

Методические указания по определению предельных параметров откосов отвалов на слабом наклонном основании

Белгород 1986

gost.e-ecolog.ru

МИНИСТЕРСТВО ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ СССР
Управление горного производства

Всесоюзный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт по осушению месторождений полезных ископаемых, специальным горным работам, рудничной геологии и маркшейдерскому делу
В И О Г Е М

УТВЕРЖДАЮ:
И.о.директора института
Ю.В.Пономаренко
10 апреля 1986 г.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПРЕДЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОТКОСОВ ОТВАЛОВ НА СЛАБОМ НАКЛОННОМ ОСНОВАНИИ

Белгород 1986

УДК 622.271.45:624.131.53

В методических указаниях изложены способы определения максимально допустимых параметров откосов отвалов, ярусов, формируемых на слабом наклонном основании, методика расчета многоярусных отвалов, позволяющая учитывать физико-механические свойства пород основания и тела отвала, нагрузки от вышележащих ярусов на основание и ранее сформированные ярусы. Приведены примеры расчета с использованием ЭВМ по программе, составленной на алгоритмическом языке ФОРТРАН-4. Дается упрощенный способ определения параметров многоярусных отвалов, позволяющий учесть напряженное состояние массива пород в отвале и изменение физико-механических свойств пород во времени.

Указания предназначаются для инженерно-технических работников, занимающихся исследованием напряженно-деформированного состояния отвалов, их проектированием и формированием.

Работа выполнена кандидатами технических наук В.П.Кудко-ким (ВИОГЕМ), П.С.Шпаковым, Г.Г.Покладом, О.И.Лягиной, Э.П. Пятковой (Кар.ПТИ), программа составлена П.С.Шпаковым. Утверждена секцией НТС ВИОГЕМ 1983 г. в качестве методических указаний.

© Всесоюзный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт по осушению месторождений полезных ископаемых, специальным горным работам, рудничной геологии и маркшейдерскому делу (ВИОГЕМ), 1986.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Открытый способ разработки месторождений в горнодобывающей промышленности находит все большее распространение. Поэтому развитие и совершенствование этого способа добычи полезных ископаемых является на современном этапе одним из главных направлений технического прогресса горнодобывающей промышленности СССР.

Для современного этапа развития открытого способа разработки месторождений характерны постоянный рост экономически выгодной глубины карьеров и их производительности по горной массе, увеличение сроков службы откосов уступов и бортов карьеров, освоение месторождений со сложными инженерно- и гидрогеологическими условиями и большой мощностью вскрышных пород, которые складируются, как правило, во внешние отвалы. Это влечет за собой увеличение высоты отвалов и площадей для их формирования, расстояний транспортировки вскрыши в отвалы, интенсификацию работ на отвалах. В таких условиях производства горных работ первостепенное значение приобретают вопросы организации ритмичной, безаварийной и эффективной работы на отвалах, что во многом зависит и от принимаемых параметров откосов ярусов и отвала в целом.

Формирование породных отвалов на непригодных для сельскохозяйственного производства территориях, к которым относятся участки пересохших озер и болот, косогоры различных профилей и т.п., получило широкое распространение в практике горнодобывающей промышленности. Это предъявляет особые требования к обоснованию параметров устойчивых отвалов, расположенных на слабом, зачастую наклонном основании. Неправильное решение данного вопроса может привести к деформациям отвалов либо к задалживанию излишней территории земельного отвода, что в обоих случаях приводит к экономическому ущербу.

Надежность прогнозирования предельно-допустимых параметров откосов и оценки степени устойчивости отвалов зависит от достоверности исходных данных по геологическим, инженерно- и гидрогеологическим условиям их формирования и принятого метода расчета, позволяющего относительно полно учесть горногеологические и горнотехнические условия, его теоретической обоснованности.

Применяемые в настоящее время графо-аналитические методы расчета имеют ряд существенных недостатков. Значения предельно допустимых параметров, определенные этими методами, вследствие неизбежных ошибок при графических построениях и измерениях не являются однозначными. В связи с этим разработан аналитический способ расчета предельно-допустимых параметров откосов отвалов, формируемых на

слабом основании, который позволяет учесть мощность слабого слоя и углы его падения. Выполнение расчетов на ЭВМ исключает субъективный подход, имеющий место при расчетах графо-аналитическими методами.

Физико-механические свойства пород тела и основания отвала во времени изменяются, что весьма сложно учесть при расчетах известными графо-аналитическими методами. Однако временной фактор существенно влияет на устойчивость отвалов, на технологию их формирования. В связи с этим разработан упрощенный способ расчета параметров многоярусных отвалов с учетом напряженного состояния пород отвала и его основания, изменения физико-механических свойств пород во времени.

Практика использования этих способов расчета в условиях Качарского, Карагайлинского и Тургайских карьеров показала хорошую сходимость результатов расчета с фактическими данными.

I. КРАТКИЙ АНАЛИЗ ПРИМЕНЯЕМЫХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА

Задача по определению максимально-допустимых параметров устойчивых отвалов решалась многими исследователями. Подробный анализ результатов исследований, выполненных до 1973 г., произведен И.И. Ермаковым [2], А.М.Мочаловым и В.Н.Хашиным [4].

Предложенные в последующие годы способы решения рассматриваемой задачи имеют следующие недостатки:

1. Криволинейные поверхности скольжения заменены плоскими [2,4, II], что, как правило, обусловливает существенные погрешности в определении параметров отвалов.

2. Мощность слабого слоя принимается равной нулю [4,5,7], т.е. задача решается для частного случая при условии развития контактного (надподошвенного) оползня.

3. Принято [2,4,5,7,II] допущение, что вертикальная часть поверхности скольжения $H_{90} = 0$ (рис. I), что не подтверждается результатами натурных наблюдений, особенно на консолидированных отвалах, сформированных из глинистых пород.

4. Угол входа θ поверхности скольжения в слабый слой рекомендуется [2,4,5,7,II] определять по упрощенной формуле

$$\theta = \frac{\pi}{4} + \frac{1}{2}\left(\varphi - \varphi'\right) - \frac{1}{2}\arcsin\left(\frac{\sin\varphi'}{\sin\varphi}\right) \qquad (I)$$

вместо полной [3,9]

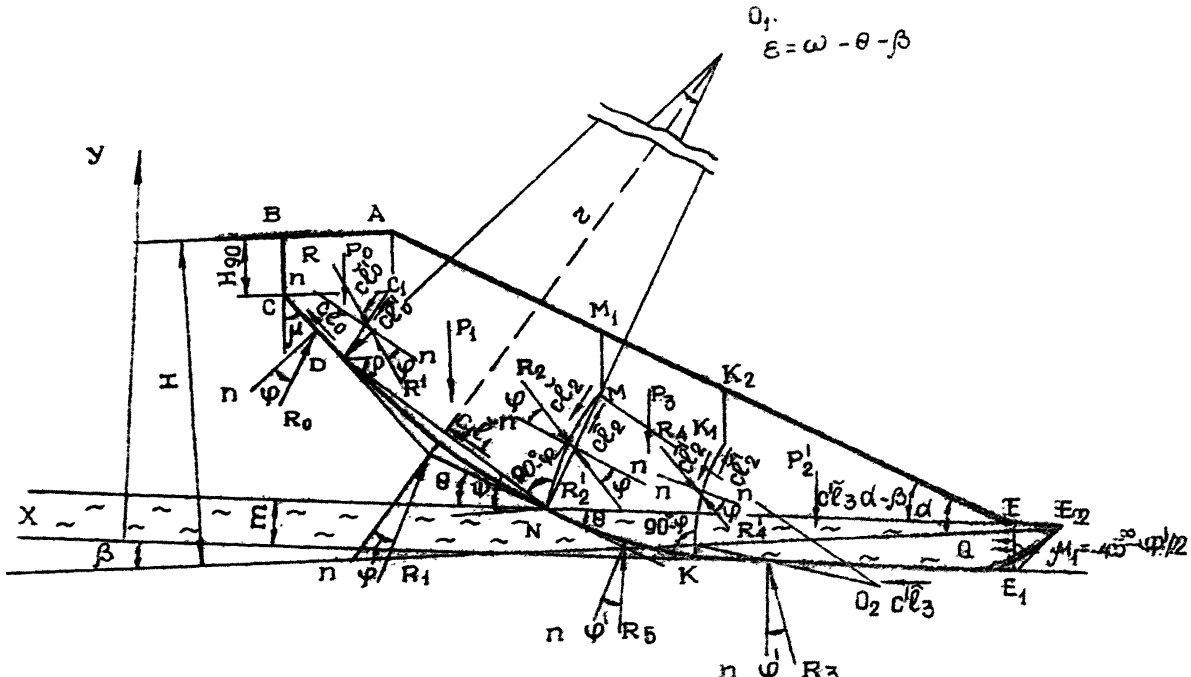

Рис. I. Расчетная схема к решению задачи по устойчивости отвала на слабом наклонном основании

$$\theta = \frac{\pi}{4} + \frac{1}{2}\left(\varphi - \varphi'\right) - \frac{1}{2}\arcsin\left[\frac{\sin\varphi'}{\sin\varphi}\left(1 - \frac{K - K'}{\sigma}\right)\right], \qquad (2)$$

где φ и φ' – угол внутреннего трения соответственно пород отвала и слабого слоя основания, град, $K = C \cdot ctg\,\varphi$, $K' = C' \cdot ctg\,\varphi'$; C и C' – сцепление соответственно пород отвала и слабого слоя основания, МПа, $\sigma = K + \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)$ – приведенное напряжение, МПа, σ_1 и σ_3 – наибольшее и наименьшее главные напряжения, МПа.

Применение формулы (I) вместо формулы (2) при оценке устойчивости неизсоких отвалов, особенно из глинистых пород, может привести к существенным погрешностям. Например, для условий карьера Качарского ГОКа $C = 0{,}0104$ МПа; $C' = 0{,}005$ МПа; $\varphi = 10{,}3^0$; $\varphi' = 10^0$; $\gamma = 18000$ кг/м^3 при $H = 10$ м вычисленный по формуле (I) угол $\theta = 7{,}4^0$, а по формуле (2) – $\theta = 17{,}1^0$.

