

МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СССР  
ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ КАПИТАЛЬНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА  
ВССОЮЗНЫЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА  
ПРОЕКТНО-ИЗЫСКАТЕЛЬСКИЙ И НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ИНСТИТУТ «ГИДРОПРОЕКТ» ИМЕНИ С. Я. ЖУКА

РЕКОМЕНДАЦИИ  
ПО РАСЧЕТУ УСТОЙЧИВОСТИ  
СКАЛЬНЫХ ОТКОСОВ

П-843-86

Гидропроект

Москва — 1986

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящих Рекомендациях рассматриваются статические методы расчета устойчивости скальных откосов в предположении заданной поверхности смещения, расположение которой предопределено существующими инженерно-геологическими особенностями строения скальных массивов. Динамика оползневого процесса, а также реологические аспекты поведения скальных пород не рассматриваются. Предлагаемые методы расчета соответствуют механизму нарушения устойчивости и формам обрушения скальных откосов, наблюдаемым в натурных условиях. Последние выявлены в результате проведенного опроса большого числа производственных, проектных и научных организаций Советского Союза, занимающихся проектированием карьеров, котлованов, а также выполняющих расчеты устойчивости скальных откосов.

В Рекомендациях обобщен опыт расчетов, теоретических и экспериментальных (на моделях) исследований устойчивости скальных откосов, накопленный в лаборатории механики скальных пород отдела скальных оснований института «Гидропроект» им. С. Я. Жука, а также учтены результаты соответствующих разработок ряда отечественных и зарубежных специалистов.

Рекомендации составлены д. т. н. Э. Г. Газиевым и к. т. н. В. И. Речицким (институт «Гидропроект» им. С. Я. Жука). Раздел 4.3.2. и соответствующий пример в Приложении 3 подготовлены к. т. н. Э. А. Фрейбергом (ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева). Настоящие Рекомендации были одобрены на заседании комиссии по устойчивости и укреплению скальных массивов СК МОМСП\*. При разработке Рекомендаций учтены отдельные замечания и предложения к. т. н. Ю. А. Фишмана (Гидропроект), д. т. н. Д. М. Казикаева (Белгородский технологический институт строительных материалов), к. т. н. В. Б. Будкова (ВИОГЕМ), д. т. н. В. Г. Зотеева (Институт горного дела Минчермета СССР), проф., д. т. н. И. В. Баклашова (Московский горный институт), которым авторы выражают искреннюю признательность.

\* СК МОМСП — Советский комитет по участию в Международном обществе по механике скальных пород.

## ГЛАВА ПЕРВАЯ

### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТОВ УСТОЙЧИВОСТИ СКАЛЬНЫХ ОТКОСОВ

1.1. Для выполнения расчетов устойчивости скальных откосов требуются следующие основные исходные данные (расчетные параметры):

- а) характеристики трещиноватости скального массива,
- б) параметры прочности на сдвиг по трещинам,
- в) форма и положение депрессионной кривой в массиве,
- г) показатели, характеризующие сейсмичность района,
- д) количественная характеристика статических и динамических нагрузок на откос,
- е) плотность скальной породы.

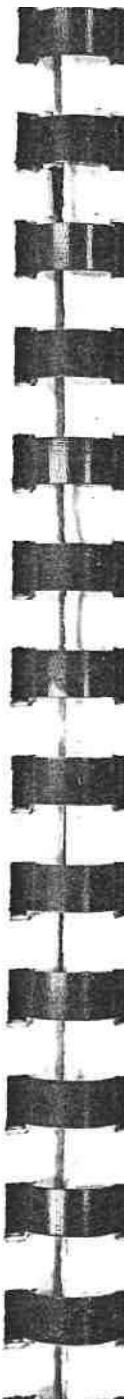
1.2. Из характеристик трещиноватости наибольшее значение для устойчивости скальных откосов имеет ориентация трещин в пространстве, задаваемая с помощью углов падения трещин  $\alpha$  и азимутов их падения  $\beta$ . Дополнительно необходимы сведения о среднем размере отдельных скальных блоков, а при рассмотрении устойчивости слоистых скальных откосов — о расстоянии между слоями пород.

По своему влиянию на устойчивость скальных откосов трещины могут быть разделены на две группы: крупные трещины или разломы, длина которых соизмерима или даже превосходит размеры откосов, и мелкие трещины, размеры которых не превышают нескольких метров. Трещины, принадлежащие ко второй группе, характеризуются обычно обобщенными параметрами трещиноватости.

1.3. Из всех прочностных параметров скального массива наибольшее значение для его устойчивости имеет прочность на сдвиг, которая, в первую очередь, определяется прочностью на сдвиг по существующим в массиве трещинам.

Прочность на сдвиг по скальной трещине зависит от конфигурации поверхности трещины (ее рельефа и волнистости), от крутизны подъема выступов или неровностей, от прочности скального материала стенок трещины, а также от типа заполнителя и его мощности.

1.4. Нарушение устойчивости скальных откосов часто является результатом неблагоприятного воздействия подземных вод. Форма и положение депрессионной кривой, также как и другие параметры фильтрационного потока в скальных массивах во многом зависят от размера трещин, их ширины раскрытия и ориентации, от взаимного расположения трещин, т. е. предопределяются характером строения массивов. Водопроницаемость, обусловленная наличием



поровой воды (содержащейся в порах самой скальной породы или в заполнителе трещин), имеет при этом подчиненное значение.

При расчетах устойчивости скальных откосов учет механического воздействия грунтовой воды заключается в приложении к рассматриваемому скальному блоку сил гидростатического давления воды, направление действия которых перпендикулярно плоскостям отчленяющих блок трещин.

Для вычисления сил гидростатического давления на рассматриваемые скальные блоки необходимо знание положения уровня грунтовых вод и формы кривой депрессии.

Следует также отметить большое влияние на устойчивость скальных массивов колебаний уровня воды в водохранилище. При сработке уровня водохранилища увеличиваются градиенты фильтрационного потока, что приводит к возрастанию сдвигающих сил. В этом случае необходимо знать возможные интервалы колебания уровня в водохранилище, возможное время сработки уровня, а также коэффициент фильтрации скального массива в направлении к дневной поверхности склона (откоса).

