

4853237

На правах рукописи

Заворина Елена Николаевна

**ПРОГНОЗ УСТОЙЧИВОСТИ
ОТВАЛОВ УГОЛЬНЫХ РАЗРЕЗОВ
С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ УПЛОТНЯЮЩЕЙ НАГРУЗКИ
НА СВОЙСТВА НАСЫПНЫХ ПОРОД**

Специальность 25.00.20 – «Геомеханика, разрушение пород,
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

2 2 СФН 2011

Кемерово – 2011

Работа выполнена на кафедре маркшейдерского дела, кадастра и геодезии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева» и в лаборатории устойчивости бортов разрезов СФ ОАО ВНИМИ

Научный руководитель –	доктор технических наук, доцент Бахаева Светлана Петровна
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор Ренев Алексей Агафангелович, кандидат технических наук Могилин Александр Валентинович
Ведущая организация –	ЗАО «Гипроуголь»

Защита диссертации состоится 6 октября 2011 г. в 13⁰⁰ часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.102.02 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева» по адресу: 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева».

Автореферат разослан 2 сентября 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Иванов В. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Быстрому росту угольной промышленности в последние годы в значительной степени способствовало расширение и развитие открытого способа разработки угольных пластов, сопровождаемое увеличением объемов вскрыши и высоты отвалов. В настоящее время на 49 действующих разрезах Кузбасса объем ежегодно складированной в отвал породы достигает 350 млн. м³. Высота отвалов изменяется от 15 до 180 м при углах откоса соответственно от 37 до 22°.

Основанием внешних отвалов на разрезах Кузбасса является всхолмленная равнина, сложенная рыхлыми четвертичными отложениями (макропористые лесовидные суглинки) мощностью от 2 до 60 м, расчлененная мелкими заболоченными логами, с углами наклона поверхности от 5 до 27°. На склонах и тальвегах логов рыхлые четвертичные отложения в основном обводнены. В этой связи формирование отвалов на наклонном слоистом основании сопровождается развитием оползней подошвенного (26,7 %) и подподошвенного (35,5 %) типов. Отвальные породы расползаются по склону на расстоянии до 200 м, повторяя рельеф основания. Оползание отвального массива происходит в течение 5–7 лет даже после завершения отсыпки отвала, при этом в зависимости от угла наклона основания общая высота отвалов уменьшается на 10–20 % от расчетного значения. Основной причиной возникновения деформаций отвалов является несоответствие их высоты физико-механическим свойствам насыпных пород и пород основания.

Для принятия эффективных технологических решений по предотвращению деформаций необходимо прогнозировать высоту отвала с учетом влияния уплотняющей нагрузки на свойства насыпных пород.

Используемый в настоящее время графоаналитический метод (метод многоугольника) прогноза устойчивости отвалов в основном обеспечивает прогноз безопасных параметров. Вместе с тем в графоаналитическом варианте этот метод громоздок, требует многократных повторных расчетов и графических построений. Кроме того, при расчетах используют усредненные физико-механические свойства отвальных пород, в то время как по результатам многочисленных измерений способом режущих колец большого размера установлено, что плотность пород на поверхности внешних отвалов изменяется в пределах 1,41–1,58 т/м³, а на поверхности предотвалов, нагруженных оборудованием, увеличивается до 1,65–1,70 т/м³.

Таким образом, в проблеме обеспечения устойчивости отвалов вскрышных пород угольных разрезов, нерешенными остаются следующие задачи: не изучены закономерности изменения плотности и сцепления отвальных пород от уплотняющей нагрузки, не разработаны аналитические методы прогноза устойчивости отвалов на прочном и слоистом основаниях с учетом влияния уплотняющей нагрузки на свойства насыпных пород.

На основании изложенного актуальным является изучение закономерностей изменения физико-механических свойств насыпных пород от уплотняющей нагрузки, разработка аналитических методов прогноза устойчивости отвалов с уче-

том влияния уплотняющей нагрузки на свойства насыпных пород.

Цель работы – прогноз устойчивости отвалов угольных разрезов с учетом влияния уплотняющей нагрузки на свойства пород, обеспечивающий безопасные условия отвалообразования.

Основная идея работы заключается в использовании эмпирических зависимостей физико-механических свойств отвальных пород от уплотняющей нагрузки для расчета по аналитическим формулам высоты отвала при нормативном коэффициенте запаса устойчивости.

Задачи исследований:

- изучение закономерностей изменения плотности и сцепления отвальных пород от уплотняющей нагрузки;
- разработка аналитического метода расчета устойчивости отвала на прочном основании;
- прогноз устойчивости отвала на слоистом основании с учетом влияния уплотняющей нагрузки на свойства насыпных пород.

Методы исследований: экспериментальные, включающие полевые и лабораторные испытания физико-механических свойств пород; математической статистики и корреляционного анализа при обработке результатов определения физико-механических свойств отвальных пород, графоаналитические и аналитические при прогнозе устойчивости отвала.

Объект исследований – внешние одноярусные отвалы вскрышных пород разрезов Кузбасса.

Предмет исследования – условие устойчивости отвалов с учетом трансформации свойств горных пород в результате механического воздействия.

Научные положения, выносимые на защиту:

- при увеличении уплотняющей нагрузки на образец смеси полускальных и песчано-глинистых отвальных пород с влажностью от 9,2 до 20,4 % его плотность изменяется по степенной зависимости, а сцепление увеличивается линейно для полускальных пород на 8 %, для песчано-глинистых – на 22 % и пропорционально высотной координате, отсчитываемой от поверхности отвала;
- повышение точности на 20 % и сокращение трудоемкости прогноза высоты устойчивого отвала на прочном основании обеспечивается использованием зависимости, полученной дифференцированием уравнения равновесия призмы возможного обрушения при минимальном коэффициенте запаса и введением дополнительных коэффициентов, учитывающих изменение плотности и сцепления отвальных пород пропорционально высоте отвала;
- обеспечение устойчивости отвала на слоистом основании с углом наклона $6 - 12^\circ$ требует дополнительного снижения его расчетной высоты для полускальных пород на 20–30 %, а для смеси полускальных и песчано-глинистых пород – на 2–15 % вследствие увеличения плотности и сцепления отвальных пород с ростом уплотняющей нагрузки.

Научная новизна работы заключается:

- в установлении регрессионных зависимостей изменения плотности и сцепления отвальных пород от уплотняющей нагрузки;
- в совершенствовании способа прогноза устойчивости отвала на прочном основании;
- в обосновании уменьшения безопасной высоты отвала на наклонном слоестом основании.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются:

- использованием стандартных методик по исследованию физико-механических свойств отвальных пород;
- применением апробированных методов математической статистики и корреляционного анализа для обработки экспериментальных данных;
- высоким коэффициентом корреляции (0,81–0,93) полученных зависимостей плотности и сцепления отвальных пород от уплотняющей нагрузки;
- незначительным (до 1,5 %) расхождением значений коэффициента запаса устойчивости отвала, вычисленного графоаналитическим и аналитическим, разработанным автором, методами;
- положительными результатами внедрения исследований при проектировании более 20 отвалов на разрезах Кузбасса.