5. В работе [7] приведенное напряжение σ принято равным минимальной величине напряжения $\sigma_0 = C \cdot ctg\,\mu$ (здесь $\mu = 45^0 - \varphi/2$), необходимой для возникновения площадок скольжения. В этом случае для условий карьера Качарского ГОКа $\theta > 50^0$, что противоречит общепризнанным теоретическим положениям [8,9].

2. МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ НАРУШЕНИЙ УСТОЙЧИВОСТИ ОТВАЛОВ НА СЛАБОМ ОСНОВАНИИ

Базируясь на результатах многолетних наблюдений за состоянием отвалов на слабых основаниях, проводимых институтами ВНИМИ, ВНИПИИ, Кар.ПТИ, НИИКМА и др., и основных положениях статики сыпучей среды [8], типовую схему формирования нарушений их устойчивости можно представить в следующем виде.

Наличие в основании слоя слабых пород (либо слабого контакта) предопределяет характер деформирования отвала (или яруса) при нарушении его устойчивости по ломаной поверхности скольжения $BCDNME_1E_2$ (см.рис. I). Под действием гравитационных сил, согласно основным положениям статики сыпучей среды, формируется призма давления $BCDNMM_1A$, в которой выделяют [3] клин давления $BCDC_1A$, (опирается на криволинейный участок поверхности скольжения CD) и призму активного давления AC_1DNMM_1, опирающуюся на криволинейный участок поверхности скольжения DN (аппроксимируется дугой окружности). Под действием веса призмы давления формируется нижняя часть призмы обрушения $M_1MNKE_1E_2E$, которую можно разделить на две призмы: призму $M_1MNKK_1K_2$, расположенную за наклонной криволинейной части поверхности скольжения NK, и лежащей в слабый слой под углом θ,

и призму $K_2K_1KE_1E_2$, опирающуюся на участок поверхности скольжения KE_1E_2, проходящей в слабом слое или по слабому контакту.

В массиве имеют место два семейства поверхностей скольжения [8]. Поверхность скольжения первого семейства, по которой действуют наибольшие сдвигающие напряжения, реализуется в поверхность разрушения $BCNKE_1E_2$. Она до глубины H_{90} ограничена трещиной отрыва BC, затем переходит в прямолинейный участок $CД$, ограничивающий клин давления, который образует угол $\mu = 45^0 - \varphi/2$ с направлением наибольшего главного напряжения. Далее следует криволинейный участок поверхности скольжения $ДN$, аппроксимированный круглоцилиндрической поверхностью, которая пересекает контакт "отвал - слабый слой основания" под углом θ, определяемым по формуле (2), полученной Г.Л.Фисенко [9]. Затем рассматриваемая поверхность скольжения проходит либо по контакту NE "отвал-основание" (в этом случае формирование призмы $M_1MNKK_1K_2$ не происходит), либо по слабому слою. В последнем случае происходит выпирание слабого слоя и оползших отвальных масс. Смещение происходит по линии NKE_1E_2, которая выходит на земную поверхность в точке E_2 и составляет с направлением наибольшего главного напряжения угол $\mu = 45^0 - \varphi/2$. Направление наибольшего главного напряжения параллельно залеганию слабого слоя.

Поверхности скольжения M_1MN и K_2K_1K второго семейства (см. рис. I), формирующиеся также с глубины H_{90} под углом μ к наибольшему главному напряжению, аппроксимируются также круглоцилиндрическими поверхностями MN и KK_1, пересекающими поверхности первого семейства в точках N и K под углом $90^0-\rho$. Формирование призмы давления $BCДNMM_1A$ обусловливает последовательное возникновение сил R и R_2, которые действуют на нижнюю часть призмы обрушения $M_1MNKE_1E_2E$, вызывая ее сдвиг. Представленная схема деформации отвалов на слабом основании подтверждается результатами теоретических, натурных и лабораторных исследований, выполненных в последние годы институтами нашей страны для различных горнодобывающих регионов.

3. ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ОТВАЛОВ НА СЛАБОМ ОСНОВАНИИ

Основные принципиальные положения аналитического решения рассматриваемой задачи впервые приведены в работе [II]. Рассматривается общий случай: определить максимально допустимые параметры устойчивого отвала на слабом наклонном основании, мощность которо-

го не превышает 0,6 Н . При решении поставленной задачи использованы следующие основные положения:

I. Активное давление создается призмой давления, являющейся монолитным телом.

2. Давление определяется в момент предельного равновесия призм, на которые расчленена призма обрушения, т.е. выполняется условие: результирующая реакции со стороны каждой поверхности скольжения отклоняется от нормали к этой поверхности в каждой точке на величину угла трения.

3. В момент предельного равновесия силы, действующие на каждую из выделенных призм, в призме обрушения $BCNKE_1E_2EA$ составляют замкнутый многоугольник, т.е. сумма их проекций на оси координат равна нулю.

С учетом сил, действующих на каждую призму (см. рис. I), величину силы активного давления R можно определить из условия равновесия призмы $BCДC_1A$, вес которой P_0 должен уравновешиваться реактивными силами R_0 и R^1 и силами сцепления $c\ell_0$. Спроектировав все силы на оси выбранной системы координат и приняв суммы проекций сил равными нулю, получим следующую систему уравнений:

$$\left.\begin{aligned} \Sigma X &= -P_0\sin\beta + c\ell_0\cos(\omega-\beta) - R_0\sin(\mu-\beta) + R^1\sin(\mu+\beta) - c\ell_0^1\cos(\omega+\beta) = 0 \\ \Sigma Y &= -P_0\cos\beta + c\ell_0\sin(\omega-\beta) + R_0\cos(\mu-\beta) + R^1\cos(\mu+\beta) + c\ell_0^1\sin(\omega+\beta) = 0 \end{aligned}\right\} \quad (3)$$

где $\omega = 90^0 - \mu = 45^0 + \varphi/2$.

Подставив в систему (3) значения $\ell_0 = \ell_0^1 = Б/2\cos\omega$ и $P_0 = \gamma Б^2 tg\omega/4 + \gamma Б \cdot H_{90}$ и решив ее относительно R^1 , получим

$$R^1 = \frac{\gamma' Б^2 + 4БC}{8\sin\mu} , \quad (4)$$

где γ' – плотность отвальных пород, кг; $Б = BA$ – ширина призмы обрушения, м; C – сцепление пород в отвале, МПа.

Расшифровка условных обозначений углов и отрезков линий приведена на рис. I.

Таким образом, со стороны призмы давления на призму активного давления будет действовать сила R , равная по величине R^1 , но противоположного направления. Анализируя аналогично предыдущему условие равновесия призмы $AC_1ДNMM_1$, вес которой P_1 , получим следующую систему уравнений:

$$\left.\begin{aligned} \Sigma X = -P_1\sin\beta - R_1\sin(\psi-\varphi) + R_2^1\cos\psi + c\ell_1\cos\psi - c\ell_2\sin(\psi-\varphi) - \\ -R\sin(\mu+\beta) + c\ell_0\cos(\omega+\beta) = 0; \end{aligned}\right\}$$

$$\left.\begin{aligned}\Sigma y = -P_1\cos\beta + R_1\cos(\psi-\varphi) + R_2'\sin\psi + c\ell_1\sin\psi + c\ell_2\cos(\psi-\varphi) - \\ -R\cos(\mu+\beta) - c\ell_0\sin(\omega+\beta) = 0\end{aligned}\right\}, \quad (5)$$

где $\psi = \rho - \beta$, $\rho = 1/2\,(\omega + \theta + \beta)$.

Решив систему (5) относительно R_2' , получим

$$R_2' = \frac{P_1\sin(\rho-\varphi)}{\cos\varphi} - c\ell_1 + \frac{R\sin(\mu+\rho-\varphi)}{\cos\varphi} - \frac{c\ell_0\cos(\omega+\rho-\varphi)}{\cos\varphi} . \quad (6)$$

Рассмотрим условие предельного равновесия для нижней части призмы обрушения (призмы упора) $M_1MNKE_1E_2E$. Из условия предельного равновесия для призмы $K_2K_1KE_1E_2E$, вес которой P_2 , следует система уравнений

$$\left.\begin{aligned}\Sigma x = -P_2'\sin\beta - R_4\cos\psi + R_3\sin\varphi' + c\check{\ell}_2'\sin(\psi-\varphi) + c'\ell_3 + Q = 0 \\ \Sigma y = -P_2'\cos\beta - R_4\sin\psi + R_3\cos\varphi' - c\check{\ell}_2'\cos(\psi-\varphi) = 0\end{aligned}\right\}, \quad (7)$$

где $Q = 2mc'ctg\,(45^\circ - \varphi'/2)$; m – мощность слабого слоя в основании отвала, м; c' и φ' – соответственно сцепление, МПа, и угол внутреннего трения, град, пород слабого слоя основания (или по слабому контакту).