1.5. Районы распространения скальных пород являются в большинстве случаев сейсмически активными районами, в связи с чем при расчете устойчивости скальных откосов довольно часто возникает необходимость дополнительного учета динамических (сейсмических) воздействий. Этот учет заключается в добавлении к расчетным усилиям так называемой сейсмической силы  $P$ , которая в соответствии с нормами СНиП II-7-81 определяется по формуле:

$$P = k_1 \cdot A \cdot G,$$

где:  $k_1$  — коэффициент, учитывающий допускаемые повреждения зданий и сооружений;  $A$  — коэффициент, величина которого зависит от расчетной сейсмичности района;  $G$  — вес рассматриваемого скального массива (блока).

Вводя обозначение  $k_1 \cdot A = k_c$ , можно записать:

$$P = k_c \cdot G,$$

где:  $k_c$  — коэффициент сейсмичности (условный).

Значения  $k_c$  для расчетов устойчивости скальных откосов в зависимости от сейсмичности района приведены в табл. I Приложения.

При расчете сейсмических сил вес частично или полностью погруженного в воду массива следует определять без учета взвешивающего действия воды.

Направления действия силы  $P$  рекомендуется принимать наиболее неблагоприятными, т. е. такими, при которых устойчивость откоса становится минимальной.

1.6. В тех случаях, когда сдвигопасных систем трещин в рассматриваемом скальном массиве не обнаружено, оценка устойчи-

вости откоса может быть осуществлена на основе анализа его напряженно-деформированного состояния по одному из существующих методов, для чего необходимо знание модуля деформации массива  $E$ , коэффициента поперечного расширения  $\nu$ , прочности скальной породы в объемном напряженном состоянии  $\sigma_c$ .

## ГЛАВА ВТОРАЯ

### МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

2.1. Определение необходимых характеристик трещиноватости скального массива производится на обнажениях рассматриваемого склона, а также в шахтах, штольнях или камерах (при их наличии).

Полученные с помощью геологического компаса данные по геометрическим параметрам падения трещин (азимутам и углам падения) наносятся на круговую равноплощадную диаграмму\* (рис. 2.1) в виде точек. Каждая точка соответствует определенному сочетанию азимута падения  $\beta$  и угла падения  $\alpha$  зафиксированной трещины.

Выявление систем трещин из всей совокупности замеренных трещин может быть выполнено графическим или статистическим методами. В первом случае обработка замеров трещиноватости осуществляется с помощью перемещения по равноплощадной диаграмме специального трафарета (круга) единичной площади, в пределах контура которого подсчитывается количество точек, после чего на диаграмме строятся линии равной их густоты. Места сгущений плотности точек определяют системы, а по максимумам сгущений находятся азимуты и углы падения этих систем. Такой метод применим при наличии четко выраженных систем трещин.

Более точным методом выявления систем трещин и определения их параметров является разработанный в институте «Гидропроект» имени С. Я. Жука метод статистического анализа трещиноватости [3]. При использовании этого метода обработка замеров трещиноватости может проводиться автоматически, с использованием ЭВМ (соответствующая программа разработана в Гидропро-

\* Круговая равноплощадная диаграмма представляет собой круг радиуса  $R$ , разделенный лучами из центра на  $360^\circ$  (азимуты падения трещин), где  $0^\circ$  соответствует направлению на Север. Угол падения откладывается от центра круга на расстояние:

$$r = \sqrt{2} R \sin \frac{\alpha}{2}.$$

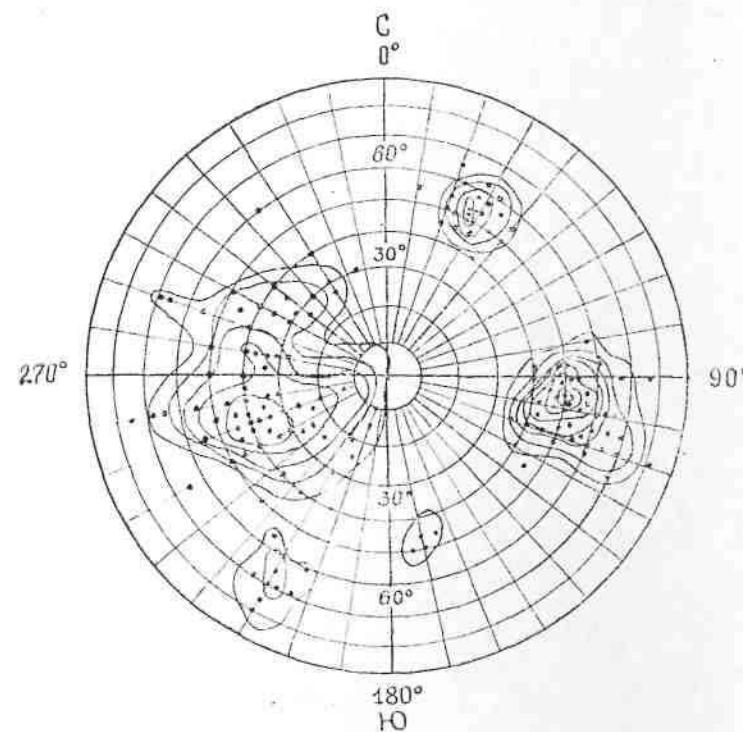


Рис. 2.1.

екте), при этом средние значения углов и азимутов падения трещин в системах определяются по формулам:

$$\bar{\beta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \beta_i, \quad \bar{\alpha} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha_i, \quad (2.1)$$

где  $n$  — количество точек, принадлежащих рассматриваемой системе трещин, выявленной с наперед заданной обеспеченностью.

Особо тщательному анализу подлежат системы трещин и отдельные крупные трещины, падающие в сторону склона, так как именно такие трещины могут являться плоскостями смещения для неустойчивых скальных массивов.

Для характеристики блочности скальных пород в массиве рекомендуется использовать следующую зависимость:

$$a_0 = (a_1 a_2 a_3)^{1/3} \left\{ \left[ 1 + \left( \frac{a_1 a_2 a_3}{a_4} \right)^{1/3} \right] \left[ 1 + \left( \frac{a_1 a_2 a_3}{a_5} \right)^{1/3} \right] \cdots \right\}^{-1/3}, \quad (2.2)$$

где  $a_0$  — приведенный размер блока скальной породы,  $a_1, a_2, a_3$  — средние расстояния между трещинами трех основных систем,  $a_4, a_5$  — средние расстояния между трещинами остальных систем в том же массиве.

