в случае трехъярусного отвала величина l_k/H_0 увеличивается на 30%.

Сопоставление полученных предложенным способом величин c_n и α_n с фактическими показало, что они близки. Так, величина c_n , определенная экспериментально, колеблется от 2,8 до 4,0 м, а по данным [22] видимая величина c_n в отвалах достигает 3—5 м при угле $\alpha_n = 55—80^\circ$. Полевые модели (см. рис. 26) позволили установить значения углов наклона поверхности разрушения в верхней части, которые колебались от 46 до 90°. Принимаемый угол α_n , равный $(45^\circ + \varphi/2)$ или 60° , находится в середине диапазона фактических и экспериментальных величин, поэтому может считаться наиболее вероятным.

Фактические данные по оползням внутренних отвалов на Богословском буроугольном месторождении свидетельствуют о том, что величина b/H_0 колеблется в пределах 0,22—1,16, а l_k/H_0 изменяется от 2,10 до 3,10. Определенные предложенным способом эти величины соответственно изменяются от 0,25 до 1,10 и от 0,60 до 6,70; кроме того, согласно [22], для контактных оползней системы уступов подкласса Б-IV-б отношение b/H_0 колеблется от 0,20 до 1,20, что также подтверждает вполне удовлетворительную сходимость экспериментальных и фактических данных.

Таким образом, на основании данных о напряженном состоянии отвалов разработан целенаправленный способ однозначного нахождения наиболее вероятной поверхности разрушения в отвалах, расположенных на пологом и наклонном основании, базирующийся на общепринятой теории прочности Кулона—Мора. Достоверность построения поверхностей разрушения обоснована теоретическими и экспериментальными исследованиями и подтверждается фактическими данными по оползням внутренних отвалов.

Предложенный графический способ построения поверхностей разрушения рекомендуется для практического использования при оценке устойчивости отвалов.

4. ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК И ОТВАЛОВ

4.1. Нахождение компонентов напряжений по поверхности разрушения и закономерностей их изменения

Анализ данных моделирования показал, что напряженное состояние в приоткосной зоне существенно отличается от обычно принимаемого при расчетах устойчивости одноосного или плоского геостатического напряженного состояния по теории А. Н. Динника.

На рис. 34 показаны эпюры нормальных (горизонтальных и вертикальных) и касательных напряжений по поверхности разрушения в одноярусных моделях. Построение осуществлялось условное: положительные величины составляющих напряжений откладывались вправо по перпендикулярам к поверхности разрушения, отрицательные — влево. При отсутствии экспериментальных точек на поверхности разрушения величины напряжений устанавливались с помощью интерполяции по близлежащим точкам.

Так как на контакте слоев применяемым методом моделирования определить напряжения невозможно, были проанализированы имеющиеся сведения из литературных источников о распределении и изменении напряжений в зоне контакта. Например, исследования неоднородных моделей оптическим методом позволили В. Д. Морозову [54] установить, что в области контакта при твердом горизонтальном и наклонном основаниях происходит сдвиг и изменение направлений не только изохром, но и изоклин. Максимальные касательные напряжения в зоне контакта уменьшаются на 38%, а в откосе с контактом, наклоненным под углом 10° в сторону выемки, — примерно на 44%. Таким образом, при изменении угла от 0 до 10° происходит изменение величины τ_{\max} в области контакта примерно на 6%. В модели откоса на слабом горизонтальном основании был установлен скачок максимальных касательных напряжений в зоне контакта с 0,7 до 1,2 кгс/см². Интенсивный рост τ_{\max} происходит в непосредственной близости от нижней бровки уступа.

Перепад напряжений отмечен и по контуру откоса, где в зоне контакта напряжения резко возрастают в

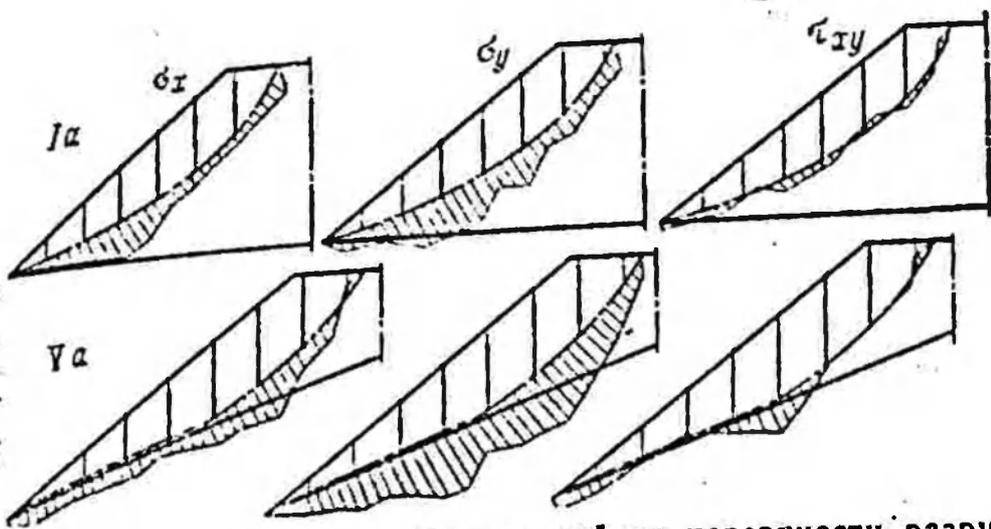


Рис. 34. Эпюры компонентов напряжений по поверхности разрушения в одноярусных моделях

слабом массиве, затем снижаются с последующим ростом в более прочной нижней зоне вблизи откоса. В определенных условиях в результате перепада напряжений возможно разрушение массива в области контакта.

В. П. Будковым [8] обнаружено, что величина действующих касательных напряжений вдоль контакта в зависимости от угла его падения изменяется на отрезке, превышающем $3H$, где H — высота уступа, однако это изменение при различных углах падения контакта неодинаково. Участок контакта $0,3H \div 2H$ в сторону массива характеризуется тем, что с изменением угла падения контакта на 5° величина действующих касательных напряжений увеличивается в среднем на $7-10\%$. Принимая во внимание вышесказанное, в зоне контакта отвала с прочным основанием касательные напряжения корректировались после интерполяции по близлежащим точкам в двух различных слоях, а значения вертикальных и горизонтальных компонентов напряжений в области контакта устанавливались путем интерполяции между точками, расположенными по обе стороны от контакта.

Как известно, напряжения в натуре σ_n и модели σ_m связаны следующей зависимостью:

$$\sigma_n = \sigma_m \frac{\gamma_n}{\gamma_m} \frac{H_n}{H_m}, \quad (4.1)$$

где γ_n и γ_m — соответственно объемные массы пород натуре и материала модели, т/м^3 ; H_n и H_m — линейные размеры натуре и модели, м.

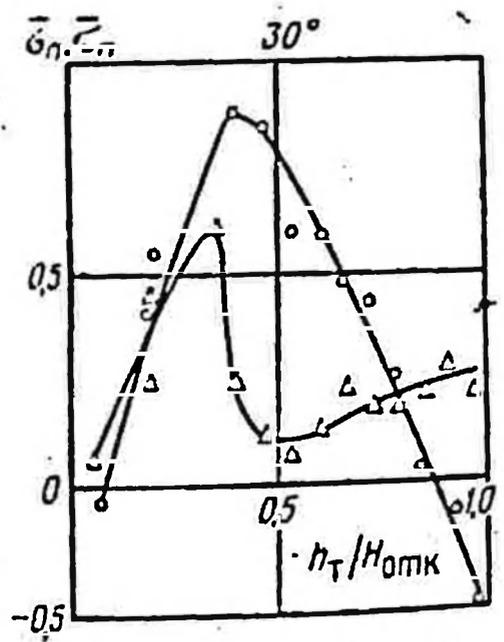
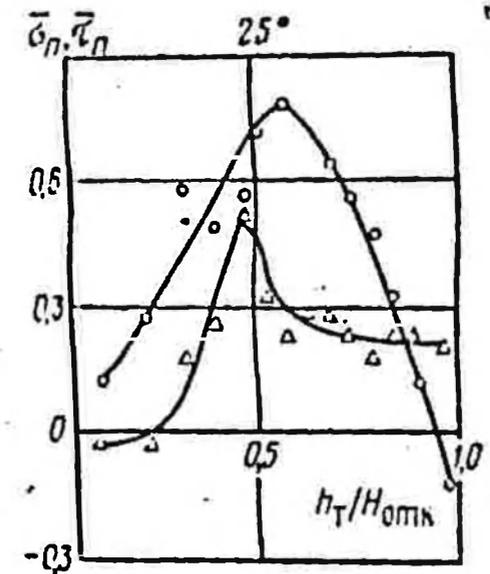
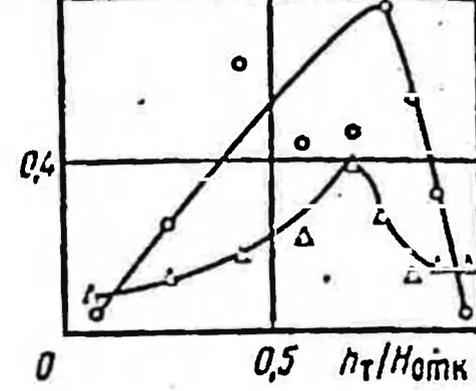
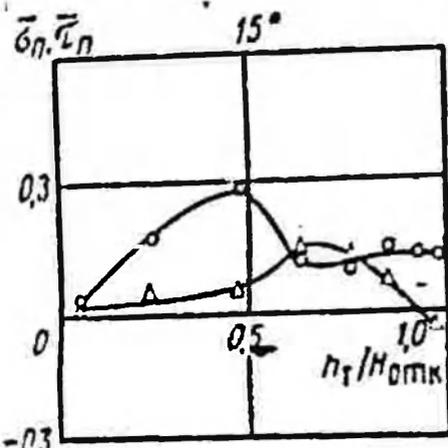
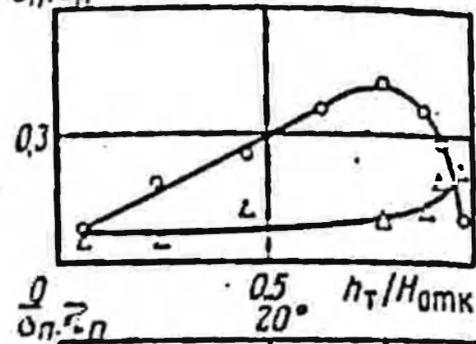
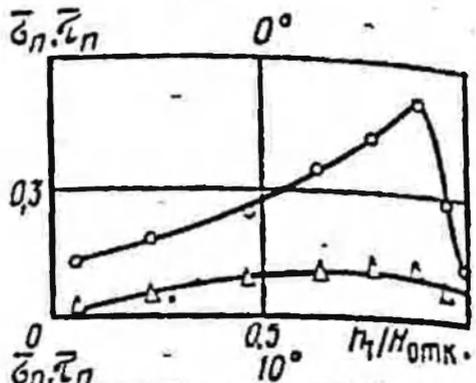
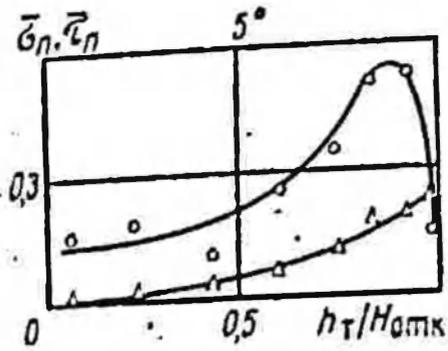
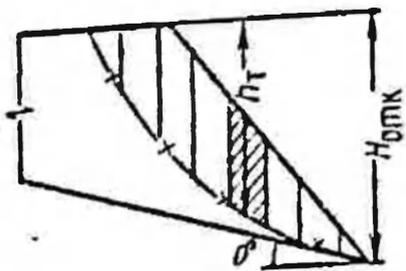


Рис. 35. Графики относительных напряжений

Согласно [81], отношение $\frac{\bar{\sigma}_n}{\gamma_n H_n}$ остается постоянным и является относительной величиной $\bar{\sigma}$. Поэтому, зная ее, по данным эксперимента можно рассчитать нормальное (σ_n) и касательное (τ_n) напряжения в любой точке приоткосного массива различной высоты по следующим формулам:

$$\sigma_n = \bar{\sigma}_n \gamma_n H_n; \quad \tau_n = \bar{\tau}_n \gamma_n H_n. \quad (4.2)$$

Для каждого блока в одноярусных моделях были определены средние относительные величины $\bar{\sigma}_n$ и $\bar{\tau}_n$ (рис. 35) и получены их зависимости от безразмерной величины $\bar{h}_T/H_{отк}$ при различных углах наклона оснований отвалов. Истинные значения напряжений могут быть определены по формулам (4.2).

4.2. Прочностные свойства пород отвалов

Вскрышные породы месторождений Кузнецкого каменноугольного бассейна представлены преимущественно песчаниками, алевролитами и реже аргиллитами.

Свойства горных пород разреза «Красногорский» на образцах с ненарушенной структурой определялись КуЗНИИИ; основные характеристики пород приведены в табл. 11.

Физико-механические свойства пород Талдинского месторождения изучались на кафедре инженерной геологии Томского инженерно-строительного института (ТИСИ). Было испытано 500 монолитов из 36 инженерно-геологических скважин. Основные данные помещены в табл. 12, где c_0 — сцепление пород в образце; c_m — сцепление пород в массиве с учетом коэффициента структурного ослабления.

Естественная влажность пород в среднем составляет 4—8%.

Таблица 11

Породы	γ , т/м ³	φ , градус	c , кгс/см ²
Песчаники	2,30	36	2,0—3,0
Алевролиты	2,15	33	0,5—3,0
Аргиллиты	2,00	30	0,4—3,6

Физико-механические свойства пород отвалов определялись в КузНИИУИ. Это единственные наиболее детальные исследования, проведенные для смеси пород отвалов разрезов Кузбасса. Установлено, например, что породы отвалов состоят в основном из песчано-глинистого заполнителя (фракции 0—10 мм) и кусковатого материала (фракции 10—1000 мм), причем фракция 0—300 мм составляет 40% отвальной массы.

Для установления прочностных свойств пород внешних отвалов разреза «Красногорский» Н. С. Поповым в КузНИИУИ были проведены лабораторные испытания 180 образцов на «пастах», приготовленных из измельченных пород вскрыши, складываемых в отвалы. Размер частиц были приняты не более 1 см. Процентное содержание фракций 0—3 мм, 6—10 мм в «пастах» определяли с учетом гранулометрического состава пород отвалов. Перед испытанием в течение 30 мин «пасту» уплотняли различными нагрузками от 1 до 13 кгс/см² при естественной влажности, а потом сдвигали при тех же нормальных нагрузках.

Показатели точности (среднеквадратическая ошибка среднего арифметического выражена в его долях) для большинства опытов не превышали 4,5% и лишь иногда достигали 5—6%. Коэффициент вариации усилий сдвига в большинстве случаев был меньше 10%.

Таблица 12

Породы	γ , т/м ³	φ , градус	c_0 , тс/м ²	c_m , тс/м ²
Песчаники	<u>2,28*</u>	<u>44</u>	<u>920</u>	<u>9,6</u>
	2,47	42	793	23,79
Алевролиты	<u>2,32</u>	<u>42</u>	<u>182</u>	<u>5,46</u>
	2,49	43	570	17,10
Аргиллиты	<u>2,11</u>	<u>24</u>	—	<u>3,42</u>
	2,43	38	417	12,50
Уголь	<u>1,28</u>	<u>35</u>	<u>1,58</u>	—
	1,28	35	2,18	—

* В числителе и в знаменателе—данные соответственно для пород, затронутых и не затронутых выветриванием.

В качестве результирующей величины усилий сдвига принималось среднее арифметическое из пятикратно повторяющихся замеров, проводимых в одинаковых условиях при равных нагрузках.

В результате исследований были построены паспорта прочности пород. В табл. 13 приведены средние значения величин сцепления (c) и угла внутреннего трения (φ) пород отвалов, полученные из паспортов при $\sigma_n = 0,6 \text{ кгс/см}^2$, а также значения объемной массы (γ).

Состав смеси пород отвалов в табл. 13 следующий: песчанник — 60, алевролит — 21, уголь — 5, аргиллит — 1 и суглинок — 10%.

Н. С. Поповым были определены также величины сопротивления сдвигу пород отвалов по основанию, сложенному алевролитами. Испытания велись на сдвиговом рычажном приборе при нормальной нагрузке до 7 кгс/см^2 с закладкой в его нижнюю обойму плиты алевролита и со сдвигом по ней пород отвалов различного литологического состава и различной влажности. Получены следующие величины угла внутреннего трения: песчанник — 36, смесь пород — 31, алевролит — 29° .

Влияние влажности, например алевролита на угол внутреннего трения при сдвиге по плите, следующее:

W, %	6,7	8,4	11,8	14,0
φ , градус	33	32	29	25

На разрезе «Красногорский» КузНИУИ были проведены лабораторные испытания прочностных свойств пород внутренних отвалов. Эти данные приведены в табл. 14.

В полевых условиях на разрезе «Красногорский» институтом УкрНИИпроект проверено сопротивление сдвигу между отслоившимися напластованиями аргиллитов

Таблица 13

Порода	φ , градус	c , тс/м ²	γ , т/м ³
Смесь			
Песчанник	32	1,5	1,8
Аргиллит	33	0,9	1,8
Алевролит	27	2,0	1,6
Уголь	28,5	1,8	1,7
Суглинок	29	0,6	1,0
	8	4,0	1,7

и алевролитов, слагающих почву выработанного пространства, служащих прочным основанием внутренних отвалов. Испытания производились на срезном приборе с площадью сдвигаемого образца 500 см². Полученные результаты приведены в табл. 15.

Результаты этих испытаний несколько ниже определенных Н. С. Поповым, но показатель φ и в этом случае ни разу не оказался меньше 20° при влажности, меньшей или равной 14%.

В институте УкрНИИПроект были проведены также лабораторные испытания прочности пород отвалов разреза «Красногорский» при центробежном моделировании их устойчивости. Для этого был использован прибор Н. Н. Маслова с площадью среза 40 см². Результаты испытаний приведены в табл. 16.

Сцепление во всех случаях было одинаковым и составляло 0,1 кгс/см².

Таблица 14

Породы	W, %	γ , т/м ³	φ , градус	c, кгс/см ²
Песчаники	9,0	1,9	33	0,86
Алевролиты	5,4	1,7	29	0,66
Смесь пород	9,3	1,7	26—35*	0,66—1,20
			26—31	

* В числителе—смесь породы в отвале; в знаменателе—основания отвала (по контакту).

Таблица 15

Порода	φ , градус	c, кгс/см ²	W, %
Отвальная смесь	17,5	0,05	16,2—17,2
	29	0,05	8,3
Аргиллит	20	0,1	13,6—14,4
	23	0,1	11,2
Алевролит	24	0,15	10,1—13,1

Примечание. Отвальная смесь и плиты аргиллита при испытании были обильно политы водой.

Данные табл. 15 в пределах точности испытаний удовлетворительны и практически соответствуют данным, полученным Н. С. Поповым.

Изучение физико-механических свойств пород нарушенной структуры Талдинского месторождения проводилось той же кафедрой инженерной геологии Томского инженерно-строительного института.

Таблица 16

Породы	%	φ , градус	ψ , %
Смесь:			
песчаник	30	36	7—14
алевролит	70	—	—
Смесь:			
песчаник	60	—	—
алевролит	21	—	—
аргиллит	4	35	7—14
уголь	5	—	—
суглинок	10	—	—
Алевролит	—	37	7
	—	34	14
Аргиллит углистый	—	29	Полное насыщение То же
Уголь	—	29	

Таблица 17

Породы	γ , т/м ³	φ , градус	c , тс/м ²
Суглинки	1,93	19	1,73
Глины	1,74	18	1,85
Песчаники	1,53*	33	2,43
	1,59	34	1,50
Алевролиты	1,50	30	1,25
	1,67	31	1,06
Аргиллиты	1,41	25	1,40
	1,51	32	1,37
Угли	0,79	35	1,56
	0,80	35	2,18

* В числителе и в знаменателе приведены данные соответственно для выветрелых и невыветрелых пород.

В табл. 17 приведены сведения о физико-механических свойствах пород естественной влажности (4—8%) с нарушенной структурой Талдинского месторождения по данным Томского инженерно-строительного института.

Анализ физико-механических свойств пород с нарушенной структурой Талдинского месторождения показал, что они близки свойствам пород внутренних отвалов разреза «Красногорский». Из табл. 17 видно, что смесь пород отвалов проектируемого разреза «Талдинский 1—2», состоящая из песчаников, алевролитов и аргиллитов, с учетом их процентного содержания, будет обладать следующими физико-механическими свойствами: объемная масса — 1,69 т/м³, угол внутреннего трения — 25—34° и сцепление — 1,06—1,50 тс/м². Смесь пород отвалов разреза «Красногорский», состоящая из таких же литологических разностей, имеет объемную массу 1,7 т/м³; значение угла внутреннего трения колеблется от 26 до 35°, а сцепление — от 0,66 до 1,2 тс/м². Кроме того, естественная влажность пород в отвалах Талдинского месторождения (4—8%) не превышает влажности пород внутренних отвалов разреза «Красногорский» (8—9%). Таким образом, свойства пород отвалов проектируемого разреза «Талдинский 1—2» и действующего «Красногорский» весьма близки.

Литологический состав пород внутренних отвалов сравниваемых разрезов следующий, %:

	«Красногорский»	«Талдинский 1—2»
Песчаники	65—70	33—35
Алевролиты	26—30	61—63
Аргиллиты	4—5	4—6

Поскольку сцепление пород в отвалах незначительное, в дальнейших расчетах используем только величины угла внутреннего трения пород, принимая сцепление равным нулю.

В расчетах был использован паспорт прочности пород внутренних отвалов разреза «Красногорский» (рис. 36).

Верхние две зависимости получены Н. С. Поповым для смеси пород отвалов (график 1) и для контакта пород отвалов по основанию (график 2). Испытания проводились при естественной влажности пород, составлявшей 8—9%, и в диапазоне нормальных давлений до

12 кгс/см². Нижний график 3 построен на основании исследований института УкрНИИпроект для пород отвалов разреза «Красногорский», сдвигавшихся по контакту с углистыми аргиллитами, обильно политыми водой.

Все три диаграммы сдвига продолжены в область больших значений нормальных напряжений до величины порядка 16 кгс/см² с учетом установленной зависимости $\sigma_{нэ} = f(\sigma_{нр})$, где $\sigma_{нэ}$ — нормальное напряжение, определенное экспериментально; $\sigma_{нр}$ — нормальное напряжение, определенное расчетным путем по формуле $\sigma_{нр} = \gamma H$. Для отвалов с $H_0 = 140$ м и $\delta \pm 20^\circ$ $\sigma_{нэ} = 0,7 \gamma H$.

При достройке паспорта прочности учитывались следующие соображения. Многими исследователями [64, 69] и др. при испытаниях крупнообломочных скальных и полускальных пород на сдвиг установлен общий для них характер процесса сдвига. Зависимость касательных напряжений от нормальных имеет две ветви с точкой перегиба при нагрузках порядка 6—7 кгс/см². В этой точке на диаграмме сдвига отчетливо наблюдается уменьшение угла внутреннего трения в среднем на 14%, причем обнаружено, что на величину этого уменьшения не влияют литологический состав и крупность обломочного материала. Относительная величина уменьшения угла внутреннего трения на 14% и была принята за основу при анализе графиков паспортов прочности пород.

Поскольку по данным ТИСИ влажность пород Талдинского месторождения примерно такая же, как и пород отвалов разреза «Красногорский», а прочностные свойства их аналогичны, применение паспорта прочности пород Красногорского разреза (см. рис. 36) при расчетах устойчивых параметров отвалов разреза «Талдинский 1—2» вполне правомерно.

Несомненно, что в дальнейшем необходимо провести специальные лабораторные и полевые исследования физико-механических свойств пород отвалов разреза «Тал-

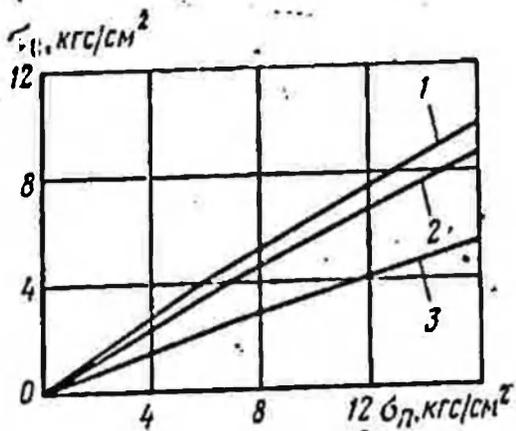


Рис. 36. Паспорт прочности пород:

1 — для смеси пород отвалов; 2 — для прочного контакта (песчанники, алевролиты); 3 — для слабого контакта (углистые аргиллиты)

динский 1—2» для уточнения параметров отвалов в проектном задании. При этом следует обратить особое внимание на сопротивление сдвигу по контакту пород отвалов с породами почвы пласта.

4.3. Способ расчета устойчивости выработок и отвалов

В основу рекомендуемого способа расчета устойчивости выработок и отвалов положено известное решение, которое заключается в определении соотношения величин сопротивлений пород сдвигу τ_c и действующих на поверхности разрушения касательных напряжений τ_n :

$$F = \frac{\sum \tau_c}{\sum \tau_n}, \quad (4.3)$$

где F — общий коэффициент запаса устойчивости.

Однако в это решение вкладывается новый смысл, состоящий в том, что учитываются все компоненты плоского напряженного состояния по поверхности разрушения.

Величины τ_n зависят от действующих по поверхности разрушения нормальных напряжений σ_n .

Значения σ_n и τ_n определяются по известным формулам теории упругости с учетом экспериментальных данных о σ_x , σ_y и τ_{xy} . При расчете напряжений принято правило знаков, наиболее часто применяющееся в механике горных пород [6]: сжимающие нормальные напряжения считаются положительными, а растягивающие — отрицательными; касательные напряжения принимаются положительными в том случае, когда их направление совпадает с положительным направлением координатной оси и нормальные напряжения также направлены вдоль положительной оси. Если же касательные напряжения совпадают с положительным направлением оси, а нормальные ист, то касательные напряжения считаются отрицательными.

Формулы для расчета действующих нормальных и касательных напряжений имели следующий вид:

$$\sigma_n = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta - \tau_{xy} \sin 2\theta; \quad (4.4)$$

$$\tau_n = - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta,$$

где θ — угол наклона поверхности разрушения к горизонту, градус.

Величина сопротивления пород сдвигу τ_c , соответствующая экспериментально определенной величине действующего нормального напряжения σ_n , устанавливалась по паспорту прочности пород.

Коэффициент запаса устойчивости рассчитывался по поверхностям разрушения, построенным по предложенному выше способу. Порядок определения величины F сводился к следующему. Оползневой клин, ограниченный откосом с одной и поверхностью разрушения с другой стороны, делился на блоки шириной, равной $0,1 R$, согласно работе [1], где R — радиус криволинейной части этой поверхности. Такое построение достаточно точно, так как проведенные расчеты показали, что при уменьшении ширины блоков в 2 раза коэффициент запаса устойчивости изменяется не более чем на $\pm 4\%$.