Из системы уравнений (7) следует

$$R_4 = P_2'B_1 + c\check{\ell}_2'B_2 + c'\ell_3B_3 + B_4 , \quad (8)$$

где

$$B_1 = \frac{\sin(\varphi'-\beta)}{\cos(\psi+\varphi')} ; \quad B_2 = \frac{\sin(\psi+\varphi'-\varphi)}{\cos(\psi+\varphi')} ; \quad B_3 = \frac{\cos\varphi'}{\cos(\psi+\varphi')} ;$$

$$B_4 = \frac{Q\cos\varphi'}{\cos(\psi+\varphi')} ; \quad c\check{\ell}_2' = c\hat{\ell}_2'\Pi - \frac{m(c-c')}{\cos(\psi-\varphi)} ; \quad \Pi = \frac{\pi\varepsilon}{360\cdot\sin\varepsilon/2} ; \varepsilon = \omega - \theta - \beta.$$

Рассматривая далее условие предельного равновесия второй составляющей $M_1MNKK_1K_2$ нижней части призмы обрушения, вес которой P_3 , получим систему уравнений

$$\left.\begin{aligned}\Sigma x = -P_3\sin\beta + R_4'\cos\psi - c\check{\ell}_2'\sin(\psi-\varphi) + c'm\,ctg\,\theta - R_2\cos\varphi - R_5\sin(\theta-\varphi') + \\ + c\ell_2\sin(\psi-\varphi) = 0 \\ \Sigma y = -P_3\cos\beta + R_4'\sin\psi + c\check{\ell}_2'\cos(\psi-\varphi) + c'm - R_2\sin\varphi + R_5\cos(\theta-\varphi') - \\ - c\ell_2\cos(\varphi-\varphi) = 0\end{aligned}\right\}, \quad (9)$$

Решая систему уравнений (9) относительно R_2 и учитывая, что реакция R_4 определяется из выражения (8), получим

$$R_2 = P_2 B_1 - P_3 F_1 + \ell_3 F_2 + F_3 \,, \qquad (10)$$

где $P_2 = P_3 + P_2^1$; $\quad P_1 = B_1 + \dfrac{\sin(\beta+\theta-\varphi')}{\cos(\psi-\theta+\varphi')}$;

$$F_5 = \sin(\theta+\varphi-\varphi'-\psi)/\cos(\psi-\theta-\varphi'); \quad F_4 = B_2 - F_5;$$

$$F_2 = F_4 \cdot C F_6 \Pi - F_5 \cdot C F_6 + B_3 C'; \quad F_6 = \frac{\sin(\alpha-\beta)}{\cos(\alpha+\varphi-\rho)};$$

$$F_3 = C \Pi F_6 m\left[F_4 \cdot ctg(\alpha-\beta) - F_5 ctg\,\theta\right] - \frac{F_4 m(C-C')}{\cos(\psi-\varphi)} + C' m \cos\varphi' / [\sin\theta \cos(\psi-\theta+\varphi')] + B_4 \cdot$$

В отвале произвольной высоты имеет место множество поверхностей скольжения, которые могут и не являться потенциальными поверхностями разрушения (наиболее напряженными), которые не будут находиться в предельном состоянии. Поэтому, рассматривая условие предельного равновесия каждой из составляющих призм, призмы давления и нижней части призмы обрушения, определяют реакции R_2^1 и R_2 по формулам (6) и (10). Так как нижняя часть призмы обрушения $M_1MNKE_1E_2E$ находится в предельном состоянии, то реакции R_2^1 и R_2 должны быть равны между собой. В общем случае для произвольно взятой поверхности скольжения это условие может не выполняться, то есть по этой поверхности скольжения для рассматриваемой призмы будет выполняться равенство

$$R_2^1 - R_2 = R_x \,, \qquad (11)$$

где R_x – дополнительная сила, МПа, которую необходимо приложить к рассматриваемой призме, чтобы привести призму обрушения в предельное равновесие (направление действия силы R_x совпадает с направлением действия сил R_2^1 и R_2).

Минимальное значение R_x будет соответствовать наиболее напряженной, т.е. вероятной, поверхности разрушения. Для определения ширины призмы возможного обрушения $Б$ в выражении (11) вместо R_2^1 и R_2 подставим их значения, см. формулы (6) и (10). При $H = const$ продифференцируем полученное выражение по аргументу $Б$ и воспользуемся известным положением, что в экстремальных точках производная равна нулю, т.е.

$$\frac{dR_x}{dБ} = 0 \qquad (12)$$

После решения уравнения (I2) относительно Б и преобразований получим зависимость

$$Б = H W_1 + W_2 ; \qquad (I3)$$

где $W_1 = \frac{M_2}{M_1}$; $W_2 = \frac{M_3}{M_1}$;

$$M_1 = \frac{A_1(tg\omega + 8\Phi_8 K_1^2)}{4} - \frac{C_3}{2}(4K_1 M_4 \sin\beta + tg\omega) - 2A_2 + 2B_1\Phi K_1^2 + \frac{A_1 tg^2\omega}{4 tg\rho} ;$$

$$M_2 = C_6 - 2K_1 C_1 + C_3[M_4 \sin\beta (K tg\omega - 2K_1) - tg\omega] ;$$

$$M_3 = C_3 [M_4 \sin\beta (2K_1 H_{90} + K_2 tg\omega) + tg\omega H_{90}] - 2K_1 K_2 C_1 - H_{90} C_8 +$$
$$+ \frac{M_5}{2}(tg\omega + 2\sin\beta M_4 K_1) + \frac{A_3}{8} - K_1 M_4 + 2\Phi_3 F_6 M_4 K_1 F_1 ; \quad M_4 = \frac{\sin\rho}{\sin\varphi},$$

$$K = ctg\alpha - ctg\rho ; \; K_1 = \sin(\rho+\omega)/2\cos\omega \sin\rho ; \; K_2 = H_{90} \cdot ctg\rho ;$$

$$A_1 = \frac{\sin(\rho-\varphi)}{\cos\varphi} ; \; A_2 = \frac{\sin(\mu+\rho-\varphi)}{8\sin\mu\cos\psi} ; \; A_3 = 4CA_2 - \frac{C\cos(\omega+\rho-\varphi)}{2\cos\varphi\cos\omega} ;$$

$$\Phi = \Phi_4 + \frac{\Pi_1 M_4^2 \sin^2(\alpha-\beta)}{\cos^2(\alpha+\varphi-\rho)} ; \qquad \Pi_1 = \frac{\frac{\gamma_1 \cdot \varepsilon}{180} - \sin\varepsilon}{8\sin^2\varepsilon/2} ;$$

$$\Phi_1 = \frac{M_4^2 \sin\rho \sin\varphi}{2\sin\rho} ; \; \Phi_2 = \Phi_1 + \Phi - \frac{M_4^2 \cdot \sin^2\beta \Pi_1}{\sin^2\rho} ; \; \Phi_3 = \frac{m \cdot \cos(\varphi+\theta-\psi)}{2\sin\theta} ;$$

$$\Phi_4 = \frac{\sin^2\rho \sin(\alpha-\beta)\cos(\psi-\varphi)}{2\sin^2\psi\cos(\alpha+\varphi-\beta)} ; \; C_1 = A_1\Phi_2 + B_1\Phi ; \; C_2 = \frac{\Pi_1 M_4 \sin\beta \cdot A_1}{8\sin^2\rho} ;$$

$$C_3 = \frac{A_1\Pi_1}{\sin^2\rho} ; \; C_4 = B_1 M_4 m + \frac{F_8 M_4}{\gamma} ; \; C_5 = \frac{C\Pi}{\gamma \sin\rho} ; \; C_8 = \frac{A_1}{2}(1 + tg\omega/tg\rho).$$

Предельное равновесие призмы обрушения при заданных физико-механических характеристиках горных пород основания отвала, отвальных масс и результирующем угле наклона откоса отвала будет достигнуто при некоторой его высоте, когда $R_x = 0$, т.е. будет выполняться равенство

$$R_2' = R_2 . \qquad (I4)$$

Из системы уравнений (I3) и (I4) следует уравнение предельной высоты отвала, расположенного на слабом основании,

$$H = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} , \qquad (I5)$$

где $a = \frac{A_1(1+w_1 tg\alpha)}{2tg\alpha} + \frac{w_1^2(8A_2 - A_1 tg\omega)}{8} + A_1 E_1^2\left(\frac{n_1}{4\sin^2\rho} - \frac{1}{8tg\rho}\right) - E_2^2 G_1 -$

$- G_2 E_1 E_2;$

$b = \frac{A_1(W_2 E_1 - 2w_1 H_{g0})}{4} + \frac{A_1 E_1 E_3}{4tg\rho} - 2G_1 E_2 E_4 + G_2(E_3 E_2 - E_1 E_4) - \frac{G_3}{2} E_1 E_3 -$

$- G_5\left(\frac{E_1}{2} - M_4 \sin\beta E_2\right) + 2 w_1 w_2 A_2 + \frac{w_1 A_3}{\delta} - E_2 G_4 + 2 D_3 F_6 F_1 M_4 E_2;$

$d = -\frac{A_1 W_2}{2}\left(\frac{W_2 tg\omega}{4} + H_{g0}\right) - w^2 tg^2\omega\left(\frac{A_1}{8tg\rho} - \frac{n_1 A_1}{4\sin^2\rho}\right) - \left(W_2 tg\omega + H_{g0}\right) \times$

$\times\left(\frac{A_1 H_{g0}}{2tg\rho} - G_3 H_{g0}\right) + E_4\left(G_5 M_4 \sin\beta - M_4 m B_1\right) - G_1 E_4^2 + E_3\left(E_4 G_2 + \frac{G_5}{2}\right) + E_4\left(2F_1 F_6 D_3 M_4 -\right.$

$\left. - \frac{F_2 M_4}{\delta}\right) + A_2 w^2 + \frac{A_3 w}{\delta} + \frac{m^2 ctg\theta B_1}{2} - F_1 E_5 - \frac{F_3}{\delta} + \frac{m ctg\theta F_2}{\delta};$

$E_1 = 2 - w_1 tg\omega;$ $\quad E_2 = K + w_1 K_1;$ $\quad E_3 = 2H_{g0} + w_2 tg\omega;$

$E_4 = K_2 + K_1 w_2;$

$E_5 = m D_3 F_6 [ctg\theta - ctg(\alpha - \beta)].$

Из выражений (I3) и (I5) следует, что ширина призмы возможного обрушения при предельной высоте отвала на слабом основании будет равна

$$B = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ad}}{2a} w_1 + w_2 . \qquad (I6)$$

Если под высотой отвала понимать его максимальную мощность, то ее значение можно определить из выражения

$$H_1 = \frac{H \cdot \sin(\alpha - \beta)}{\sin\alpha \cdot \cos\beta} . \qquad (I7)$$

Следует иметь в виду, что значение H, вычисленное по формуле (I5), не должно превышать значения, рассчитанного при условии отсутствия слабого слоя $m = 0$. При наличии слабого слоя в основании отвала в первую очередь необходимо выполнить расчет по слабому контакту "отвал-основание" для случая $m = 0$, а затем с учетом мощности слабого слоя при $m = const$. Необходимость выполнения указанных расчетов вызвана тем, что в определенных условиях (при весьма близких прочностных характеристиках пород отвала и слабого слоя) высота отвала H при $m = 0$ может оказаться меньше высоты, вычисленной при $m = const$.