Личный вклад автора заключается:

- в отборе образцов, систематизации экспериментальных исследований, статистической обработке результатов компрессионных и сдвиговых испытаний отвальных пород;
- в разработке и реализации технического, научного и методического обеспечения аналитического метода расчета устойчивости отвала с учетом влияния уплотняющей нагрузки на свойства пород и выполнении поверочных расчетов для сравнения параметров отвалов, определенных графоаналитическим и аналитическим методами для различных инженерно-геологических условий;
- в разработке для проектных организаций рекомендаций по обеспечению устойчивости отвалов и их использовании на более чем 20 разрезах Кузбасса.

Научное значение работы состоит в установлении зависимостей изменения плотности и сцепления смеси отвальных пород угольных разрезов от уплотняющей нагрузки и прогнозе на их основе параметров устойчивых отвалов.

Отличие от ранее выполненных работ заключается в обосновании и разработке принципов расчета устойчивости отвалов угольных разрезов аналитическим методом с учетом полученных зависимостей сцепления и плотности насыпных пород от уплотняющей нагрузки.

Практическая ценность работы заключается:

- в разработке методик и компьютерных программ по определению высоты устойчивого отвала и ширины бермы безопасности;
- в разработке технических рекомендаций по обеспечению устойчивости отвалов для угольных разрезов Кузбасса.

Реализация работы. Рекомендации по параметрам, обеспечивающим устойчивость отвалов, рассчитанным аналитическим методом, использованы при разработке проектных решений по геомеханической оценке отвальных массивов на следующих предприятиях Кузбасса: ОАО «Кузбасская топливная компания», ООО «СтройИвестКузбасс», ОАО «УК «Кузбассразрезуголь» (Кедровский, Талдинский угольные разрезы), ООО «Разрез «Киселевский», ООО «Разрез Березовский», ОАО «Разрез Октябрьский», ООО «Разрез Южный», ОАО «Междуречье», ООО «Разрез Тайбинский», ЗАО «Черниговец» и др.

Анализ и статистическая обработка результатов натурных наблюдений за деформациями отвалов, выполненные автором, использовались при разработке «Временного положения о порядке учета и контроля деформационных процессов на открытых горных работах Кузбасса», согласованного и рекомендованного к внедрению на предприятиях, подконтрольных Прокопьевскому горнотехническому отделу (письмо Кузнецкого управления Госгортехнадзора России от 10.09.2002 № 06-1038).

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-практических конференциях «Влияние научно-технического прогресса на экономическое развитие Кузбасса» (г. Прокопьевск, 2006 г.); «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири» (г. Кемерово, 2008 г.); «Энергетическая безопасность России: новые подходы к развитию угольной промышленности. Кузбасский международный угольный форум» (г. Кемерово, 2009 г.) и получили одобрение.

Публикация. По теме диссертации опубликовано 7 печатных работ, в том числе 3 в изданиях, рекомендованных ВАК России, получено 1 свидетельство на регистрацию программы для ЭВМ.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложений и изложена на 170 страницах машинописного текста, содержит 49 таблиц, 38 рисунков и список литературы из 133 наименований.

Автор выражает глубокую благодарность своим коллегам по работе и канд. техн. наук В. Н. Хашину, оказавшим помощь в проведении экспериментальных исследований, проверке, развитии и реализации научных разработок, выполненных в процессе подготовки диссертации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приведена краткая характеристика горно-геологических условий отвалообразования Кузбасса, а также обзор и анализ работ исследователей, посвященный изучению свойств отвальных пород и геомеханической оценке отвальных массивов.

Во внешние отвалы Кузбасса складировать преимущественно полускальные породы (песчаники 31–84 %, алевролиты 2–58 %), обладающие достаточно высоким ($\varphi = 23 - 34^\circ$) сопротивлением сдвигу. Вместе с тем основанием внешних

отвалов служат четвертичные отложения (макропористые лессовидные суглинки), сцепление которых в зависимости от влажности изменяется в широком диапазоне от 0,6 МПа в тальвеге логов до 5,6 МПа на водоразделах, а угол внутреннего трения соответственно от 5 до 18°. В южной части Кузбасса при малой (0,5–3 м) мощности четвертичных отложений углы наклона основания достигают 27°, в центральной при малых (0–3°) углах наклона основания мощность четвертичных отложений изменяется от 45 до 60 м. Таким образом, геологические условия Кузбасса способствуют образованию оползней подошвенного и подподошвенного типов. Основной причиной возникновения деформаций отвалов является несоответствие высоты отвала физико-механическим свойствам насыпных пород и пород оснований.

Наиболее значительный вклад в разработку методик полевых и лабораторных испытаний физико-механических свойств пород нарушенного (отвалов) и ненарушенного (основание отвалов) сложения внесли А. Бишоп, В. Д. Ломтадзе, Н. Н. Маслов, С. С. Морозов, Н. В. Орнатский, В. В. Охотин, А. П. Павлов, Г. И. Покровский, Е. М. Сергеев, В. Н. Соколов, К. Терцаги и другие ученые.

Однако вопросы, связанные с изменением свойств отвальных пород от уплотняющей нагрузки, в настоящее время остаются неисследованными, но весьма важными в решении проблемы устойчивости отвалов.

Развитие теории и практики геомеханических оценок состояния техногенного массива горных пород и расчета его устойчивости нашло отражение в работах С. П. Бахасвой, А. М. Гальперина, Э. Л. Галустьяна, В. П. Грибкова, В. В. Истомина, В. В. Камшилова, Ю. С. Козлова, Е. В. Костица, О. Ю. Крячко, А. Н. Куксова, Ю. Н. Малюшицкого, Г. Мачак, А. В. Могилина, Б. В. Несмеянова, И. И. Попова, В. Н. Попова, Т. К. Пустовойтовой, А. А. Ренева, К. Шуберта и других. В их трудах разработаны научные основы оценки устойчивости откосов и рекомендованы способы повышения устойчивости инженерных грунтовых сооружений. Развитие исследований происходило по пути совершенствования методов, разработанных ранее Г. Л. Фисенко, А. М. Деминим, В. Н. Хашиным.

В настоящее время наиболее известны графоаналитические методы, среди них необходимо отметить метод многоугольника сил (Г. М. Шахуньянц), дающий достаточную для практических целей точность расчета. Однако при высокой точности метод многоугольника сил в графическом виде требует многократных построений и расчетов для отыскания наиболее напряженной поверхности и исключает применение ЭВМ. Поэтому многими исследователями предложены аналитические методы расчета устойчивости отвалов на наклонном основании, которое является поверхностью ослабления.