Разделение клина оползания на отдельные блоки осуществлялось только для сопоставления предложенного способа расчета с общезвестным способом «касательных напряжений». Для оценки устойчивости откосов, основанной на анализе напряженного состояния, нет необходимости использовать блоки, поскольку можно установить действующие вдоль поверхности разрушения удерживающие и сдвигающие напряжения и определить их отношение.

После построения эпюр напряжений по поверхностям разрушения для каждого блока определялись средние величины σ_x , σ_y и τ_{xy} , а также угол наклона поверхности разрушения к горизонту. Затем по формулам (4.4) рассчитывались величины σ_n и τ_n , а τ_c устанавливалось по паспорту прочности пород (см. рис. 36).

Пользуясь зависимостями (см. рис. 35), можно рассчитать коэффициент запаса устойчивости отвала любой высоты при колебании угла наклона его основания от 0 до 30° . Конкретный расчет устойчивости отвалов с использованием относительных величин напряжений приведен в табл. 18. Исходные данные: $H_0 = 30$ м; $H_{отк} = 46,2$ м; $\beta = 37^\circ$; $\delta = 15^\circ$; $\gamma = 1,7$ т/м³. Для расчета использованы графики (см. рис. 35), формулы (4.2) и паспорт прочности пород отвалов (см. рис. 36).

$$F = \frac{6,96}{4,57} = 1,52.$$

Таким образом, предложенный способ расчета устойчивости отвалов учитывает особенности распределения напряжений в приоткосной зоне и все составляющие плоского поля напряжений. Местоположение поверхности разрушения определяется однозначно по зависимостям, установленным экспериментальным путем (см. рис. 31). Напряжения по поверхности разрушения устанавливаются по графикам относительных напряжений (см. рис. 35). Сопротивление пород сдвигу определяется по паспорту прочности пород, но с учетом величины σ_n , полученной экспериментально.

Для обоснования достоверности предложенного способа оценки устойчивости отвалов его сравнивали с теоретическими расчетами и фактическими данными.

Расчет устойчивости отвалов произведен по указанному выше способу, основанному на анализе напряженного состояния в исследованных моделях отвалов.

При определении коэффициентов запаса устойчивости в одноярусных моделях отвалов высотой 30 м с углом откоса 37° с основанием от 0 до 30° установлена зависимость коэффициента запаса устойчивости от угла наклона основания, представленная на рис. 37 (кривая 1). Как видно, из рисунка, величина F с увеличением угла наклона основания от 0 до 30° уменьшается с 2,6 до 1,1.

Установлено, что целесообразно принимать одно среднее значение величины объемной массы пород

Таблица 18

Номер блока	θ , градус	h_T , м	$\frac{h_T}{H_{отк}}$	$\bar{\sigma}_n$	$\bar{\tau}_n$	σ_n , кгс/см ²	τ_n , кгс/см ²	$\tau_{ст}$, кгс/см ²
I	+15	45,0	0,97	0,096	0,214	0,49	1,09	0,29
II	+15	42,6	0,92	0,276	0,182	1,41	0,93	0,84
III	+15	40,5	0,88	0,346	0,122	1,77	0,62	1,05
IV	+31	36,0	0,78	0,425	0,088	2,17	0,45	1,57
V	+34	29,0	0,63	0,348	0,074	1,78	0,38	1,31
VI	+38	21,0	0,45	0,250	0,108	1,28	0,55	0,97
VII	+44	11,2	0,24	0,169	0,051	0,86	0,26	0,66
VIII	+60	2,9	0,06	0,070	0,057	0,36	0,29	0,27

$$\Sigma = 4,57; \Sigma = 6,96$$

(1,7 т/м³), поскольку согласно выполненным расчетам, учет изменения ее по высоте отвала практически не влияет на коэффициент запаса устойчивости; разница в величинах данного коэффициента не превышает 2% (табл. 19).

По тем же поверхностям разрушения был рассчитан коэффициент запаса устойчивости методом «касательных напряжений», т. е. величины σ_n и τ_n вычислялись по формулам

$$\sigma_n = \gamma h_b \cos^2 \theta; \quad \tau_n = \frac{1}{2} \gamma h_b \sin 2\theta, \quad (4.5)$$

где h_b — средняя высота блока, м.

Полученная зависимость коэффициента запаса устойчивости от угла наклона основания методом касательных напряжений (рис. 37, кривая 2) существенно отличается от экспериментальной. В табл. 20 помещены данные величины F , определенные экспериментальным путем ($F_{\text{э}}$) и методом касательных напряжений (F_p).

Установленное расхождение объясняется тем, что метод касательных напряжений учитывает одноосное напряженное состояние и рассматривает лишь одну вертикальную составляющую напряжений σ_y , в то время

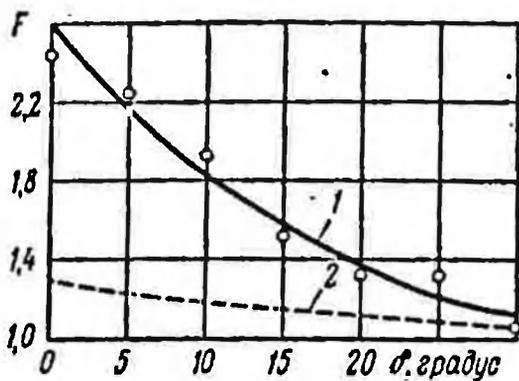


Рис. 37. Зависимость \bar{F} от θ в моделях отвалов:

1 — по экспериментальным данным;
2 — по методу «касательных напряжений»

Таблица 19

Номер модели	Коэффициент запаса устойчивости при		$F' - F''$
	$\gamma = \text{const}$	γ — переменная величина	
1а	1,26	1,24	+0,02
2а	1,22	1,24	-0,02
3а	1,18	1,20	-0,02
4а	1,22	1,23	-0,01
5а	1,12	1,12	0
6а	1,01	1,04	0

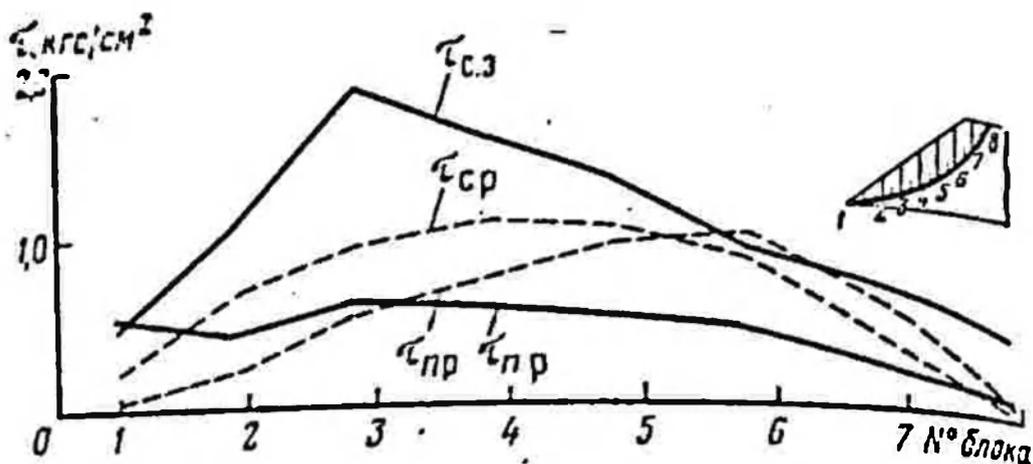


Рис. 38. Изменение экспериментальных и расчетных величин удерживающих ($\tau_{сэ}$) и сдвигающих ($\tau_{пр}$) сил вдоль поверхности разрушения в одноярусной модели отвала, расположенного на горизонтальном основании. Цифрами обозначены точки на поверхности разрушения, являющиеся проекциями средних высот блоков

как предложенный способ оценки устойчивости откосов основан на анализе всех компонентов плоского поля напряжений и более полно отражает реальный характер распределения напряжений в отвалах.

Кроме того, как было установлено ранее, величина σ_v , полученная экспериментальным путем, в зоне влияния откоса значительно отличается от расчетной, о чем свидетельствуют данные табл. 7 и рис. 12. Расхождение между экспериментальными и расчетными данными уменьшается с увеличением угла наклона основания, что объясняется приближением напряженного состояния к одноосному при значениях $\delta > 25^\circ$.

Чтобы более наглядно показать разницу между коэффициентом запаса устойчивости, рассчитанным по

Таблица 20

δ, градус	$F_э$	F_p	$F_э - F_p$	%
0	2,60	1,30	1,30	100
5	2,18	1,24	0,94	76
10	1,86	1,18	0,68	58
15	1,60	1,16	0,44	38
20	1,40	1,12	0,28	25
25	1,24	1,09	0,15	14
30	1,10	1,07	0,03	3

предложенному способу с учетом напряженного состояния в приоткосной зоне, и методом «касательных напряжений», были рассмотрены полученные по этим методам величины напряжений. Так, на рис. 38 приводятся экспериментальные и расчетные значения касательных (τ_n) напряжений по поверхности разрушения в модели отвала, расположенного на горизонтальном основании, и величины сопротивления пород сдвигу (τ_c). Формулы для определения коэффициентов запаса устойчивости будут иметь следующий вид:

$$\bar{F}_p = \frac{\Sigma \tau_{cp}}{\Sigma \tau_{np}}; \quad F_c = \frac{\Sigma \tau_{ca}}{\Sigma \tau_{na}} = \frac{\Sigma \tau_{cp} + \Delta_1 \tau_c}{\Sigma \tau_{np} - \Delta_1 \tau_n}, \quad (4.6)$$

где $\Delta_1 \tau_c$ и $\Delta_1 \tau_n$ — приращения напряжений, обусловленные дополнительным учетом горизонтальных (σ_x) и касательных (τ_{xy}) напряжений.

На рис. 39 и 40 для сравнения приведены эпюры экспериментальных и расчетных величин σ_n , τ_n и τ_c вдоль поверхностей разрушения в одноярусных моделях, расположенных на наклонном (20°) основании. Наблюдающееся несоответствие в эпюрах показывает существенную разницу между величинами напряжений, определенных экспериментально и рассчитанных по методу «касательных напряжений».

Расчеты показали также, что учет тех или иных компонентов поля напряжений недопустим.

Если оценивать полученные величины коэффициентов запаса устойчивости, определенные по предлагаемому способу и по методу «касательных напряжений», с точки зрения фактического состояния устойчивости внутренних отвалов, то можно сказать, что расчетные величины явно занижены. Практика работы разреза «Красногорский» убедительно свидетельствует о том, что установленные расчетным методом «касательных напряжений» предельные параметры отвалов занижены.

На разрезе успешно обрабатываются по бестранспортной системе пласты с углом падения до 18° (при условии наличия прочных пород в основании отвалов). Определенная методом «касательных напряжений» величина коэффициента запаса устойчивости отвала высотой 30 м с углом откоса 35° на наклонном основании ($\delta = 15^\circ$) ниже допустимой (1,16) и близка к предель-

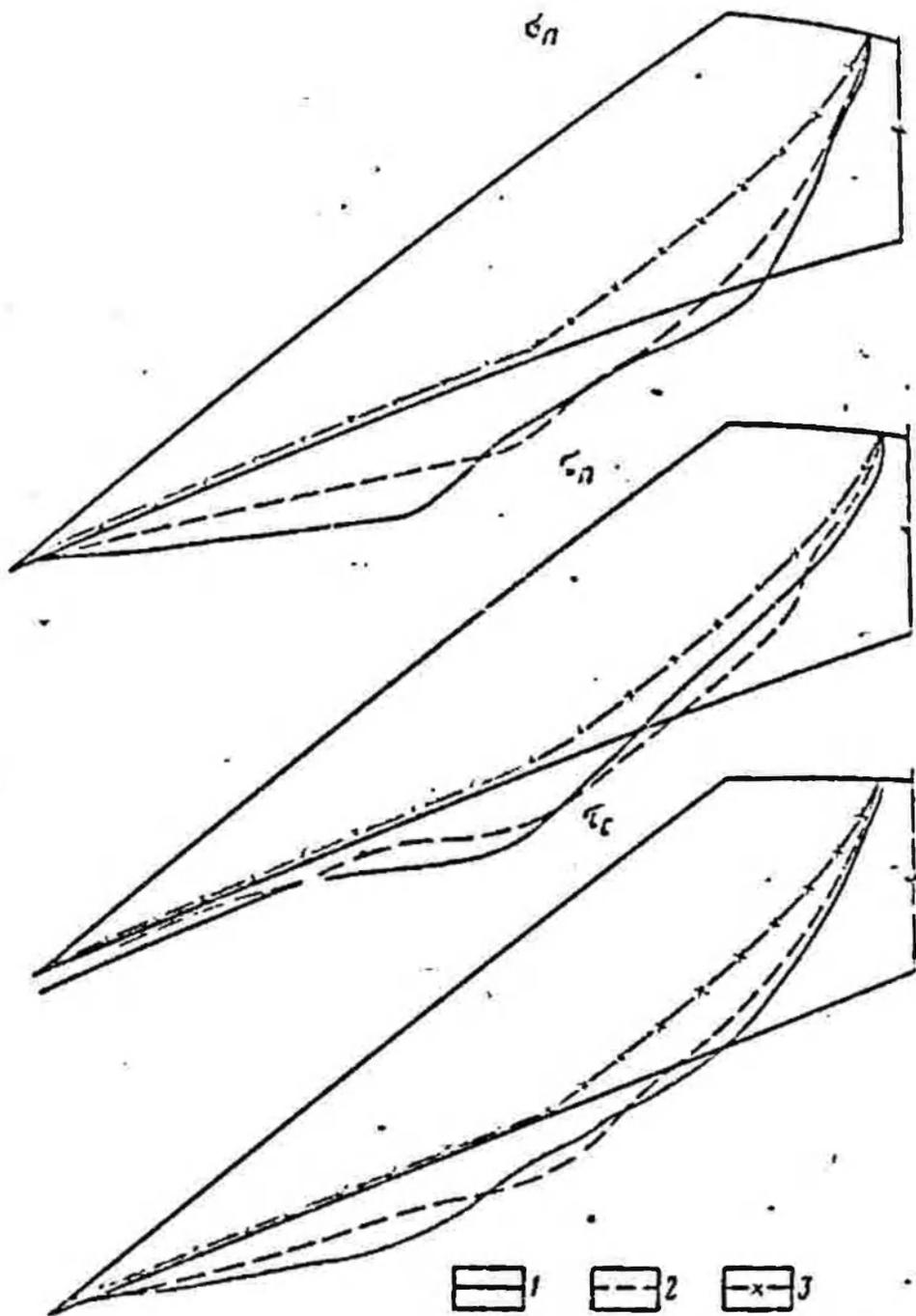


Рис. 39. Эпюры экспериментальных 1 и расчетных 2 величин σ_n , τ_n и τ_ϵ по поверхностям разрушения 3 в одноярусном отвале при $\delta=20^\circ$

ной, в то же время по экспериментальным данным отвал с такими параметрами обладает достаточным (1,60) запасом устойчивости, что подтверждается также полевым моделированием.

Таким образом, предложенный способ оценки устойчивости откоса отвала обладает известным преимуществом по сравнению с существующими способами, поскольку учитываются все компоненты плоского поля на-

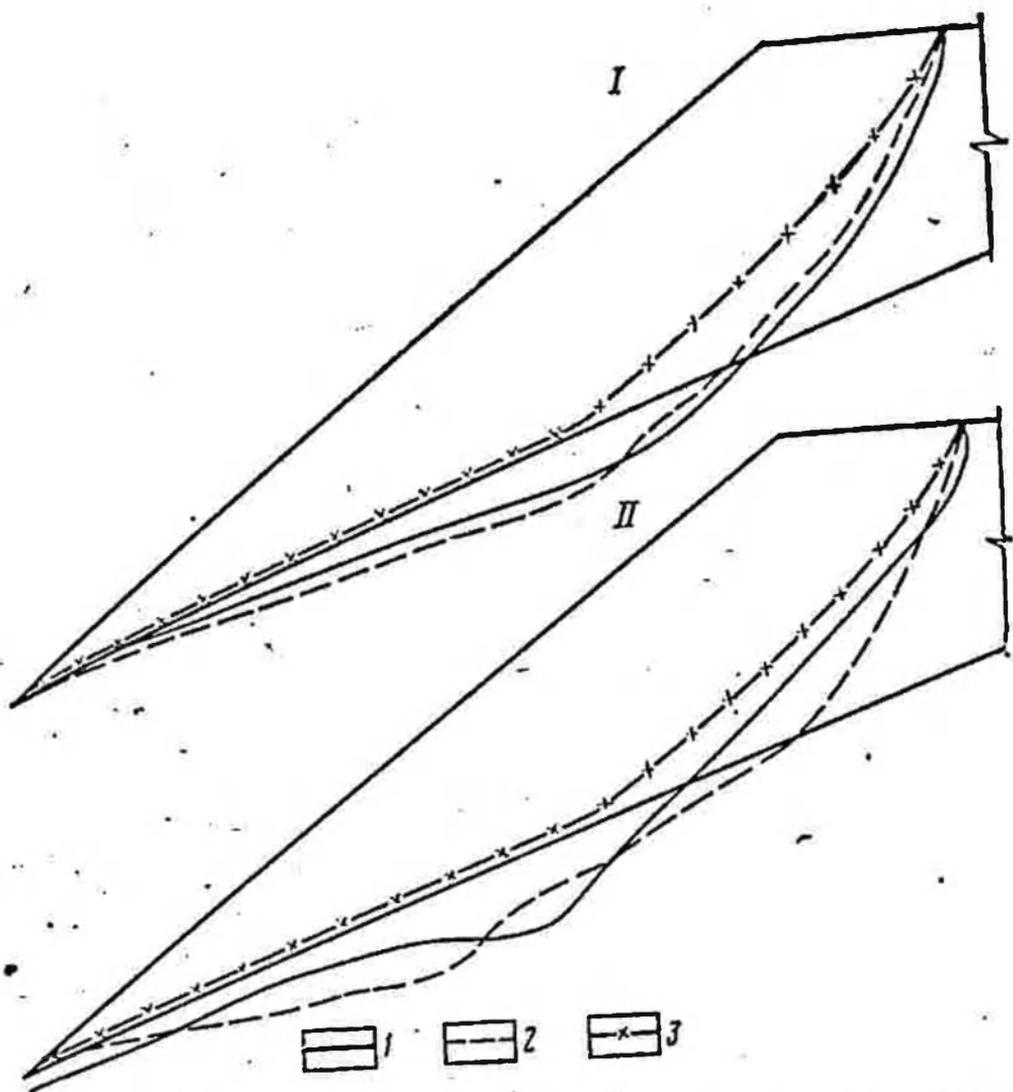


Рис. 40. Элюры τ_n I и τ_0 2 по поверхностям разрушения 3, определенные по методу «касательных напряжений» I и по данным экспериментов II в моделях одноярусных отвалов при $\delta=20^\circ$

пряжений в приоткосной зоне. Исследованиями установлена несостоятельность способа «касательных напряжений», рассматривающего только вертикальную составляющую напряжений. Существует мнение о невозможности использования данных моделирования на плоских моделях из игдантина в расчетах устойчивости, так как при этом не обеспечивается подобия характеристик сопротивления сдвигу по наклонному основанию отвалов. Однако нами моделировались неразрушающие деформации. В этом случае подобие разрушающих характеристик не обязательно, а определяемые напряжения зависят от граничных условий и не зависят от упругих характеристик материала. Кроме того, все выводы проверялись другими методами моделирования и натурными наблюдениями.

Соответствие натуральных и фактических данных по состоянию устойчивости внутренних отвалов. Разрез Южного Кузбасса свидетельствует о правомерности и надежности предложенного способа оценки устойчивости отвалов и выработок, поэтому он может быть рекомендован для практического применения.

4.4. Способ расчета устойчивости нагруженных отвалов

Как известно, внешние нагрузки от горного и транспортного оборудования снижают устойчивость уступов и отвалов. Предложенный ранее способ расчета, учитывавший эти нагрузки [61], основывался на анализе сил и предположении, что внешняя нагрузка является непосредственной причиной деформации откоса. Расчеты, проведенные по указанной методике [61] применительно к шагающим драглайнам современных моделей, показали, что при отсутствии поверхностей ослабления, падающих в сторону откоса, это оборудование не может служить непосредственной причиной деформации откосов. Поэтому расчеты устойчивости нагруженных уступов можно вести по поверхности разрушения; построенной без учета внешней нагрузки. Кроме того, более точные результаты можно получить, анализируя действующие в приоткосном массиве напряжения, а не силы.

Исходными данными для построения новой расчетной схемы являются элементы уступа или отвала и характеристики горного оборудования. На рис. 41 представлена схема нагруженного отвала, где H_n — высота яруса, м.

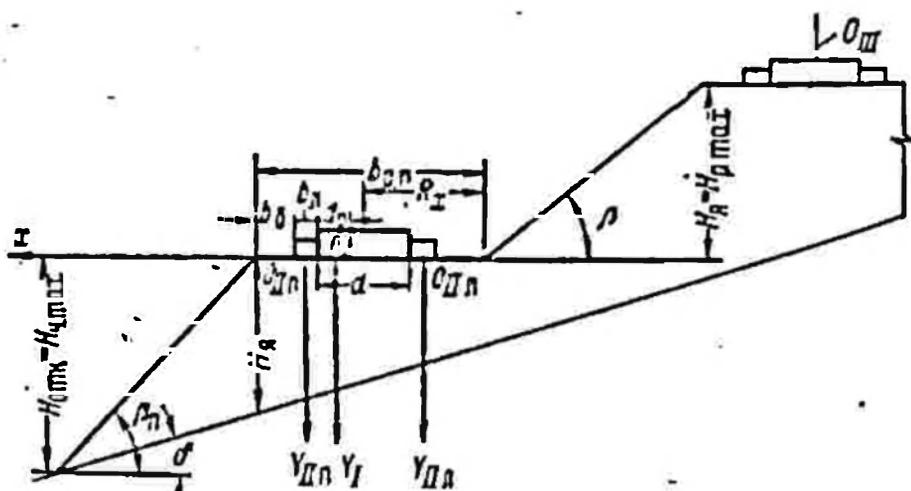


Рис. 41. Схема нагруженного отвала

Параметры отвалов ограничиваются условиями их устойчивости, а также рабочими размерами оборудования: максимальной глубиной черпания — $H_{ч.макс}$ и высотой разгрузки — $H_{р.макс}$. Ширина рабочей площадки:

$$b_{р.п} = R_x + d/2 + b_л + b_б, \quad (4.7)$$

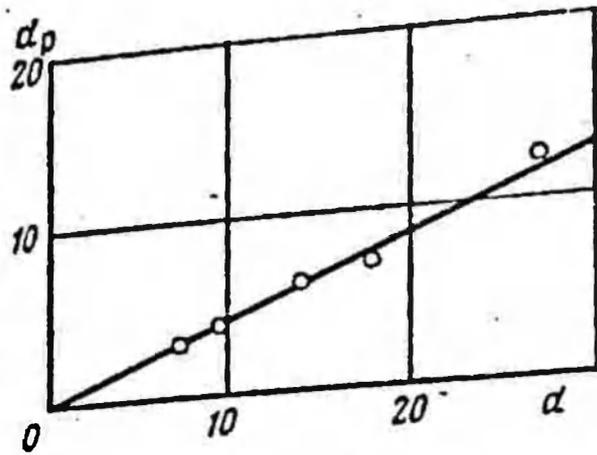


Рис. 42. Зависимость ширины рабочей части опорного круга a_p от диаметра опорной базы d

где R_x — радиус вращения хвостовой части кузова, м; d — диаметр опорного круга, м; $b_л$ — ширина лыжи, м; $b_б$ — берма безопасности, м.

Нагрузки от экскаватора при его работе, при шагающих и в статическом положении различны. Центрами приложения равнодействующей силы являются: в первом случае — середина рабочей части опорного круга — $O_{с.}$; во втором — центры правой и левой лыж — $O_{лп}$ и $O_{пл}$; в третьем — середина опорного круга — $O_{ш}$ (см., рис. 41).

Ширину рабочей части опорного круга a_p рекомендуется определять по графику рис. 42.

Поверхность разрушения строится по методике, описанной в разделе 3. Оползневой клин делится на блоки. Компоненты напряжений от собственного веса пород σ_n и τ_n определяются по графикам (см. рис. 35). Сопротивление сдвигу τ_c устанавливается по паспорту прочности пород для каждого блока по величине σ_n .

Распределение напряжений от внешних нагрузок может быть, как показано в работе [22], различным. Однако, используя принцип суперпозиции, можно всегда свести их к наиболее простой форме равномерно распределенной нагрузки. Для этого случая В. А. Флоринским [88] выведены формулы, по которым можно определить компоненты напряжений:

$$\sigma'_x = \frac{q_0}{\pi} \left(\operatorname{arctg} \frac{l-x}{y} + \operatorname{arctg} \frac{l+x}{y} \right) + \frac{2lq_0y(x^2 - y^2 - l^2)}{\pi[(x^2 + y^2 - l^2)^2 + 4l^2y^2]};$$

$$\sigma'_y = \frac{q_0}{\pi} \left(\operatorname{arctg} \frac{l^2 - x^2}{y} + \operatorname{arctg} \frac{l + x}{y} \right) - \frac{2lq_0y(x^2 - y^2 - l^2)}{\pi[(x^2 + y^2 - l^2) + 4l^2y^2]} ; \quad (4.8)$$

$$\tau'_{xy} = \frac{4lq_0xy^2}{\pi[(x^2 + y^2 - l^2) + 4l^2y^2]} ;$$

где σ'_x , σ'_y и τ'_{xy} — компоненты напряжений от внешней нагрузки, кгс/см²; q_0 — внешняя нагрузка в виде непрерывного ряда сосредоточенных сил, кгс/см²; l — половина ширины загруженного участка, м; x , y — координаты точек, м (проекции центров блоков на вероятной поверхности разрушения).

По этим формулам были рассчитаны [92] и построены графики (рис. 43—45), применение которых значительно упрощает вычисления.

При определении расчетных значений удельных динамических давлений от экскаваторов при работе и при шагании необходимо, согласно работе [22], вводить в паспортные значения удельных давлений коэффициент, равный двум, учитывающий неравномерность распределения давлений.