2.2. Прочность на сдвиг по скальной трещине устанавливается на основе проведения специальных полевых опытов, которые могут быть дополнены лабораторными испытаниями образцов.

Полевые исследования на сдвиг проводят в специальных подземных камерах, в которых оставляют породные целики площадью обычно от  $0,5 \text{ м}^2$  до  $1,0 \text{ м}^2$ , включающие участки рассматриваемой трещины. С увеличением размера испытываемого образца возрастает достоверность получаемых результатов, которые должны быть распространены на весь скальный массив или на определенную его область. В связи с этим в особо важных случаях проводят испытания больших целиков с площадью сдвига порядка  $10 \text{ м}^2$  и даже более. Подготовка и проведение полевых опытов осуществляется в соответствии с существующими рекомендациями [7].

В результате проведенных исследований получают экспериментальную зависимость  $\tau_{\text{пр}} = f(\sigma)$  предельных значений касательных напряжений  $\tau_{\text{пр}}$  от нормальных напряжений  $\sigma$ , действующих на поверхности сдвига \*.

Аналитическая зависимость прочности на сдвиг записывается уравнением [2]:

$$\tau_{\text{пр}} = \sigma \operatorname{tg} \left[ i_0 \left( 1 - \frac{\sigma}{R_{\text{tc}}} \right)^{10} + \varphi_0 \right], \quad (2.3)$$

где:  $\tau_{\text{пр}}$  — прочность на сдвиг по трещине,  $\sigma$  — нормальное напряжение в плоскости трещины,  $R_{\text{tc}}$  — прочность стенок трещины на раздавливание,  $i_0$  — угол подъема неровностей на стенках трещины в направлении сдвига,  $\varphi_0$  — угол трения стенок трещины с учетом заполнителя.

Угол трения стенок трещины  $\varphi_0$  определяется по величине остаточной прочности на сдвиг по трещине ( $\tau_{\text{ост}}$ ):

$$\varphi_0 = \arctg \frac{\tau_{\text{ост}}}{\sigma}. \quad (2.4)$$

Непосредственное определение параметров  $i_0$  и  $R_{\text{tc}}$  связано с практическими трудностями, поэтому их рекомендуется вычислять обратным расчетом по результатам выполненных экспериментов на сдвиг по трещине.

Значения  $i_0$  и  $R_{\text{tc}}$ , наилучшим образом аппроксимирующие полученные экспериментальные данные, могут быть найдены с по-

\* В некоторых случаях, в частности, при малом числе опытов и (или) небольшом диапазоне изменений нормальных напряжений допускается использовать кулоновскую зависимость прочности на сдвиг по трещине.



мощью метода наименьших квадратов. В нашем случае, когда параметры  $i_0$  и  $R_{\text{tc}}$  входят в функцию  $\tau_{\text{пр}} = f(\sigma)$  нелинейно, проще использовать графический способ решения задачи [1]. Следует задаться некоторыми значениями одного из параметров, например  $i_0$ , после чего построить зависимость суммы

$$\sum (R_{\text{tc}}) = \sum_{i=1}^n [\tau_{\text{пр}i} - f(\sigma_i, R_{\text{tc}}, i_0)]^2 \quad (2.5)$$

от другого параметра ( $R_{\text{tc}}$ ) при каждом заданном  $i_0$  (в формуле (2.5)  $n$  — количество экспериментов на сдвиг). Минимальная величина минимумов суммы (2.5) будет достигаться при некоих значениях  $i_0$  и  $R_{\text{tc}}$ .

Для ориентировочного установления параметров  $i_0$  и  $R_{\text{tc}}$ , соответствующих методу наименьших квадратов, могут быть использованы зависимости:

$$R_{\text{tc}} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{1 - \sqrt[10]{\frac{l_2}{l_1}}}, \quad (2.6)$$

$$i_0 = \frac{l_1(2)}{(1 - \sigma_1(2)/R_{\text{tc}})^{10}}, \quad (2.7)$$

где

$$l_1(2) = \arctg \frac{\tau_{\text{пр}1(2)}}{\sigma_1(2)} - \varphi_0. \quad (2.8)$$

В формулах (2.6) — (2.8) индексами 1 и 2 обозначены параметры, относящиеся к экспериментам с минимальным и максимальным значениями нормального напряжения  $\sigma$  соответственно.

Для возможности выполнения расчетов устойчивости скальных откосов зависимость (2.3) линеаризуют в соответствующем интервале нормальных напряжений  $\sigma$ , в результате чего получают нормативные значения параметров сопротивляемости сдвигу скального массива  $\operatorname{tg} \varphi^{\text{n}}$  и  $c^{\text{n}}$ , которые в данном случае не несут смыслового значения «коэффициента трения» и «сцепления», а являются лишь математическими параметрами линейной зависимости. Пример минеаризации функции (2.3) приведён в Приложении 2.

При большой мощности заполнителя и отсутствии «жестких» контактов прочность на сдвиг по трещине определяется прочностью на сдвиг заполнителя трещины:

$$\tau_{\text{пр}} = \sigma \operatorname{tg} \varphi_3 + c_3, \quad (2.9)$$

где  $\operatorname{tg} \varphi_3$  и  $c_3$  — соответственно коэффициент трения и сцепление материала заполнителя.

Нормативные значения параметров прочности на сдвиг заполнителя трещины определяются обработкой экспериментальных данных по методу наименьших квадратов.

Расчетные значения величин  $\operatorname{tg} \varphi_3$ ,  $c_3$  и  $\operatorname{tg} \varphi$ , с находятся через их нормативные значения в соответствии со СНиП II-16-76 (или путем построения нижней доверительной границы для совокупности полученных опытных данных, или путем деления нормативных значений на коэффициенты безопасности по грунту).

2.3. Выбор и назначение параметров фильтрационного потока в проектируемом скальном откосе осуществляется на основе проведения полевых гидрогеологических исследований, состав и объем которых зависит от общих гидрогеологических условий, стадии проектирования и ответственности сооружения.

Для оценки устойчивости откоса наиболее важно определить уровень подземных вод в массиве, который зависит от наличия и глубины расположения подпорного горизонта, водопроницаемости массива на различных глубинах и ее анизотропии, а также от водопроницаемости отдельных крупных трещин, расположенных на рассматриваемом участке.