Анализ существующих методов прогноза устойчивости отвалов, а также опыта проектирования внешних отвалов показал, что при расчете устойчивости отвалов, как правило, принимаются усредненные физико-механические свойства отвальных пород, в то время как автором и другими исследователями установлено значительное изменение физико-механических свойств отвальных пород от уплотняющей нагрузки.

В имеющихся методических рекомендациях и правилах обеспечения устой-

чивости параметры отвалов даны в виде графиков и таблиц и выполнены для конкретной горно-геологической обстановки, а использование их в иных условиях не всегда оправданно. Поэтому автором разработаны и обоснованы принципы расчета устойчивости отвала аналитическим методом с учетом полученных зависимостей сцепления и плотности насыпных пород от уплотняющей нагрузки.

Основным объектом исследований выбраны внешние одноярусные отвалы вскрышных пород разрезов Кузбасса, которые характеризуются значительными (до 700 тыс. м³) по объему деформациями, приводящими к выходу из строя опор ЛЭП, нарушению технологических и магистральных автодорог, выводу из строя экскаваторов и автотранспорта, перекрытию готовых к выемке запасов угля объемом до 300 тыс. т.

На основании комплексного анализа современного состояния рассматриваемой проблемы по прогнозу устойчивости отвалов сформулированы цель и задачи исследований, приведенные в общей характеристике работы.

Во второй главе приведены исследования плотности и сцепления отвальных пород от уплотняющей нагрузки.

Для изучения изменения плотности отвальных пород по высоте отвала автором проводились испытания по уплотнению отвальных пород на приборе, сконструированном О. Ю. Крячко, с площадью среза 550 см² по общепринятой методике, разработанной ВНИМИ.

В полевых условиях образцы отбирались непосредственно из отвалов и испытания проводились при нормальных напряжениях до 0,1 МПа, в лаборатории образцы уплотнялись под прессом при нормальных напряжениях до 3,0–5,0 МПа.

Зависимость плотности смеси полускальных и песчано-глинистых пород отвалов на угольных разрезах Кузбасса от уплотняющей нагрузки установлена для следующего состава смеси пород: до 77 % песчаных и 2,5–18,0 % глинистых разностей при влажности 9,2–20,4 %.

По результатам компрессионных испытаний строили графики зависимости плотности γ отвальных пород от уплотняющей нагрузки σ_y (рис. 1, а).

Компрессионные испытания проводили следующим образом. В отвальном массиве выделяли вертикальный столб единичной площади (рис. 1, б) и делили его на ряд горизонтальных слоев такой малой толщины Δh_i , в пределах которой плотность можно считать постоянной. На верхнюю площадку выделенного слоя с высотной отметкой $H_{i-1} = \Sigma \Delta h_{i-1}$ прикладывали нагрузку $\sigma_{i-1} = \Sigma \Delta \sigma_{i-1}$, а на нижнюю границу с отметкой $H_i = H_{i-1} + \Delta h_i$ — соответственно $\sigma_i = \sigma_{i-1} + \Delta \sigma_i$. При этом $\Delta \sigma_i = \gamma \Delta h_i$, где плотность γ в пределах тонкого слоя считали постоянной величиной и определяли по графику $\gamma = f(\sigma_y)$ в зависимости от выбранной величины $\Delta \sigma$ во всем диапазоне нагрузок σ_y (см. рис. 1, а). Затем определяли толщину тонкого слоя $\Delta h_i = \Delta \sigma_i / \gamma$ и, суммируя слои, находили высоту отвала $H = \Sigma \Delta h_i$, которой соответствовали нагрузка σ_i и плотность γ_i (табл. 1).

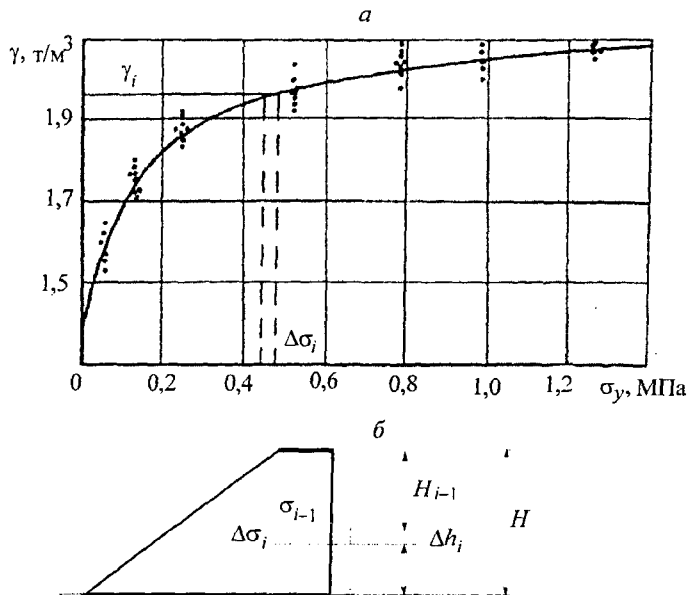


Рис. 1. Зависимость плотности γ отвалных пород от уплотняющей нагрузки σ_y : а – график зависимости; б – схема для расчета

Таблица 1

Расчет плотности пород от высоты отвала (пример)

Приращение $\Delta\sigma_i$ нагрузки, МПа	Нагрузка σ_i , МПа	Плотность пород γ_i в интервале $\Delta\sigma_i$, 10^{-3} т/м^3	Толщина слоя Δh_i , м	Высота отвала H_i , соответствующая γ_i и σ_i , м
–	0	1,380	–	0
0,02	0,02	1,420	1,41	1,41
0,02	0,04	1,490	1,34	2,75
0,02	0,06	1,560	1,27	4,02
0,02	0,20	1,835	1,09	12,05
0,05	0,25	1,870	2,67	14,72
0,05	0,30	1,900	2,63	17,35
0,10	1,00	2,055	4,87	52,38
0,10	1,10	2,065	4,81	57,22
0,10	1,20	2,075	4,81	62,03

Используя результаты компрессионных испытаний, строили график $\gamma = f(H)$ в полулогарифмических координатах (рис. 2), по которому определяли плотность пород в любой точке по высоте отвала.

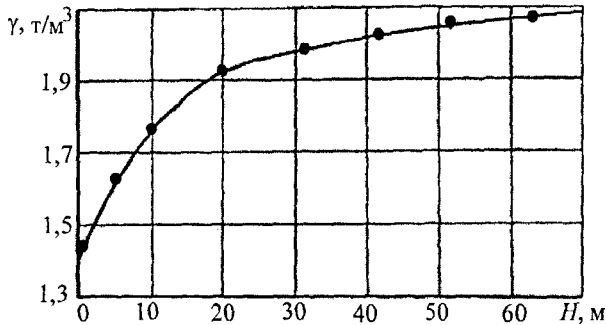


Рис. 2. Зависимость плотности γ от высоты отвала H

Полученная зависимость плотности от высоты отвала может быть выражена функцией вида

$$\gamma_i = \gamma_o [a_\gamma + e_\gamma \lg(H_i/H_{i-1})], \quad (1)$$

где γ_i, γ_o – плотности пород соответственно при высотной координате H_{i-1} и на поверхности отвала, т/м^3 ; a_γ, e_γ – эмпирические коэффициенты (табл. 2), рассчитанные методом наименьших квадратов по результатам испытания плотности пород, безразмерные; H_i, H_{i-1} – высота и высотная координата точек отвала от его поверхности, м.