Значения нормальных σ'_n и касательных τ'_n напряжений от внешней нагрузки, действующих по вероятной поверхности разрушения, определялись по известным формулам теории упругости с учетом правил знаков:

$$\sigma'_n = \frac{\sigma'_x + \sigma'_y}{2} - \frac{\sigma'_x - \sigma'_y}{2} \cos 2\theta - \tau'_{xy} \sin 2\theta ; \quad (4.9)$$

$$\tau'_n = -\frac{\sigma'_x - \sigma'_y}{2} \sin 2\theta + \tau'_{xy} \cos 2\theta .$$

Величину коэффициента запаса устойчивости нагруженных отвалов определяют, основываясь на известном в механике принципе независимости действия сил. При этом результирующие напряжения получают как сумму составляющих от массы пород и от внешней нагрузки

$$F_R = \frac{\Sigma \tau_{с-н}}{\Sigma \tau_n + \tau'_n} ; \quad (4.10)$$

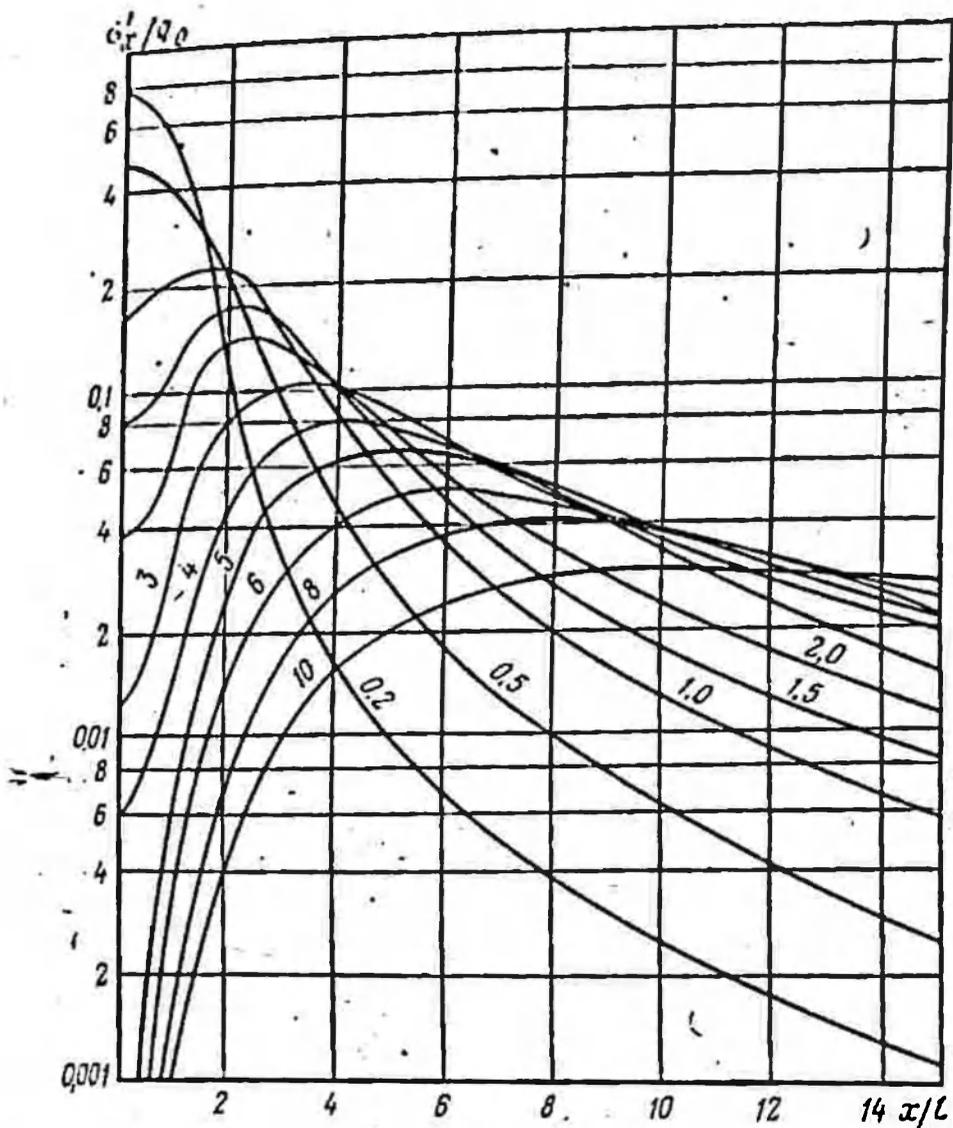


Рис. 43. Зависимость σ_x'/q_0 от x/l (цифрами обозначены величины y/l)

где $\tau_{с.п}$ — удерживающие напряжения с учетом действия внешней нагрузки.

Значение $\tau_{с.п}$ определяется по графику сдвига при нормальном напряжении $\sigma_{пн}$, учитывающем действие нагрузки

$$\sigma_{пн} = \sigma_n + \sigma_n. \quad (4.11)$$

Таким образом, рекомендуемый способ расчета позволяет учесть динамический характер нагрузок и все компоненты плоского напряженного состояния в приоткосной зоне, возникающие как в результате действия нагрузок, так и от массы пород.

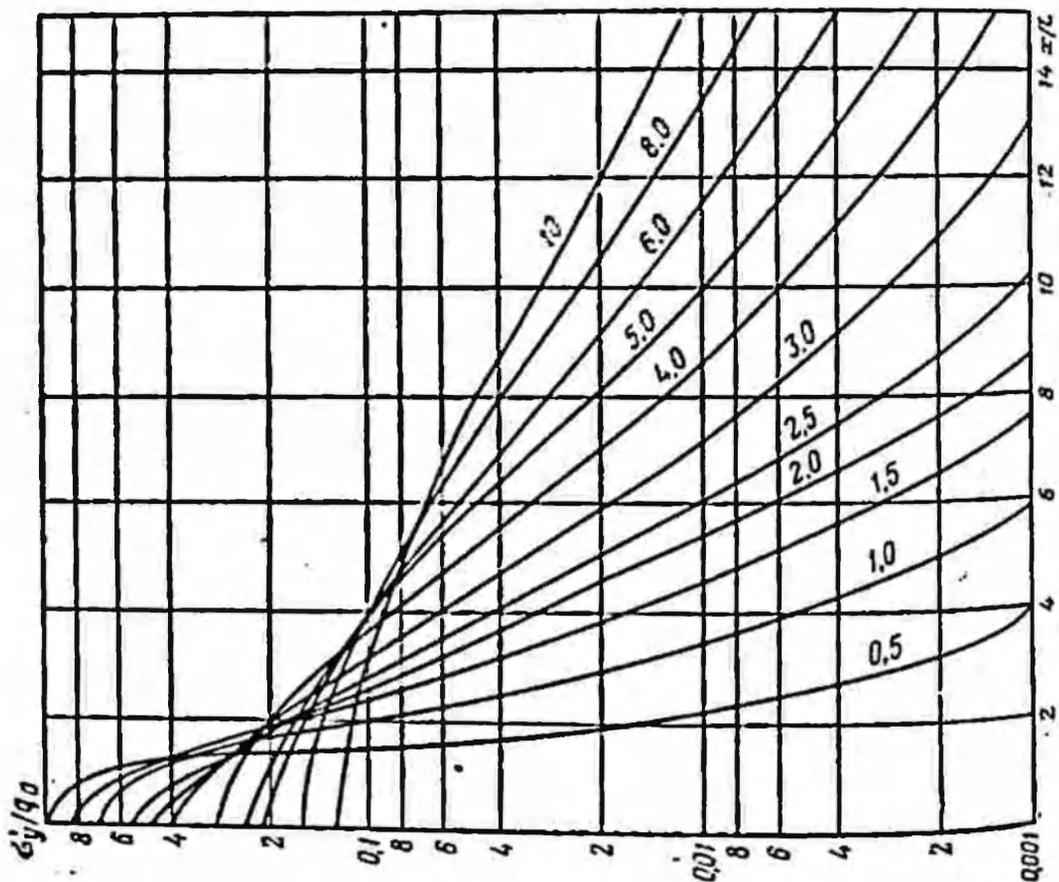
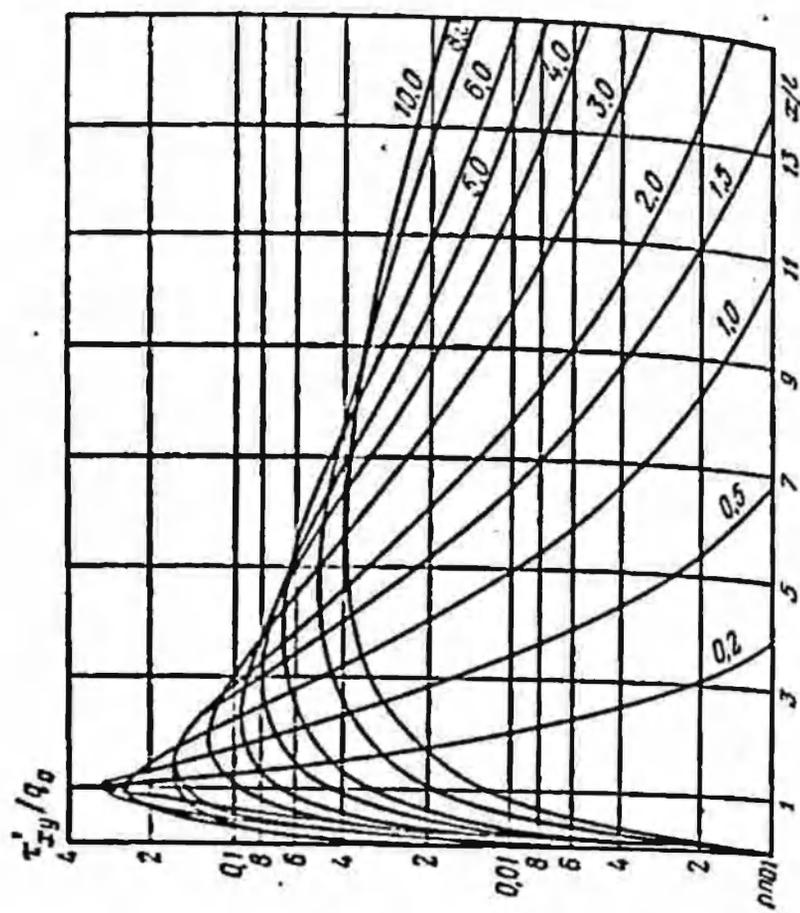


Рис. 44. Зависимость σ_y^*/q_0 от x/l (цифрами обозначены величины y/l)

Рис. 45. Зависимость τ_{xy}^*/q_0 от x/l (цифрами обозначены величины y/l)



4.5. Влияние основных факторов на устойчивость отвалов и выработок

С использованием данных лабораторного моделирования методики построения поверхности разрушения, способа расчета устойчивости отвалов с учетом их напряженного состояния, графиков безразмерных величин напряжений и способа «касательных напряжений» была произведена оценка устойчивости отвалов в зависимости от ряда факторов.

Общий коэффициент запаса складывается по И. С. Стрелецкому [78] как произведение частных коэффициентов. Применительно к отвалам формулу для определения коэффициента запаса можно представить в следующем виде:

$$\bar{F} = F_t F_{\text{п}} F_c F_{\text{н}}, \quad (4.12)$$

где F_t , $F_{\text{п}}$, F_c и $F_{\text{н}}$ — коэффициенты, учитывающие соответственно фактор времени, точность определения физико-механических свойств породы, точность применяемого способа расчета и влияние внешней нагрузки, например от экскаватора.

Для отвалов, сложенных скальными и полускальными породами, коэффициент F_t можно принимать из следующих соображений. Сразу же после отсыпки начинается уплотнение пород в отвале под действием силы тяжести. Их прочность возрастает во времени, главным образом, за счет увеличения сцепления. Ввиду ограниченности фактических данных можно принять с некоторым запасом $F_t = 1$.

Коэффициент $F_{\text{п}}$ зависит от показателей точности определения физико-механических свойств пород. Этот коэффициент следует вводить в том случае, когда в качестве расчетных используются среднеарифметические показатели свойств пород. При применении в расчетах гарантированных значений этот коэффициент можно принимать равным единице.

Наибольший разброс данных бывает при определении сопротивления пород сдвигу. Для рассматриваемых условий показатель точности можно принять по данным КузНИУИ равным 4—6%.

Значения коэффициента F_c изменяются в зависимости от точности применяемого способа расчета, составляющей (для используемого нами экспериментального способа) в среднем 8%.

Значения коэффициентов F_n для современных моделей шагающих драглайнов приведены ниже:

Модель ЭШ	5/45М	10/70А	15/90А	25/100А	40/85	40/85*	80/100
F_n	1,14	1,09	1,14	1,17	1,28	1,19	1,17

* Отвальный вариант.

Подставляя принятые значения частных коэффициентов запаса в формулу (4.12), получим для ненагруженных уступов

$$F = 1,0 \cdot 1,06 \cdot 1,08 = 1,15.$$

Для нагруженных уступов коэффициенты запаса следующие:

Модель ЭШ	5/45М	10/70А	15/90А	25/100А	40/85	40/85*	80/100
F	1,31	1,25	1,31	1,35	1,47	1,37	1,35

* Отвальный вариант.

Таким образом, с учетом наиболее перспективных для разработки Талдинского месторождения моделей драглайнов коэффициент запаса устойчивости равен 1,35—1,37.

Установленная зависимость изменения коэффициента запаса устойчивости отвалов при различных углах наклона основания (см. рис. 37) свидетельствует о том, что устойчивость яруса отвала высотой 30 м с углом откоса 37° обеспечивается при коэффициенте запаса устойчивости, равном 1,2. При этом угол наклона основания равен 25° . При принятом коэффициенте запаса 1,35—1,37 граничные значения угла наклона почвы пласта составляют 20 — 21° .

Эти выводы подтверждаются также результатами опытов, проведенных в полевых условиях на одноярусных отвалах, характеристика которых была приведена в табл. 10, а профили на рис. 27. Анализ их показал, что деформации отвалов, отсыпанных на слабое основа-

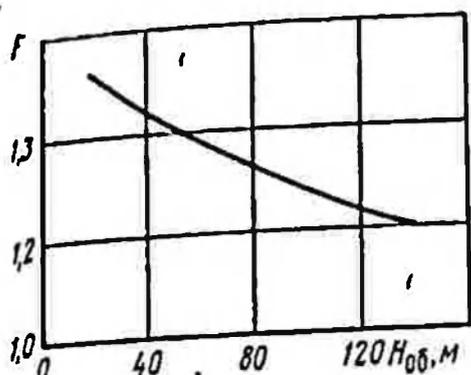


Рис. 46. Зависимость F то $H_{об}$ при $\beta=37^\circ$ и $\delta=20^\circ$

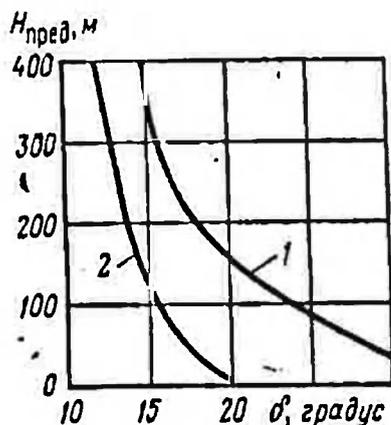


Рис. 47. Графики изменения предельной высоты отвала в зависимости от угла наклона его основания при наличии в почве пласта песчаников и алевролитов (кривая 1) и углистых аргиллитов (кривая 2)

ние из углистых аргиллитов (модели 6—8), возникают при более низких углах его наклона ($15-20^\circ$), чем в отвалах, расположенных на песчанке (модели 1—5), критические углы наклона основания которых достигают $24-25^\circ$.

С учетом возможной ошибки экспериментов предельными значениями углов наклона основания, при которых возможно применять бестранспортное отвалообразование, рекомендуется считать 20° в случае наличия в основании отвалов прочных пород (песчаников и алевролитов) и 13° , если в почве пласта залегают необходимые аргиллиты.

С использованием графиков безразмерных напряжений (см. рис. 35) были рассчитаны коэффициенты запаса устойчивости отвалов различной высоты с целью установления значения их предельно допустимой высоты. На рис. 46 представлена зависимость коэффициента запаса устойчивости от общей высоты отвала с углом откоса 37° при угле наклона основания 20° . Как видно из рисунка, предельно допустимой является высота отвала, равная 140 м. Отвалы такой высоты на наклонном основании (20°) могут быть отсыпаны только при условии наличия прочных пород в почве пласта.

Аналогичные расчеты были произведены для случая наличия в основании отвалов слабых пород (аргилли-

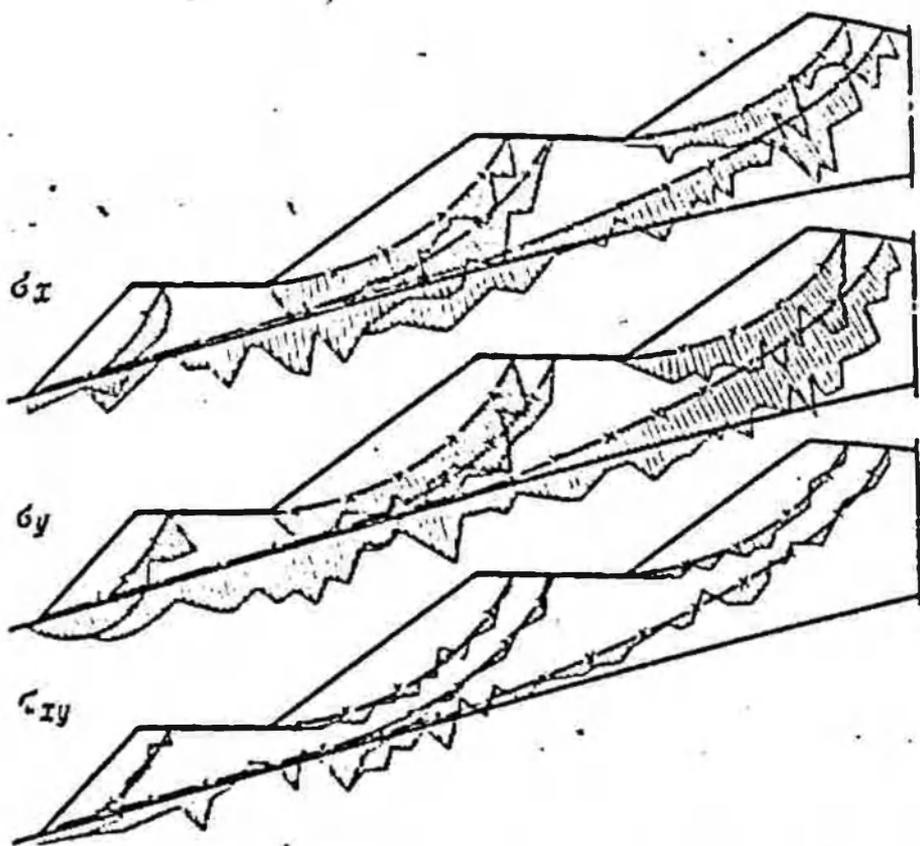


Рис. 48. Эпюры напряжений по поверхности разрушения в модели 26

тов) с использованием графиков 1 и 3 паспорта прочности пород (см. рис. 36). На рис. 47 приводится характер изменения предельной высоты отвалов при различных углах основания в зависимости от литологического состава пород, залегающих в почве пласта. Эти графики свидетельствуют о том, что высоту внутреннего бес-транспортного отвала следует допускать не более 140 м при результирующем угле отвала 37° и при прочном основании отвала, представленном песчаниками и алевролитами, до угла падения 20° , а при основании из аргиллитов — до 13° .

Полученные нами результаты согласуются с данными института УкрНИИпроект, где при центробежном моделировании внутренних отвалов разреза «Красногорский» установлено, что отвалы с углом естественного откоса, равным 36° , и высотой 90—110 м устойчивы на наклонном основании с углом 20° .

Расчет устойчивости многоярусных отвалов осуществляли таким же способом, как и одноярусных. По поверхностям разрушения строили эпюры напряжений σ_x , σ_y и τ_{\max} . В качестве примера на рис. 48 и 49 пред-

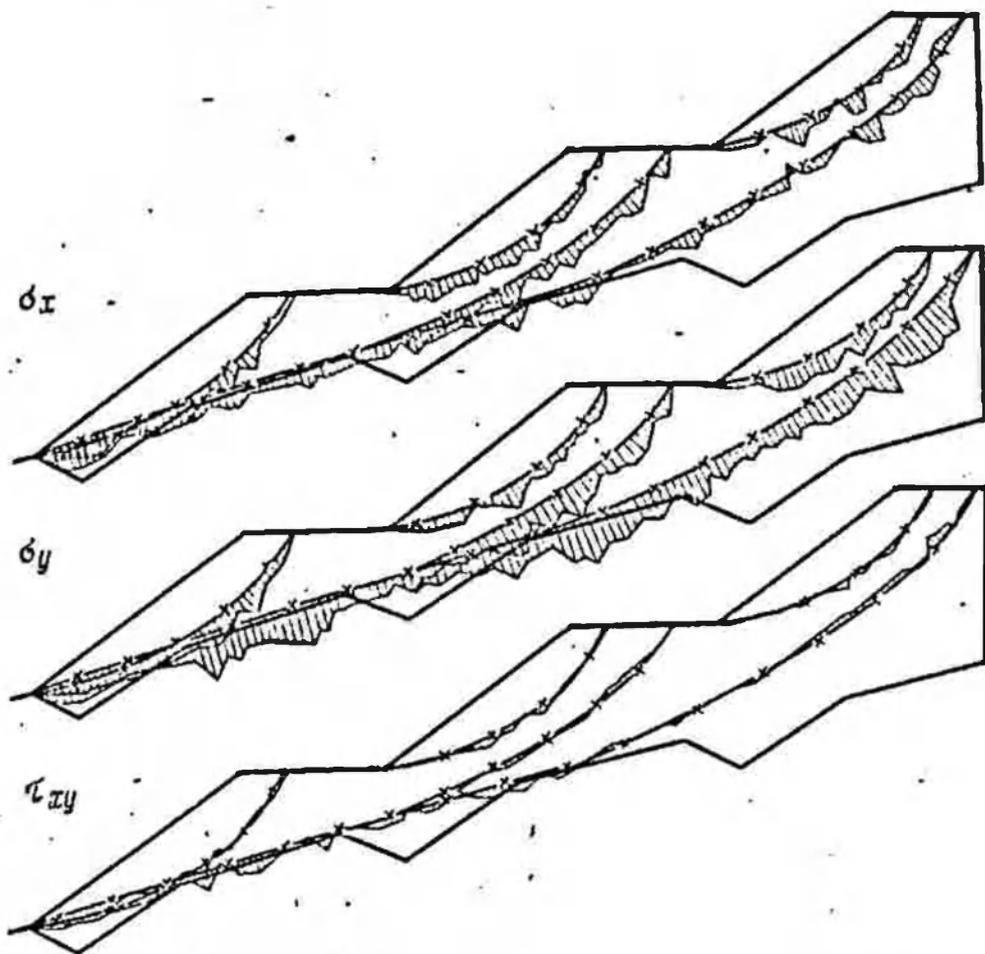


Рис. 49. Эпюры напряжений по поверхности разрушения в модели 7а

ставлены эпюры в моделях 2б, 7а. Из сравнения приведенных эпюр видно, что выполаживание откоса и устройство предохранительных выемок в почве пласта существенно снижают величины нормальных и касательных напряжений. Порядок определения коэффициента запаса устойчивости аналогичен вышесказанному. Были произведены расчеты устойчивости для всех исследованных моделей и оценка степени влияния основных факторов.

Влияние угла наклона основания прослеживается также и в моделях многоярусных отвалов. В табл. 21 приведены данные расчетов устойчивости многоярусных отвалов.

Как видно, наблюдается снижение коэффициента запаса устойчивости с увеличением угла наклона основания.

Если проследить изменение коэффициентов запаса устойчивости отвала с увеличением числа ярусов, то можно убедиться в том, что процесс оползания проис-

ходит циклично и начинается с нарушения устойчивости нижнего яруса с последующим захватом вышележащих ярусов. Причем значения коэффициентов запаса устойчивости для второго и третьего ярусов в моделях 26 и 7а практически одинаковы (табл. 22) и сравнимы с величиной $F=2,66$ для однородного откоса (модель 1Ха).

Несмотря на меньшую высоту отвала в модели 1Ха (28 м по сравнению с 32 м в моделях 26 и 7а) величина F несколько меньше за счет более крутого угла откоса (37° вместо 35°).

Наличие в отвале слабого слоя мощностью до 6 м снижает устойчивость многоярусного отвала в среднем на 20%.

Величина коэффициента запаса устойчивости нижнего яруса отвала, расположенного на наклонном основании ($\delta=15^\circ$), близкая к минимально допустимой, свидетельствует о том, что необходимы мероприятия по обеспечению устойчивости отвала и, кроме того, о невозможности подрезки при наличии слабого слоя в подошве отвала.

Влияние подрезки яруса под углом, превышающим естественный, было исследовано теоретически и на моделях одно- и многоярусных отвалов. На рис. 50 приведена зависимость между углами подрезанных ярусов отвалов β_a и коэффициентом запаса их устойчивости F

Таблица 21

Номер модели	δ , градус	Коэффициент запаса по ярусам		
		одному	двум	трем
6а	5	1,80	2,19	2,30
26	15	1,60	1,97	2,12
10а	20	1,44	1,77	1,91

Таблица 22

Номер модели	Коэффициент запаса по ярусам	
	второму	третьему
26	3,20	2,82
7а	2,88	2,98

для отвала, расположенного на основании имеющем угол наклона 20° , полученная расчетным путем с использованием метода «касательных напряжений» и процентного соотношения между расчетными и экспериментальными данными. Ярус отвала высотой 30 м с углом откоса 52° имеет минимально допустимый коэффициент запаса устойчивости.

Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что изменение устойчивости отвалов в результате подрезки незначительно. Так, при увеличении угла откоса с 37 до 45° коэффициент запаса устойчивости одноярусного отвала уменьшается на 3—11%. В трехъярусных отвалах подрезка нижнего яруса под углом 45° уменьшает коэффициент запаса в среднем на 17%. Однако это снижение будет компенсироваться инженерной подготовкой почвы пласта.

Подрезку можно осуществлять только в отвалах, расположенных на прочном основании. В случае наличия слабого слоя подрезку осуществлять нельзя, что подтверждается данными, полученными на модели 3б.

Кроме того, еще раз обращаясь к результатам полевого моделирования (см. рис. 27 и табл. 10), можно видеть, что критический угол откосов отвалов в моделях, расположенных на прочном основании из песчаника, находится в пределах $45—50^\circ$, а на слабом — в пределах $36—39^\circ$, то есть практически равен углу естественного откоса. Таким образом, подрезку на всю высоту яруса возможно осуществлять только в отвалах, отсыпаемых на прочное основание, и под углом не более 45° .

С помощью моделей было исследовано также влияние выемок в почве пласта и наличие предохранительного целика на устойчивость отвалов. Расчеты позволили получить количественную оценку степени влияния этих факторов. В табл. 23 приведены данные о коэффициентах запаса устойчивости по исследованным моделям.

Коэффициент запаса устойчивости модели отвала с выемкой F_B

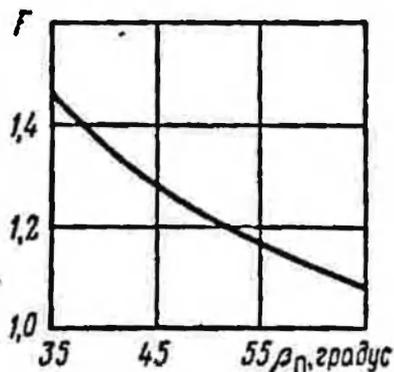


Рис. 50. Зависимость коэффициента запаса устойчивости от угла подрезанного яруса отвала высотой 30 м при $\delta = 20^\circ$

$$F_B = \frac{\Sigma \tau_{с.э} + \Delta \tau_c}{\Sigma \tau_{лэ} - \Delta \tau_n} \quad (4.13)$$

где $\Delta \tau_c$ — приращение сопротивления пород сдвигу, обусловленное нарушением монолитности контакта (подошвы отвала); $\Delta \tau_n$ — уменьшение действующих напряжений из-за экранирующего эффекта выемок.

Сопротивление пород сдвигу увеличивается на 15—20% за счет нарушения их монолитности на контакте, а действующие напряжения уменьшаются примерно в 2 раза за счет перераспределения напряжений и исчезновения зон их концентрации.