Предполагаемые форма и положение депрессионной кривой находятся в результате обработки полученных данных с помощью моделирования на ЭГДА, аналитическим путем или посредством других существующих методов [5]. В процессе производства работ положение кривой депрессии в массиве должно уточняться путем режимных наблюдений.

## ГЛАВА ТРЕТЬЯ

### ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАСЧЕТА УСТОЙЧИВОСТИ СКАЛЬНЫХ ОТКОСОВ

3.1. При расчетах устойчивости скальных откосов, как правило, следует использовать плоские или ломаные поверхности смещения, определяемые имеющимися в скальном массиве плоскостями трещин. В относительно редких случаях, например, в квазиднородной среде при малых размерах структурных блоков, могут иметь место сложные поверхности смещения с криволинейными участками.

3.2. В зависимости от геологического строения скальных массивов должны применяться различные методы расчета их устойчивости, учитывающие возможную кинематику их обрушения.

3.3. Любой из используемых методов расчета устойчивости скальных откосов должен базироваться на следующих основных предпосылках:

а) смещающиеся скальные массивы не являются абсолютно жесткими телами, а состоят из скальных блоков, взаимодействую-



щих между собой в процессе смещения. Это взаимодействие и определяет процесс и механизм обрушения;

б) достижение предельного равновесия на какой-либо части потенциальной поверхности смещения еще не означает нарушения устойчивости массива, которая определяется взаимодействием неустойчивых блоков или отсеков с расположенным ниже устойчивыми частями массива. Действующие силы и силы сопротивления не равны между собой во всех точках поверхности смещения;

в) метод расчета устойчивости скальных откосов в первую очередь следует рассматривать как инструмент анализа степени влияния различных факторов на устойчивость, позволяющий лучше понять и проанализировать поведение скального откоса в условиях изменяющихся внешних воздействий.

3.4. Для определения устойчивости скальных откосов используется метод предельного равновесия. Форма предельной поверхности смещения заранее предполагается, исходя из характера трещиноватости откоса, его топографии и кинематической возможности обрушения. Как правило, эти поверхности выделяют объемные тела обрушения в виде клиньев и блоков. Однако, во многих случаях можно с достаточной степенью приближения представить поверхность смещения и рассматриваемый массив в условиях плоской задачи. Этот прием широко применяется для протяженных откосов, когда направление простирации плоскостей ослабления в скальном массиве параллельно откосу.

3.5. Поверхность смещения скального откоса (склона), как правило, совпадает с существующими в массиве поверхностями ослаблений на всем своем протяжении. В тех случаях, когда смещение по существующим в массиве плоскостям ослабления кинематически невозможно или связано с возможностью разрушения скального материала между трещинами, поверхность смещения может представлять собой вновь сформированную трещину скола (отрыва), не совпадающую с существующими в массиве поверхностями ослабления, либо совпадающую с ними лишь частично.

3.6. Расчеты устойчивости скальных откосов ведутся по двум группам предельных состояний:

— по первой группе — когда потеря устойчивости откосов приводит проектируемое (защищаемое) сооружение в состояние, непригодное к эксплуатации;

— по второй группе — когда потеря устойчивости откосов приводит сооружение в состояние, непригодное к нормальной эксплуатации.

**Примечание.** Под непригодностью сооружений к эксплуатации понимается полный или частичный выход сооружения из строя, исключающий возможность выполнения им заданных эксплуатационных функций. Под непригодностью к нормальной эксплуатации понимаются нарушения в работе сооружений, допускающие

возможность их эксплуатации с ограничениями (по напору, времени и т. д.).

3.7. Расчет устойчивости скальных откосов состоит в определении дефицита устойчивости  $S$  (разности между сдвигающими и удерживающими силами) как отдельных блоков или отсеков, так и всего скального откоса в целом.

Применительно к рекомендации СНиП II-16-76 следует оценивать устойчивость на сдвиг по выполнению неравенства:

$$n_c N \leq \frac{m}{k_u} R. \quad (3.1)$$

Критерий устойчивости скальных откосов в этом случае может быть записан в виде:

$$S = n_c N - \frac{m}{k_u} R \leq 0, \quad (3.2)$$

где  $N$  и  $R$  — расчетные значения соответственно обобщенной сдвигающей силы и силы предельного сопротивления сдвигу;  $k_u$  и  $n_c$  — соответственно коэффициенты надежности и сочетания нагрузок, принимаемые согласно требованиям главы СНиП по основным положениям проектирования речных гидротехнических сооружений;  $m$  — коэффициент условий работы.

Коэффициент надежности  $k_u$  учитывает степень ответственности и капитальности сооружений, разрушению или нарушению нормальной работы которых угрожает обрушение откоса. Он вводится в качестве делителя к расчетным значениям параметров прочности на сдвиг.

Коэффициент условий работы  $m$  при расчетах устойчивости естественных и искусственных откосов и склонов принимается равным  $m=1$  (СНиП II-16-76).

При расчете устойчивости скальных откосов по второй группе предельных состояний  $k_u$  и  $n_c$  также принимаются равными единице.

При расчете по первой группе предельных состояний (наиболее частый случай) значения  $k_u$  берутся по таблице 2 Приложения 1. Коэффициент  $n_c$  при этом для основного сочетания нагрузок следует принимать равным  $n_c=1,0$ , для особого сочетания нагрузок —  $n_c=0,90$  и для сочетания нагрузок в период строительства —  $n_c=0,95$ .

С учетом  $m=1$  условие устойчивости записывается в виде:

$$n_c N \leq \frac{1}{k_u} R \quad (3.3)$$

или

$$S = n_c N - \frac{1}{k_u} R \leq 0. \quad (3.4)$$

В случае  $S > 0$  скальный массив неустойчив и для его укрепления необходимо приложение удерживающего усилия величиной  $S$ .

3.8. Для сопоставления решений, полученных для различных условий и откосов, с целью анализа оптимальности того или иного из них за критерий, наряду с дефицитом устойчивости  $S$ , может быть принят коэффициент устойчивости откоса  $k_y$ , определяемый при  $S=0$ :

$$S = n_c N - \frac{1}{k_y} R = 0. \quad (3.5)$$

Условие устойчивости в этом случае записывается в виде:

$$k_y = \frac{R}{N} \geq n_c k_u. \quad (3.6)$$

Если при этом значения  $R$  и  $N$  сами зависят от коэффициента устойчивости  $k_y$  (например, в методе дефицита сил), то величина последнего в общем случае находится подбором.

## ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

### РЕКОМЕНДУЕМЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА УСТОЙЧИВОСТИ СКАЛЬНЫХ ОТКОСОВ

Методы расчета устойчивости скальных откосов приведены ниже в порядке, соответствующем их распространенности на практике (в частности, при анализе устойчивости склонов водохранилищ и проектировании котловалов гидротехнических сооружений). Исключение составляет метод расчета устойчивости объемных скальных блоков, который для удобства изложения материала помещен в конце главы.

Рассматриваемые схемы откосов представлены на рис. 4.1.

#### 4.1. Сдвиг по плоской поверхности (схемы А и Б)

Нарушение устойчивости откосов данного типа наблюдается при падении системы протяженных трещин (напластования) в сторону склона под углом, меньшим угла наклона откоса. При этом обычно имеет место отрыв смещающегося массива по сопряженной системе трещин.

Анализ устойчивости откоса заключается в проверке соотношения (3.4) на рассматриваемой сдвигопасной трещине.

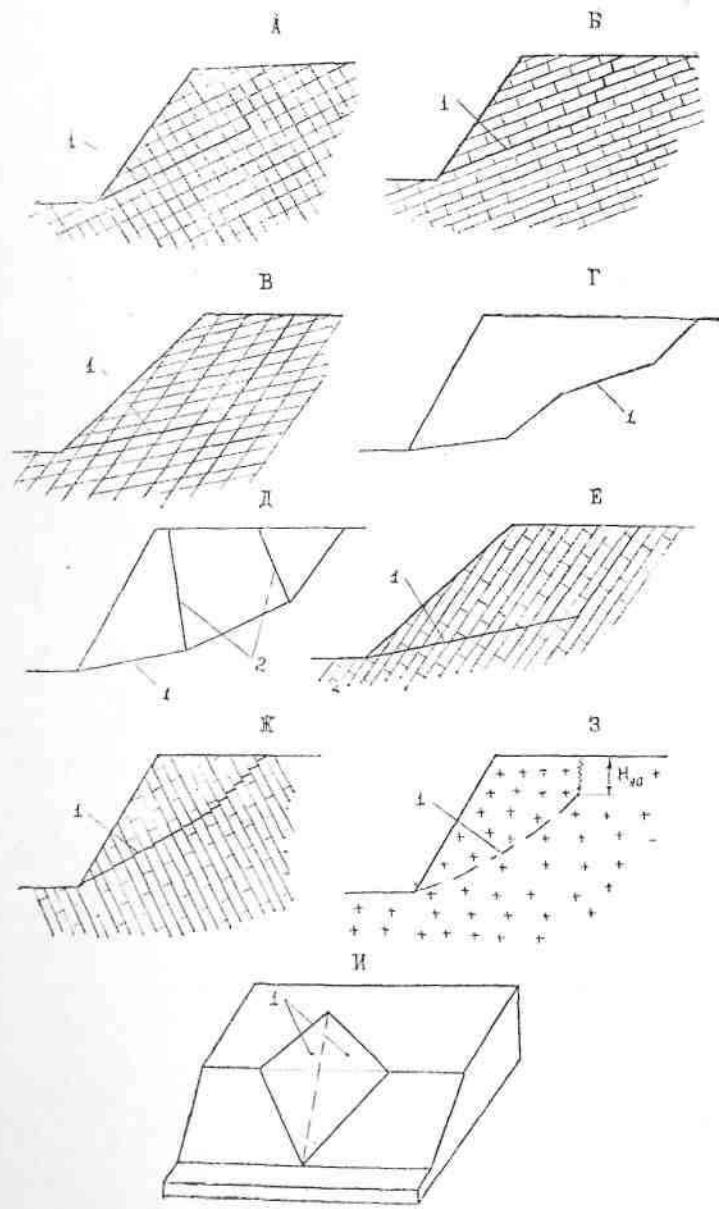


Рис. 4.1.



Вычисление сил  $N$  и  $R$  осуществляется по формулам:

$$N = G [\sin \alpha + k_c \cos (\alpha - \delta)] + U_2 \cos \alpha - Q \cos (\alpha + \beta), \quad (4.1)$$

$$R = \operatorname{tg} \varphi [G [\cos \alpha - k_c \sin (\alpha - \delta)] - U_1] - U_2 \sin \alpha + Q \sin (\alpha + \beta) + cL, \quad (4.2)$$

где:  $G$  — вес рассматриваемого массива,  $\operatorname{tg} \varphi$  и  $c$  — расчетные значения параметров прочности на сдвиг по падающей в сторону склона трещине,  $\alpha$  — угол падения трещины (рис. 4.2),  $L$  — размер рассматриваемого участка трещины,  $U_1$ ,  $U_2$  — силы гидростатического давления воды соответственно на низовую и боковую грани рассматриваемого массива,  $Q$  — внешняя сила, действующая на массив,  $k_c$  — коэффициент сейсмичности,  $\beta$  и  $\delta$  — величина углов наклона к горизонту соответственно внешней и сейсмической сил.

Силы  $U_1$  и  $U_2$  определяются следующим образом:

$$U_1 = \int_0^L h_l dl = \frac{F}{\cos \alpha} \cdot \rho_w, \quad (4.3)$$

$$U_2 = \frac{1}{2} h_L^2 \cdot \rho_w, \quad (4.4)$$

где:  $h_l$  — превышение кривой депрессии над поверхностью трещины на расстоянии  $l$  от подошвы откоса (рис. 4.2a),  $F$  — площадь

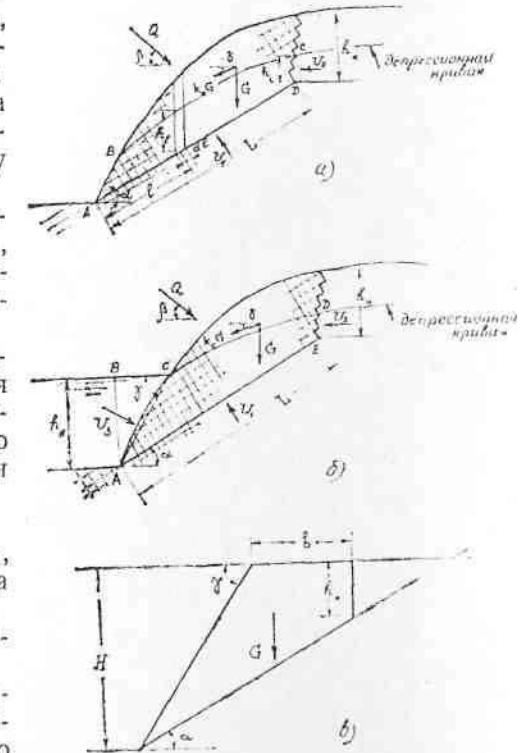


Рис. 4.2.