В результате экспериментальных исследований смеси неводонасыщенных песчано-глинистых отвальных пород ($n = 48$) установлено среднее значение плотности $(1,898 \pm 0,047) \text{ т/м}^3$, с вероятностью 0,995; коэффициент вариации $V_x = 8,6 \%$, корреляционное отношение $r_{x/y} = 0,91$.

Одновременно с испытаниями отвальных пород на уплотняемость проводили неконсолидировано-недренированный («быстрый») сдвиг образцов пород. Этот тип испытаний отличается быстрым нагружением и медленным оттоком воды из образца, влияние порового давления в этом случае проявляется в полной мере и учитывается в неявном виде.

По результатам испытаний отвальных пород на сдвиг строили паспорта прочности, по которым определяли сцепление C_i пород как функцию от уплотняющей нагрузки (рис. 3), которая выражается формулой

$$C_i = (a_c + e_c H_i) \cdot 10^{-2}, \quad (2)$$

где C_i – сцепление, МПа; $a_c (\text{т/м}^2), e_c (\text{т/м}^3)$ – эмпирические коэффициенты, рассчитанные методом наименьших квадратов по результатам компрессионных испытаний при определении сцепления отвальных пород; H_i – высота отвала, м.

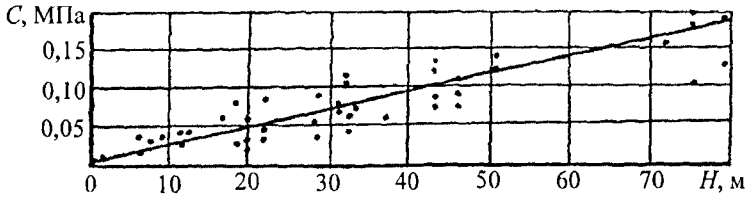


Рис. 3. Зависимость сцепления C песчано-глинистых пород от высоты отвала H

Таблица 2
Эмпирические коэффициенты для отвальных пород Кузбасса

Состав отвальных пород	γ_{cp}	Значения эмпирических коэффициентов			
		a_γ	b_γ	a_c	b_c
Полускальные (песчаники, алевролиты)	<u>1,40–1,60</u>	<u>1,15–1,25</u>	<u>0,17–0,30</u>	0,3	0,08
	1,50	1,20	0,23		
Песчано-глинистые	<u>1,14–1,40</u>	<u>1,15–1,35</u>	<u>0,35–0,50</u>	2,0	0,22
	1,28	1,27	0,44		
Смесь полускальных и песчано-глинистых	<u>1,30–1,50</u>	<u>1,20–1,35</u>	<u>0,20–0,35</u>	1,0	0,16
	1,38	1,29	0,27		

Экспериментальным путем установлено, что среднее значение сцепления неводонасыщенных песчано-глинистых отвальных пород ($n = 44$) находится в доверительном интервале $(0,076 \pm 0,001)$ МПа с вероятностью 0,995, коэффициент вариации $V_x = 5,2\%$, коэффициент корреляции $r = 0,83$.

Исследование зависимости сцепления от нагрузки проводили путем уплотнения образцов различных групп отвальных пород при следующих нагрузках σ_y : 0,25; 0,31; 0,42; 0,62; 0,83, а затем срезали и строили паспорта прочности (рис. 4), по которым определяли их сцепление.

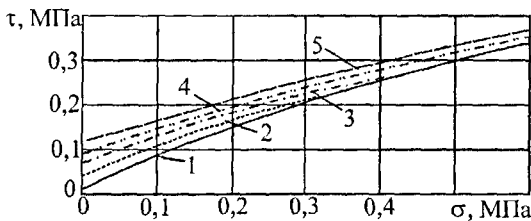


Рис. 4. Паспорт прочности песчано-глинистых пород при уплотняющих нагрузках (МПа):

1 – $\sigma_y = 0,25$; 2 – $\sigma_y = 0,31$; 3 – $\sigma_y = 0,42$; 4 – $\sigma_y = 0,62$; 5 – $\sigma_y = 0,83$

Анализ графиков зависимости сцепления отвальных пород от нагрузки (рис. 5, а), построенных по паспортам прочности, показал, что сцепление неводонасыщенных песчано-глинистых пород 2 с ростом нагрузки увеличивается значительно (до 30 %), а сцепление крепких обломочных пород 1, характеризующихся небольшой сжимаемостью, изменяется мало (до 8 %). Для песчано-глинистых пород испытания производились при различной их влажности. При этом установлено, что с увеличением влажности (с 12 до 37 %) сцепление пород снижается в 10 раз (рис. 5, б).

Обобщение и анализ полученных экспериментальных данных позволили установить прочностные характеристики (сцепление и угол внутреннего трения) трех групп пород нарушенного сложения: полускальных, смеси полускальных и глинистых, смеси песчано-глинистых (коэффициент вариации $V_x = 9,6-31,6 \%$), которые рекомендуется использовать на этапе проектирования для оценки устойчивости отвалов для условий Кузбасса.

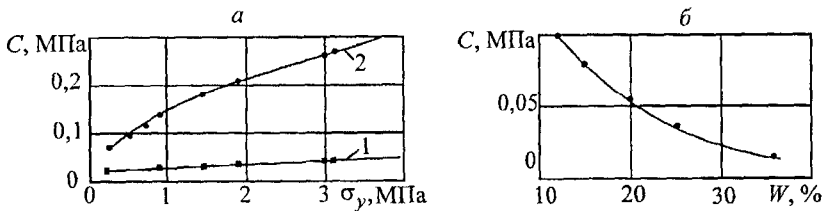


Рис. 5. Графики зависимости сцепления отвальных пород от нагрузки (а) и влажности (б):

1 – скальные; 2 – песчано-глинистые породы

По результатам исследований, изложенным во второй главе, сформулировано первое научное положение.

Третья глава посвящена разработке аналитического метода расчета устойчивости отвала на прочном основании, основным содержанием которого являются вывод аналитической формулы для расчета высоты отвала и учет установленных во второй главе зависимостей сцепления и плотности отвальных пород от уплотняющей нагрузки.

Устойчивость отвалов на прочном основании определяется методом алгебраического суммирования сил по потенциальным криволинейным поверхностям скольжения. Схема расчета приведена на рис. 6.