При решении рассматриваемой задачи существенное значение имеет способ определения угла θ. В.В.Соколовский отмечал [8], что в точке соприкосновения или входа поверхности скольжения со слабым слоем одновременно должны удовлетворяться условия обычного и специального предельного равновесия:

$$\left.\begin{aligned}\tau &= c + \sigma_n \operatorname{tg}\varphi \\ \tau_t &= c' + \sigma_{nt} \operatorname{tg}\varphi'\end{aligned}\right\}, \qquad (18)$$

где τ и τ_t – сдвигающие напряжения соответственно по площадкам обычного и специального предельного напряженного состояния, МПа; σ_n и σ_{nt} – нормальные напряжения соответственно к этим площадкам, МПа; c и c' – сцепление соответственно пород отвала и его основания (или по слабому контакту), МПа; φ и φ' – угол внутреннего трения соответственно пород отвала и его основания (или по слабому контакту), град.

Для этого случая Г.Л.Фисенко [9] получена формула (2), позволяющая определять угол θ, образуемый площадками скольжения обычного и специального предельного напряженного состояния. Следует отметить, что в общем случае значение приведенного напряжения σ, входящего в формулу (2), не известно, так как не известна высота отвала, при которой наступает предельное равновесие рассматриваемой системы "отвал–основание". Известно, что для плоской задачи приведенное напряжение можно определить из зависимости

$$\sigma = c \cdot \operatorname{ctg}\varphi + \tfrac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3), \qquad (19)$$

где σ_1 и σ_3 – соответственно наибольшее и наименьшее главные напряжения, действующие по площадке скольжения, МПа.

Из круга напряжений следует, что в момент предельного равновесия при сдвиге на площадке, составляющей угол $\mu = 45^\circ - \varphi/2$ с направлением наибольшего главного напряжения σ_1, действует главное напряжение, величина которого определяется по формуле

$$\sigma_1 = 2c \operatorname{ctg}(45^\circ - \varphi/2) + \sigma_3 \operatorname{ctg}^2(45^\circ - \varphi/2), \qquad (20)$$

где σ_3 – наименьшее главное напряжение, действующее по площадке однига, МПа.

Учитывая, что

$$\sigma_1 = \gamma H, \qquad (21)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с^2; γ – плотность отвальных масс, кг/м^3; H – высота отвала, м, из зависимости(20) следует

$$\sigma_3 = \frac{q\gamma H}{ctg^2\mu} - \frac{2c}{ctg\mu}. \qquad (22)$$

Таким образом, для заданной высоты отвала приведенное напряжение можно определять по формуле, которая следует из выражения (I9), если учесть формулы (2I) и (22):

$$\sigma = c(ctg\varphi - tg\mu) + \frac{q\gamma H}{2}(1+tg^2\mu). \qquad (23)$$

Формула (2) для определения угла θ, если учесть выражение(23), запишется в виде

$$\theta = \frac{\pi}{4} \pm \frac{1}{2}(\varphi - \varphi') - \frac{1}{2}\arcsin\left[\frac{\sin\varphi'}{\sin\varphi}\left(1 - \frac{c\,ctg\varphi - c'ctg\,\varphi'}{c(ctg\,\varphi - tg\mu) + \frac{q\gamma H}{2}(1+tg^2\mu)}\right)\right]. \qquad (24)$$

При вычислении угла θ по формулам (2) и (24) возникают некоторые затруднения, связанные с незнанием истинной высоты отвала H. Поэтому на первой стадии расчет угла θ можно выполнять, приняв приближенную величину высоты, определенную без учета слабого слоя. Если же значение H, определенное с учетом слабого слоя, существенно отличается от принятого приближенного, то расчет следует повторить при уточненной высоте.

При определении параметров отвалов на слабом основании по разработанной методике необходимо выполнять большой объем вычислений. В связи с этим составлен алгоритм решения задачи и программа на языке ФОРТРАН для ЭВМ ЕС–I022.

4. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ ПАРАМЕТРОВ ОТВАЛОВ НА СЛАБОМ ОСНОВАНИИ

Оценка разработанной методики выполнена путем сравнения результатов расчетов параметров отвалов на слабом основании с данными расчетов тех же параметров, при тех же исходных данных, по ранее разработанным методикам [4,6,II] . Расчеты выполнены при следующих расчетных данных: результирующий угол наклона откоса яруса отвала α = = 27^0 30′; плотность отвальных масс γ = I800 кг/м^3; угол внутреннего трения отвальных масс φ = I0^0 20′; угол внутреннего трения по-

род слабого слоя основания (по слабому контакту) $\varphi' = 10^{0}$; сцепление пород слабого слоя основания (по слабому контакту) C = = 0,005 МПа. Результаты расчетов предельной высоты яруса отвала H и ширины призмы обрушения $Б$ для условий карьера Качарского ГОКа при мощности слабого слоя основания $m = 0$ и угле его наклона $\beta = 0^{0}$ приведены в табл. I, а при $m = I$ м и $\beta = 5^{0}$ в табл. 2.

Таблица I

Методика расчета	Параметры	Сцепление пород отвала C, МПа					
		0,0I	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06
Предлагаемая	h	7,0	I2,6	I7,6	22,6	27,5	32,5
	Б	I,7	3,2	4,5	5,9	7,2	8,5
Мочалова А.М. и др.	h	8,4	I4,0	I9,6	25,3	30,9	36,5
	Б	6,7	9,9	I4,2	I8,4	22,7	27,0
Шпакова П.С. и др.	h	8,4	I4,0	I9,6	25,3	30,9	36,5
	Б	6,7	9,9	I4,2	I8,4	22,7	27,0
Окатова Р.П.	h	6,4	II,3	I5,6	20,0	24,3	28,6
	Б	2,4	3,8	5,I	6,5	7,8	9,2

Примечание. Значения угла θ определялись по формуле (24).

Таблица 2

Методика расчета	Параметры	Сцепление пород отвала C, МПа					
		0,0I	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06
Предлагаемая	h	5,3 / 5,6	9,4 / 9,4	I3,5 / I3,6	I7,6 / I8,0	2I,8 / 22,4	26,0 / 26,8
	Б	I,8 / 2,2	2,5 / 3,2	3,5 / 4,5	4,6 / 5,8	5,7 / 7,2	6,8 / 8,6
Мочалова А.М. и др.	h	6,I / 6,5	I0,5 / I2,I	I5,2 / I7,9	I9,9 / 23,7	24, / 29,6	29,3 / 35,4
	Б	4,8 / 8,3	8,6 / I5,6	I2,4 / 23,0	I6,4 / 30,6	20,4 / 38,0	24,4 / 45,8
Шпакова П.С. и др.	h	6,4 / 6,6	I0,7 / I2,2	I5,3 / I8,0	20,I / 23,8	24,8 / 29,7	29,6 / 35,6
	Б	6,0 / 6,6	7,I / I2,4	I0,3 / I8,3	I3,5 / 24,3	I6,7 / 30,3	20,0 / 36,4

Примечание. В числителе результаты расчетов при определении значений угла θ по формуле (24), в знаменателе – по формуле (I).

По данным натурных наблюдений за состоянием отвалов ширина призмы обрушения составляет (0,25–0,7) h . Из приведенных в табл. I и 2 данных следует, что при определении ширины призмы обрушения Б разработанными ранее методами [4,6,II] получаются значения, превышающие или сопоставимые с высотой яруса h , а по предложенному методу – сопоставимые с данными натурных наблюдений. Причем, по сравниваемым методам расчета получаются разные значения предельной высоты яруса (по предложенному методу на 20–35% меньше). При разнице в значениях высот на 20–35% величина Б отличается в 3–4 раза.

Отметим также, что при тех же исходных данных по физико-механическим свойствам пород и $\beta = 0^0$ выполнен расчет параметров яруса по методике НИИМИ [3] (рассмотрен изотропный массив на устойчивом основании). В результате получено, что при $\alpha = 27^0\ 30'$, $H = 8$ м и $Б = 1{,}6$ м.

Результаты расчетов параметров отвала при $\alpha = 34^0$; $\beta = 5^0$; $\varphi = 28^0$; $\varphi' = 10^0$; $C = 0{,}025$ МПа; $C' = 0{,}005$ МПа; $\gamma = 1800$ кг/м^3 приведены в табл. 3.

Таблица 3

Методика расчета	При $\beta = 0^\circ$ $m = 0$ высота отвала	Параметры отвала при мощности слабого слоя $m = 0$			Параметры отвала при мощности слабого слоя $m = 1$ м		
		Высота Н, м	Мощность, H_I, м	Ширина призмы обруш. Б, м	Высота Н, м	Мощность H_I, м	Ширина призмы обруш. Б, м
I	2	3	4	5	6	7	8
Предлагаемая	43,8	28,4	24,7	6,I	24,3	2I,2	5,2
Мочалова А.М. и др.	43,2 43,8	24,7 24,7	2I,4 2I,4	II,I II,0	22,7 22,7	I9,7 I9,7	I0,6 I0,5
Шпакова П.С. и др.	43,2 43,8	24,4 24,9	2I,3 2I,7	9,6 9,6	22,4 22,9	I9,5 I9,9	9,I 9,I
Окатова Р.П.	45,7 43,8	2I,6 2I,7	—	4,3 4,3	—	—	—

Примечание. В числителе приведены значения параметров, полученных по формулам авторов рассматриваемых методик, в знаменателе – с учетом угла θ , определенного по формуле (2).