При анализе влияния местоположения, формы и размера выемок было установлено, что наибольшее воздействие на устойчивость отвалов оказывает местоположение выемок. Расположение выемок под верхней бровкой отвала (см. табл. 23, модель 5а) повышает коэффициент запаса устойчивости нижнего яруса всего на 4%, то есть почти не влияет на устойчивость. В то же время расположение выемок у нижней бровки повышает коэффициент запаса устойчивости нижнего яруса в 2,2 раза (см. модели 2а и 7а).

Влияние формы и размера выемок незначительно, что видно из сравнения моделей 7а, 12а и 8а. Выемка треугольной формы (модель 7а) обеспечивает большую устойчивость, чем прямоугольной (модель 8а), а с увеличением объема выемки коэффициент запаса устойчивости увеличивается (модели 7а и 12а). Практически все три модели (7а, 12а и 8а) равноценны, но для создания выемки, принятой в модели 12а, потребуется объем работ вдвое меньший, чем для выемки той же

Таблица 23

Номер модели	Относительный коэффициент запаса по ярусам		
	одному	двум	трем
2а	100*	102	110
7а	220	145	108
12а	198	132	122
8а	140	101	105
5а	101	133	107

* За 100% принята величина коэффициента запаса, равная 1,93.

формы, но большей глубины (модель 7а). Поэтому экономически целесообразна выемка, имитируемая моделью 12а, и расчеты затрат на работы по инженерной подготовке почвы отвалов в дальнейшем сделаны для этих условий.

Установленное методом тензометрической сетки перераспределение напряжений в отвалах за счет создания выемок в их основании было, как уже указывалось, подтверждено центробежным моделированием. Возвращаясь к рис. 24, можно видеть, что выемки снижают порядок полос и тем самым способствуют повышению устойчивости нижнего яруса отвалов примерно в 2 раза, поэтому выемки могут быть рекомендованы как мероприятие, способствующее повышению устойчивости отвалов. Варианты создания выемок и результаты производственных экспериментов будут рассмотрены в следующей главе.

Аналогичный эффект можно получить оставляя целики угля шириной, равной ширине заходки (40 м). Исследованиями установлено, что наличие целика увеличивает общий коэффициент запаса устойчивости отвала на 20%. Однако такое мероприятие экономически невыгодно из-за увеличения потерь угля.

Таким образом, с помощью моделирования и соответствующих расчетов по предложенной методике впервые произведена количественная оценка влияния на устойчивость отвалов следующих основных факторов: изменение угла наклона основания; подрезка нижнего яруса под углом; превышающим естественный; наличие слабого слоя в почве пласта; создание выемок в основании отвалов и оставление предохранительного целика.

Кроме того установлено, что во-первых, при минимально допустимом коэффициенте запаса устойчивости, равном 1,2, устойчивость яруса отвала высотой 30 м с углом откоса 37° обеспечивается и при угле наклона основания 25° .

Во-вторых, предельная высота отвала, имеющего угол откоса 37° , расположенного на прочном основании с углом наклона 20° , не должна превышать 140 м:

В-третьих, обнаружено, что наличие слабого слоя мощностью до 6 м снижает устойчивость отвала в среднем на 20%.

В-четвертых, обоснована возможность применения подрезки нижнего яруса отвала под углом 45° в отвалах

из скальных и полускальных пород, отсыпанных на прочное основание с углом наклона до 15°. При более крутых углах наклона основания необходимо проведение специальных мероприятий, обеспечивающих устойчивость отвалов.

В-пятых, получен существенный эффект от создания в почве пласта выемок, повышающих устойчивость нижнего яруса более чем в 2 раза, а всего отвала в целом на 20—30%. Подобное же действие оказывают предохранительные целики.

Все расчеты проведены для скальных и полускальных пород без включения глинистых разностей, т. е. для хорошо фильтрующих пород.

5. ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ

5.1. Расширение области применения бестранспортной системы разработки на пластах с углом падения до 18—20°

Открытый способ разработки угля в Кузбассе постоянно совершенствуется и будет развиваться в дальнейшем как за счет реконструкции действующих, так и за счет проектирования и строительства новых разрезов.

Одним из главных направлений технического прогресса открытых горных работ в СССР является расширение области рационального применения прогрессивной бестранспортной системы разработки, обеспечивающей низкие затраты на вскрышные работы и наибольшую производительность труда. Эта проблема в условиях Кузбасса особенно актуальна, поскольку здесь отмечается снижение удельного веса бестранспортной системы*, которое сохранится и в ближайшие годы:

Год	1960	1965	1970	1975
% от общего объема вскрыши	47	29	25	16

Раньше расширение области применения бестранспортной системы в Кузбассе сдерживалось малыми рабочими параметрами существующего оборудования. Например, в 1951 г. на разрезах комбината Кузбасскарб-

* Это связано с ухудшением инженерно-геологических условий разработки месторождений.

еруголь работало 28 экскаваторов с ковшем средней емкости 1,83 м³. В настоящее время на разрезах насчитывается свыше 600 экскаваторов, а средняя емкость ковша составляет 10 м³.

С использованием высокопроизводительных экскаваторов при разработке вскрыши и при отвалообразовании значительно расширилась область применения бестранспортной системы и в то же время приобрели особую значимость вопросы устойчивости внутренних отвалов, параметры которых существенно увеличались. Сейчас основным вопросом является обеспечение устойчивости внутренних отвалов при технологически целесообразных их параметрах и при пологом залегании пластов, имеющих угол наклона более 10—12°.

В существующей практике проектирования и эксплуатации разрезов бестранспортная система, как правило, применяется для разработки пологих пластов пород с углами падения до 10—12°. Расчеты, выполненные в КуЗНИУИ, определили низкие значения предельно-устойчивой высоты отвалов, при которых применение внутреннего отвалообразования неэффективно. Так, для разрезов Томусинского района Кузбасса была установлена предельная высота отвала, расположенного на основании с углом наклона 12°, равная 31 м. При угле наклона основания отвала 17° высота его не превышала 19, а возможная мощность вскрыши — 14 м.

Однако опыт работы разреза «Красногорский» показал, что практически возможно эффективно разрабатывать пласты с углом падения до 14—15° по бестранспортной системе. Вместе с тем при возрастании углов падения до 16—17°, а также на участках, где в почве пластов залегают слабые породы, например, углистые аргиллиты, бывают нарушения устойчивости отвалов, отрицательно сказывающиеся на экономичности работ.

Оценивая площади карьерных полей Кузбасса, В. В. Крючков, Л. К. Федяев и др. [41, 86] отметили целесообразность применения бестранспортной системы разработки на участках с углом падения пластов до 18° при условии разработки и внедрения специальных мероприятий, обеспечивающих устойчивость внутренних отвалов. Для этих условий они подсчитали долю площади нижнего пласта, обрабатываемого по бестранспортной системе, которая составит на разрезах: «Междуреченском» — 75—81, «Томусинском» — 78—82, «Талдинском

1—2» — 80—84, «Новоколбинском» — 85, «Урегольском» — 95, «Куренинском» — 97, «Алардинском» — 98—99, на участке «Кийзакский — 9» разреза «Красногорский» — 100%.

Таким образом, при применении бестранспортной системы для разработки пластов с углами падения более 10—12° необходимо решать задачу устойчивости внутренних отвалов, расположенных на пологих и наклонных пластах. Успешное решение этой задачи значительно повысит экономическую эффективность открытой добычи угля в Кузбассе, так как в недалеком будущем 20—25% угля будет добываться на месторождениях с наклонным залеганием пластов [97]. Основной объект исследований — Талдинское месторождение, которое принадлежит к центральной части Ерунаковского геолого-экономического района Кузбасса.

Промышленные запасы каменного угля на данном месторождении составляют около 1,5 млрд. т. Мощность проектируемого разреза «Талдинский 1—2» составит 24 млн. т в год; максимальная проектная глубина 560 м. Освоение месторождения намечается в четыре очереди по 6 млн. т каждая за 15 лет эксплуатации. Угли энергетические марки Г6, суммарная мощность одиннадцати рабочих пластов 90,6 м.

Максимальная протяженность месторождения 14, ширина 12 км. Наибольшей угленасыщенностью характеризуется центральная часть — собственно участок «Талдинский 1—2» (рис. 51).

Месторождение состоит из 42 угольных пластов, из которых 11 могут быть отработаны открытым способом.

Почти все пласты имеют сложное строение, число породных прослоек достигает порой 20. Мощность пластов изменяется от 1,6 до 21,3 м. Наиболее мощные 78, 82, 86—84 и 91 пласты, а также пласт 73 в северной части месторождения, где он сливается с пластами 72 и 71 (суммарная мощность которых составляет 11—14 м). В основном пласты имеют достаточно выдержанную мощность по всей площади.

Литологический состав угленосной толщи представлен алевролитами, песчаниками и аргиллитами. Наиболее распространены алевролиты — 61,3%; содержание песчаников колеблется от 18,4 до 27,2%. Аргиллиты в пределах участков развиты слабо (4,2—5,5%) и имеют второстепенное значение. По своему составу угленосная

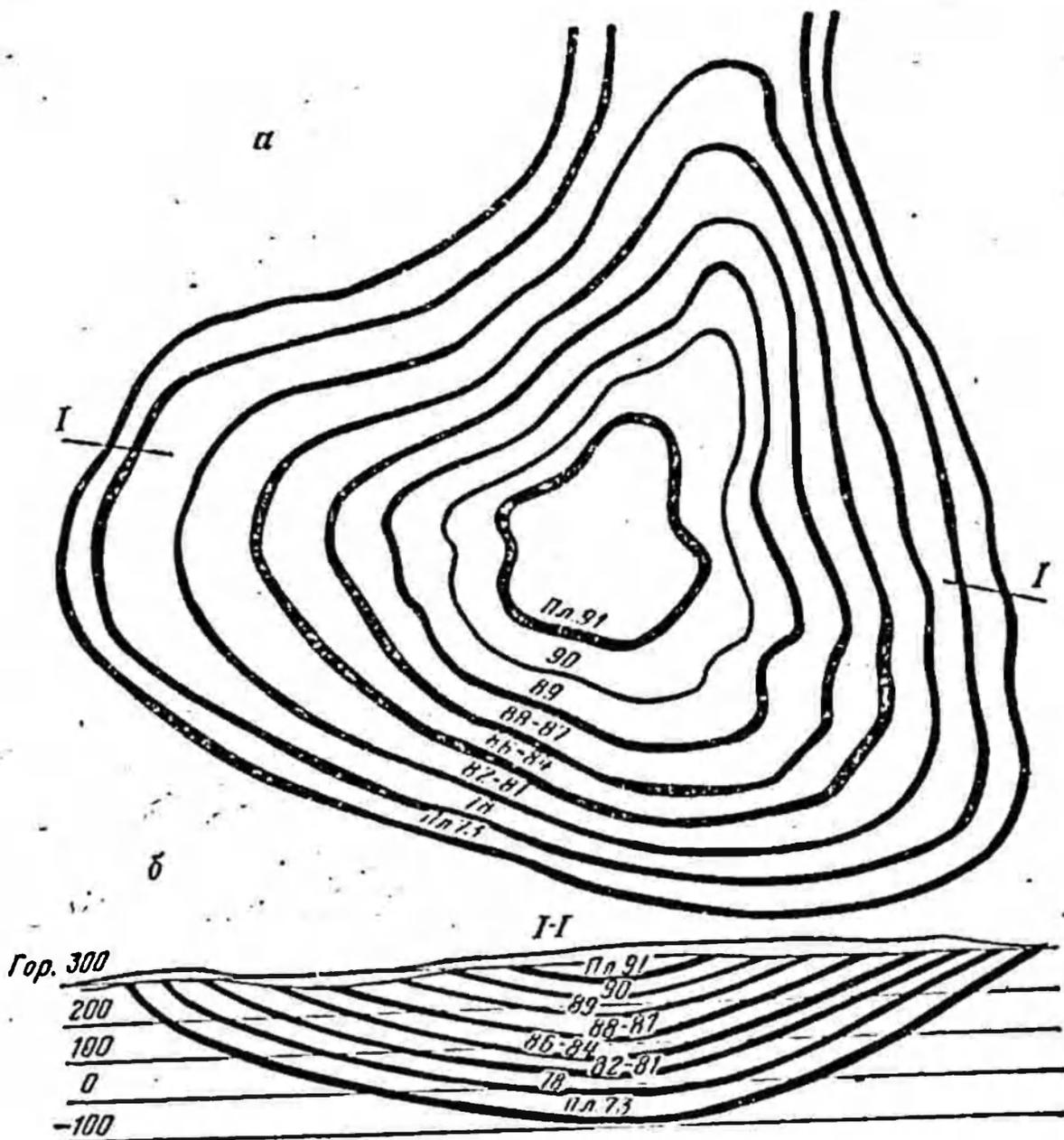


Рис. 51. Разрез «Талдинский 1-2»:
 а — схематический план; б — профиль по линии I-I

толща непостоянна как по простиранию, так и по мощности.

Четвертичный покров сложен суглинками и глинами; мощность его не превышает 20 м.

Продуктивные слои представляют собой брахисинклиналь с пологим залеганием крыльев, которая на разведанном участке имеет почти симметричное строение. Углы падения угольных пластов изменяются от 0° в замковой части до 45° на выходах под наносы. Так, на юго-западном крыле складки углы падения дости-

гают 5—10°, на северо-восточном — 10—20°. Вблизи осевой части складки углы падения пластов изменяются от 4 до 10°. Участки с крутым залеганием ограничены по площади и находятся в северной части месторождения.

Гидрогеологические условия месторождения характеризуются наличием густой речной сети и обводненностью пород. На площадях участка «Талдинский 1—2» подземные воды приурочены в основном к коренным породам угленосной толщи, к песчанкам и пластам угля.

В толще коренных пород выделяются две зоны: верхняя — интенсивной трещиноватости и наибольшей обводненности; нижняя — затухающей трещиноватости. В последней располагается пять водоносных горизонтов.

Из современных физико-геологических явлений на территории Талдинского месторождения широко развиты оползни. Наибольшее их число наблюдается на левом берегу р. Еланы Нарык в четвертичных отложениях. Оползни контактные — поверхность разрушения проходит по контакту рыхлых отложений с коренными породами. Многоступенчатые оползни с валами выпирания имеют большие размеры и охватывают площадь до 0,5 км².

Для нормальной эксплуатации разреза, обеспечения безопасности ведения работ и повышения устойчивости бортов потребуется предварительное осушение пород, а при отработке запасов угля под поймой р. Еланы Нарык — отвод русла за пределы участка.

ТЭО по Ерунаковскому району, составленным Сибгипрошахтом, предусматривается комбинированная система разработки Талдинского месторождения: транспортная в верхней части и бестранспортная по нижнему междупластью. Самый нижний пласт 73—71-й залегает в основном полого под углами 6—20°, но на северо-западном крыле складки углы падения увеличиваются до 36—42°. Этот пласт имеет наиболее сложное строение. Мощность его колеблется от 11,2 до 14,1 при среднем значении 11,9 м. Мощность междупластья в среднем 40—64 м. На северном продолжении участка «Талдинский 1—2» мощность пласта колеблется от 6,5 до 13,3 м, а мощность междупластья составляет 65—86 м (максимальная величина достигает 100 м). В кровле и почве залегают в основном алевролиты, реже песчанки и углистые аргиллиты. Бестранспортную систему можно также применить при отработке вскрыши верхнего 91-го

пласта * (рис. 52). Весьма благоприятные условия залегания и ^{большая} мощность пласта (максимальная — 15,4 м, средняя — 13,6 м, минимальная — 12,6 м) позволяют начать его отработку сразу же после строительства первоочередных объектов. Пласт имеет пологое (до 15°) падение и лишь в северо-западной части поля углы падения достигают 20—23°. Пласт выдержан по мощности; в кровле и почве залегают алевролиты, очень редко аргиллиты и песчаники. Мощность вышележащих пород составляет 60—68 м. Поскольку частично породы находятся в зоне выветривания, они обладают более низкими прочностными характеристиками, чем в погруженной замковой части брахисинклинали.

Другой объект исследований — разрез «Красногорский» производственного объединения «Кемеровоуголь». Разрез сдан в эксплуатацию 31 декабря 1954 г. с проектной мощностью 300 тыс. т/год.

Карьерное поле имеет длину около 12—17 км и ширину от 1,5 до 4,5 км. Рельеф поверхности сложный; отметки на водоразделах достигают 500—600 м, в логах 235—240 м. Геологический разрез по I разведочной линии представлен на рис. 53.

По возрасту продуктивная толща относится к пермской системе и представлена отложениями Верхнебалахонской свиты. Промышленное значение имеют 11 пластов, которые состоят из одной или нескольких пачек угля, разделенных породными прослойками. Мощность пластов колеблется от 0,8 до 8,0 м, суммарная мощность составляет 36 м. Угли энергетические марок ТР, ТРОК-I и ТРОК-II.

Вмещающие породы представлены песчаниками на кремнистом цементе (65—70% всего объема вскрыши), алевролитами и изредка аргиллитами. Местами песчаники переходят в конгломераты. Коэффициент крепости пород по шкале проф. М. М. Протодьяконова изменяется от 4 до 12. При разработке их применяется буровзрывной способ рыхления.

Четвертичный покров незначителен (мощность колеблется от 1 до 10 м) и почти повсеместно представлен делювиальными суглинками и глинами — светло-бурыми и темно-коричневыми, иногда с примесью ще-

* При дальнейшем развитии горных работ породы внутренних отвалов должны быть удалены за пределы карьерного поля.

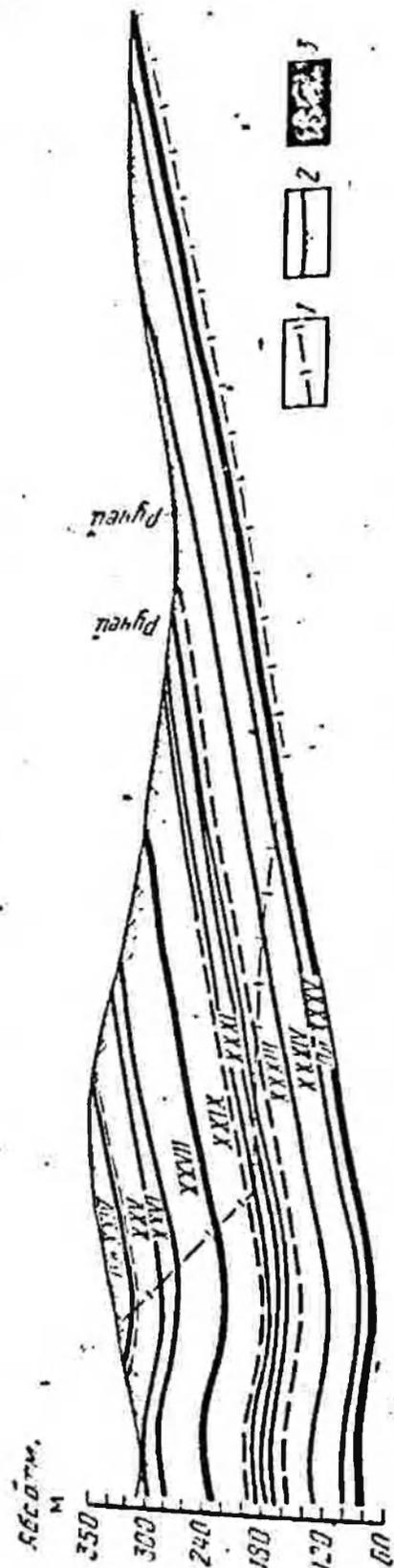


Рис. 53. Геологический разрез по I разведочной линии:
 1 — граница разреза; 2 — почвенно-растительный слой; 3 — уголь

бенки. Вблизи действующих ручьев и у берегового склона р. Томы изредка встречаются синие пловатые глины.

Коренные породы в нижней части толщи трещиноваты и обводнены. Максимальный приток воды в зумпф на одном участке достигает в апреле 3200, минимальный в июле — 250, среднегодовой — 720 м³/ч. Однако, благодаря большой расчлененности рельефа и хорошо организованному водоотливу, выработки и дорожные коммуникации разреза практически сухие.

Тектоническое строение месторождения простое. Слои пород по всей площади сохраняют моноклиналиное северо-западное направление с углами падения от 10 до 17°; на отдельных участках они уменьшаются до 3—8° или увеличиваются до 20—21°. Местами слои пересекаются дайками диабазов, но в основном пласты угля не нарушены.

Вскрытие карьерных полей производится полутраншеями со скользящими съездами. Подвигание фронта работ в среднем составляет 40 м/год.

Система разработки — комбинированная: вскрышные породы верхних пластов отрабатываются по транспортной системе с применением автосамосвалов, а двух-трех нижних —

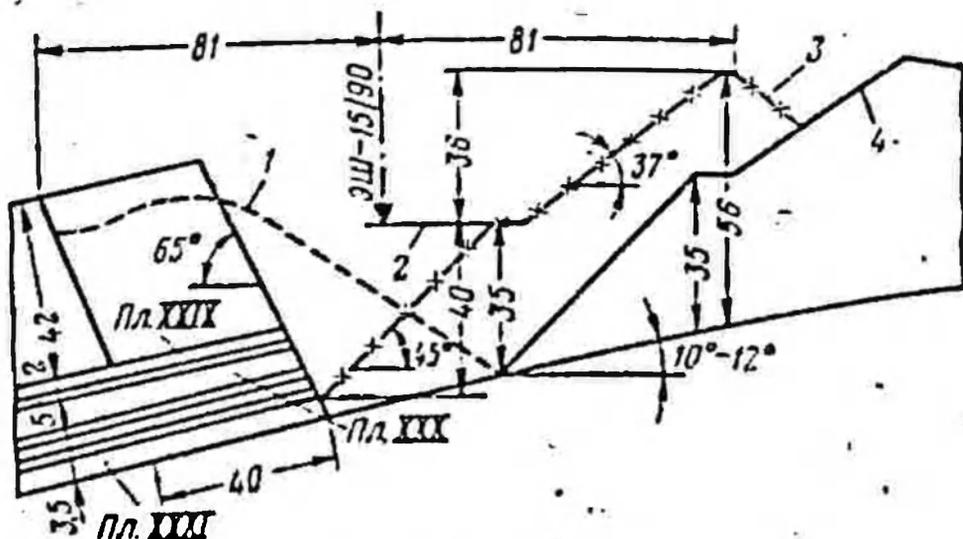


Рис. 54. Схема отработки вскрышного пласта XXIX—XXXI экскаватором ЭШ-15/90:

1 — развал пород после взрыва; 2 — рабочая трасса экскаватора; 3 — конечное положение отвала; 4 — первоначальное положение отвала

по бестранспортной системе шагающими драглайнами при высоте вскрышного уступа 35—48 м.

По данным 1977 г. основные технико-экономические показатели разреза следующие:

Вскрыша, млн. м ³ :	
общая	20,5
при бестранспортной системе разработки	10,0
при транспортной	10,5
Текущий коэффициент вскрыши	4,56
Затраты на 1 м ³ вскрыши, коп.:	
общие	99,3
при бестранспортной системе разработки	84,4
при транспортной	11,3
Коэффициент грезекскавации	2,24
Затраты на грезекскавацию 1 м ³ вскрыши, руб	17,0
Себестоимость 1 т угля, руб.	5,01

На рис. 51 представлена типичная технологическая схема разработки пластов.

Во внутренние отвалы укладывают около 60% вскрыши, преимущественно песчаники и алевролиты с незначительной добавкой менее прочных пород. Основанием отвалов служат большей частью песчаники и алевролиты, реже — углистые аргиллиты.

В практике разреза «Красногорский» случаев подвижек внутренних отвалов, отсыпаемых на прочное основание (песчаники, алевролиты), не наблюдалось. Деформировались отвалы, в основании которых залежали

слабые глинистые породы — увлажненные углистые аргиллиты. В этих случаях оползшие массы достигали уступа рабочего борта, перекрывали угольный пласт и выводили из строя оборудование. Кроме того, возможность оползневых подвижек создавала угрозу безопасности людей.

Из общих эксплуатационных потерь угля по разрезу (7—8%) около 1,5% составляли потери за счет нарушения устойчивости внутренних бестранспортных отвалов.

Примером оползней отвалов на слабом основании может служить оползень, образовавшийся на втором — шестом участке в 1967 г. В отвал складировали смесь пород из песчаников (80%), алевролитов, углистых аргиллитов и глины (20%). Угол падения пласта XXXV, в почве которого залегала слабая некондиционная пачка угля мощностью 3,5 м, равен 14—16°. При общей высоте отвала 65 м откосы с углами 40—45° в случае постоянного движения пород выколаживаются за месяц до 36—38°. Удаление слабого слоя и отсыпка отвала на прочное основание привели к тому, что в течение пяти лет отвалы сохраняли устойчивость при угле откоса нижнего яруса 40—42° и общей высоте порядка 40 м.

Систематические подвижки отвалов, расположенных на слабом основании, наблюдались также в другом районе этого участка, где в почве пласта залегала пачка пересланяющихся тонких прослоек углистых аргиллитов, углей и алевролитов общей мощностью 6—12 м. При этом происходило выдавливание пород основания. Отвалы были сложены из песчаных (60%) и глинистых пород (40%). Угол наклона основания составил 12—16°, а высота отвалов до оползания — 30—40 м. Оползши не прекращались в течение ряда лет. Оставляемые целики угля не давали положительных результатов (рис. 55).

Последняя подвижка была зафиксирована в 1972 г., в результате которой был разрушен предохранительный целик угля с забетонированными в него рельсами. Потери угля с 1 м предохранительного целика составили 120 т, а общие потери при длине блока 240 м — 30 тыс. т угля.

Наблюдения за состоянием отвалов и анализ имеющихся случаев нарушения их устойчивости позволили установить, что происходящие оползши внутренних отвалов, согласно классификации [21], относятся к классу

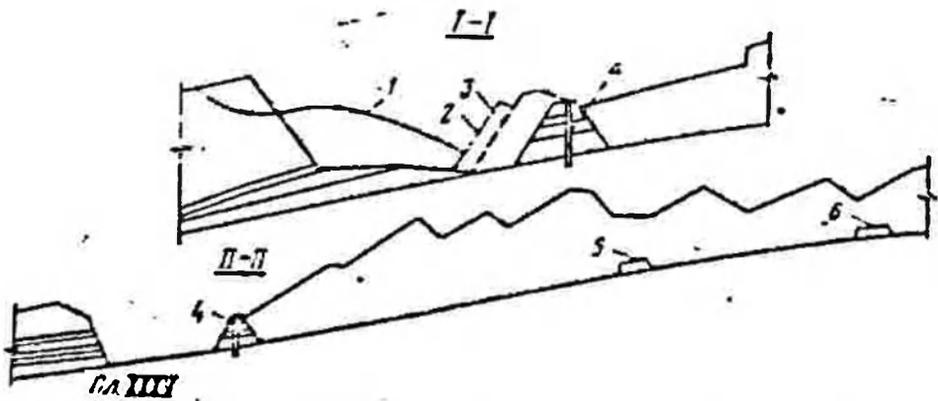


Рис. 55. Профили отвалов в районе оползня на участке 2—6:
 1 — развал взорванной горной массы; 2 и 3 — фиксированные смещения целика
 угля; 4 — рельсы в угольном целике 1972 г.; 5 и 6 — целики угля, оставленные
 в 1967 и 1968 гг.