Показателем устойчивости откосов отвалов, расположенных на прочном основании, является коэффициент запаса устойчивости n , определяемый из отношения главного момента удерживающих $M_{уд}$ к главному моменту сдвигающих $M_{сд}$ сил, действующих на призму возможного обрушения – оползающий клин:

$$n = \frac{M_{уд}}{M_{сд}} = \frac{\sum Y_q r}{\sum C_q r} = \frac{\sum [(P_i \cos \alpha_1) \cdot \operatorname{tg} \varphi_i + C_i L] r}{\sum (P_i \sin \alpha_1) r}, \quad (3)$$

где $\sum Y_q$, $\sum C_q$ – соответственно сумма удерживающих и сдвигающих сил, действующих по поверхности скольжения, Н; r – радиус кругло-цилиндрической поверхности, м; P_i – вес оползающего клина длиной по фронту 1 м, Н; α_1 – угол между вертикалью, проходящей через центр тяжести клина, и нормалью к поверхности в точке их пересечения, град; φ – угол внутреннего трения, град; C – сцепление отвалных пород, МПа; L – длина поверхности скольжения, м.

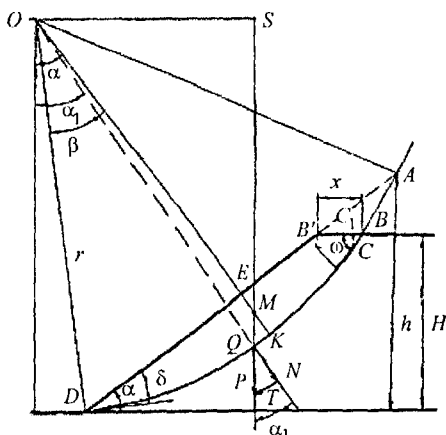


Рис. 6. Схема к расчету отвала на прочном основании

Исходя из геометрических построений оползающего клина (см. рис. 6) выведены формулы длины поверхности скольжения (4) и веса оползающего клина (5).

Длина поверхности скольжения

$$L = r \cdot \operatorname{arc} 2\delta - x \frac{\sin \alpha}{\sin \delta} = r \frac{\pi \delta}{90} - x \frac{\sin \alpha}{\sin \delta}, \quad (4)$$

где $\delta = 45^\circ - \varphi/2$, град; x – ширина призмы возможного обрушения, м.

Вес P оползающего клина $BKDB$:

$$P = \gamma \left[\frac{r^2}{2} (\operatorname{arc} 2\delta - \sin 2\delta) - \frac{1}{2} x^2 \frac{\sin(\alpha + \delta) \sin \alpha}{\sin \delta} \right]. \quad (5)$$

Подставляя в формулу (3) значение длины поверхности скольжения L (4), вес оползающего клина P (5), а также введя условные коэффициенты: A , b_1 , d , a , m , c , b , выраженные соотношением тригонометрических функций и физико-механических свойств отвалных пород (рис. 7), а затем дифференцируя получен-

ное уравнение, определяем минимум функции (3), являющийся минимальным коэффициентом запаса устойчивости по наиболее напряженной поверхности скольжения:

$$n_{\min} = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \alpha_1} + \frac{A}{H} \cdot \frac{e_1(d-m)(a-m)}{c-m^2}. \quad (6)$$

Преобразуя уравнение (6) относительно H , получаем формулу для расчета высоты отвала при заданном коэффициенте запаса устойчивости n :

$$H = \frac{A}{\left(n - \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \alpha_1}\right)} \cdot \frac{e_1(d-m)(a-m)}{c-m^2}. \quad (7)$$

Ширина призмы возможного обрушения определится по формуле

$$x = H \frac{mb}{e(d-m)}. \quad (8)$$

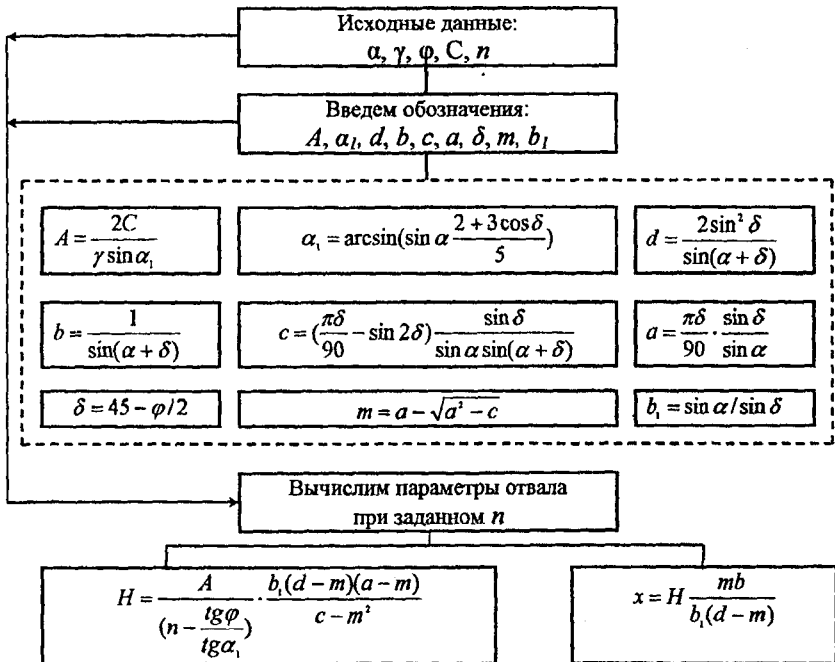


Рис. 7. Схема аналитического метода расчета устойчивости отвала на прочном основании

Первоначально вычисляют ориентировочное значение высоты отвала по усредненным значениям сцепления и плотности, затем отвал делят на горизонтальные слои такой мощности, в пределах которой изменение сцепления и плотности будет незначительно, и вычисляют для каждого слоя плотность (1) и сцепление (2) с учетом их изменения от уплотняющей нагрузки. По значениям сцепления C_H и плотности γ_H , вычисленным с учетом уплотняющей нагрузки, вновь рассчитывают условный показатель A и оптимальные значения высоты отвала H и ширины призмы возможного обрушения (см. рис. 7).

Результаты, изложенные в третьей главе, позволили сформулировать второе научное положение.

В четвертой главе приведены исследования по прогнозу устойчивости отвала на слоистом основании с учетом влияния уплотняющей нагрузки на свойства насыпных пород.

С целью выражения в аналитическом виде сил и реакций, действующих на откос, вводим условную систему координат, начало которой совмещаем с нижней бровкой откоса, а ось X с линией контакта отвала и основания (рис. 8). Призму возможного обрушения $AKMECB$ (S) делим на призму активного давления $NMEC$ (S_1) и призму упора $AKNCB$ (S_2). Границу между ними NC проводим под углом $(90^\circ - \varphi)$ к поверхности скольжения в теле отвала.