Из табл. 3 следует, что при $\beta = 0$ и $m = 0$ предельная высота отвала, определенная анализируемыми методами, отличается на 1,4-4,3% от значения H, вычисленного по формулам (2) или (24), т.е. сходимость результатов удовлетворительная. Все рассматриваемые методы "реагируют" на изменение угла наклона основания. Но по методам [4,6,7,11] значения H получились практически равными и отличаются от величины высоты, вычисленной по разработанной методике на 6,6 - 13,8% (в зависимости от мощности слабого слоя), а ширина призмы обрушения отличается в 1,5-2 раза. Применение метода НИИМИ [3] для данных условий дает завышенное значение высоты H = = 102 м и заниженное значение ширины призмы обрушения $Б$ = 6,6 м.

Анализ данных, приведенных в табл. 1-3, подтверждает справедливость ранее приведенных замечаний об имеющихся недостатках у существующих методов расчета параметров отвалов. Очевидно, что значение θ должно определяться по формулам (2) или (24), так как применение сокращенной формулы (1) приводит к завышению значений H и $Б$, особенно для отвалов из глинистых пород. Таким образом, изучет при выполнении расчетов величины $H_{g\theta}$, упрощенная трактовка угла θ и замена криволинейной поверхности скольжения прямолинейными отрезками приводят к завышенным значениям предельных параметров откосов отвалов (особенно величины $Б$) даже по сравнению с их значениями, определенными по методу [8] без учета слабого слоя. Последнее допущение оправдано лишь при определении предельной высоты H откоса отвала, сложенного сыпучими породами, когда значение C близко к нулю.

Следует также иметь в виду, что методики [4,5,7] не позволяют учесть мощность слабого слоя, т.е. имеют ограниченное применение.

Разработанная методика расчета предельных параметров отвалов на слабом наклонном основании наиболее полно теоретически обоснована, результаты расчетов подтверждаются данными натурных наблюдений за состоянием отвалов на Качарском, Карагайлинском и Тургайских карьерах. Эта методика может быть использована для определения профиля равноустойчивого выпуклого многоярусного отвала. Для этого при заданных прочностных характеристиках пород основания и тела отвала вводится переменный угол наклона откоса через заданный шаг и вычисляются параметры предельного откоса (высота и ширина призмы обрушения). Если вынести на чертеж точки с ординатами, равными вычисленным значениям высот, и через эти точки провести плавную линию, то получим профиль откоса устойчивого отвала. Вписывая в построенный профиль отдельные ярусы, получим многоярусный отвал.

5. ПРИМЕР РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ОТВАЛА НА ЭВМ ПО РАЗРАБОТАННОЙ ПРОГРАММЕ

Для определения предельных параметров откоса отвала, расположенного на слабом наклонном основании, с помощью ЭВМ по разработанной методике необходимо составить директиву:

```
//␣OPTION ␣LINK
 ␣AKTION ␣NOMAP
 ␣INCLUDE␣SPOCH 11
//␣EXEC ␣LNKEDT
//␣EXEC
```

```
00.5, 02.0, 00.5, 00.0, I0.0, 05.0, 24.5, 27.5, 0I.0,
0I.0, 04.0, I2.0, I0.0, 0,05, 0I.8, I2.0
(Z I0, Z II, Z I2, B I0, B II, B I2, A I0, A II, A I2,
C I0, C II, F , FI, CI, G, HP ).
```

В директиву входят следующие исходные данные:

Z I0, Z II, Z I2 – начальная, конечная мощность слабого слоя и шаг ее изменения, м;

B I0, B II, B I2 – начальный, конечный угол наклона слабого слоя и шаг его изменения, град;

A I0, A II, A I2 – начальный, конечный угол наклона откоса отвала и шаг его изменения, град;

C I0, C II – начальное и конечное значения величины сцепления массива пород отвала, т/м^2;

F – угол внутреннего трения массива пород отвала, град;

FI – угол внутреннего трения породы слабого слоя, град;

C I – сцепление породы слабого слоя, т/м^2;

G – объемный вес породы отвала, т/м^3;

HP – приведенное напряжение, т/м^2.

Для первой расчетной точки принимается значение HP равным γH (здесь γ – объемный вес породы, складируемой в отвал, т/м^3; H – высота устойчивого откоса отвала, вычисленная без учета слабого слоя) или по результатам экспериментальных измерений напряжений. В последующих расчетных точках значение HP вычисляется автоматически.

Ввод исходных данных производится с форматом (9 (F 4.I,Iχ)). Для лучшего визуального контроля каждое последующее значение вводимых данных от предыдущего отделяется запятой.

В приложении дана распечатка (предусмотрено программой) исход - ных данных с целью контроля правильности их ввода и результаты расчетов параметров отвала: высота и мощность отвала, берма безопас - ности (ширина призмы возможного обрушения).

В связи с тем, что исходные данные не изменяются, кроме угла наклона откоса отвала, в приложении исходные данные в полном объеме приведены только один раз, а ниже указывается измененное значение угла откоса.

6. ГРАФО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ СПОСОБ ПОСТРОЕНИЯ ПРОФИЛЯ УСТОЙЧИВОГО МНОГОЯРУСНОГО ОТВАЛА

При формировании многоярусных отвалов важно правильно предрассчитать его профиль. Весьма сложна задача в этой постановке для случая многоярусного отвала из пород с низкими прочностными характеристиками, формируемого на слабом основании. Ведь устойчивость и емкость многоярусного отвала зависят от его параметров, физико-механических свойств складируемых пород и пород основания и изменения этих свойств во времени, т.е. по мере наращивания отвала. Извест - ные на данный момент методики расчета параметров устойчивых многоярусных отвалов [1,3,4] не позволяют учесть всю совокупность основных влияющих на их устойчивость факторов, что ограничивает область применения этих методик. Главное, что при расчетах этими методами не удается учесть изменения напряженного состояния массива пород под действием вышележащих ярусов и уплотнение свежеотсыпанных по - род во времени.

Разработанная методика построения профиля многоярусных отвалов позволяет учесть основные факторы, от которых зависит длительная устойчивость отвалов: прочность складируемых в отвал пород и изменение ее во времени; мощность, угол наклона и физико-механические свойства пород слабого слоя в основании отвала; изменение напряженного состояния массива пород в отвале под действием вышележащего свежеотсыпанного яруса.

Для построения профиля многоярусного отвала необходимы следую - щие исходные данные: α - угол естественного откоса пород; склад - дируемых в отвал, град; γ, φ и C - соответственно плотность, кг/м^3, угол внутреннего трения, град, и сцепление, МПа, свежеотсыпанных в отвал пород; γ_1, φ_1 и C_1 - соответственно плотность, кг/м^3, угол внутреннего трения, град, и сцепление, МПа, уплотненных в отвале пород; γ', φ' и C' - соответственно плотность, кг/м^3 угол внутреннего трения, град, и сцепление, МПа, пород слабого слоя;

m и β – соответственно мощность, м, и угол наклона, град, слабого слоя.

Профиль устойчивого многоярусного отвала определяется следующим образом. Рассчитываются вышеизложенным или другим методом расчета при известных исходных данных α, γ, φ и C предельная высота яруса h_1' и ширина призмы возможного обрушения $Б_1'$ без учета слабого слоя, его мощности и угла наклона (рис.2,а). Затем определяются параметры h_1'' и $Б_1''$ с учетом слабого слоя (контакта) в основании отвала. За окончательную высоту H_1 устойчивого яруса принимается наименьшее из значений h_1' и h_1'', т.е., если $h_1' > h_1''$, то $H_1 = h_1''$.

Определяется ширина бермы безопасности B_1 между первым и вторым ярусами по верхней площадке первого яруса. Для этого выполняется расчет с использованием исходных данных для свежеотсыпанных пород α, γ, φ и C без учета слабого слоя, с целью определения предельной высоты H_2 второго яруса и ширины призмы возможного обрушения $Б_2$ (рис. 2,б). Расчет выполняется принятым методом. Следует иметь в виду, что ширина бермы безопасности должна удовлетворять двум условиям:

1. Второй ярус не должен влиять на напряженное состояние призмы возможного обрушения первого яруса, т.е. потенциальная (наиболее напряженная) поверхность скольжения первого яруса должна находиться вне зоны концентрации напряжений (сжимающих), формируемой под действием второго яруса.

2. Общая устойчивость двухъярусного отвала при предельно допустимых высотах H_1 и H_2 устойчивых ярусов обеспечивается.

Проверка по первому условию выполняется путем учета нагрузок на первый ярус от веса пород второго яруса. По форме эпюра этих нагрузок (напряжений) повторяет конфигурацию поверхности второго яруса, т.е. на участке $a = H_2 \operatorname{ctg} \alpha$ эпюра является треугольником, а на участке β – прямоугольником (рис. 3). Сжимающие напряжения в массиве пород, формирующиеся за счет нагрузок от веса пород второго отвала, можно определить по зависимости [10]

$$\sigma_z = \mathcal{J} \cdot P, \qquad (25)$$

где $\mathcal{J} = f(a/z, \beta/z)$ – функция относительных величин a/z и β/z, значения которой определяются по графику Остерберга (см. рис. 3); a и β – длина соответственно треугольной и прямоугольной частей эпюры, м; z – глубина рассматриваемой точки, м; P – величина удельной нагрузки в прямоугольной части и максимальной нагрузки в треугольной части эпюры, кг/м^2.