контактных оползней отвала и подошвы, в частности, к подклассам Б-IV-б и Б-IV-в (рис. 56).

Из других видов деформаций на разрезе встречаются осадки, оплывины, осыпи, но они не оказывают существенного влияния на ведение горных работ.

Важным элементом в оценке устойчивости отвалов является правильный выбор расчетной схемы, наиболее полно отражающей реальное состояние отвалов, что возможно на основании экспериментальных и теоретических исследований. Ввиду близости характеристик физико-механических свойств пород с нарушенной структурой Талдинского месторождения и пород внутренних отвалов разреза «Красногорский» результаты натуральных наблюдений на последнем с известным приближением могут быть положены в основу рекомендаций для внутренних отвалов разреза «Талдинский 1—2». Внутренние бестранспортные отвалы разреза «Красногорский» обследованы в 60 точках, произведено 343 замера углов естественных откосов отвалов, 68 замеров углов подрезанных ярусов отвалов, в шести точках определены углы внешнего трения (в каждой по 5—12 измерений), в 71 точке зафиксированы фактические значения высот нижних ярусов отвалов, величины общих высот и результирующие углы откоса отвалов установлены по данным 86 замеров.

Результаты лабораторных и полевых экспериментов сопоставлены с фактическими данными и проверены теоретическими расчетами.

Породы в отвалах располагаются под углом естественного откоса, на величину которого влияют такие

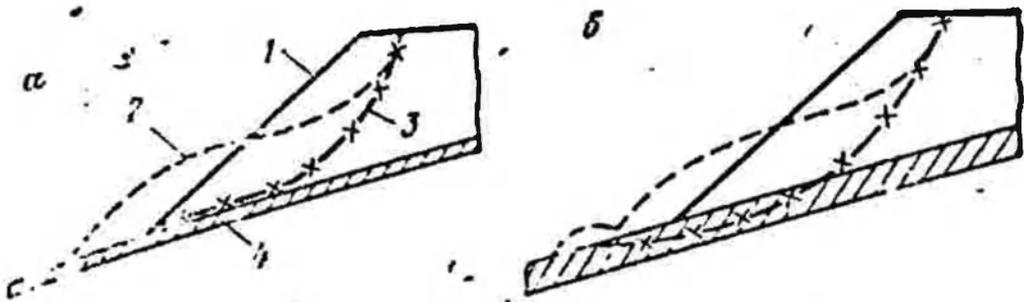


Рис. 56. Схемы оползневых деформаций:

a — контактные оползни подкласса Б-IV-б; *б* — то же, подкласса Б-IV-п;
 1 — контур отвала до оползания; 2 — то же, после оползания; 3 — поверхность разрушения; 4 — слабый слой пород

факторы, как угол внешнего трения, высота отвала, время его стояния, способ отвалообразования и др.

Углы естественного β_0 и подрезанного $\beta_{п}$ откосов определялись горным компасом, по фотоснимкам в масштабе и с маркшейдерских профилей, один из которых изображен на рис. 57. Сопоставление значений углов, полученных различными способами (табл. 24), показало хорошую сходимость, что позволило с одинаковой степенью достоверности относиться к данным, полученным любым из этих трех способов.

Полевые наблюдения и анализ фактических данных показали, что отвалы в зависимости от способа их отсыпки имеют различную форму в плане: конусную, призматическую и серповидную (рис. 58).

Отвалы в виде конуса образуются при концентрированной отсыпке пород экскаватором в одну точку — вер-

Таблица 24

Способ замера	β_0 , градус	<i>n</i>	$\beta_{п}$, градус	<i>n</i>
Горным компасом	$\frac{33-42}{37}$	9	$\frac{45-57}{46}$	2
По плану (профилю)	$\frac{34-40}{37}$	5	$\frac{40-50}{45}$	6
По фотоснимку	$\frac{32-40}{37}$	11	$\frac{41-48}{45}$	8

Примечание. В числителе — минимальные и максимальные значения, в знаменателе — среднеарифметические; *n* — число замеров.

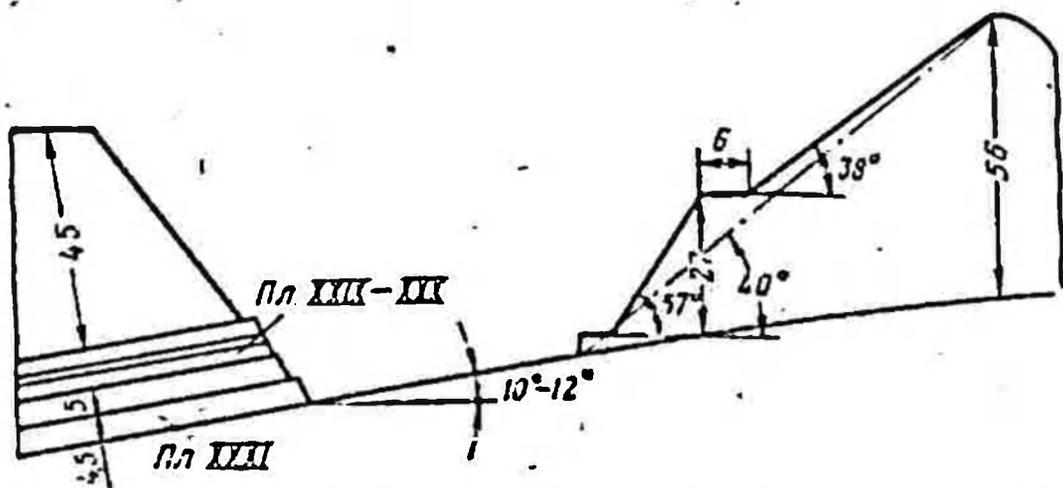


Рис. 57. Маркшейдерский профиль по линии IX—IX на участке 5

шину конуса, от которой они перемещаются в разные стороны под одинаковыми углами. При разгрузке ковша вдоль линии, параллельной простиранию, или под углом к ней формируются в первом случае призматические, во втором серповидные формы отвалов. Причем углы откосов в этих случаях в направлении, перпендикулярном оси выработанного пространства, и в торцах отвалов будут различными. Естественно, что в торцах они значительно больше из-за увеличения скорости перемещения кусков ввиду совпадения направления их перемещения с траекторией движения ковша.

Фактические углы откосов свежесыпанных β_e и постоявших $\beta_{e,п}$ отвалов замерены в направлении, перпендикулярном фронту работ. Замерены также углы для торцевых точек отвалов различной формы в плане. Средние значения углов по всему разрезу представлены в табл. 25.

Таблица 25

Форма отвала	β_e , градус		$\beta_{e,п}$, градус	
	в направлении, перпендикулярном фронту работ	в торцевых точках	в направлении, перпендикулярном фронту работ	в торцевых точках
Конусная	38	—	38	—
Призматическая	37,5	30	37	30
Серповидная	39	31	38	28,5

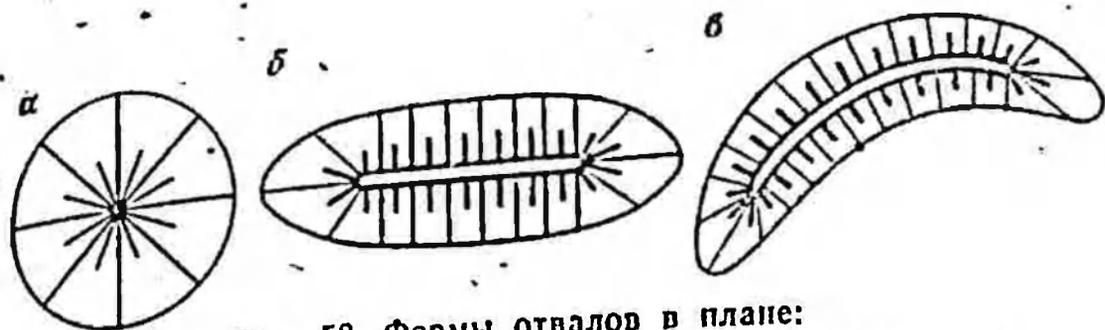


Рис. 58. Формы отвалов в плане:
 а — конусная; б — призматическая; в — серповидная

После отсыпки пород в отвалы происходит их осадка и уплотнение, в результате чего углы откосов выглаживаются. Например, по данным маркшейдерской съемки внутренних отвалов разреза «Красногорский» и по предварительным расчетам величина осадки в первые 1,5—2,5 мес после отсыпки составляет несколько процентов.

На основании многочисленных замеров за расчетную величину угла естественного откоса для пород отвалов разреза «Красногорский» можно принять угол, равный 38° , а для постоянных отвалов — $36—37^\circ$.

В шести точках наблюдений были проведены опыты по определению угла внешнего трения отвалов. Результаты замеров приведены в табл. 26.

Угол внешнего трения определяется по формуле [15]

$$\operatorname{tg} \varphi_{\text{в}} = \operatorname{tg} \beta_{\text{е}} - \frac{2L}{gt^2 \cos \beta_{\text{е}}} \quad (5.1)$$

где $\operatorname{tg} \varphi_{\text{в}}$ — коэффициент внешнего трения; L — длина откоса, м; g — ускорение силы тяжести, м/с²; t — время скатывания куска, с.

Длина откоса измерена рулеткой, время скатывания — секундомером, средняя его величина подсчитана по 5—12 замерам.

Как показали расчеты, угол внешнего трения качества пород отвалов разреза «Красногорский» равен $30—31^\circ$ и не зависит ни от времени стояния отвала, ни от его угла естественного откоса.

Таким образом, угол естественного откоса отвала образуется не только за счет трения качения (при скатывании крупных кусков вниз по откосу), но и за счет трения скольжения при перемещении вниз мелкой фракции и кусков плоской формы. Поэтому заменять термин

«угол естественного откоса» «углом скатывания» [49] неправомерно.

Имеющиеся случаи нарушения устойчивости отвалов на пологих пластах и расширение внутреннего отвалообразования на наклонных пластах вызвали необходимость разработать специальные мероприятия по предупреждению оползневых деформаций. В частности, на основе лабораторных исследований рекомендуется инженерная подготовка почвы пласта путем устройства предохранительных выемок специальной формы.

Выемки в почве пласта можно образовывать буровзрывным способом. Нами были рассмотрены два варианта создания выемок в подошве отвалов: I — взрывами на выброс камерными обычными зарядами и зарядами с воздушными полостями и II — дробление горных пород скважинными зарядами.

На рис. 59 представлены проектные профили воронок, для которых проведены расчеты. Как указывалось ранее, за исходную принята выемка глубиной до 6 м; минимально возможная глубина выемок 3 м ограничивается величиной забойки скважины.

Таблица 26

Номер участка	Номер точки	Лито-логический состав пород, %	Время стояния отвала	$\beta_{с}$, градус	L, м	t, с	$\Phi_{в}$, градус
3-4	38	П-70 А-30	10-12 лет	40	35	6	30
3-4	13	П-60 А-20	Свежеотсыпавший	36	32	6	30
5	15	П-50 А-50	Одни сутки	37	30	7	31
2-6	30	П-60 АА-40	12 дней	37	30	7	31
7	22	П-60 Гл-35 Д-5	10 дней	38	28	6	30
8	24	П-40 А-40 Гл-20	Одни год	38	46	8	31

Примечание. Гл — глина; Д — диабаз. Остальные обозначения те же, что и в табл. 10.

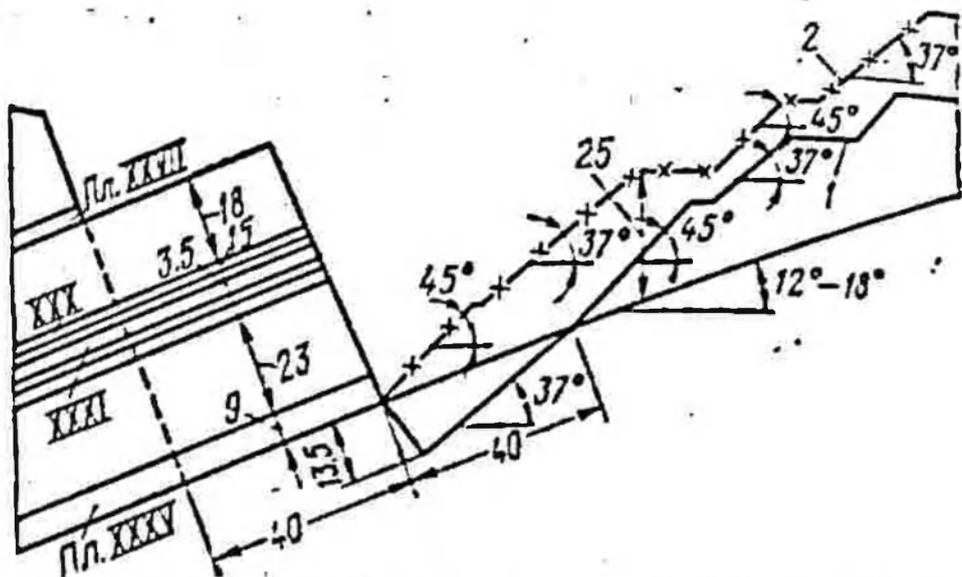


Рис. 60. Схема бестранспортной системы разработки с предохранительной выемкой в почве пласта XXXV на участке 2—6:
1 — первоначальное положение отвала; 2 — конечное положение отвала

ствия динамических нагрузок на отвалы не могут привести к нарушению их устойчивости.

При обводнении отвалов целесообразно создавать уклон выемок по простиранию в сторону понижения почвы пласта. В этом случае выемки будут служить дренами, обеспечивающими сток подземных вод и повышающими устойчивость отвалов.

На разрезе «Красногорский» горным инж. В. С. Вагоровским были проведены эксперименты по устройству выемок в почве пласта. Первоначальная проектная схема расположения выемок показана на рис. 60. Однако, ввиду наличия в почве слоя слабых пород большой мощности и возникшей деформации отвала, опытный участок был перенесен в зону отработки XXXIII пласта экскаватором ЭШ-10/60 № 84 (участок 2—6), где угол падения пласта достигал 17—20°. Образование выемок осуществлялось следующим образом. После выемки угля в почве пласта были пробурены скважины глубиной от 5 до 14 м на уступе длиной 200 м. Взорванные породы удаляли на разных профилях по-разному: полностью, частично и не удаляли совсем. Профиль отвала представлен на рис. 61.

Проведенными в дальнейшем маркшейдерскими наблюдениями за состоянием внутренних отвалов на участке производственного эксперимента не обнаружено нарушений их устойчивости.



Рис. 61. Профиль отвала на участке производственного эксперимента:
 1 — положение подрезанного отвала; 2 — невыбранная взорванная порода;
 3 — фактическое сечение выемки

При обработке последующей заходки на одной ее половине породы из выемки экскавировали, на другой оставляли без изменения. Результаты наблюдений свидетельствовали о надежной устойчивости отвалов в обоих случаях.

Таким образом, на основании лабораторных исследований и натуральных наблюдений установлена целесообразность рыхления почвы пласта буровзрывным способом при углах падения пласта более $15-16^\circ$ и в тех случаях, когда в почве залегают прочные породы.

Если в почве пласта залегают слабый слой небольшой мощности, например углистые аргиллиты, то его целесообразно удалять. Такое мероприятие было проведено на одном из участков разреза «Красногорский», где была удалена некондиционная высокозольная пачка угля мощностью до 2 м и отвал был отсыпан на прочное основание из песчаника.

Как было установлено в процессе лабораторных исследований, наличие целика угля повышает устойчивость отвалов, однако усложняет организацию добычных работ, а при залегании в почве пласта мощного слоя слабых пород он не обеспечивает устойчивости отвалов и разрушается при их деформации (см. рис. 55).

Таким образом, при наличии в основании отвалов слабых пород значительной мощности или целики, ни выемки не являются эффективными мероприятиями, обеспечивающими устойчивость внутренних отвалов. В подобных случаях целесообразно разворачивать фронт работ под углом к простиранию с тем, чтобы угол падения почвы пласта в сечении, перпендикулярном фронту работ, не превышал 8° , что обеспечивает в отвалах бо-

лее благоприятное напряженное состояние, либо вести работы с частичной закладкой выработанного пространства вскрышными породами.

Анализируя вышензложенное, можно сказать, что для обеспечения устойчивости отвалов целинки оставлять не рекомендуется ввиду сложности организации добычных работ. К тому же при наличии в почве пласта слоя слабых пород мощностью более 5—6 м оставление целинков угля нерационально, поскольку они не предупреждают деформации отвалов.

Наиболее перспективным, действенным и экономичным способом повышения устойчивости внутренних отвалов на пологих и наклонных пластах Талдинского и Томусинского месторождений Кузбасса (равно как и для других с аналогичными инженерно-геологическими условиями) является инженерная подготовка почвы пласта путем создания на каждой заходке в основании отвалов скважинными зарядами выемок или зон рыхления глубиной до 6 м, которые позволяют увеличить коэффициент запаса устойчивости нижнего яруса отвала более чем в 2 раза, а всего отвала в целом на 30%, и расширить область применения прогрессивной бестранспортной системы разработки на пластах с падением до 18—20°.

Создание выемок необходимо осуществлять при обработке пластов с углом падения более 15° в случае наличия прочных пород в основании отвалов. При наличии слабых пород в почве пласта необходимо предусматривать специальные мероприятия, указанные выше.

5.2. Совершенствование схем экскавации

Важным элементом бестранспортной системы разработки является угол откоса нижнего яруса отвала. При его увеличении пропорционально возрастает результирующий угол откоса и емкость внутренних отвалов, что снижает коэффициент переэкскавации. Возможность увеличения угла откоса нижнего яруса путем подрезки обуславливается тем, что породы сразу же после отсыпки оседают и уплотняются, в результате чего значительно увеличивается их сопротивление сдвигу. Кроме того, формируя трассу, экскаваторы создают дополнительную нагрузку на породы отвалов, способствуя тем самым еще большему их уплотнению.

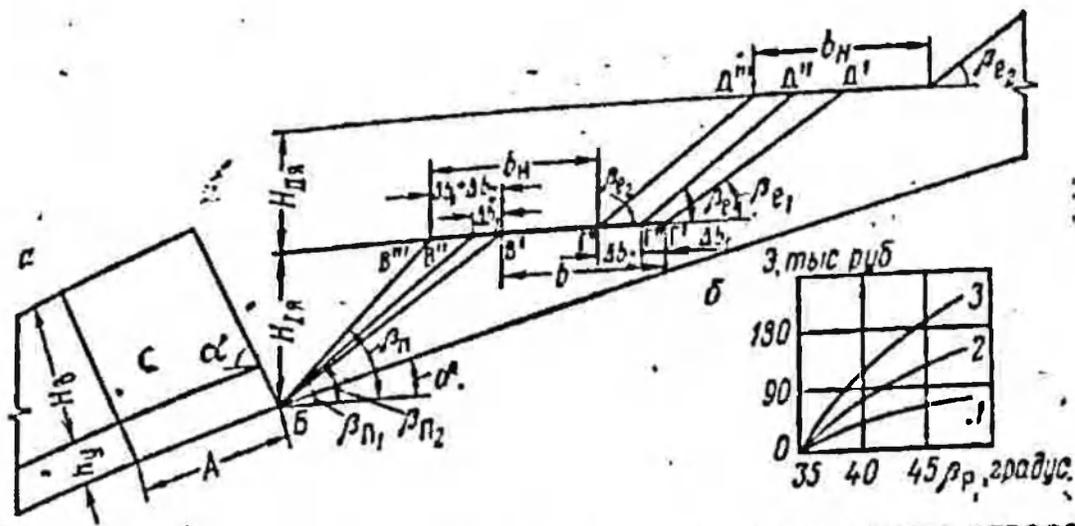


Рис. 62. Влияние углов естественных и подрезанных откосов отвалов на объем переэкскавации:

а — схема к расчету экономического эффекта; б — графики зависимости экономического эффекта; 1 — для первого яруса; 2 — для второго яруса; 3 — для двух ярусов

На рис. 62 дана схема, по которой определяется увеличение емкости отвалов за счет изменения β_e и осуществляется подрезка нижнего яруса под углом β_n .

При угле естественного откоса β_{e1} , контур отвала ограничивается линией $BВ'Г'Д'$, ширина бермы уступа равна $B'Г'$. С изменением угла β_{e1} до β_{e2} меняется контур отвала, он занимает положение, ограниченное ломанной линией $BВ''Г''Д''$. В этом случае ширина бермы увеличивается на величину Δb_1 , точка B' перемещается в точку B'' , поэтому при сохранении величины b_{II} постоянной второй ярус отстраивается уже из точки $Г''$ и под углом β_{e2} .

Для первого яруса отвала увеличение емкости характеризуется площадью S_1 треугольника $BВ'В''$, для второго — площадью S_2 фигуры $Г'Д'Д''Г''$.

Аналогично рассмотрено влияние подрезки нижнего яруса под углом β_n на увеличение емкости отвала. В данном случае емкость возрастает на величину площади S_3 треугольника $BВ'В''$ в первом и S_4 фигуры $Г''Д''Д'''Г'''$ во втором случае.

Авторами произведен расчет для следующих значений: $\beta_{e1} = 35^\circ$, $\beta_{e2} = 38^\circ$, $\beta_n = 45^\circ$, $b_{II} = 44$ м, $H_{IIA} = 40$ м и $H_{IJA} = 32$ м и определен экономический эффект на 1 км фронта работ, исходя из затрат на переэкскавацию 1 м³ пород, равных 18 коп. Изменение экономического эффекта в зависимости от величины углов откосов ярусов отвала иллюстрируется рис. 62, б.

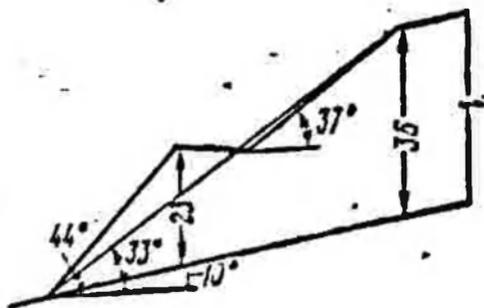


Рис. 63. Профиль подрезанных отвалов на участке 3—4 разреза «Красногорский»

Таким образом, с увеличением угла естественного откоса отвала от 35° до 38° и при подрезке отвала до 45° можно получить дополнительную емкость отвала и увеличить высоту вскрывшего уступа или снизить объем переэкскавируемых пород на $400-980$ тыс. m^3 на 1 км фронта, что приведет к экономии $73-176$ тыс.

руб., или $1-2\%$ от себестоимости 1 т угля.

На рис. 63 изображен профиль подрезанных отвалов разреза «Красногорский». По данным замеров фактические значения высот нижних ярусов внутренних отвалов разреза «Красногорский», где работают экскаваторы ЭШ-10/60 и ЭШ-15/90, колеблются от 10 до 35 м и в среднем составляют 22 м. Высоты подрезанных ярусов изменяются от 15 до 35 м и достигают в среднем 23 м.

Ниже приведены углы подрезанных ярусов отвалов (в числителе — минимальные и максимальные, в знаменателе — среднеарифметические).

Номера эксплуатационных участков	3—4	5	2—6	7	8	Всего по разрезу
Вп, градус	$\frac{41-60}{50}$	$\frac{41-60}{50}$	$\frac{40-57}{46}$	$\frac{40-51}{46}$	$\frac{41-57}{47}$	$\frac{40-60}{48}$
Число замеров	27	49	73	8	11	168

Натурными и маркшейдерскими наблюдениями за состоянием подрезанных откосов отвалов было установлено, что они сохраняют устойчивость при угле подрезки нижних ярусов до $50-57^\circ$. При этом высота подрезки $H_n = 35-37$ м. На основе натурных наблюдений, лабораторных и полевых исследований, а также теоретических расчетов рекомендуется подрезать нижний ярус отвалов под углом 45° на всю высоту яруса, но не более чем на 35 м в отвалах из скальных и полускальных пород, отсыпанных на прочное основание с наклоном до 15° , и не более чем на 30 м при наклоне основания 20° . При наличии в основании отвалов маломощного до 2 м слоя слабых пород последний должен быть удален. Если же мощность слабых пород велика, подрезку осуществлять нельзя.

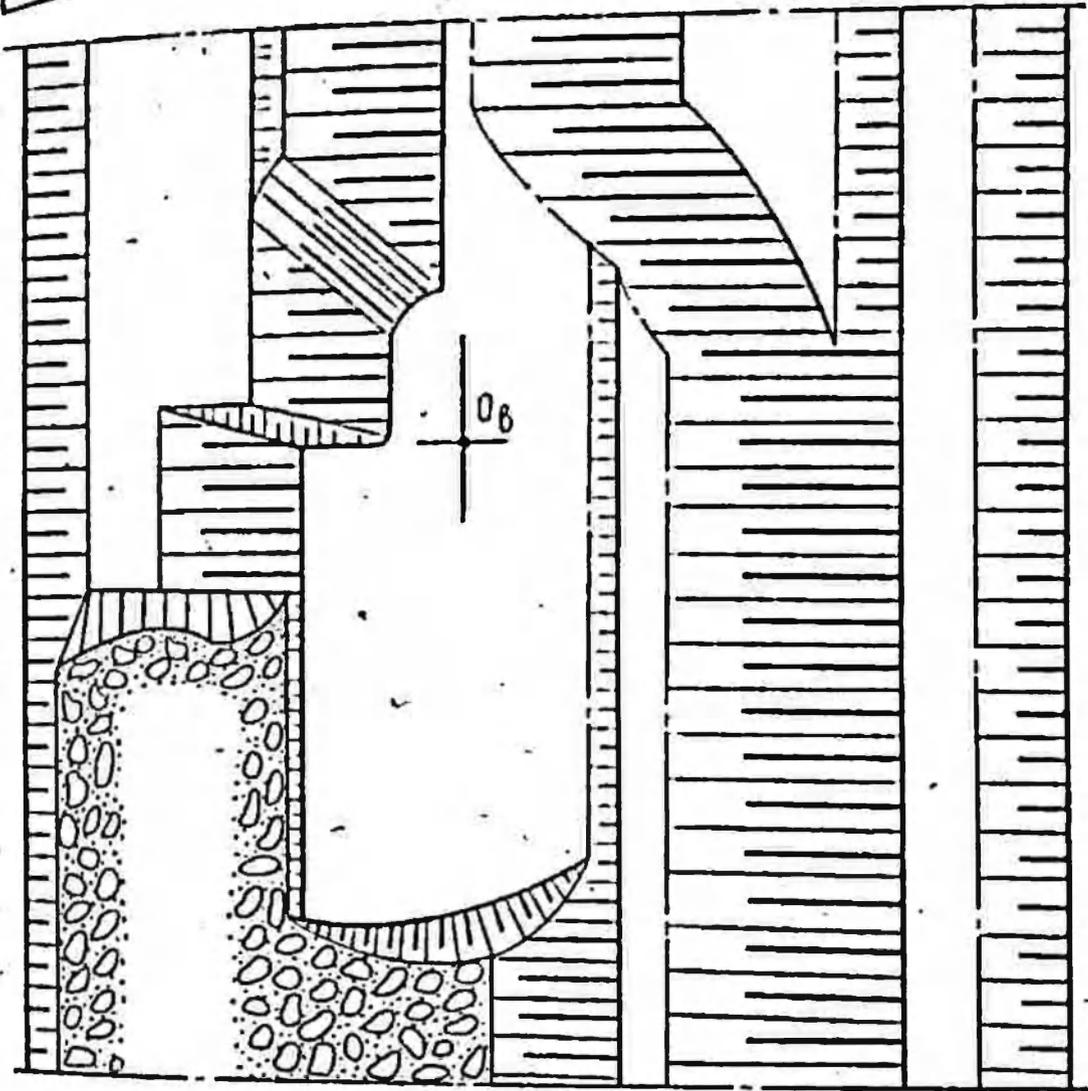
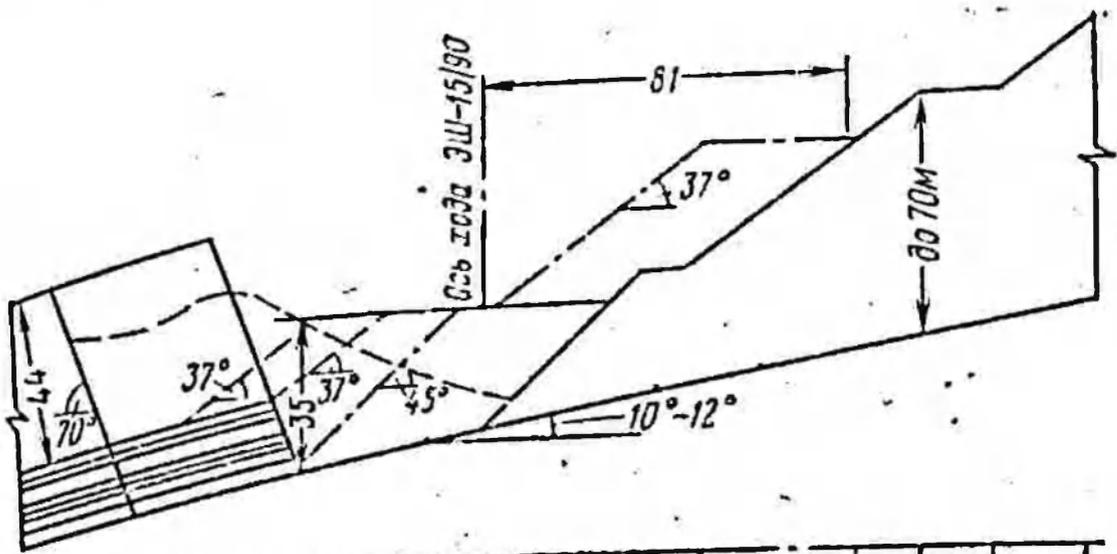


Рис. 64. Схема работы экскаватора ЭШ-15/90 по оконтуриванию пласта ХХХІ с применением подрезки

При подрезке экскаватор должен располагаться за пределами призмы возможного обрушения (3 м) и работать отступающим ходом (рис. 64).