массива  $ABCD$ , расположенного ниже кривой депрессии,  $\rho_a$  — плотность воды.

Устойчивость откоса можно считать обеспеченной, если при всех возможных значениях  $L$  условие (3.4) удовлетворяется.

При рассмотрении устойчивости склона водохранилища (реки) или откоса котлована, заполненного водой, расчет сил  $N$  и  $R$  ведется с учетом силы гидростатического давления воды  $U_3$  (рис. 4.2б):

$$N = G [\sin \alpha + k_c \cos (\alpha - \delta)] + U_2 \cos \alpha - U_3 \sin (\gamma - \alpha) - Q \cos (\alpha + \beta), \quad (4.5)$$

$$R = \operatorname{tg} \varphi [G [\cos \alpha - k_c \sin (\alpha - \delta)] - U_1 - U_2 \sin \alpha + U_3 \cos (\gamma - \alpha) + Q \sin (\alpha + \beta)] + cL, \quad (4.6)$$

$$U_3 = \frac{1}{2} h_a^2 \cdot \rho_s, \quad (4.7)$$

где:  $h_a$  — высота уровня воды,  $\gamma$  — угол наклона откоса.

В формулах (4.5) и (4.6) силы  $U_1$  и  $U_2$  вычисляются по зависимостям (4.3) и (4.4), при этом  $F$  в (4.3) представляет собой площадь фигуры  $A\bar{B}CDE$  (рис. 4.2б).

Для скальных откосов простой формы (какими являются уступы карьеров и котлованов), находящихся под действием только сил собственного веса, представляется возможным определить глубину трещины отрыва (рис. 4.2в):

$$h_* = \frac{c}{\rho \cdot \cos^2 \alpha (n_c k_n \operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \varphi)}, \quad (4.8)$$

ее расстояние от кромки уступа:

$$b = h_* \sqrt{\operatorname{ctg} \alpha - \operatorname{ctg} \gamma}, \quad (4.9)$$

а также предельную высоту уступа:

$$H_{\text{пр.}} = h_* \frac{\operatorname{ctg} \alpha + \sqrt{\operatorname{ctg} \alpha \operatorname{ctg} \gamma}}{\operatorname{ctg} \alpha - \operatorname{ctg} \gamma}, \quad (4.10)$$

где:  $\rho$  — плотность скальной породы.

#### 4.2. Сдвиг по полигональной поверхности при отсутствии крупных секущих трещин (схемы В и Г)

Это один из самых распространенных случаев в инженерной практике для крупных оползней и обрушений. Даже при рассмотрении смещений по одной протяженной трещине иногда приходится пользоваться этой схемой, так как трещины редко сохраняют прямолинейность на большом протяжении (схема Г).

Рассматриваемый ниже метод, получивший название метода дефицита сил [2], может быть использован и при наличии в откосе двух систем трещин, падающих в сторону склона (схема В).

Для анализа устойчивости таких массивов они разбиваются условно вертикальными плоскостями на отсеки, стоящие на соответствующих участках полигональной поверхности смещения (рис. 4.3).

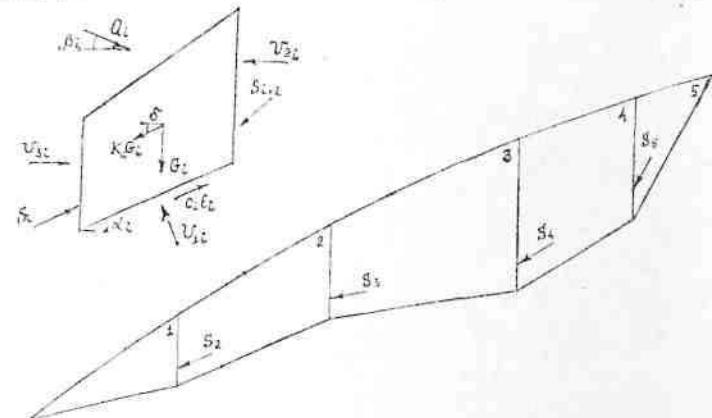


Рис. 4.3.

Для каждого из отсеков (начиная с верхнего) находятся дефициты устойчивости  $S_i$ , которые представляют собой силы взаимодействия между отсеками:

$$S_i = n_c A_i - \frac{B_i}{k_n}, \quad (4.11)$$

$$A_i = G_i [\sin \alpha_i + k_c \cos (\alpha_i - \delta)] + S_{i+1} \cos (\alpha_{i+1} - \alpha_i) + (U_{2i} - U_{3i}) \cos \alpha_i - Q_i \cos (\alpha_i + \beta_i), \quad (4.12)$$

$$B_i = \operatorname{tg} \varphi_i [G_i [\cos \alpha_i - k_c \sin (\alpha_i - \delta)] + S_{i+1} \sin (\alpha_{i+1} - \alpha_i) - (U_{2i} - U_{3i}) \sin \alpha_i - U_{1i} + Q_i \sin (\alpha_i + \beta_i)] + c_i l_i, \quad (4.13)$$

где:  $G_i$  — вес рассматриваемого отсека,

$S_{i+1}$  — дефицит устойчивости вышерасположенного отсека, передаваемый на рассматриваемый отсек,

$\operatorname{tg} \varphi_i$ ,  $c_i$  — параметры прочности на сдвиг по  $i$ -той плоскости смещения,

$\alpha_i$  — угол падения поверхности смещения в пределах  $i$ -го отсека,

$l_i$  — размер плоскости смещения в основании  $i$ -го отсека,

$U_{1i}, U_{2i}, U_{3i}$  — силы гидростатического давления воды на основание рассматриваемого отсека ( $U_{1i}$ ), а также на его боковые грани — верхнюю ( $U_{2i}$ ) и нижнюю ( $U_{3i}$ ).