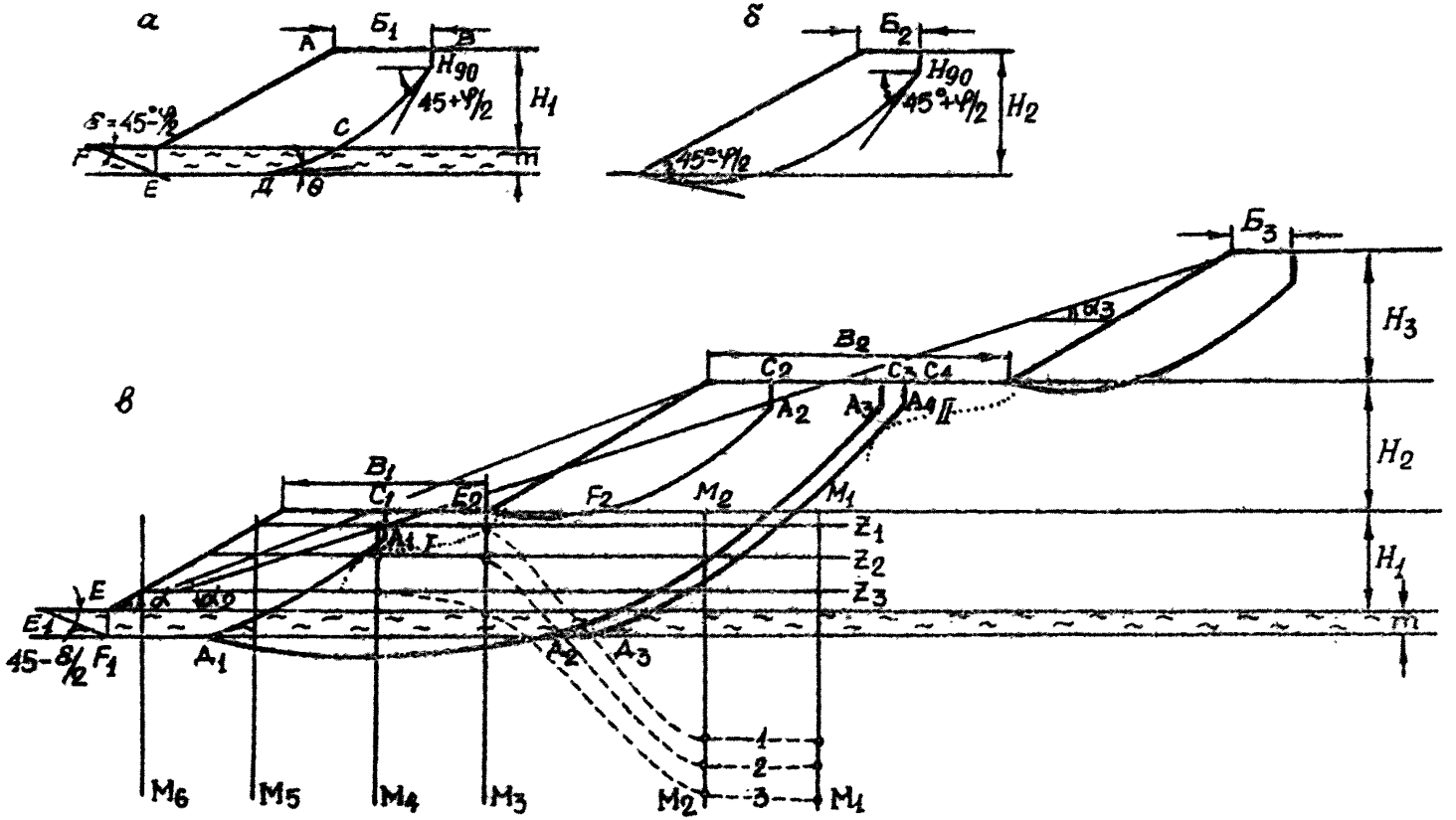

Рис. 2. Схема расчета устойчивости многопрусного отвала на слабом основании

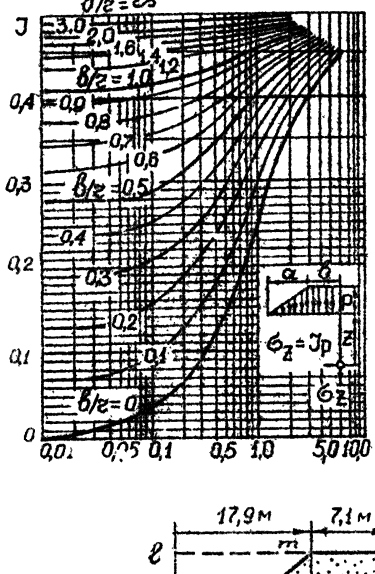

Рис. 3. График зависимости сжимающих напряжений от нагрузки, изменяющейся по закону прямой (по Остербергу)

Сжимающие напряжения σ_z, возникающие в результате отсыпки второго яруса, определяются для различных глубин z_1, z_2, z_3,... по вертикальным сечениям M_1, M_2, M_3, ... (см. рис. 2,в).

Рассмотрим пример расчета сжимающих напряжений σ_z в точках А и В, расположенных на вертикальных сечениях M_1 и M_3 на глубине $z = 4$ м (рис. 4).

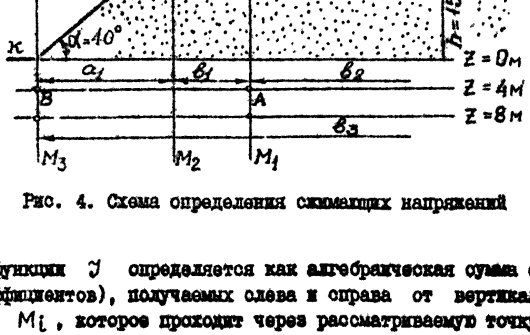

Рис. 4. Схема определения сжимающих напряжений

Значение функции J определяется как алгебраическая сумма отношений (коэффициентов), получаемых слева и справа от вертикального сечения M_i, которое проходит через рассматриваемую точку. В частности, для точки А при нагрузке, действующей слева от вертикального сечения M_1, $a_1 : z = 17,9 : 4 = 4,5$ и $b_1 : z = 7,1 : 4 = 1,8$. По графику Остерберга (см. рис. 3) определяем, что $J_A = 0,49$. При

нагрузке, действующей справа от вертикального сечения M_1, $a : z = 0$ и $b_2 : z = \infty$ (так как справа от рассматриваемого сечения треугольная часть эпюры удалена на большое расстояние и на величину σ_z влиять эта часть эпюры нагрузок не будет). Из графика Остерберга следует, что $\vartheta_п = 0{,}50$.

Учитывая, что

$$\sigma_z = \vartheta P = (\vartheta_A + \vartheta_п) P, \qquad (26)$$

где $P = \gamma H_2$, получим $\sigma_{zA} = (0{,}49 + 0{,}50)\ P$.

Для определения σ_z в точке B (см. рис. 4) приложим фиктивную нагрузку, эпюра которой представляет треугольник klm. При полной нагрузке на первый ярус, включая и фиктивную, получим $a_1 : z = 0$ и $b_3 : z = \infty$. Из рис. 4 следует, что $\vartheta_п = 0{,}50$. При фиктивной нагрузке klm имеем $a_1 : z = 17{,}9 : 4 = 4{,}5$ и $b : z = 0$. По графику Остерберга находим $\vartheta'_п = 0{,}425$. Тогда $\sigma_{zB} = (\vartheta_п - \vartheta'_п) P = (0{,}50 - 0{,}425)\ P = 0{,}075\,P$.

После вычислений для каждой из глубин z_1, z_2, z_3,... (см. рис. 2, в) строятся эпюры распределения скимающих напряжений (линии I, 2, 3 на рис. 2, в) и через точки $\sigma_z = 0$ проводится плавная линия I (на рис. 2, в она обозначена точками), которая является границей зоны влияния второго яруса на напряженное состояние первого яруса.

Ширина бермы безопасности B_1 принимается такой, чтобы потенциальная поверхность разрушения $E_1 F_1 Д_1 A_1 C_1$ не проходила через зону скимающих напряжений, т.е. не пересекала линию I. Значение B_1 определяется путем графических построений.

Производится проверка выполнения второго условия путем расчета степени устойчивости двухъярусного отвала с учетом слабого слоя (контакта) в основании отвала и без учета слабого слоя. Второе условие выполняется, если двухъярусный отвал имеет запас устойчивости не менее нормативного, т.е. коэффициент запаса устойчивости не менее 1,2 [3]. Если в результате расчетов получили, что коэффициент запаса устойчивости двухъярусного отвала меньше нормативного, то необходимо увеличить B_1 и выполнить еще раз поверочный расчет. После этого отстраиваются потенциальные поверхности разрушения $E_2 F_2 A_2 C_2$ второго яруса, $E Д_1 Д_2 A_3 C_3$ двухъярусного отвала (без учета слабого слоя) и $E_1 F_1 Д_3 A_4 C_4$ двухъярусного отвала (с учетом слабого слоя).

При выполнении поверочных расчетов следует иметь в виду, что к моменту отсыпки пород в вышележащий ярус происходит уплотнение по-

род основания и первого яруса. Поэтому в расчетах следует принимать расчетные характеристики отвальных пород с учетом уплотнения, т.е. для первого яруса принимать значения γ_1, φ_1 и C_1. Если отношение заходки на предельном контуре отвала по ширине, близкой к значению $Б_2$, или формируется бульдозерный отвал, то должны быть откорректированы, с учетом уплотнения, исходные данные по физико-механическим свойствам пород второго яруса.

Аналогично изложенному определяются параметры третьего яруса отвала и ширина берм безопасности B_2 между вторым и третьим ярусами. Если физико-механические характеристики горных пород, складируемых в третий ярус, не отличаются от характеристик пород второго яруса, то можно принимать высоту третьего яруса $H_3 = H_2$, а $Б_3 = Б_2$.

Определив границу зоны сжимающих напряжений во втором ярусе, формируемой за счет веса пород третьего яруса, по изложенной выше методике (см. рис. 2,в, линия II), устанавливается ширина берм безопасности B_2 по верхней площадке второго яруса. В данном случае первое условие будет выполнено, если потенциальные поверхности $E_2F_2A_2C_2$, $ЕД_1Д_2A_3C_3$ и $E_1F_1Д_3A_4C_4$ не проходят через зону сжимающих напряжений σ_z, т.е. ни одна из них не пересекает линию II. В противном случае должна быть произведена корректировка (увеличение) ширины берм безопасности B_2.