5.3. Параметры отвалов и схемы экскавации

К основным параметрам, от которых зависит устойчивость внутренних бестранспортных отвалов угольных разрезов Кузбасса, относятся: угол падения пластов (δ), угол естественного откоса (β_e), высота яруса ($H_{я}$), угол ($\beta_{п}$) и высота ($H_{п}$) подрезанного яруса предотвала, ширина бермы между ярусами ($b_{п}$), общая высота ($H_{об}$) и результирующий угол (β_p) отвала (рис. 65).

Высоту яруса рекомендуется измерять от вершины отвала по вертикали до пересечения с его основанием ($H_{п}$), а не с горизонталью, проходящей через нижнюю точку откоса ($H_{отк}$), и не по перпендикуляру, опущенному из вершины отвала на его основание (H), как это принято в отчетах КузННУИ (см. рис. 65). Величина $H_{п}$, измеренная таким образом, характеризует наибольшее сечение отвала. Причем между высотой отвала ($H_{п}$), высотой откоса ($H_{отк}$) и высотой отвала по КузННУИ (H) существуют следующие зависимости:

$$\begin{aligned} H_{об} &= \frac{H}{\cos \delta}; \\ H_{отк} &= \frac{H \sin \beta}{\sin (\beta - \delta)}; \\ H &= \frac{H_{отк} \sin (\beta - \delta)}{\sin \beta \cos \delta}. \end{aligned} \quad (5.2)$$

Высоты нижнего и верхних ярусов отвалов, с одной стороны, ограничены параметрами применяемого оборудования (максимальной глубиной черпания $H_{ч\max}$ и максимальной высотой разгрузки $H_{р\max}$), с другой стороны — требованиями обеспечения устойчивости яруса (см. формулы 5.2).

Устойчивость ярусов отвалов, начиная со второго и выше, при угле естественного откоса 38° , согласно данным моделирования и произведенным расчетам, обеспечивается при любой технологически возможной высоте.

Важными элементами при построении схем экскавации являются также общая высота и результирующий угол откоса отвала. Как установлено, предельная высота отвалов, расположенных на наклонном основании ($\delta \doteq 18-20^\circ$), не должна превышать 140 м. При этом результирующий угол отвала не ограничивается устой-

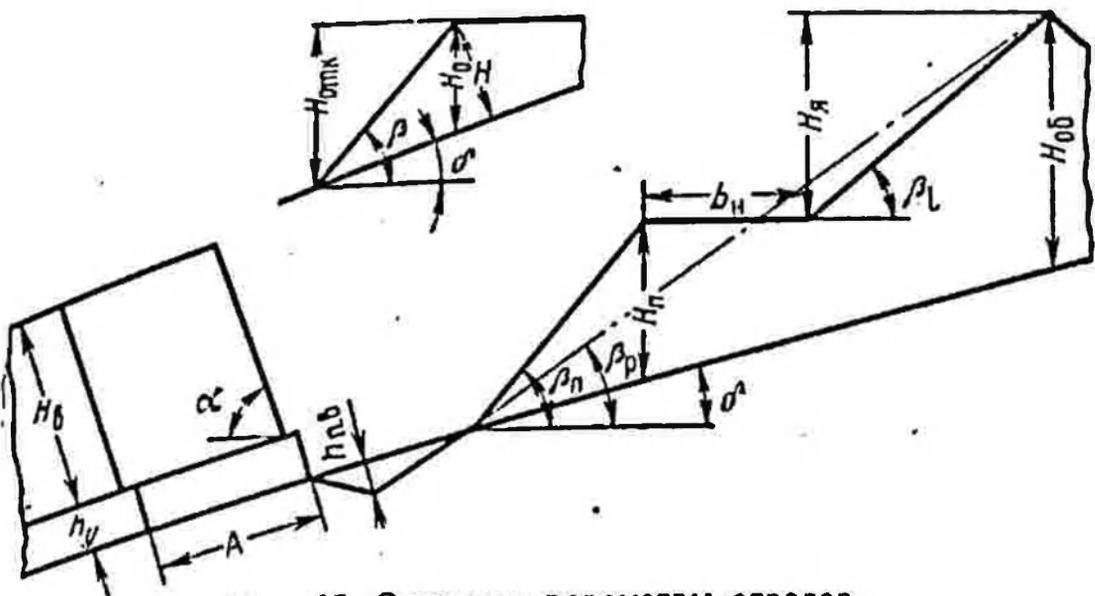


Рис. 65. Основные параметры отвалов

чивостью, а будет определяться технологической схемой расстановки применяемого оборудования. Однако его величина для предельного значения общей высоты отвала не должна быть больше 37° .

Ниже приведены фактические результирующие углы (β_p) и общие высоты отвалов ($H_{об}$) разреза «Красногорский» при различных углах падения почвы пласта (δ).

δ , градус	8—12	12—16	16—20
$H_{об}$, м	$\frac{30-68}{51}$	$\frac{20-66}{46}$	$\frac{20-48}{34}$
β_p , градус	$\frac{24-40}{33}$	$\frac{22-42}{33}$	$\frac{23-39}{34}$
Число замеров	34	37	15

Примечание. В числителе — минимальные и максимальные значения; в знаменателе — средние арифметические.

Как видно, прослеживается определенная закономерность уменьшения средних значений высоты с увеличением угла наклона его основания, несмотря на разброс единичных данных.

Таким образом, средние величины фактических результирующих углов отвалов для разреза «Красногорский» находятся в пределах $33-34^\circ$, но расчетами выявлена возможность увеличения их до $37-38^\circ$.

Для установления зависимостей результирующих углов от общей высоты отвалов была выполнена серия

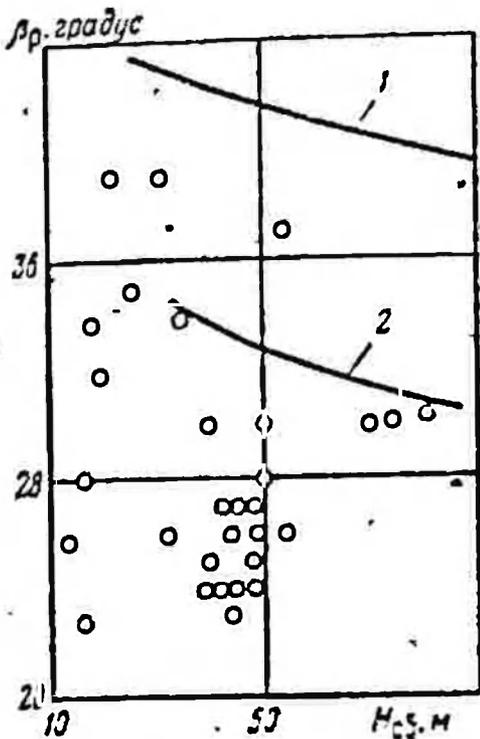


Рис. 66. Зависимость результирующих углов от общих высот отвалов, расположенных на основании с наклоном 20° (кружки обозначены фактические значения параметров отвалов разреза «Красногорский»)

расчетов, по данным которых построены графики рис. 66. Эти расчеты осуществлялись методом «касательных напряжений» (кривая 2) и с учетом процента расхождения в величинах коэффициента запаса устойчивости, определенных данным методом и предложенным нами способом расчета (кривая 1). Как видно из рис. 66, фактические значения результирующих углов и высот отвалов не превышают величины, ограниченной графиком 1, что свидетельствует о надежности рекомендуемого способа расчета.

Расчетами была оценена возможность замены контура двух-, трех- и четырехъярусного отвала результирующим углом. С

этой целью были осуществлены проверочные расчеты для многоярусных отвалов по схемам, две из которых представлены на рис. 67. Результаты расчетов показали, что вполне допустимо заменять прямолинейно-ступенчатый контур многоярусного отвала эквивалентным ему прямолинейным контуром, поскольку величины коэффициентов запаса устойчивости практически одинаковы (с учетом точности расчетов).

На основании проведенных комплексных исследований рекомендованы следующие параметры устойчивых внутренних отвалов на прочном основании разрезов «Талдинский 1—2» и «Красногорский»: предельный угол наклона основания $\delta = 20^\circ$; устойчивая высота отвала $H_{об.в} = 140$ м; результирующий устойчивый угол откоса отвала $\beta_{р.в} = 37^\circ$; устойчивая высота сформированного под углом 45° нижнего яруса $H_{п} = 30$ м; устойчивая высота яруса для свежесыпанного отвала с углом естественного откоса 38° при существующих размерах драглайнов практически неограничена; ширина бермы безо-

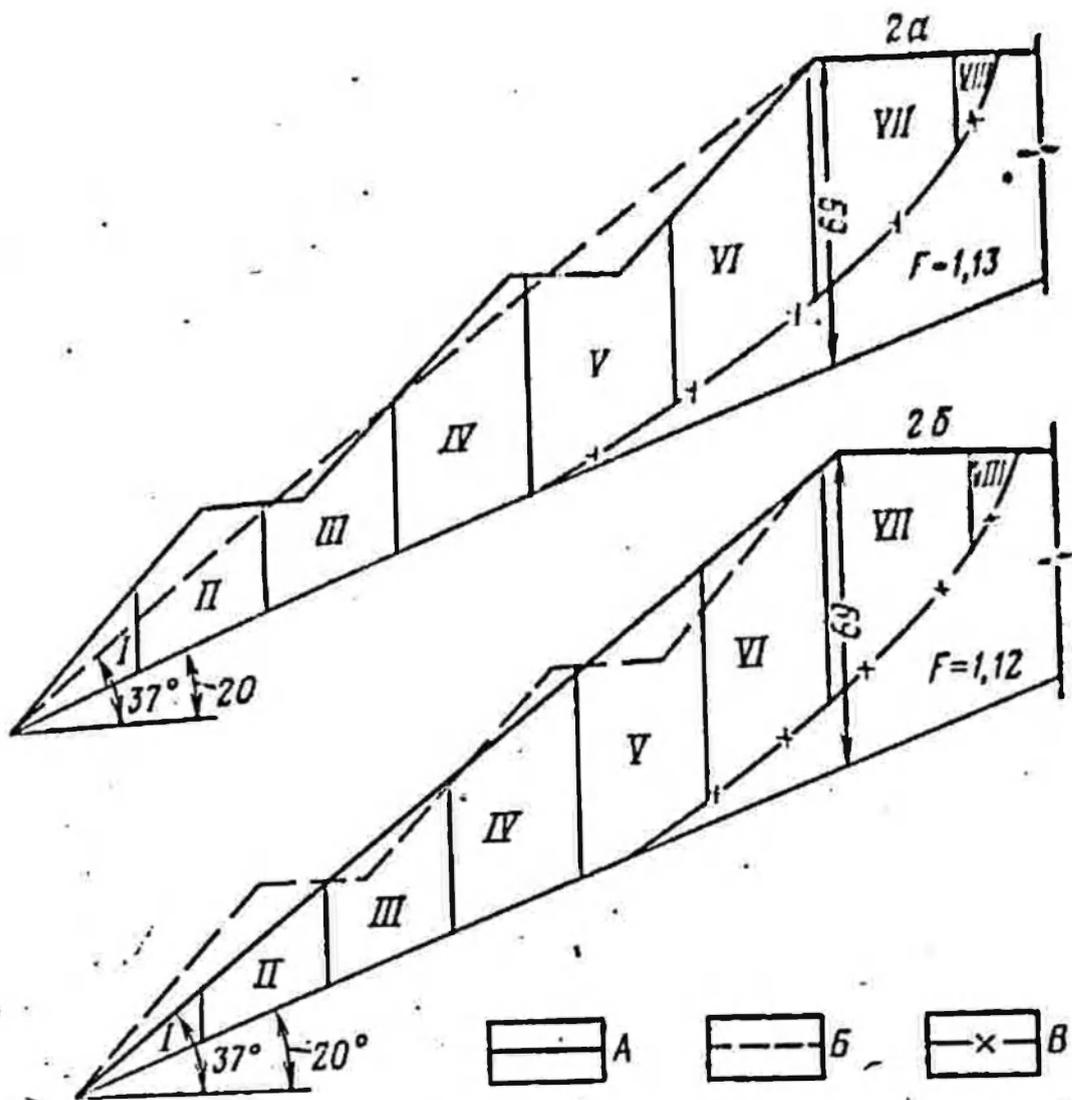


Рис. 67. Схемы отвалов к расчету их устойчивости:
 А — контур, по которому рассчитан коэффициент запаса устойчивости; Б — эквивалентный ему контур; В — поверхность разрушения (римскими цифрами обозначены номера блоков, арабскими — расчетные схемы)

пасности при отстройке контура отвала перед новой заходкой (с учетом опыта работы разреза «Красногорский») $b_6 = 5-6$ м.

При наличии слабых пород в почве пласта большой мощности предельным углом наклона основания отвалов следует принимать угол, равный 13° .

Технологические параметры внутренних отвалов не должны превышать предельных. Соотношение технологических и устойчивых параметров отвалов следует устанавливать при каждом конкретном случае построения схем экскавации.

Эффективность разработанных рекомендаций элементов систем разработки иллюстрируют нижеприводи-

мые схемы экскавации для условий Талдинского и Томусинского месторождений.

Основные параметры и показатели построенных схем экскавации приведены в табл. 27.

Во всех рассмотренных схемах ширина заходки принята равной 40 м, согласно рекомендациям Сибгипрошахта, а коэффициент разрыхления 1,35.

Для разреза «Талдинский 1—2» институтом Сибгипрошахт была предложена схема разработки вскрышных пород пласта 91 по бестранспортной системе. По этой схеме предусматривалась экскавация пород вскрыши двумя драглайнами ЭШ-40/85; основание отвалов имело угол падения 8° , углы естественных откосов равнялись 35° . Со схемой Сибгидрошахта сравнивались все построенные нами, на которых исследовалось влияние изменения угла естественного откоса от 35° до 38° , подрезки нижнего яруса отвалов под углом 45° и специальных инженерных мероприятий по подготовке почвы пласта на экономические показатели бестранспортной системы разработки.

Анализ данных (см. табл. 27, схема 1) показал, что увеличение угла естественного откоса на 3° и подрезка нижнего яруса отвала под углом 45° существенно влияют на величину коэффициента переекспкавации. Так, значение коэффициента переекспкавации снижается на 33%, а объем экскаваторных работ — в 1,6 раза. Причем в схемах не всегда полностью используются линейные параметры применяемого оборудования, в результате чего имеется дополнительный резерв возможного увеличения мощности вскрыши, обрабатываемой по бестранспорт-

Таблица 27

Номер схемы	Обраба- тываемый пласт	δ, градус	И _в , м	И _{сб} , м	β _р , градус	K _п
1	91	8	41,5	63	24	0,57
2	91	8	41,5	58	30	0,21
3	91	15	41,5	47	23	1,20
4	91	15	41,5	57	26	0,82
5	91	15	41,5	57	36	0,43
6	72—73	15	60,0	67	26	1,14
7	XXXIII	17	48,0	77	33	0,72
8	XXXIII	17	48,0	68	37	0,44

ной системе. При отстройке контура отвала с минимально допустимой шириной бермы между ярусами коэффициент переэкскавации уменьшается на 63% (схема 2).

Используя аналогичное оборудование и способ его расстановки, как и в схеме 1, была построена схема разработки пласта 91, расположенного на наклонном основании ($\delta = 15^\circ$) и имеющего угол естественного откоса, равный 35° (схема 3). Коэффициент переэкскавации составил 1,20. С этой схемой сравнивали другие, в частности схемы 4 и 5, в которых угол естественного откоса был принят равным 38° и предусматривалась подрезка яруса под углом 45° . В схеме 4 величина коэффициента переэкскавации с 1,20 снизилась до 0,82, т. е. на 32%, а в схеме 5 снижение коэффициента переэкскавации составило 64%. Схема 5 дает снижение объема работ драглайнов по экскавации и переэкскавации пород в 2,5 раза.

Таким образом, подрезка нижнего яруса отвала позволяет получить дополнительную мощность обрабатываемой вскрыши; уменьшить общую высоту отвала; приблизить трассу экскаватора к рабочему борту, что позволит расширить ее; использовать экскаватор с большим вылетом стрелы. Экскаватор может маневрировать по трассе, отсыпая породу с разных положений при одном проходе, что существенно повысит приемную емкость отвалов и, кроме того, будет отстроена поверхность, не требующая дальнейшей планировки.

Учитывая то обстоятельство, что одним из путей совершенствования отвалообразования на угольных разрезах Кузбасса является применение мощного оборудования, для Талдинского месторождения рассмотрена схема отработки пласта 72—73 (мощность вскрыши 60 м, $\delta = 15^\circ$) экскаваторами ЭШ-80/100, ЭШ-25/100 и ЭШ-15/90 (схема 6, рис. 68) и для разреза «Красногорский» — схемы отработки пласта XXXIII ($\delta = 17^\circ$, мощность вскрыши 48 м), где применяется спаренная работа драглайнов ЭШ-25/100 и ЭШ-15/90 (схема 8, рис. 69). В этих схемах предусмотрены предварительная инженерная подготовка почвы пласта и подрезка нижнего яруса отвала под углом 45° .

Следует отметить, что в случае отстройки контура отвала с минимально возможной шириной бермы между ярусами (см. рис. 69) коэффициент переэкскавации снижается почти на 40%. Правда, при этом увеличиваются

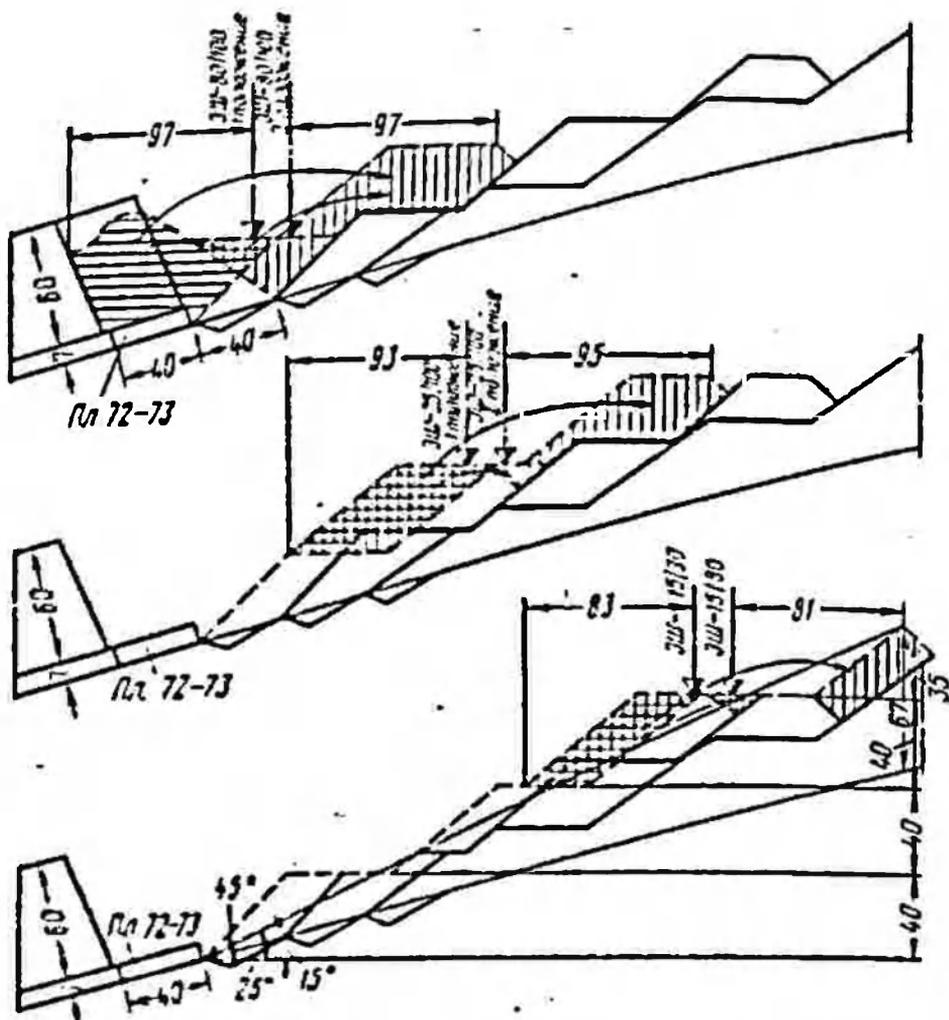


Рис. 69. Схема экскавации вскрыши по пласту 72—73 на наклонном основании $\delta = 15^\circ$

высота и результирующий угол откоса отвала, по согласию проведенным расчетам, коэффициент устойчивости находится в допустимых пределах. Например, при расчете коэффициента запаса устойчивости для схемы, представленной на рис. 69, выполненном методом «касательных напряжений», получили величину, равную 1,20, которая является согласно формуле (4.12) минимально допустимой (см. раздел 4.5). Учитывая тот факт, что метод «касательных напряжений» даст заниженные результаты, можно говорить о достаточном коэффициенте запаса устойчивости отвала, образованного по данной схеме (см. рис. 69).

Таким образом, были определены и обоснованы предельные параметры отвалов для разреза «Талдинский 1—2», которые могут быть рекомендованы и для других

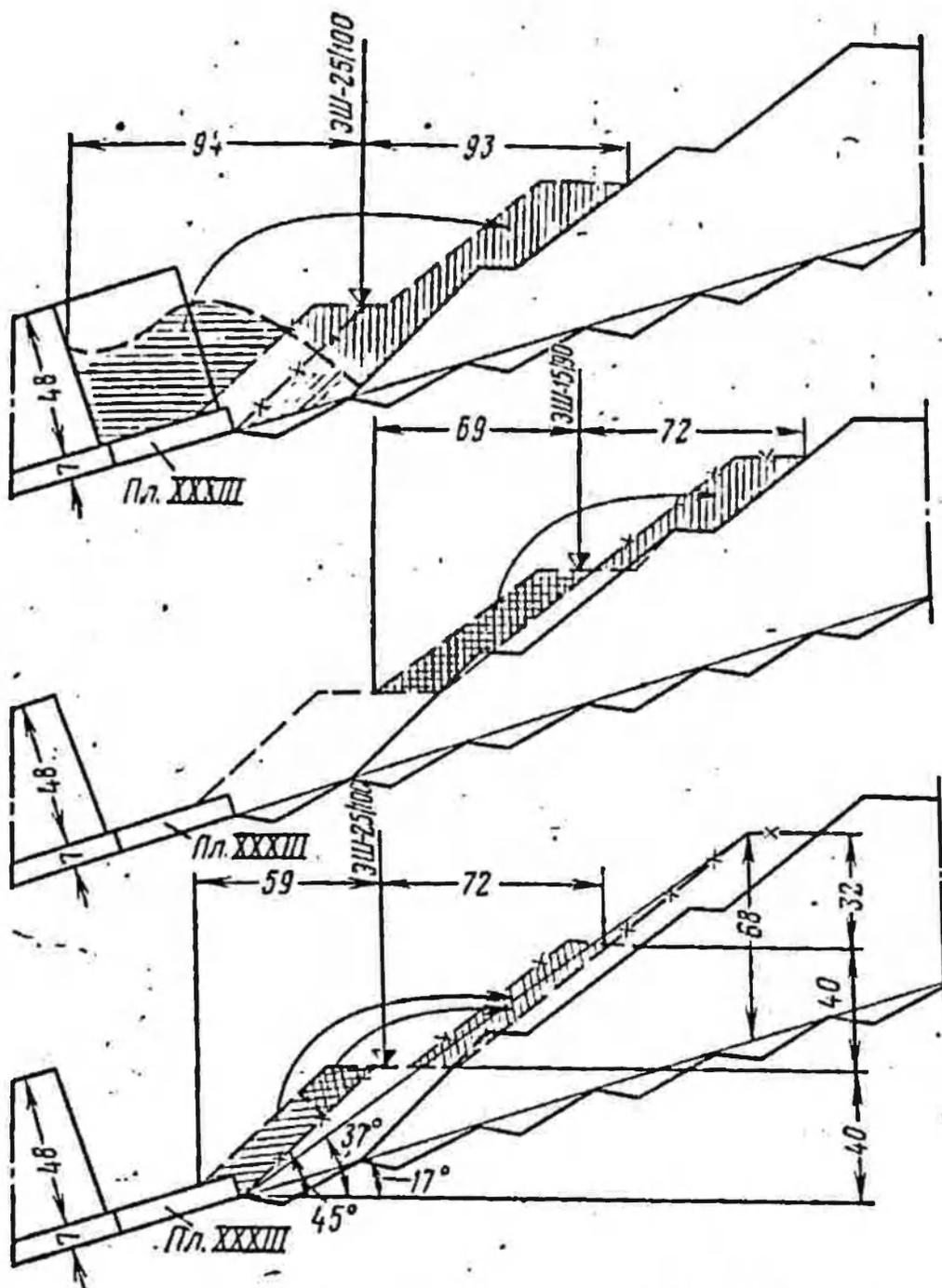


Рис. 69. Схема экскавации вскрыши по пласту XXXIII на наклонном основании с углом 17° при угле естественного откоса 38°

месторождений с аналогичными инженерно-геологическими условиями.