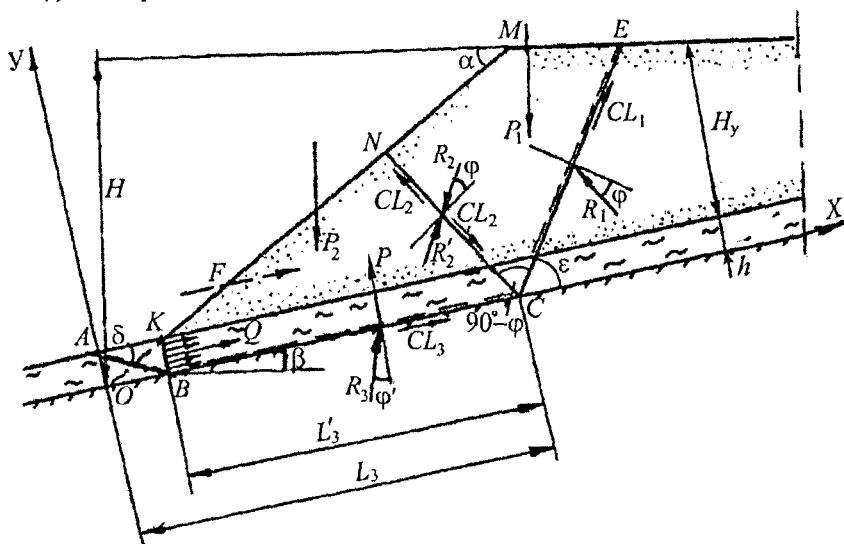


Рис. 8. Схема к расчету устойчивости отвала на слоистом основании

Определяем геометрические параметры откоса (табл. 3).

Проектируем силы и реакции, действующие на призмы «активного давления» и «упора», на оси X и Y (табл. 4).

Таблица 3

Геометрические параметры откоса

Наименование параметра	Призма активного давления	Призма упора
Длина поверхности скольжения (ПС) в основании призм, м	$L_1 = \frac{H - L_3 \sin \beta}{\sin(\varepsilon + \beta)}$	$L_1 = \frac{H - L_3 \sin \beta}{\sin(\varepsilon + \beta)}$
Длина границы NC между призмами, м	$L_2 = L_3 \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\cos(\alpha + \varphi - \varepsilon - \beta)}$	
Объем призм единичной длины по фронту отвала, м ³	$S_1 = S - S_2$	$S_2 = \frac{1}{2} L_3^2 \frac{\sin(\alpha - \beta) \cos(\varepsilon - \varphi)}{\cos(\alpha - \beta - \varepsilon + \varphi)}$
Объем призмы возможного обрушения единичной длины по фронту отвала, м ³	$S = \frac{1}{2 \sin \beta} \left[H^2 \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin \alpha} - (H - L_3 \sin \beta)^2 \frac{\sin \varepsilon}{\sin(\varepsilon + \beta)} \right]$	

Таблица 4

Вид силы	Призма активного давления	Призма упора
Вес призмы, Н	$P_1 = \gamma S_1$	$P_2 = \gamma S_2$
Реакции по боковым поверхностям (EC , CN) и в основании (OC) призмы возможного обрушения, Н	$R_1 = P_1 \frac{\cos(\varepsilon + \beta)}{\cos \varphi} - CL_2$ $R'_2 = P_1 \frac{\sin(\varepsilon - \varphi + \beta)}{\cos \varphi} - CL_1$	$R_3 = P_2 \frac{\cos \beta}{\cos \varphi'} + CL_2 \frac{\cos(\varepsilon - \varphi)}{\cos \varphi'} +$ $+ P_1 \frac{\sin(\varepsilon - \varphi + \beta) \sin \varepsilon}{\cos \varphi \cos \varphi'} - CL_1 \frac{\sin \varepsilon}{\cos \varphi'} -$ $- \bar{P} L_3 \frac{1}{\cos \varphi'}$
Силы сцепления, Н	$CL_1 = C_{cp} L_1 + (C_c - C_{cp}) \frac{h}{\sin \varepsilon}$ $CL_2 = C_{cp} L_2 + (C_c - C_{cp}) \frac{h}{\cos(\varepsilon - \varphi)}$	$C' L'_3 = C' [L_3 - h \operatorname{ctg}(\alpha - \beta)]$

Приложим к призме «упора» силу F параллельно основанию такой величины и знака, чтобы в откосе наступило предельное состояние и многоугольник сил замкнулся. Условие равновесия откоса запишется в виде уравнения статики: $\Sigma Y = 0$, $\Sigma X = 0$, тогда сила F определится по формуле

$$\begin{aligned}
 F = P_1 \frac{\sin(\varepsilon - \varphi + \beta) \cos(\varepsilon + \varphi')}{\cos \varphi \cos \varphi'} - P_2 \frac{\sin(\varphi' - \beta)}{\cos \varphi'} CL_1 \frac{\cos(\varepsilon + \varphi')}{\cos \varphi'} - \\
 - CL_2 \frac{\sin(\varepsilon - \varphi + \varphi')}{\cos \varphi'} - C' L'_3 - Q + \bar{P} L'_3 \operatorname{tg} \varphi',
 \end{aligned} \quad (9)$$

где Q – сила сопротивления разрезанию слабого слоя, МПа; \bar{P} – средняя интенсивность избыточного порового давления, МПа.

Подставляя в формулу геометрические параметры откоса (см. табл. 3), заменяя $P_1 = P - P_2$ (P — вес призмы возможного обрушения), а также выражая соотношения тригонометрических функций через условные коэффициенты: a, e, c, d, A, B , уравнение (9) запишем в следующем виде:

$$F = \frac{1}{2}aH^2 + eHL_3 - \frac{1}{2}cL_3^2 - BL_3 - AH - c. \quad (10)$$

Для нахождения положения наиболее напряженной поверхности скольжения, для которой сила F максимальна, уравнение (10) дифференцируют по длине основания призмы упора L_3 при $H = \text{const}$:

$$\frac{dF}{dL_3} = eH - cL_3 - B. \quad (11)$$

Выполнив преобразования и решив уравнение (11) относительно параметров отвалов, определяют высоту откоса H_1 и ориентировочное значение высоты отвала H' :

$$H_1 = \frac{(eA + B) + \sqrt{(eA + B)^2 + B^2(c - ae)}}{c - ae}, \quad H' = H_1 \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin\alpha \cdot \cos\beta}. \quad (12)$$

Ширину призмы возможного обрушения x' (отрезок ME на рис. 6) определяют по формуле

$$x' = \frac{H'(1 - ed) - B}{e}. \quad (13)$$

Отвал в пределах призмы возможного обрушения делят на ряд элементарных горизонтальных слоев такой мощности, в пределах которой плотность и сцепление отвальных пород считают постоянными. Вычисляют плотность γ_i (1) и сцепление C_i (2) каждого элементарного слоя, а затем плотность γ_H и сцепление C_H отвальных пород при высоте H' учетом уплотняющей нагрузки.