Аналогично определяются параметры всех вышележащих ярусов. При этом следует иметь в виду, что сумма высот всех ярусов отвала не должна превышать предельно допустимую высоту отвала при нормативном коэффициенте запаса его устойчивости. Контроль целесообразно производить путем выполнения поверочного расчета по разработанной методике расчета параметров отвалов на слабом основании. В данном случае в качестве исходных данных для расчета принимаются генеральный угол наклона откоса отвала $\alpha_г$, который определяется графически при отстройке профиля многоярусного отвала, физико-механические свойства уплотненных пород отвала γ_1, φ_1 и C_1 и характеристики пород слабого слоя основания.

При складировании в ярусах пород, отличающихся по прочности, необходимо поверочный расчет выполнить по средневзвешенным показателям массива пород отвала [3]:

$$C_{ср} = \frac{C_1 \ell_1 + C_2 \ell_2 + \dots + C_n \ell_n}{\ell_1 + \ell_2 + \dots + \ell_n}, \qquad (27)$$

$$\varphi_{ср} = arctg \frac{\sigma_1 \ell_1 tg\varphi_1 + \sigma_2 \ell_2 tg\varphi_2 + \dots + \sigma_n \ell_n tg\varphi_n}{\sum_{i=1}^{n} \sigma_i \ell_i}, \qquad (28)$$

где C_i – сцепление массива пород в i-ом ярусе, МПа; φ_i – угол внутреннего трения пород i-го яруса, град. ℓ_i – длина участка потенциальной поверхности разрушения в пределах i-го яруса, м; σ_i – приближенные значения нормального напряжения в середине соответствующих участков потенциальной поверхности разрушения.

Для определения допустимой высоты отвала при заданном коэффициенте запаса устойчивости в ЭВМ вводятся значения расчетных прочностных характеристик пород отвала и слабого слоя основания, определяемых по формуле [3],

$$C_n = \frac{C_u}{n} \quad ; \quad \varphi_n = arc\,tg \frac{tg\,\varphi_u}{n}, \qquad (29)$$

где C_u и φ_u – исходные значения сцепления, МПа, и угол внутреннего трения, град.

Изложенная методика построения профилей многоярусных отвалов опробирована при определении параметров трехярусного бульдозерного отвала Качарского карьера. В отвал складируются четвертичные суглинки и глины, неогеновые пестроцветные и палеогеновые чеганские глины. Значительная часть отвала формируется на территории мелководных пересохших озер, где под тонким слоем воды залегают озерно-болотистые отложения мощностью 1,5–2 м. Отвал формируется на неподготовленном основании.

В расчетах приняты следующие исходные данные:
$\alpha = 27^0 30'$; $\gamma = 1800$ кг/м^3; $\varphi = 10^0 20'$; $C = 0{,}0104$ МПа; $\varphi_1 = 10^0 40'$; $C_1 = 0{,}047$ МПа. Для слабого слоя основания $\varphi' = 10^0$; $C' = 0{,}005$ МПа.

Результаты расчетов:

При формировании отвала на слабом основании (озерная часть) $H_1 = 7$ м; $H_2 = H_3 = 9$ м; $B_1 = 15{,}4$ м; $B_2 = 23{,}5$ м. Результирующий угол наклона трехъярусного отвала $\alpha_r = 16^0$, а предельная высота отвала $H = 56$ м. Отвал устойчив.

При формировании отвала на относительно прочном основании (береговая часть) $H_1 = H_2 = H_3 = 9$ м; $B_1 = 11{,}2$ м; $B_2 = 17{,}5$ м. Результирующий угол наклона трехъярусного отвала $\alpha_r = 18^0 30'$, а предельная высота отвала $H = 80$ м. Отвал устойчив.

На рис. 5 приведены профили многоярусных отвалов глинистых пород на устойчивом основании для условий Качарского и Ангельдинского месторождений. Профили отстроены несколькими методами, что позволяет в сравнении выявить преимущества и недостатки методик их построения и самих профилей.

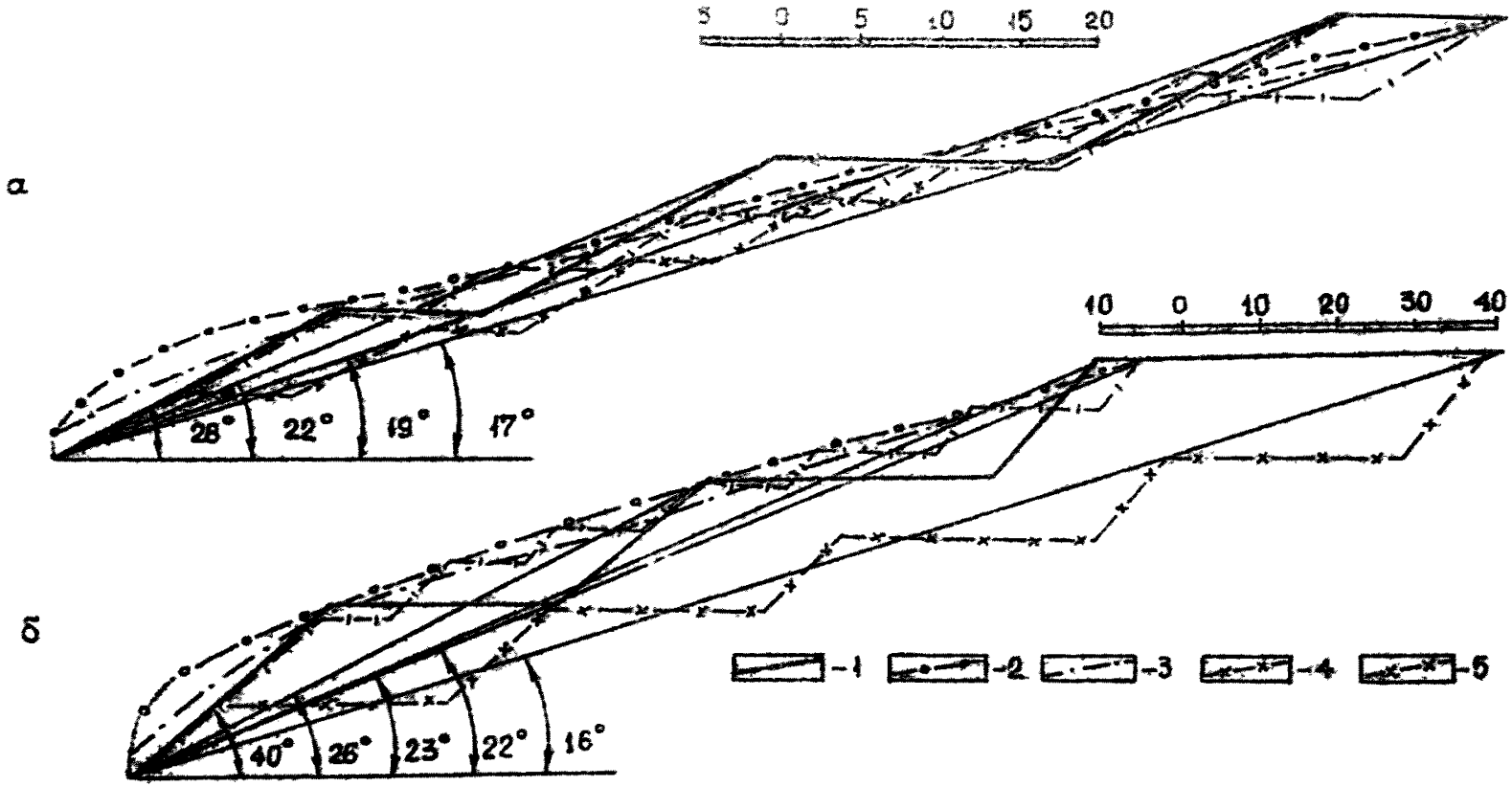

Рис. 5. Профили многоярусных отвалов на устойчивом основании:
а – для условий Качарского месторождения; б – для условий Аманжельдинского месторождения; I – по разработанной методике построения; 2 – контур выпуклого откоса по В.Т. Сапожникову; 3 – контур выпуклого откоса по А.М.Мочалову; 4 – профиль отвала по А.М.Мочалову; 5 – профиль отвала по А.М.Демину

При формировании отвалов на устойчивом основании [3] рекомендуется выпуклый контур, отстроенный по графику предельных очертаний откосов выпуклого профиля (вписываются отдельные ярусы, что позволяет получить ступенчатый профиль отвала). Для всех вариантов производится оценка устойчивости по нескольким поверхностям скольжения для каждого яруса, так как выпуклый и ступенчатый профили отличаются. В данном случае откосы выпуклого профиля являются лишь ориентировочными для отстройки ступенчатого профиля многоярусного отвала. Такая методика отстройки оправдана в том случае, когда в выпуклый профиль вписываются ярусы небольшой высоты, и ступенчатый профиль в среднем повторяет выпуклый профиль. Однако, такой ступенчатый профиль зачастую экономически не выгодно и технологически не возможно формировать. Предложенный графо-аналитический способ построения профилей многоярусных отвалов позволяет решать поставленную задачу с большей точностью при меньшем объеме поверочных расчетов.