Эффективность рекомендуемых параметров отвалов доказана рассмотренными схемами экскавации, анализ которых показал, что в результате принятия угла естественного откоса равным 38° вместо 35° , применения подрезки нижнего яруса под углом 45° и увеличения ре-

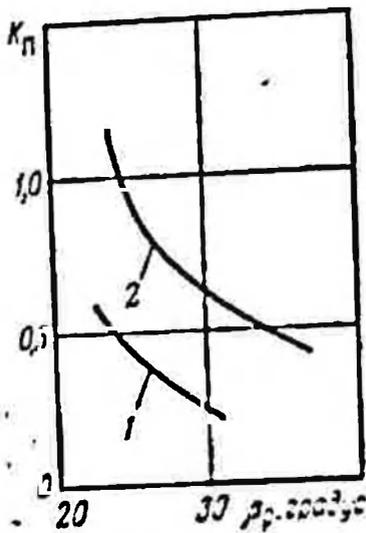


Рис. 70. Графики зависимости коэффициента переексплуатации K_p от результирующего угла откоса отвала при углах наклона основания:
1—8°; 2—15°

зультирующего угла до 37° коэффициент переексплуатации может снизиться на 30—64% при уменьшении объема работ экскаваторов в 1,6—2,5 раза.

График зависимости результирующего угла откоса отвала от коэффициента переексплуатации представлен на рис. 70.

Если рассматривать два варианта обработки пласта 91 (разрез «Талдинский») с углом падения 8 и 15° при угле естественного откоса 35° (по Сибгипрошахту) и 38°, а подрезанного — 45°, то при их сопоставлении отчетливо обнаруживается возможность увеличения емкости отвала за счет внедрения рекомендуемых мероприятий. На рис. 71 показан вариант обработки пласта при $\delta = 15^\circ$.

За счет увеличения углов откосов возрастает емкость отвала. Это позволяет обработать дополнительный объем вскрыши по бестранспортной системе и получить следующий экономический эффект:

№ схемы (см. табл. 27)	Общий экономический эффект, тыс. руб.	Относительный экономический эффект в % от себестоимости 1 т угля
2	около 300	4
4	более 500	7

Для разреза «Красногорский» экономический эффект от увеличения результирующего угла отвалов с 33 до 37° (схемы 7 и 8) составляет более 100 тыс. руб. на 1 км фронта, или 8% от себестоимости 1 т угля.

Суммарный экономический эффект от внедрения рекомендуемых мероприятий для разреза «Талдинский 1—2» составит порядка 1,5 млн. руб. в год. Частичное внедрение указанных мероприятий на разрезе «Красногорский» уже позволило сэкономить около 200 тыс. руб.

5.4. Расчет устойчивости нагруженных отвалов

Для оценки влияния нагрузок от оборудования на устойчивость отвалов разреза «Талдинский — 1—2» по

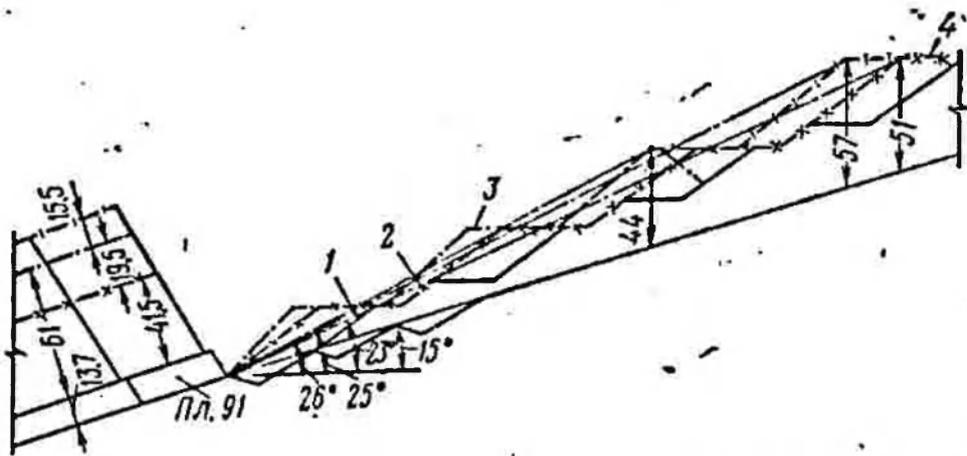


Рис. 71. Дополнительные емкости отвалов за счет подрезки нижнего яруса под углом 45° и принятия угла естественного откоса равным 38° . Положения отвалов:

1 — первоначальное; 2 — при $\beta_0 = 35^\circ$; 3 — при $\beta_0 = 33^\circ$ и $\beta_{22} = 45^\circ$; 4 — при отсыпке дополнительного яруса

методике, изложенной в разделе 4.4, были проведены расчеты. При этом рассматривали современные модели шагающих экскаваторов [60].

С учетом установленных выше предельных параметров внутренних отвалов строились расчетные схемы нагруженных отвалов для каждой модели шагающих экскаваторов. Ширина рабочей площадки нагруженных ярусов вычислялась по формуле (4.7).

С использованием графика для определения бермы безопасности и коэффициента запаса устойчивости откоса нагруженного уступа [22], полученного по результатам опытов на моделях из эквивалентных материалов, соответствующих следующим значениям свойств пород: $c = 1,0$ тс/м²; $\varphi = 30^\circ$; $\gamma = 1,9$ т/м³, при заданных: ускорении колебаний 300 см/с², угле откоса 45° и коэффициенте запаса устойчивости 1,2 установлена ширина бермы безопасности (b_6), которая должна быть не менее 3 м*. Поскольку при работе нижним черпаньем экскаватору необходимо находиться вне контура возможного нарушения устойчивости уступа, для работы драглайна в забое произведен расчет минимально возможного расстояния от нагрузки до верхней бровки уступа ($b_{\text{н min}}$) по формуле [22]

$$b_{\text{н min}} = R_{\text{ч.у}} - \frac{d}{2} > b_6, \quad (5.3)$$

* Для шагающих драглайнов рассмотренных моделей.

где $R_{\text{чy}}$ — наименьший радиус черпания на горизонте установки, м.

Величина $b_{\text{н min}}$ составляет 6—8 м, т. е. $b_{\text{н min}} > b_{\text{в}}$, следовательно, условие безопасности соблюдается.

Поскольку прочность пород отвалов Кузбасса выше, чем исследованных в работе [22] песчано-глинистых, можно рекомендовать для внутренних бестранспортных отвалов разрезов Южного Кузбасса, отсыпаемых из скальных и полускальных пород с углом откоса 38° и подрезанных под углом 45° драглайнами ЭШ-5/45 М, ЭШ-10/70А, ЭШ-15/90А, ЭШ-25/100А, ЭШ-40/85 и ЭШ-80/100, ширину бермы безопасности равной 3 м. С учетом этой величины были получены следующие значения рабочих площадок на нагруженных отвалах: ЭШ-5/45М — 18 м; ЭШ-10/70А — 25 м; ЭШ-15/90А — 33 м; ЭШ-40/85 — 39 и 42 м; ЭШ-25/100А — 41 м и ЭШ-80/100 — 49 м. Ширина рабочей части опорного круга устанавливалась по графику (см. рис. 42).

Таким образом, расчетная схема нагруженного отвала строилась следующим путем (см. рис. 41). Угол наклона основания принимался равным 20° . Нижний ярус отвала отстраивался под углом 45° . Высота его не превышала 30 м, что соответствовало максимальной глубине черпания экскаватора или высоте откоса, равной 45 м. Следовательно, высоты откосов нижних ярусов были равны максимальным глубинам черпания рассматриваемых моделей экскаваторов. Внешняя нагрузка (модель экскаватора) располагалась на рабочей площадке соответствующей ширины с учетом бермы безопасности, ширины лыж и диаметра опорного круга.

Следующий ярус отстраивался под углом 38° и высотой, равной высоте разгрузки данного экскаватора, т. е. в этом случае высота яруса и высота откоса были равны между собой и соответствовали максимальной высоте разгрузки драглайна. Оборудование на горизонтальной площадке яруса отвала располагалось так же, как и в предыдущем случае.

Всего построено семь схем нагруженных отвалов с двумя ярусами для каждой модели шагающего драглайна, причем рассмотрены два варианта модели ЭШ-40/85 с разными диаметрами опорного круга — 18 и 22 м (модель ЭШ-40/85 с диаметром опорного круга 22 м, предназначена для работы на отвалах).

Одна из построенных схем представлена на рис. 72,

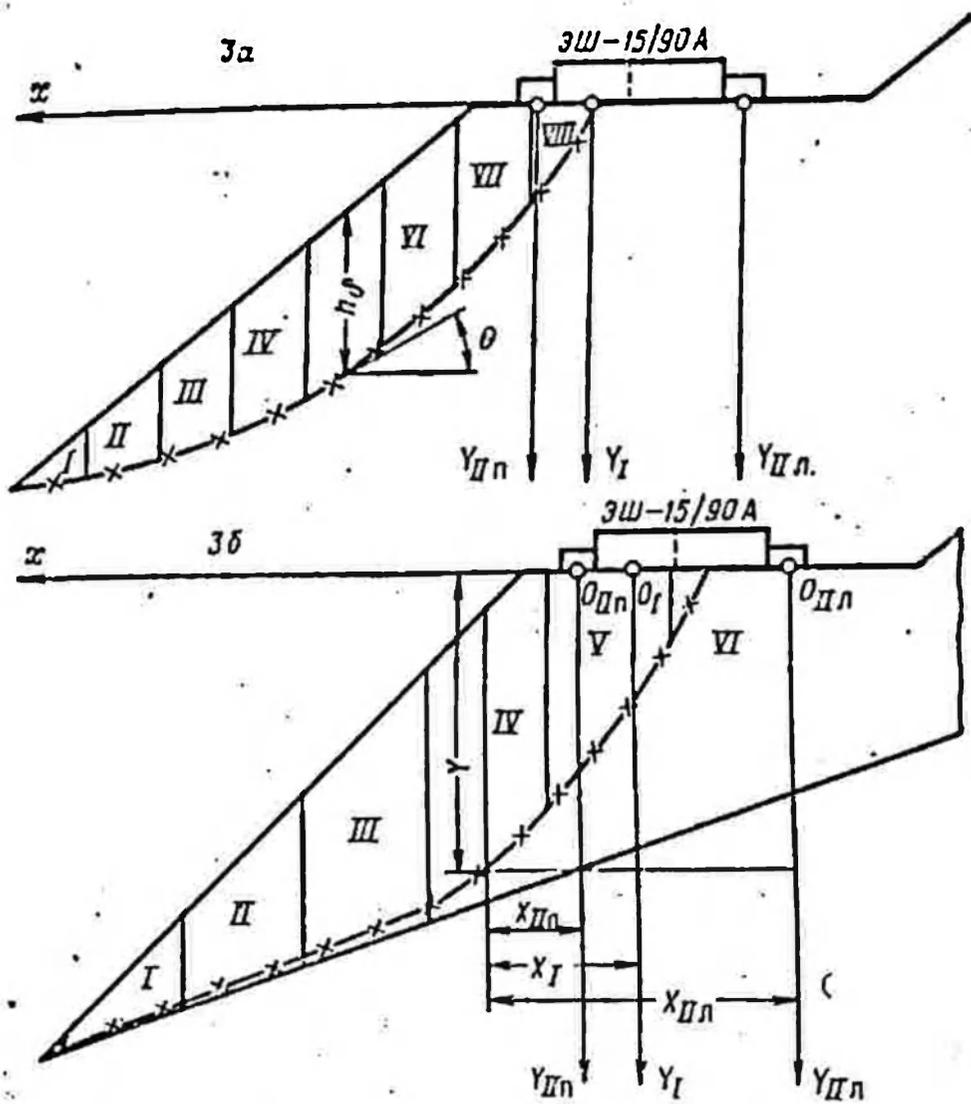


Рис. 72. Расчетные схемы нагруженных отвалов (римскими цифрами обозначены номера блоков)

а основные параметры всех рассмотренных схем приведены в табл. 28.

Влияние внешней нагрузки на устойчивость отвалов определялось при работе драглайнов и при их шагании. Статическое положение не рассматривалось, поскольку проведенные предварительно расчеты показали незначительное изменение величины коэффициента запаса устойчивости от статической нагрузки, которое можно не учитывать.

Предварительно была рассчитана устойчивость ненагруженных отвалов для рассматриваемых схем по графикам относительных напряжений (см. рис. 35) с использованием паспорта прочности пород (см. рис. 36). Затем были определены компоненты напряжений от

Таблица 28

Номер схемы	Экскаватор	Нижний ярус, $\delta=20^\circ$; $\beta=45^\circ$		Верхний ярус, $\delta=0^\circ$; $\beta=38^\circ$
		$H_{я}$, м	$H_{отк}$, м	$H_{я}=H_{отк}$, м
1а 1б	ЭШ-5/45М	12,6	20	18
2а 2б	ЭШ-10/70А	21,6	35	20
5а 5б	ЭШ-40/85	25,6	40	30
6а 6б	ЭШ-40/85 (отвалытый вариант)	25,6	40	30
3а 3б	ЭШ-15/90А	25,6	40	35
4а 4б	ЭШ-25/100А	28,8	45	40
7а 7б	ЭШ-80/100	28,8	45	40

Таблица 29

Номер схемы	F_1	F_2	F_3	$\frac{F_2 - F_1}{F_1}$	$\frac{F_3 - F_1}{F_1}$	$\frac{F_3 - F_2}{F_1}$
$\delta = 20^\circ; \beta = 45^\circ$						
1б	1,31	1,23	1,19	8,2	11,2	3,3
2б	1,25	1,22	1,19	2,4	4,8	2,5
5б	1,30	1,20	1,14	7,7	12,3	5,0
6б	1,30	1,17	1,05	10,0	19,2	10,3
3б	1,32	1,30	1,14	1,5	13,6	12,3
4б	1,31	1,26	1,24	3,8	5,3	1,6
7б	1,29	1,07	1,19	17,0	7,8	
$\delta = 0^\circ; \beta = 38^\circ$						
1а	2,45	2,24	2,11	8,6	13,9	5,8
2а	2,31	2,11	2,10	8,7	9,1	0,5
5а	2,37	2,10	1,71	11,4	27,8	
6а	2,32	2,18	1,93	6,0	16,8	11,5
3а	2,23	2,13	2,10	4,5	5,8	1,4
4а	2,37	2,01	1,97	15,2	16,9	2,0
7а	2,20	1,99	2,14	9,6	2,7	

внешней нагрузки, действующих по вероятной поверхности разрушения, для двух вариантов: I — рабочее положение и II — шагание.

Результаты расчетов по всем рассмотренным схемам сведены в табл. 29, где F_1 — величина коэффициента запаса устойчивости ненагруженного яруса отвала; F_2 и F_3 — то же, нагруженного яруса соответственно при работе и при шагании драглайна.

Как видно из табл. 29, коэффициенты запаса устойчивости нагруженных ярусов несколько ниже, чем коэффициенты запаса устойчивости ненагруженных ярусов отвалов, причем процент снижения F при движении (шагании) драглайнов больше, чем при работе, за исключением ЭШ-80/100, у которого за счет шагающерельсового механизма уменьшается влияние нагрузок при шагании по сравнению с воздействием нагрузок при его работе. Коэффициент запаса устойчивости в нижних ярусах отвалов, нагруженных экскаваторами, снижается на 2—19, а верхних на 3—28%.

Для сравнения предложенного способа с существующими выполнены специальные расчеты. В табл. 30 приведены значения коэффициентов запаса устойчивости ярусов отвалов, определенные различными способами.

Таким образом, расчеты по рекомендуемому способу дают меньшее относительное влияние внешних нагрузок

Таблица 30

Способ расчета	F_1	F_2	$\frac{F_2 - F_1}{F_1} \cdot 100\%$	F_1	F_2	$\frac{F_1 - F_2}{F_1} \cdot 100\%$
	Схема 2а			Схема 2б		
По напряжениям (рекомендуемый)	2,31	2,11	8,7	$\frac{1,25}{2,89}$	$\frac{1,22}{2,12}$	$\frac{2,4}{2,7}$
По силам [1]	1,18	1,06	10,2	$\frac{1,03}{1,48}$	$\frac{0,97}{1,02}$	$\frac{5,8}{31}$

Примечание. Значения F для схемы 2а и в числителе для схемы 2б рассчитаны по поверхности разрушения, построенной по методике, предложенной в работе [20], а в знаменателе для схемы 2б — по поверхности разрушения, построенной по методу, описанному в работе [92].

и существенно больше значения общих коэффициентов запаса устойчивости.

В процессе работы экскаваторов на уступах ярусов отвалов создаются колебания в породах, которые снижают сопротивление их сдвигу. Снижение прочности пород под воздействием вибрации зависит главным образом от ускорения колебаний. Как установлено [22], между сопротивлением сдвигу при вибрации и ускорением колебаний существует следующая зависимость:

$$S' = S_c e^{-\lambda_b a}, \quad (5.4)$$

где S' — сопротивление пород сдвигу при вибрации, кгс/см²; S_c — то же, в статических условиях, кгс/см²; e — основание натурального логарифма; λ_b — коэффициент, характеризующий способность пород сопротивляться вибрационным воздействиям, с²/см; a — ускорение колебаний, см/с².

Результирующее ускорение колебаний пород в любой точке массива (a_{xy}') с координатами y и x' может быть определено по формуле

$$a_{xy}' = a_{\max} \frac{e^{-(\eta_n x' + \eta_r y)}}{x'^{n_p}}, \quad (5.5)$$

где a_{\max} — максимальное ускорение колебаний пород в непосредственной близости от источника колебаний, см/с²; η_n — коэффициент поглощения колебаний по поверхности, м⁻¹; η_r — коэффициент поглощения колебаний на глубине, м⁻¹; n_p — показатель расхождения фронта волны.

Было оценено влияние вибрационных нагрузок на сопротивление пород сдвигу. Расчет, проведенный для схемы с драглайном ЭШ-80/100, показал, что для рассмотренных условий вибрационные нагрузки на устойчивость нагруженных ярусов отвалов практически не влияют.

5.5. Определение ширины охранных зон и берм безопасности

Используя установленное выше понятие приоткосной зоны, можно определить ширину охранной зоны $b_{\text{охр}}$, за пределами которой массив пород не подвергается влиянию откоса. По графикам (см. рис. 21) можно устано-

вить ширину охранной зоны при расположении сооружений поверхностного комплекса вблизи бортов карьеров, при отсыпке внутренних транспортных отвалов на бестранспортные и для решения аналогичных задач, связанных с обеспечением долгосрочной устойчивости открытых горных выработок и отвалов.

Как видно из графика (см. рис. 21, прямая), в исследованном диапазоне значений углов откосов зона влияния откоса на верхней площадке уменьшается примерно пропорционально выполаживанию угла откоса.

На графике рис. 73, построенном для модели с углом откоса 37° , можно выделить три области. Первая, характеризующаяся слабой зависимостью зоны влияния откоса от угла наклона подошвы δ , имеет место при значениях δ от 0 до 12° . Величина b_B изменяется от 0,4 до 0,6 H . Для второй области при $\delta = 12-25^\circ$ характерно резкое увеличение величины b_B , возрастающей от 0,6 до 1,4 H . Наконец, в третьей зоне при $\delta > 25^\circ$ величина b_B начинает уменьшаться, пока при угле $\delta = 37^\circ$, равном углу откоса модели, не обратится в нуль.

При расчетах по упомянутым графикам надо принимать значения устойчивых углов откосов или конструктивно-технологических углов, меньших устойчивых.

Приняв практически встречающиеся значения углов откосов выработок и отвалов, можно выделить следующие характерные диапазоны значений ширины охранных зон на верхней площадке для однородных пород:

Тип выработки (отвала)	Характерные значения углов откосов, градус	Ширина охранной зоны (в долях H)
Уступ	45—85	0,6—1,3
Ярус отвала	35—45	0,5—0,6
Борт или многоярусный отвал	12—45	0,1—0,5

Способ определения ширины охранной зоны можно рассмотреть на следующем примере. Для условий проек-

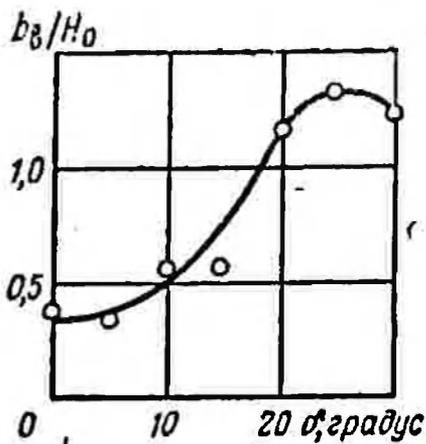


Рис. 73. Зависимость размеров приоткосной зоны на верхней площадке от угла падения пластов

тируемого Талдинского разреза (Южный Кузбасс) была установлена на основе проведенных нами исследований предельная по условию устойчивости высота внутренних отвалов 140 м с углом откоса 37° и при угле падения почвы пласта до 20° . Эти параметры устойчивости справедливы при прочном основании отвалов, представленном песчаниками и алевролитами. При глинистых породах почвы создаются другие условия устойчивости.

Согласно расчетам института Сибгипрошахт, максимальная высота внутренних отвалов, которая может быть экономически целесообразной при существующих и перспективных моделях шагающих драглайнов, не должна превышать 70 м. Для полного использования выработанного пространства в этом случае выгодно на внутренний бестранспортный отвал отсыпать транспортный той же высоты, т. е. 70 м. Для этого необходимо определить ширину охранной зоны между бестранспортными и транспортными отвалами. По графику (см. рис. 73) для $\delta = 20^\circ$ $b_n/H_0 = 1,2$, тогда

$$b_n = b_{\text{охр}} = 1,2 \cdot 70 = 84 \text{ м.}$$

Схема внутренних отвалов представлена на рис. 74.

Ожидаемая экономическая эффективность определяется на основе возможности транспортирования части вскрыши во внутренние отвалы на короткое расстояние. Эта эффективность может быть рассчитана по формуле

$$Э = (C_n - C_k) V, \quad (5.6)$$

где C_n — затраты на транспортирование во внешние отвалы, руб.; C_k — затраты на транспортирование во внутренние отвалы, руб.; V — объем вскрышных работ, м^3 .

Расчет экономической эффективности проведен для двух вариантов: автомобильного и ж.-д. транспорта. Стоимостные показатели приняты по данным расчетов, выполненных в ИГД им. А. А. Скочинского.

Расчеты по формуле (5.6) показали, что ожидаемая экономия в результате применения внутреннего отвалообразования составит: при ж.-д. транспорте 150 тыс. руб., при автомобильном транспорте 800 тыс. руб. на 1 млн. м^3 породы, укладываемой в отвал.

Аналогично ширине охранной зоны, но для условий краткосрочной устойчивости, можно определить ширину бермы безопасности из условия $b_0 \geq b$, где b — ширина захвата при возможной деформации (оползании) уступа

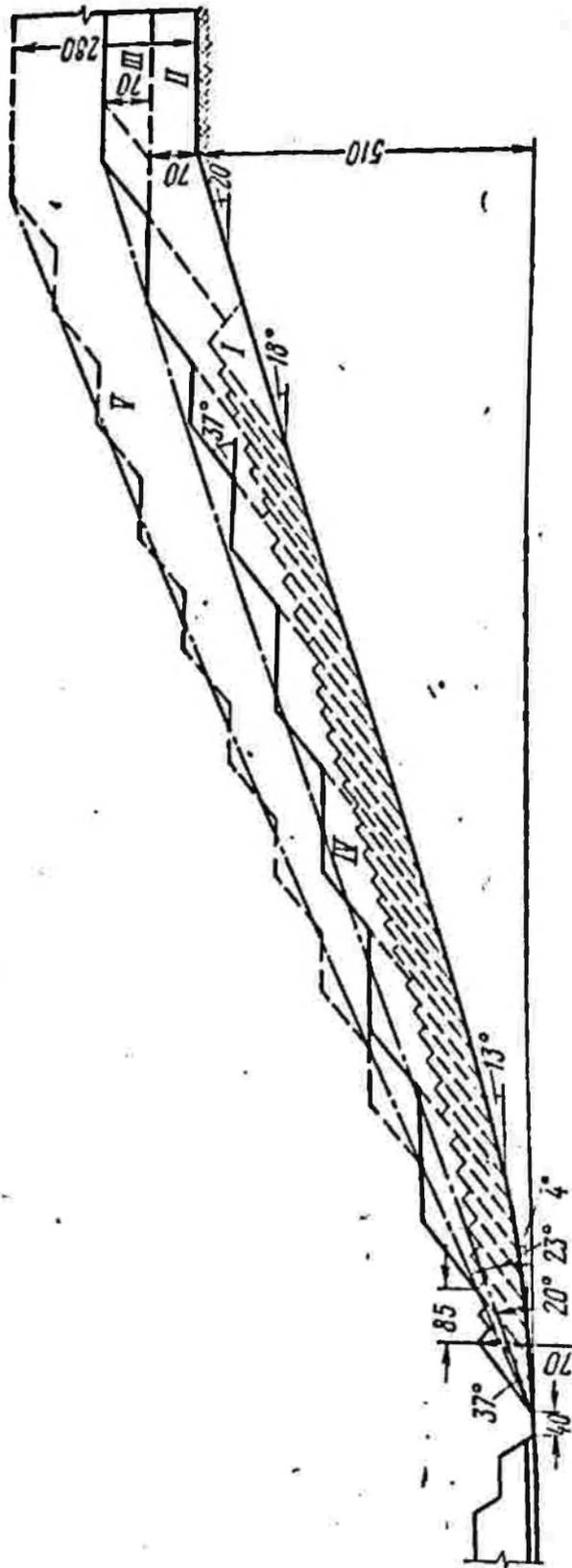


Рис. 74. Схема внутреннего отвала с предельными параметрами
(римскими цифрами обозначены этапы формирования отвала)

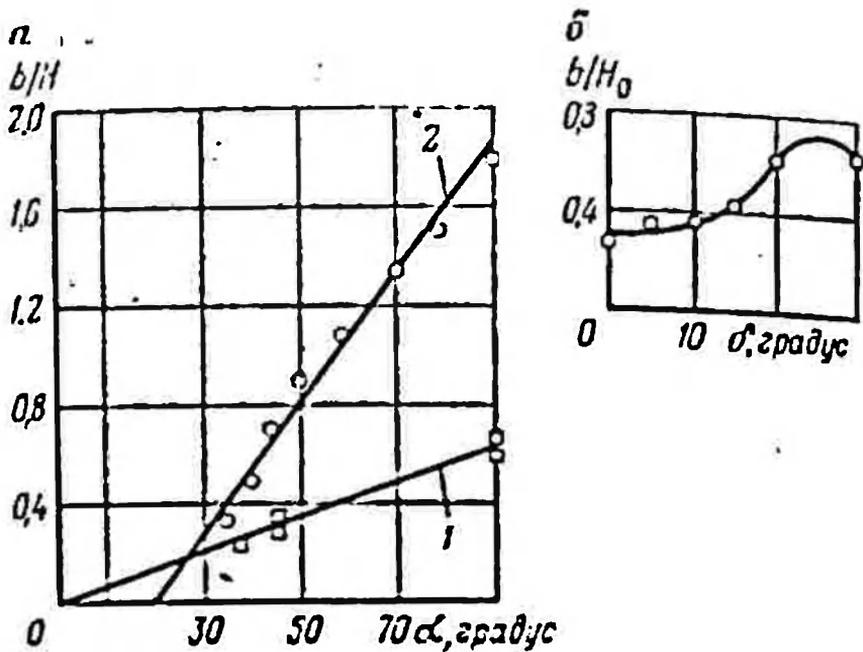


Рис. 75. Зависимости: а — b/H_0 от α ; б — b/H_0 от δ :
 1 — для однородного массива; 2 — для неоднородного с падением трещины
 в сторону карьера под углом 25° [1]

или отвала, т. е. ширина части верхней площадки от верхней бровки до поверхности отрыва, захваченной деформацией. Для уступов, сложенных однородными породами, величину b рекомендуется определять по графику рис. 75, а (кривая 1), полученному на основе данных моделирования на оптически активных материалах способом тензометрических сеток. Величина b устанавливалась по первым, считая от контура откоса, экстремальным значениям составляющих нормальных и касательных напряжений в зоне влияния откоса.