Остальные обозначения в формулах (4.12) и (4.13) соответствуют употребленным ранее.

Силы  $U_1, U_2$  и  $U_3$  находятся следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} U_{1i} &= \frac{F_i}{\cos \alpha} \cdot \rho_a \\ U_{2i} &= \frac{1}{2} h_{i+1}^2 \cdot \rho_a \\ U_{3i} &= \frac{1}{2} h_i^2 \cdot \rho_a \end{aligned} \right\}, \quad (4.14)$$

где:  $F_i$  — площадь массива, расположенного ниже уровня кривой депрессии в  $i$ -том отсеке,  $h_i$  и  $h_{i+1}$  — высота уровня воды соответственно на нижней и верхней гранях  $i$ -го отсека.

При малой кривизне депрессионной кривой допускается силу  $U_{1i}$  определять по формуле:

$$U_{1i} = \frac{h_i + h_{i+1}}{2} l_i \cdot \rho_a. \quad (4.15)$$

В случае полного затопления отсека (при его расположении под уровнем воды) вместо сил  $U_{1i}, U_{2i}, U_{3i}$  целесообразно вводить в расчет одну взвешивающую силу  $W_i$ , направленную вертикально вверх и равную

$$W_i = F_i \rho_a, \quad (4.16)$$

где:  $F_i$  — площадь рассматриваемого (находящегося под водой) скального отсека.

Направление сил  $S_i$  предполагается совпадающим с линией падения соответствующей плоскости скольжения, как это показано на рис. 4.3.

В случае, если полученная по формуле (4.11) величина  $S_i$  получается меньшей нуля, в расчет подставляется значение  $S_i = 0$ .

Вычислив дефицит устойчивости для отсека № 2 ( $S_2$ ), определяются интегральные сдвигавшая и удерживающая силы:

$$\begin{aligned} N &= A_i = G_i [\sin z_i + k_c \cos (z_i - \delta)] + S_2 \cos (z_2 - z_1) + \\ &+ (U_{2i} - U_{3i}) \cos z_1 - Q_i \cos (z_1 + \beta_1), \end{aligned} \quad (4.17)$$

$$\begin{aligned} R &= B_i = \operatorname{tg} z_i [G_i [\cos z_i - k_c \sin (z_i - \delta)] + S_2 \sin (z_2 - z_1) - \\ &- (U_{2i} - U_{3i}) \sin z_1 - U_{1i} + Q_i \sin (z_1 + \beta_1)] + c_i l_i. \end{aligned} \quad (4.18)$$



Оценка устойчивости откоса заключается в проверке соотношения (3.4).

Определение коэффициента устойчивости откоса  $k_y$  производится по формуле (3.6), при этом вычисление сил  $N$  и  $R$  должно вестись с заменой в уравнении (4.11) значения  $k_u$  на  $k_y$ . В общем случае коэффициент устойчивости находится подбором. В частном случае для откоса с двумя отсеками  $k_y$  определяется по формуле:

$$k_y = \frac{a + \sqrt{a^2 - 4bd}}{2b}, \quad (4.19)$$

где

$$\begin{aligned} a &= B'_1 + n_c [B'_2 \cos (z_2 - z_1) + \operatorname{tg} \varphi_1 A'_2 \sin (z_2 - z_1)], \\ b &= n_c [A'_2 (\cos (z_2 - z_1)) n_c + A'_1], \\ d &= \operatorname{tg} \varphi_1 B'_2 \sin (z_2 - z_1). \end{aligned} \quad (4.20)$$

В формулах (4.20):

$$\begin{aligned} A'_i &= G_i [\sin z_i + k_c \cos (z_i - \delta)] + (U_{2i} - U_{3i}) \cos z_i - \\ &- Q_i \cos (z_i + \beta_i), \quad i = 1, 2, \end{aligned} \quad (4.21)$$

$$\begin{aligned} B'_i &= \operatorname{tg} z_i [G_i [\cos z_i - k_c \sin (z_i - \delta)] - \\ &- (U_{2i} - U_{3i}) \sin z_i - U_{1i} + Q_i \sin (z_i + \beta_i)] + c_i l_i, \quad i = 1, 2. \end{aligned} \quad (4.22)$$

#### 4.3. Сдвиг по полигональной поверхности смещения при наличии крупных секущих трещин (схема Д)

При наличии секущих призму обрушения потенциальных поверхностей сдвига (единичных крупных трещин, зон дробления и т. п.), расчет устойчивости основывается на решении плоской задачи предельного состояния взаимодействующих между собой отсеков с учетом напряженного состояния не только по полигональной поверхности смещения, но и по секущим призмам плоскостям ослабления, являющимися границами расчленения призмы на элементы (отсеки). В данном случае возможно использование как графического, так и аналитического методов анализа устойчивости скальных откосов.

##### 4.3.1. Графический метод

Графический метод построения многоугольника сил является более простым способом оценки устойчивости откосов.

Последовательность графического расчета устойчивости откоса, состоящего из двух отсеков, представлена на рис. 4.4.

Из произвольной точки  $A$  проводится отрезок  $AB$ , совпадающий по направлению с вектором  $G_2$  (вес верхнего отсека) и равный ему по величине. Из точки  $B$  по направлению падения плоскости 2 строится вектор  $BD$ , равный по величине  $BD = \frac{1}{k_n} c_2 l_2$  и ориентированный против направления смещения. Из точки  $D$  строится вектор  $DF = \frac{1}{k_n} c'_2 l'_2$ , где через  $c'_2$  и  $l'_2$  обозначены параметры секущей призму обрушения трещины раздела между отсеками. Для завершения построения многоугольника сил, соответствующего верхнему отсеку, необходимо построить векторы реакций  $P_2$  и  $E_2$  (последняя представляет собой силу взаимодействия между отсеками), которые неизвестны по величине, но определены по направлениям условными углами трения:

$$\varphi_{2\text{ усл.}} = \arctg \left( \frac{1}{k_n} \operatorname{tg} \varphi_2 \right), \quad (4.23)$$

$$\varphi'_{2\text{ усл.}} = \arctg \left( \frac{1}{k_n} \operatorname{tg} \varphi'_2 \right). \quad (4.24)$$

Проводя из точки  $F$  луч по направлению действия силы  $E_2$ , а из точки  $A$  луч по направлению, обратному направлению действия реакции  $P_2$ , получим точку их пересечения  $J$ , которая и определяет величины сил  $P_2$  и  $E_2$ .