Оптимальные значения высоты отвала H и ширины призмы возможного обрушения x рассчитывают по тем же формулам (12) и (13), что и ориентировочное значение этих показателей, пересчитав условные коэффициенты A и B через свойства отвального массива γ_H, C_H , определенные с учетом уплотняющей нагрузки.

Надежность прогноза оптимальных параметров отвала H и x подтверждается поверочным расчетом. Силы и реакции, действующие на призмы «активного давления» и «упора», подставляют в уравнение (9), при $F = 0$ считают, что устойчивость отвала с параметрами H и x будет обеспечена с заданным коэффициентом запаса, значение которого учитывают на начальном этапе при определении свойств пород отвала (C и φ) и основания (C' и φ').

Алгоритм аналитического способа расчета устойчивости отвала на слоистом основании реализован в компьютерной программе, блок-схема которой приведена на рис. 9.

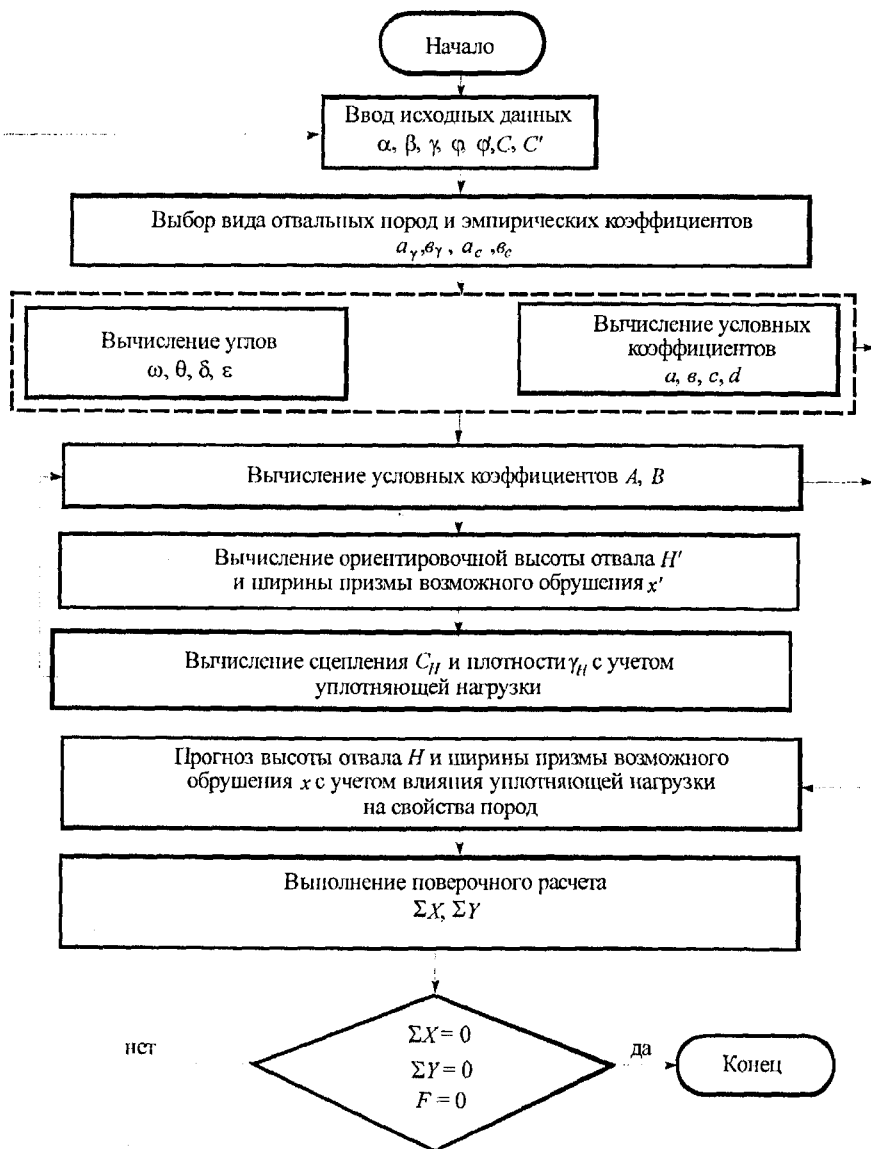


Рис. 9. Блок-схема расчета устойчивости отвала на слоистом основании аналитическим методом

Многочисленные расчеты (для различных геологических условий Кузбасса) устойчивости отвала на слоистом основании, выполненные по усредненным физико-механическим свойствам, а также с учетом изменения плотности и сцепления отвальных пород от уплотняющей нагрузки, показали, что для обеспечения устойчивости отвала на слоистом основании с углом наклона $6-12^\circ$ требуется дополнительное уменьшение его расчетной высоты для полускальных пород на 20–30 % (рис. 10, а), а для смеси полускальных и песчано-глинистых пород на 2–15 % (рис. 10, б) вследствие увеличения плотности и сцепления отвальных пород с ростом уплотняющей нагрузки.

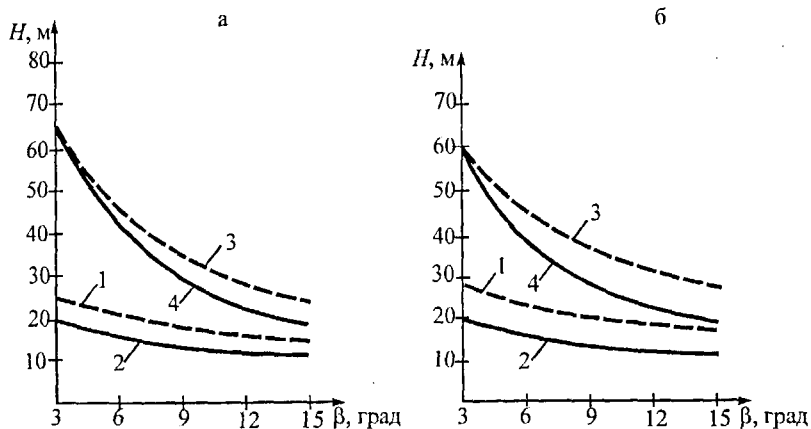


Рис. 10. Зависимость высоты отвала на слоистом основании от угла наклона основания:

а – для полускальных пород; б – для смеси полускальных и песчано-глинистых пород; 1, 2 – $\varphi' = 6^\circ$; 3, 4 – $\varphi' = 12^\circ$; 1, 3 – по усредненным свойствам; 2, 4 – с учетом изменения плотности и сцепления отвальных пород от уплотняющей нагрузки

Результаты, изложенные в четвертой главе, позволили сформулировать третье научное положение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой изложены научно обоснованные технические решения по прогнозу устойчивости отвалов угольных разрезов с учетом влияния уплотняющей нагрузки на свойства пород, включающие аналитические зависимости изменения плотности и сцепления отвальных пород от уплотняющей нагрузки, аналитическую формулу определения высоты отвала на прочном основании, обеспечивающие повышение точно-

сти и оперативности прогноза параметров устойчивых отвалов, что имеет существенное значение для обеспечения безопасных условий отвалообразования на предприятиях угольной промышленности.