При принятом угле откоса уступа определяем по упомянутому графику относительную ширину захвата b/H , а затем и величину бермы безопасности в зависимости от высоты уступа.

В отличие от предыдущей задачи, где угол откоса принимался устойчивым или меньше устойчивого, в данном случае расчет имеет смысл только при углах откоса, больших устойчивого, характерных для рабочих уступов, а для отвалов — при углах естественного откоса.

При неоднородном строении приоткосного массива ширина захвата существенно увеличивается. На том же графике нанесена прямая, показывающая зависимость $b/H = f(\alpha)$, построенная по обработанным данным рабо-

ты [4] (см. рис. 75, а, кривая 2). На моделях имитировался трещиноватый массив с падением трещин под углом 25° в сторону выработки.

На величину b_0 существенно влияет угол наклона основания отвала δ . Зависимость относительной ширины захвата b/H_0 от δ для отвалов с углом естественного откоса 37° , располагающихся на прочном основании, показано на графике рис. 75, б. Здесь величина H_0 характеризует максимальное вертикальное сечение отвала, т. е. расстояние по вертикали между верхней бровкой яруса и его подошвой. Порядок расчета аналогичен вышензложенному.

Рекомендуемый способ целесообразно использовать при инженерных расчетах, проектировании и научных исследованиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моделирование плоско-деформированного состояния откосов способом тензометрических сеток позволило впервые получить все компоненты напряжений в приоткосной зоне. Это открыло путь к разработке способов расчета откосов по напряжениям; такой подход учитывает более широкий круг факторов, чем расчеты по нагрузкам.

Изложенная в книге методика расчета по напряжениям дает близкие к фактическим данным результаты, позволяет обосновать эффективные мероприятия, повышающие устойчивость отвалов, а также объяснить влияние некоторых факторов, например подрезки отвалов, на их устойчивость.

Разработанная методика была применена при решении ряда конкретных горнотехнических задач: расширение области применения внутреннего отвалообразования на пласты с углами падения до 18—20°, определение ширины охранных зон и берм безопасности и других, что дало существенный экономический эффект, а ожидаемый — еще более значителен.

Задачами дальнейших исследований являются: распространение предложенной методики на более широкий диапазон условий, например, слабые (глинистые) породы подошвы отвалов; совершенствование методики моделирования путем использования ЭВМ для обработки экспериментальных данных; разработка новых менее трудоемких методов моделирования напряженного или деформированного состояния; разработка новых приборов и методики испытаний на сдвиг крупнообломочных пород с учетом фактора времени.

Решение этих задач позволит расширить область применения наиболее эффективной бестранспортной системы разработки, а также улучшить экономические показатели других систем разработки за счет изменения принятых ранее ограничений параметров систем и горного оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алаторцев Е. К.* К расчету устойчивости откосов. «Гидротехническое строительство», 1953, № 8, с. 25—26.
2. *Александров Б. К.* Исследование устойчивости откосов нагруженных уступов в карьерах на примере железорудных месторождений Курской магнитной аномалии. Дисс. на соиск. уч. степени канд. техн. наук. М., фонды ИГД им. А. А. Скочинского, 1965, 143 с.
3. *Аленькин Я. Д.* Изучение обрушения борта карьера Милякского рудника оптическим методом. «Горный журнал», 1968, № 11, с. 62-61.
4. *Бадурин А. П.* Моделирование прочности и устойчивости скальных пород в бортах карьеров при подсечении их трещинами с заполнителем. — «Труды Института горного дела, Министерство черной металлургии СССР», 1972, вып. 37, с. 102—101.
5. *Барон Л. П.* Характеристики трения горных пород. М., «Наука», 1967. 203 с.
6. *Безухов П. П.* Основы теории упругости, пластичности ползучести. (Учебник для вузов.) Изд. 2, перераб. и доп. М., «Высшая школа», 1968. 512 с.
7. *Беликов Б. П.* Модули упругости различных типов пород СССР. — «Труды Ин-та геологических наук АН СССР», 1952, вып. 146, с. 3—38.
8. *Будков В. П.* Исследование закономерностей распределения напряжений в бортах карьеров. Дисс. на соиск. уч. степени канд. техн. наук. М., фонды МГИ, 1970. 153 с.
9. *Вагоровский В. С.* Совершенствование бестранспортной системы разработки на Красногорском разрезе. — «Уголь», 1971, № 12, с. 40—44.
10. *Витенберг М. В.* Исследование напряжений, деформаций и устойчивости плотин из местных материалов. Дисс. на соиск. уч. степени канд. техн. наук. М., фонды ВОДГЕО, 1972. 224 с.

11. Влияние массовых взрывов на устойчивость внутренних отвалов. Информационная карта, серия 11. Карта № 119 (1970). М., Изд-во ЦНИИЭУголь, 1970.

12. Вольхин Б. А., Зобнин В. И. Приближенное определение модуля упругости горных пород. — «Труды ин-та УНИИПромедь», 1963, вып. VII, с. 140—144.

13. Галёркин Б. Г. Собрание сочинений. Т. I. М., Изд-во АН СССР, 1952. 392 с.

14. Гесертма Дж. Исследование поведения обрушающихся градулированных материалов методом фотоупругости. — В сб.: «Механика горных пород». М., «Недра», 1966, с. 450—451.

15. Головин Г. Я. Лабораторные работы по теоретической механике. М., «Высшая школа», 1967. 75 с.

16. Гольд Г. С. Исследование горных и геотехнологических вопросов разработки Предкарпатских серных месторождений. Дисс. на соиск. уч. степени канд. техн. наук. М., фонды ИГД им. А. А. Скочинского, 1964. 239 с.

17. Голушкевич С. С. Статика предельных состояний грунтовых масс. М., Гостехиздат, 1957. 288 с.

18. Горбачев Д. Т., Селезнев В. В. Основные технические решения по освоению Ерунаковского угольного района Кузнецкого бассейна. — «Уголь», 1970, № 9, с. 33—36.

19. Грибков В. П. Исследование влияния горнотехнических и инженерно-геологических условий месторождений на эффективность бестранспортных систем открытой разработки (на примере разработки Бабаевского бурогоугольного месторождения). Дисс. на соиск. уч. степени канд. техн. наук. М., фонды МИРГЭМ, 1964. 159 с.

20. Демин А. М. Устойчивость откосов на открытых разработках в связи с технологией работ. Дисс. на соиск. уч. степени докт. техн. наук. М., фонды ИГД им. А. А. Скочинского, 1974. 246 с.

21. Демин А. М. Систематизация данных о фактических углах откосов бортов карьеров, уступов и отвалов. — В сб.: «Научные сообщения ИГД им. А. А. Скочинского, вып. 57». 1968, с. 49—57.

22. Демин А. М. Устойчивость открытых горных выработок и отвалов. М., «Недра», 1973. 232 с.

23. Демин А. М., Шарий А. А. Моделирование напряженного состояния откосов уступов методом тензосетки. — «Добыча угля открытым способом», 1969, № 2, с. 29—32.

24. Демин А. М., Шушкина О. И. Борьба с оползнями на карьерах за рубежом. М., изд. ЦНИИЭУголь, 1971. 80 с.

25. Динник А. Н. Распределение напряжений вокруг подземных горных выработок. — В сб.: «Труды совещания по управлению горным давлением». М.-Л., изд-во АН СССР, 1938, с. 7—75.

26. Дудушкина К. И., Морозов В. Д. О зональном механизме разрушения прикарьерной части горного массива. — «Научные труды МГМИ», Магнитогорск, 1955, вып. 36, с. 53—60.

27. Дудушкина К. И., Смирнов В. В., Морозов В. Д. Влияние открытых горных выработок на состояние и свойства пород массива. В сб.: «Формирование и изменение физико-механических свойств горных пород под влиянием естественных и искусственных факторов (геологических процессов, инженерных сооружений и горных работ)». Л., изд. Ленинградского областного научно-технического горного общества, 1956, с. 193—201.

28. Загоруйко Л. П. Повышение устойчивости отвалов с помощью технологии открытых горных работ. Киев, изд. УкрНИИТН, 1969. 68 с.

29. Запольский В. П., Мадим Л. Р. Определение методами моделирования устойчивых профилей бортов и отвалов для карьеров Никополь-марганцевого бассейна. Бюл. научно-техн. информ. НИГРИ 1957, № 3, с. 17—21.

30. Зелинский И. П., Каменнова Ю. А., Максимов С. Н. Моделирование напряженного состояния и устойчивости пород оползневого склона. Вопросы инженерной геологии. Доклады советских ученых к Международному конгрессу Международной Ассоциации инженер-геологов. М., 1970, с. 322—331.

31. Зимина Е. А., Сенчук Д. П. Зависимость оптико-механических свойств материалов на основе эпоксидной смолы ЭД-6 от состава и технологии изготовления. «Записки ЛГН, т. XLIV, вып. I. Разработка рудных месторождений». Л., 1961, с. 59—63.

32. Золотарев Г. С., Максимов С. И., Каменнова Ю. А. Напряженное состояние массивов пород высоких склонов как один из критериев оценки их устойчивости. — «Гидротехническое строительство», 1969, № 9, с. 23—27.

33. Изучение напряженного состояния массивов пород в инженерно-геологических целях. М., изд. МГУ, 1968. 136 с.

34. Калинин М. М., Подъemiцков Ю. К. Оптически активный материал тугоплавкий и технология его приготовления. — «Изв. вузов, Горный журнал», 1961, № 8, с. 21—23.

35. Каменнова Ю. А., Максимов С. И., Попов И. В. Опыт моделирования напряженного состояния массива пород в инженерно-геологических целях. — В сб.: «Вопросы инженерной геологии и грунтоведения. М., изд. МГУ, 1963, с. 152—159.

36. *Камишилов В. В.* Зависимость высоты внутренних отвалов от угла наклона их основания.— Изв. вузов, «Горный журнал», 1958, № 6, с. 14—19.

37. *Козлов Ю. С., Земисев В. И.* Определение положения поверхности, скольжения и ширины призмы возможного обрушения в однородном откосе. — «Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых», 1970, № 6, с. 97—100.

38. *Койфман М. И.* Простой метод определения прочности горных пород в кернах разведочного бурения. — В сб.: «Научные сообщения ИГД им. А. А. Скочинского», 1967, вып. XXXVII, с. 37—45.

39. *Корсеньков Ю. В., Русский И. И.* Эффективный способ доработки Вессловского бурогоугольного месторождения с применением драглайнов ЭШ-10/75. — «Добыча угля открытым способом», 1968, № 5, с. 3—5.

40. *Красавин А. П., Федлев Л. К., Иванов В. Д.* Состояние и перспективы развития бестранспортной системы разработки на угольных разрезах СССР. — В сб.: «Технология открытых горных работ с применением техники циклического действия». Киев, изд. УкрНИИпроект, 1974, с. 3—5.

41. *Крючков В. В.* Некоторые вопросы развития бестранспортной системы разработки в Кузнецком бассейне. В кн.: Ин-т горного дела им. А. А. Скочинского. Научные сообщения. Информац. вып. № 74. М., 1970, с. 9—13.

42. *Крячко О. Ю.* Формирование отвальных откосов на Черемховских разрезах. — В кн.: «Добыча угля открытым способом». 1971, № 11 (71), с. 23.

43. *Лебедев В. К.* Отвалообразование в условиях гористой местности Заполярья. — В сб.: «Пути повышения эффективности открытых горных работ». Л., «Наука», 1970, с. 123—127.

44. *Лушнов Н. П.* Опытная каменная наброска на строительстве Чарвакской ГЭС. Тезисы докладов координационного совещания по вопросам научных исследований, проектирования и строительства плотин из местных материалов. Октябрь—ноябрь 1967. Л., «Энергия», 1967, с. 139—142.

45. *Максимов С. Н., Шарий А. А.* К вопросу выбора масштаба моделирования при изучении напряженного состояния склонов. — В сб.: «Вопросы формирования и устойчивости высоких склонов». М., изд. МГУ, 1970, с. 105—111.

46. *Малкис Н. И., Трумбачев В. Ф.* Низкомодульные, оптически чувствительные материалы для исследования напряженного состоя-

пия горных пород методом фотоупругости. М., «Недра», 1968, с. 3—18.

47. *Малюшицкий Ю. Н.* Условия устойчивости бортов карьеров. Киев, изд-во АН Укр. ССР, 1957. 270 с.

48. *Мамьков В. Н., Костельцев Б. Г.* Исследование физико-механических свойств горных пород Кузбасса акустическим методом. Тезисы докладов к III региональному совещанию по инженерной геологии. Л., 1966, с. 486—493.

49. *Маркович Л. П.* Исследование прочности и устойчивости отвалов с учетом горнотехнических факторов на Предкарпатских серпих карьерах. Дисс. на соиск. уч. степени канд. техн. наук. М., фонды МГИ, 1968. 213 с.

50. *Махорин А. А., Фаминцев Б. М.* Стереотензометрический способ изучения деформаций и напряжений на плоских моделях из низкомодульных оптически активных материалов. — В сб.: «Вопросы формирования и устойчивости высоких склонов». М., изд. МГУ, 1970, с. 150—159.

51. *Мельников И. В.* Создание новой техники открытой угольной добычи с учетом перспектив развития топливной промышленности СССР. Доклад на Всесоюзном совещании по совершенствованию технологии и средств комплексной механизации производственных процессов на угольных карьерах, состоявшемся в г. Междуреченске Кемеровской обл. 24—26 июня 1969 г. М., изд. ИГД им. А. А. Скочинского, 1969. 23 с.

52. *Методические указания по изготовлению моделей из оптически чувствительных материалов для исследования проявлений горного давления.* Л., изд. ВНИИИ, 1970. 60 с.

53. *Морозов В. Д.* Определение области максимальных напряжений в однородном массиве поляризационно-оптическим методом. — В сб.: «Добыча угля открытым способом». М., 1966, № 7, с. 56—58.

54. *Морозов В. Д., Байков Б. И., Ковтун А. А.* Изучение напряженного состояния пород бортов карьеров поляризационно-оптическим методом. Ташкент, «Фан», 1970. 126 с.

55. *Морозов В. Д., Камюв З. Г., Поклонский А. П.* Напряженно-деформированное состояние породного массива и метод увеличения устойчивости откосов. — «Горный журнал», 1974, № 7, с. 54—57.

56. *Мочалов А. М.* Определение ширины призмы обрушения плоского откоса. — «Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых». 1968, № 4, с. 112—115.

57. *Мукушев М. М.* Исследование и разработка технологических схем выемки пологих пластов столбами по наделению (на примере

Карагандинского бассейна). Дисс. на соиск. уч. степени докт. техн. наук. Караганда, фонды ИГД им. А. А. Скочинского, 1972. 383 с.

58. *Мурояма*. Об измерении напряжений в земляной массе поляризационно-оптическим методом. — «Добуку гаккай ромбунсю», 1959, № 62. Перевод № 24, 1961 (Бюро переводов ВИНТИ). М., 1962, с. 66—73.

59. *Никитин С. Н., Морозов В. Д., Темникова Н. Б.* Применение метода фотоупругости при исследовании устойчивости бортов карьеров. — «Вопросы разработки руд открытым способом». Магнитогорск, 1965. Научные труды МГМИ, вып. 36, с. 21—29.

60. *Оборудование для механизации производственных процессов на карьерах*, под общ. ред. В. С. Виноградова. М., «Недра», 1974. 376 с.

61. *Определение устойчивости откосов уступов на карьерах КМА*. М., изд. ИГД им. А. А. Скочинского, 1964. 43 с.

62. *Осокина Д. Н.* Пластичные и упругие низко модульные оптически активные материалы для исследования напряжений в земной коре методом моделирования. М., изд-во АН СССР, 1963. 196 с.

63. *Пашкевич А. В.* Устойчивость внутренних отвалов, подрезанных в основании. — Труды ВНИМИ. Сб. Л. Л., 1963, с. 258—264.

64. *Петров Г. Н., Радченко В. Г., Рейфман Л. С.* Экспериментальные исследования сопротивления сдвигу крупнообломочных грунтов Чарвакской плотины. — «Гидротехническое строительство», 1970, № 9, с. 5—7.

65. *Поклонский П. С.* Высокие отвалы на карьерах. — «Горный журнал», 1957, № 10, с. 22—25.

66. *Попов И. И.* Условия устойчивости внутренних отвалов. — «Изв. вузов, Горный журнал», 1960, № 5, с. 28—33.

67. *Попов С. И.* Деформации отвальных уступов и меры борьбы с ними. Дисс. на соиск. уч. степени канд. техн. наук, Магнитогорск, фонды МГМИ, 1944.

68. *Протодьяконов М. М., Кунтыш М. Ф.* Переход от кривых сред со сжатием к огибающим наибольшим кругов напряжений. Мора. М., «Недра», 1967, с. 15—19.

69. *Рассказов Л. Н.* Экспериментальные исследования сопротивляемости сдвигу крупнообломочных грунтов. — «Гидротехника», 1968, вып. 19, с. 92—97 с ил. Труды ин-та ВОДГЕО.

70. *Розанов Н. С.* Метод тензосетки и его приложение к исследованию напряженного состояния гидросооружений. М.—Л., Госэнергоиздат, 1958. 56 с.

71. *Рудаков М. Л., Попов И. И., Ли А. П.* Предупреждение оползней на карьерах. М., Госгортехиздат, 1960. 136 с.

72. *Саложников В. Т.* Моделирование откосов. — «Изв. вузов, Горный журнал», 1960, № 9, с. 39—48.

73. *Скабичевский Ю. Г.* К вопросу о влиянии горногеологических условий на открытую разработку месторождений. — В кн.: Совершенствование открытой разработки месторождений полезных ископаемых. М., Углетехиздат, 1955, с. 282—291.

74. *Соколовский В. В.* Статика сыпучей среды. М., Физматгиз, 1960, 243 с.

75. *Сорокин А. Д., Архипова Л. П.* Физико-механические свойства агарояда. — В сб. научн. статей научно-исслед. горнорудного ин-та УССР, 1962, № 9, с. 62—65.

76. *Степанов В.-Я.* Исследование напряжений в кровле выработок камерного типа методом тензосетки. — В кн.: Исследования по механике горных пород Фрунзе, «Илим», 1967, с. 25—38.

77. *Стегюха Е. И.* Экспресс-методы определения физико-механических свойств в горных породах. — «Разведка и разработка нефт. и газ. месторожд. Межвед. респ. научн.-техн. сб.», 1970, вып. 7, с. 48—51.

78. *Стрелецкий И. С.* Основы статистического учета коэффициента запаса прочности сооружений. М., Стройиздат, 1947, 94 с.

79. *Тартаковский Б. И., Иценко М. В.* Применение поляризационно-оптического метода для исследования напряженного состояния уступов с целью их обрушения. Днепропетровск, «Промінь», 1968, с. 83—86.

80. *Тартаковский Б. И., Кирилук В. Д., Лашко В. Т.* Экспериментальные исследования напряженного состояния уступов. — В кн.: Проблемы реологии горных пород. Киев, «Наукова думка», 1970, с. 197—199.

81. *Титова В. И.* Использование безразмерных величин напряжений, полученных методом фотоупругости, для расчета плотности из грунта и камня. Тезисы докладов координационного совещания по вопросам научных исследований, проектирования и строительства плотин из местных материалов. Октябрь—ноябрь, 1967. Л., изд. ВНИИГидротехника, 1967, с. 32—36.

82. *Томсон Д.* Дух науки. Пер. с англ. Лыцова В. И. Под ред. И. Д. Болотовой, Е. С. Геллера. М., «Знание», 1970, 175 с.

83. *Трумбаев В. Ф., Молодцова Л. С.* Игдантин и его применение при исследованиях напряжений вокруг горных выработок оптическим методом. — В сб.: «Научно-исслед. работы в угольной промышленности» (ЦИТ Угольной промышленности). 1959, № 1, с. 44—59.

84. *Тубольцев В. М., Шанина А. Н.* Исследование распределения напряжений в насыпи. — «Вопросы геотехники», 1968, № 12, с. 55—59.

85. *Федоров И. В., Степанов В. С.* Распределение напряжений в откосах неоднородного сложения по результатам исследований методом фотоупругости. — «Труды лаборатории Гидротехнических сооружений», 1960, № 3, с. 92—129.

86. *Федяев Л. К., Крючков В. В., Гринцов В. А.* Методика оценки площадей, пригодных к разработке по бестранспортной системе. — В кн.: Бестранспортные системы разработки месторождений. Челябинск, 1969, с. 3—5.

87. *Фисенко Г. Л.* Устойчивость бортов карьеров и отвалов. М., «Недра», 1965. 378 с.

88. *Флорин В. А.* Основы механики грунтов. Общие зависимости и напряженное состояние оснований сооружений. М.-Л., Госстройиздат, 1959. 357 с.

89. *Хаимова-Малькова Р. И.* Методика исследования напряжений поляризационно-оптическим методом. М., «Наука», 1970. 116 с.

90. *Цветков В. К.* Решение задачи теории упругости для некоторых форм открытых горных выработок. — «Изв. вузов, Горный журнал», 1972, № 5, с. 50—54.

91. *Ческидов В. И., Печенихин С. П.* К вопросу отработки Талдинского месторождения. — В кн.: Вопросы вскрытия карьерных полей. Новосибирск, изд. ИГД СО АН СССР, 1972, с. 230—238.

92. *Чжу Жуй-гэн.* Влияние статических внешних нагрузок на устойчивость откосов карьеров. Дисс. на соиск. уч. степени канд. техн. наук. М., фонды ИГД им. А. А. Скочинского, 1963, 157 с.

93. *Шарий А. А.* Экспериментальное изучение напряженного состояния глинистых пород в склонах и откосах. Дисс. на соиск. уч. степени канд. геолого-минералогических наук. М., фонды МГУ, 1970. 20 с.

94. *Шушкина О. И.* Исследование устойчивости внутренних бестранспортных отвалов (на примере Талдинского и Томусинского месторождений Кузбасса). Дисс. на соиск. уч. степени канд. техн. наук. М., фонды ИГД им. А. А. Скочинского, 1973. 143 с.

95. *Яковенко А. И.* Внутреннее отвалообразование на угольных разрезах при пологом залегании пластов. НИИОГР, М., «Недра», 1966, с. 12—23 (Научные труды НИИОГР, вып. 5).

96. *Яковлева Т. Г.* Исследование возможности моделирования строительного периода при возведении железнодорожных насыпей. — «Труды Моск. ин-та инж. ж.-д. транспорта», 1968, вып. 273, с. 40—49.

97. Ярош Е. В. Совершенствование бестранспортной системы разработки и буро-взрывных работ на карьерах Кузбасса. — «Добыча угля открытым способом», 1969, № 5, с. 3—6.

98. Akai K. On the stress distribution in the carthi embankment the foundation. Proc. 4th Japan Nat. Congr. Appl. Mech. 1954, Tokio, 1955, 115—122.

99. Choistek A., Vaculik Ja. Stavba vysypek a hald an ukloněném terénu. "Uhli", 1970, 12, N 8, 293—296, 318.

100. Dworkin L. M. Open pit planning. „Western Miner”, 1970, N 3, p. 52.

101. Français. Recherches sur la pousse des terres, sur la forme et les dimensions des revètements et sur le talus d'excavation. Mem. de l'obice genice, 1820.

102. Schubert K. Bodenmechanische Untersuchungen zum Verhältnis Vorkippenhöhe—Gesamtkippen—höhe bei Förderbrückenkippen. „Bergbautechnik”, 1962, H. 11, 583—585.

СОДЕРЖАНИЕ

	С.
Предисловие	3
1. Методические основы моделирования	6
1.1. Основные понятия и определения	6
1.2. Устойчивость отвалов в карьерах	8
1.3. Способы и методика моделирования	15
2. Закономерности распределения напряжений в приоткосной зоне	29
2.1. Определение компонентов напряжений	29
2.2. Особенности напряженного состояния в приоткосной зоне	36
2.3. Способ определения размеров приоткосной зоны	47
2.4. Характеристика напряженного состояния, полученная другими способами	52
2.5. Исследование деформаций отвалов в лабораторных и полевых условиях	59
3. Построение вероятной поверхности разрушения	65
3.1. Критерии для определения вероятной поверхности разрушения	65
3.2. Способ построения вероятной поверхности разрушения	68
4. Оценка устойчивости горных выработок и отвалов	74
4.1. Нахождение компонентов напряжений по поверхности разрушения и закономерностей их изменения	74
4.2. Прочностные свойства пород отвалов	77
4.3. Способ расчета устойчивости выработок и отвалов	84
4.4. Способ расчета устойчивости нагруженных отвалов	92
4.5. Влияние основных факторов на устойчивость отвалов и выработок	97
5. Практическое использование разработанной методики	106
5.1. Расширение области применения бестранспортной системы разработки на пластах с углом падения от 18—20°	106
5.2. Совершенствование схем экскавации	124
5.3. Параметры отвалов и схемы экскавации	128
5.4. Расчет устойчивости нагруженных отвалов	136
5.5. Определение ширины охранных зон и берм безопасности	142
Заключение	148
Список литературы	150

ИБ № 1382

Александр Максимович Демин
Ольга Ивановна Шушкина

**НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ
И УСТОЙЧИВОСТЬ ОТВАЛОВ В КАРЬЕРАХ**

Редактор издательства А. П. Крылов
Обложка художника А. Е. Чучканова
Художественный редактор О. Н. Зайцева
Технические редакторы Н. Ю. Явчинская, О. Ю. Трещенок
Корректор Н. Н. Власова

Слабо в набор 5 10 77. Подписано в печать 14 02 78.
7-02349. Формат 84×108¹/₃₂. Бумага № 2.
Гарнитура литер. Печать высокая. Печ. л. 5.0.
Усл. п. л. в. в. 24 изд. л. в. в. Тираж 1300 экз.
Заказ 1428/624-10 Цена 1 р. 30 к.

Издательство «Недра»,
103111, Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/19

Московская типография № 32 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров
СССР по делам издательства, полиграфии
и книжной торговли.
Москва, К-51, Цветной бульвар, 26

1 р. 30 к.

НЕДРА

В. 11