Методика А.М. Мочалова - В.Н. Хашина [4] позволяет определять профиль многоярусных отвалов, формируемых как на устойчивом(см. рис 5) так и на слабом (рис 6) основании. Для построения выпуклого профиля откоса отвала на слабом основании необходимо выполнить несколько расчетов. Авторы метода предлагают производить серию расчетов с углами наклона откосов отвала с шагом 3-5°. Для известных способов расчета отвалов на слабом основании отсутствуют графики и

Таблица 4

Методика отстройки профиля откоса многоярусного отвала	Параметры отвала для условий месторождения											
	Качарского на основании						Амангельдинского на основании					
	устойчивом			слабом			устойчивом			слабом		
	Высота, Н, м	Угол наклона откоса α_r, град	Количество ярусов	Высота, Н, м	Угол наклона откоса α_r, град	Количество ярусов	Высота, Н, м	Угол наклона откоса α_r, град	Количество ярусов	Высота, Н, м	Угол наклона откоса α_r, град	Количество ярусов
Рекомендуемая	27	I8,5	3	25	I6	3	50	22	3	43	20	3
А.М. Мочалова	27	I7,0	6	25	I6	4	50	2I	7	43	20	3
А.М. Демина	27	I8,5	7	-	-	-	50	I6	5	-	-	-

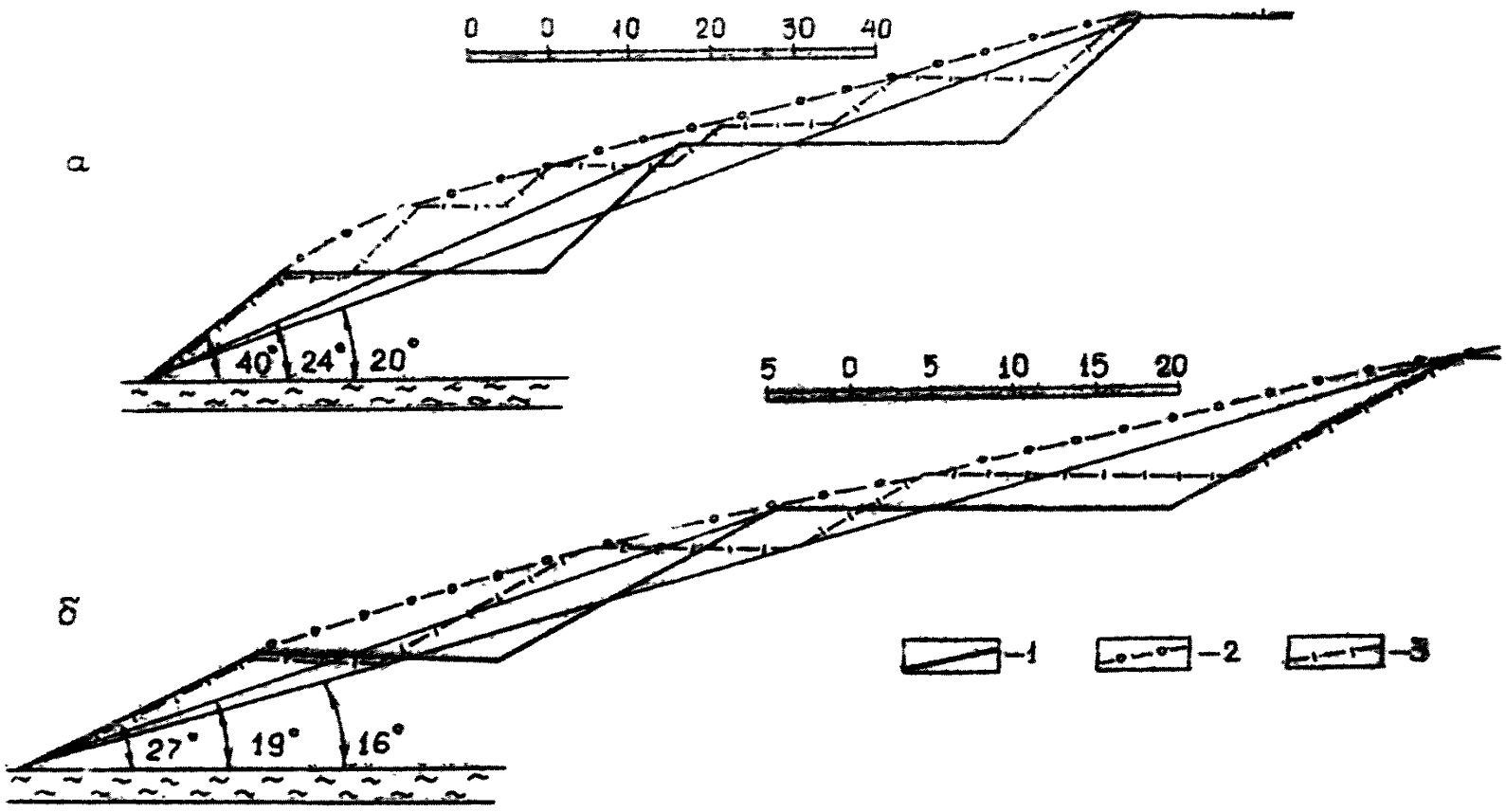

Рис. 6. Профили многоярусных отвалов на слабом основании:
а – для условий Аминевельдинского месторождения; б – для условий Качарского месторождения;
I – по разработанной методике построения; 2 – типовой профиль отвала по А.М.Мочалову; 3 –
– профиль отвала по А.М.Мочалову

номограммы, поэтому задача в такой постановке является трудоемкой. Формирование многоярусного отвала предлагается производить в пределах построенного выпуклого откоса. В связи с этим высоты ярусов, начиная со второго, в 1,5–3 раза меньше предельных, т.е. увеличивается число ярусов (в рассматриваемых примерах до 6–7 вместо 3, см.рис.5), что не целесообразно с позиций технологии ведения горных работ.

По методике А.М.Демина [1] отстройка профиля многоярусного отвала производится путем вписывания ступенчатого профиля откоса в плоский откос заданной высоты. Получаемый таким способом ступенчатый откос существенно отличается (см. рис. 5, 6 и табл. 4) от профилей откосов отвалов, отстроенных другими методами. По методу А.М.Демина получаются результирующие углы наклона откосов отвалов, как правило, меньше, нежели по другим методам.

Литература

1. Демин А.М. Устойчивость открытых горных выработок и отвалов. М., Недра, 1973, 231 с.

2. Ермаков И.И. Устойчивость отвалов на слабом основании. Труды ВНИМИ, № 83. Л., ВНИМИ, 1971, с. 135–140.

3. Методические указания по определению углов наклона бортов, откосов уступов и отвалов строящихся и эксплуатируемых карьеров. Л., ВНИМИ, 1972, 165 с.

4. Мочалов А.М., Хашин В.Н. Расчет устойчивости отвалов на наклонном основании. Труды ВНИМИ, № 89. Л., ВНИМИ, 1973, с. 130–138.

5. Мочалов А.М., Костин Е.В. Расчет параметров устойчивых откосов в слоистом массиве пород. Труды ВНИМИ, № 96. Л., ВНИМИ, 1975, с. 107–115.

6. Мочалов А.М., Хашин В.Н. Расчет параметров устойчивых отвалов на наклонном слоистом основании. Труды ВНИМИ, № 92. Л., ВНИМИ, 1974, с. 73–79.

7. Окатов Р.П. Об устойчивости откосов на слабом наклонном основании. ФТПРПИ, 1980, № 3, с. 21–24.

8. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды. М., Физматгиз, 1960, 244 с.

9. Фисенко Г.Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов. М., Недра, 1965, 378 с.

10. Цытович Н.А. Механика грунтов. М., Высшая школа, 1968, 258 с.

11. Шпаков П.С., Лятхина О.И. Определение устойчивой высоты отвала на наклонном основании. – В кн.: Мероприятия по повышению устойчивости бортов на карьерах цветной металлургии. Свердловск, Унипромедь, 1978, с. 14–15.

РАСПЕЧАТКА КОНТРОЛЬНОГО ПРИМЕРА

Исходные данные: угол откоса – A = 23,5; мощность слабого слоя – Σ = I,0; угол наклона основания отвала – B = 0,0; угол внутреннего трения массива – F = I2,0; угол внутреннего трения основания или контакта – F_1 = I0,0; сцепление слабого слоя или контакта – C_1 = 0,5; объемный вес – γ = I,8.

Результаты расчета	Сцепление массива									
	I,00	I,33	I,67	2,00	2,33	2,67	3,00	3,33	3,67	4,00
H	7,58	I0,07	I2,2I	I4,36	I6,52	I8,68	20,84	22,99	25,I5	27,3I
H_I	7,58	I0,07	I2,2I	I4,36	I6,52	I8,68	20,84	22,99	25,I5	27,3I
Б	I,30	I,63	I,97	2,33	2,68	3,04	3,40	3,76	4,I3	4,49
θ	I9,33	25,3I	26,08	26,70	27,I3	27,44	27,68	27,87	28,02	28,I5
Угол откоса – A = 24,5*										
H	7,I0	9,4I	II,43	I3,47	I5,5I	I7,56	I9,60	2I,6I	23,70	25,75
H_I	7,I0	9,4I	II,43	I3,47	I5,5I	I7,56	I9,60	2I,6I	23,70	25,75
Б	I,42	I,75	2,II	2,48	2,85	3,23	3,6I	4,00	4,38	4,77
θ	I9,43	25,6I	26,42	27,06	27,49	27,83	28,05	28,24	28,40	28,52
Угол откоса – A = 25,5*										
H	6,68	8,84	I0,76	I2,70	I4,64	I6,58	I8,53	20,48	22,43	24,39
H_I	6,68	8,84	I0,76	I2,70	I4,64	I6,58	I8,53	20,48	22,43	24,39
Б	I,5I	I,83	2,20	2,58	2,97	3,37	3,76	4,I6	4,56	4,97
θ	I9,52	25,89	26,75	27,40	27,84	28,I6	28,40	28,59	28,75	28,87

*Остальные исходные данные не изменяются.

С О Д Е Р Ж А Н И Е

Общие положения 3

I. Краткий анализ применяемых методов расчета 4

2. Механизм формирования нарушений устойчивости отвалов на слабом основании 6

3. Обоснование методики расчета параметров отвалов на слабом основании 7

4. Сравнительный анализ результатов расчетов параметров отвалов на слабом основании. I4

5. Пример расчета параметров отвала на ЭВМ по разработанной программе I8

6. Графо-аналитический способ построения профиля устойчивого многоярусного отвала 19

Литература. 29

Приложение. Распечатка контрольного примера 3I

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПРЕДЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ОТКОСОВ ОТВАЛОВ НА СЛАБОМ НАКЛОННОМ ОСНОВАНИИ

Научный редактор канд. техн. наук А.И.Ильин
Технический редактор А.Г.Воронцова
Корректор М.П.Елинсон. Художник Б.М.Попов

Подписано к печати 7 апреля 1986 г.
Объем I,7 уч.-изд.л. Тираж 260 экз. Заказ № 597
Ротапринт ВИОГЕМ, Белгород, Б.Хмельницкого, 86.
Цена 26 коп.

gost.e-ecolog.ru