Основные научные и практические результаты исследований сводятся к следующему.

1. Методом компрессионных испытаний на сдвиг и уплотняемость смеси полускальных и песчано-глинистых отвальных пород влажностью от 9,2 до 20,4 % установлены эмпирические зависимости (с коэффициентом корреляции 0,81–0,93) степенного вида для плотности и линейного для сцепления от уплотняющей нагрузки, учет этих зависимостей при расчете высоты отвала на прочном основании дает увеличение коэффициента запаса устойчивости на 22–24 %.

2. Экспериментально-аналитическим методом по результатам сдвиговых испытаний установлены прочностные характеристики (с коэффициентом вариации $V_p = 9,6–31,6$ %) трех групп пород нарушенного сложения и показатели сопротивления сдвигу семи групп контактов пород с основанием (с коэффициентом вариации $V_k = 12,4–24,3$ %) для условий Кузбасса, использование которых позволит на этапе проектирования оценивать устойчивость отвалов.

3. По паспортам прочности отвальных пород, построенным по результатам полевых и лабораторных исследований, установлено, что сцепление неводонасыщенных песчано-глинистых пород с ростом нагрузки увеличивается значительно (до 30 %) и имеет степенную зависимость, а сцепление крепких обломочных пород изменяется мало (до 8 %) и выражается прямолинейной зависимостью. С ростом влажности (с 12 до 37 %) сцепление песчано-глинистых пород уменьшается в 10 раз.

4. Повышение точности и сокращение трудоемкости прогноза устойчивости отвала на прочном основании обеспечивается за счет установления аналитических зависимостей высоты отвала и ширины бермы безопасности, полученных путем дифференцирования уравнения равновесия призмы возможного обрушения, выражаемого отношением главного момента удерживающих к главному моменту сдвигающих сил при минимальном коэффициенте запаса устойчивости, вычислением условных коэффициентов, входящих в аналитические зависимости, и учета изменения плотности и сцепления насыпных пород от уплотняющей нагрузки.

5. Анализ расчетов высоты отвала и ширины призмы возможного обрушения, выполненных графоаналитическим и аналитическим методами, показал, что учет зависимостей сцепления и плотности отвальных пород от уплотняющей нагрузки, вычисление эмпирических коэффициентов этих функций через физико-механические свойства отвальных пород позволяют повысить на 20 % точность расчета и сократить его трудоемкость, при этом расхождения между этими двумя методами составляют для отвала на прочном основании 1,5 %, а для отвала на слоистом основании 2,3%.

6. Многочисленные расчеты (для различных инженерно-геологических условий Кузбасса) устойчивости отвала на слоистом основании, выполненные с учетом изменения плотности и сцепления отвальных пород от уплотняющей нагрузки, позволили установить следующее:

- высота устойчивого отвала увеличивается при углах наклона основания менее 6° и уменьшается при углах наклона основания от 6 до 12° ;
- для полускальных пород уменьшение высоты составляет от 20 до 30 %, а для смеси полускальных и песчано-глинистых пород от 2 до 15%;
- для песчано-глинистых пород при любых углах наклона основания высота устойчивого отвала при учете плотности и сцепления отвальных пород, увеличивающихся от уплотняющей нагрузки, повышается.

На основе выполненных автором исследований для разрезов и проектных организаций Кузбасса разработано более 20 Заключений и Рекомендаций по обеспечению устойчивости отвалов и определению их оптимальных параметров.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах

В изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Заворина, Е. Н. Особенности внешнего отвалообразования для условий Ерунаковского геолого-экономического района / Е. Н. Заворина, А. Н. Куксов // Вестник КузГТУ. – 2006. – № 3. – С. 23–26.
2. Оценка поведения прибортовых массивов на разрезах Кузбасса / А. С. Ташкинов, А. А. Таюрский, А. Н. Куксов, Е. Н. Заворина // Вестник КузГТУ. – 2006. – № 6.2. – С. 40–42.
3. Бахаева, С. П. Прогноз устойчивости отвала на слоистом основании с учетом влияния уплотняющей нагрузки на свойства пород / С. П. Бахаева, Е. Н. Заворина / Безопасность труда в промышленности. – 2011. – № 8. – С. 40–43.

В прочих изданиях:

4. Хашин, В. Н. Оценка устойчивости отвалов на прочном основании аналитическим способом / В. Н. Хашин, Е. Н. Заворина // Совершенствование технологических процессов при разработке месторождений полезных ископаемых : сб. науч. тр. № 6 / Ассоциации «Кузбассуглетехнология». – Кемерово, 1992. – С. 94–99.
5. Заворина, Е. Н. Особенности внешнего отвалообразования на угольных разрезах Кузбасса / Е. Н. Заворина, А. Н. Куксов // Влияние научно-технического процесса на экономическое развитие Кузбасса : сб. материалов I Региональной науч.-практ. конф. / Филиал КузГТУ. – Прокопьевск, 2006. – С. 191–194.
6. Куксов, А. Н. О возможности размещения тяжелого горно-выемочного оборудования на уступах и внешних отвалах из четвертичных отложений / А. Н. Куксов, Е. Н. Заворина // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сб. материалов XII Междунар. науч.-практ. конф. – Кемерово, КузГТУ, 2008. – С. 164–167.
7. Заворина, Е. Н. Зависимость плотности и сцепления пород внешнего от-

вала от его высоты / Е. Н. Заворина // XI Междунар. науч.-практ. конф. Энергетическая безопасность России: новые подходы к развитию угольной промышленности. Кузбасский международный угольный форум. – Кемерово, КузГТУ, 2009. – С. 131–134.

8. Заворина, Е. Н. Совершенствование методов оценки устойчивости внешних отвалов на прочном и слоистом основаниях / Е. Н. Заворина // III Междунар. науч.-практ. конф. Перспектива развития Прокопьевско-Киселевского угольного района как составная часть комплексного инновационного плана моногородов. – Кемерово, КузГТУ, 2011. – С. 78–81.

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011615115. Параметры отвала вскрышных пород («ПОП») / С. П. Бахаева, Е. Н. Заворина, С. О. Воронин, А. С. Львов. – № 2011613168 ; заявл. 04.05.2011 ; зарегистр. 29.06.2011.

Подписано в печать 31.08.2011
Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе
Уч.-изд. л. 1,00. Тираж 120 экз. Заказ 557
КузГТУ. 650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28
Типография КузГТУ. 650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4а