Теперь необходимо построить многоугольник сил для нижнего отсека. Учитывая, что в этом многоугольнике должны принять участие силы, действующие по плоскости раздела между блоками:

$E_2$  и  $\frac{1}{k_n} c'_2 l'_2$ , целесообразно использовать эти векторы, уже имеющиеся на построенном многоугольнике сил для верхнего блока.

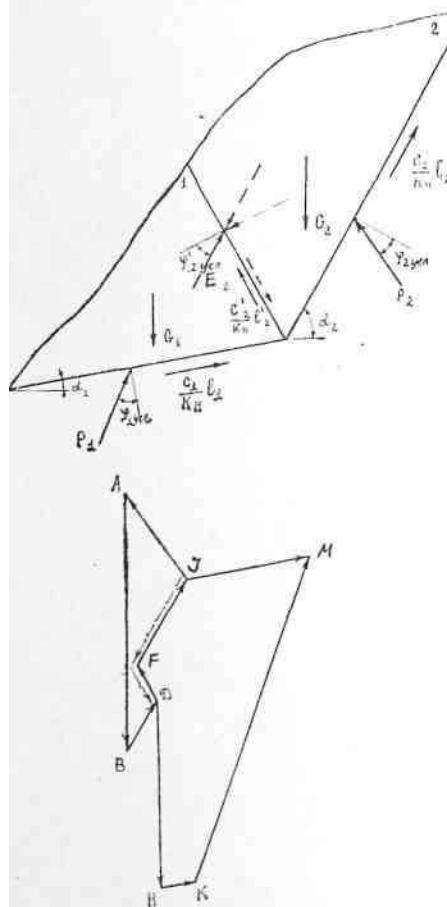


Рис. 4.4.



Из точки  $D$  проводится вектор  $DH = G_1$  и из точки  $H$  — вектор  $HK = \frac{1}{k_n} c_1 l_1$ , ориентированный против направления возможного смещения отсека по плоскости 1. Затем из точки  $K$  проводится луч, имеющий направление реакции  $P_1$ . Перпендикуляр, опущенный из точки  $J$  на этот луч, представляет собой дефицит устойчивости откоса. Если направление этого перпендикуляра «препятствует» смещению массива, то это означает, что дефицит устойчивости отрицателен и массив устойчив.

Графический способ расчета устойчивости скальных откосов может быть использован при любом количестве трещин, секущих массив (при любом количестве отсеков) и при всех возможных действующих силах (фильтрационной, сейсмической и т. д.).

### 4.3.2. Аналитический метод

При необходимости выполнения точных расчетов может быть использован аналитический метод. Методика расчета основана на расчленении потенциальной призмы обрушения непосредственно по естественным поверхностям ослабления (рис. 4.5) на конечное чис-

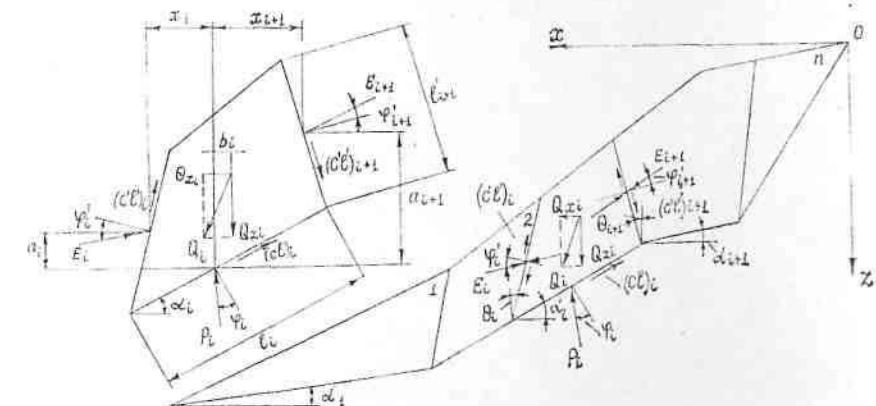


Рис. 4.5.

ло элементов (отсеков) и определения величин сил взаимодействия между ними [9]. Силы взаимодействия в случае реализации предельного напряженного состояния массива по поверхностям ослабления направлены к границам расчленения под углом, характеризующим сдвиговые параметры соответствующих поверхностей ослабления. Вычисление расчетных значений обобщенной активной сдвигающей силы  $N$  и обобщенной силы предельного сопротивле-

ния сдвигу  $R$  для всей призмы обрушения откоса производится по формулам:

$$N = F_1 + D_1 |F_2| + D_2 |F_3| + D_3 |\dots| \dots, \quad (4.25)$$

$$R = A_1 + B'_1 + D_1 |A_2 - B_2 + B'_2 + D_2 |A_3 - B_3 + B'_3 + D_3 |\dots| \dots, \quad (4.26)$$

где:

$$\left. \begin{aligned} A_i &= [\lg z (Q_z \cos z - Q_x \sin z) + cl]_i \cos \varphi_i, \\ i &= 1, 2, \dots, n, \\ B_i &= [c'l' \sin (z - \varphi + \theta)]_i, \\ B'_i &= (c'l')_{i+1} \sin (z_i - \varphi_i + \theta_{i+1}), \\ D_i &= \frac{\cos (\varphi_i - \varphi_{i+1} + \theta_{i+1})}{\cos (z - \varphi - \varphi' + \theta)_{i+1}}, \\ F_i &= [(Q_z \sin z + Q_x \cos z) \cos \varphi]_i. \end{aligned} \right\} \quad (4.27)$$

В формулах (4.25) — (4.27):

$Q_{zi}$  и  $Q_{vi}$  — составляющие суммарной расчетной нагрузки  $Q_i$  для  $i$ -того отсека от сил веса, сейсмических, фильтрационных и других объемных и поверхностных сил,  $\lg \varphi_i$  и  $c_i$  — параметры прочности на сдвиг по полошве  $i$ -того отсека,  $\lg \varphi'_i$  и  $c'_i$  — параметры прочности на сдвиг по поверхностям ослабления (трещинам), являющимися границами расщепления призмы обрушения на отсеки;

$z_i$  и  $l_i$  — угол наклона и размер  $i$ -той плоскости смещения;

$\theta_i$  и  $l'_i$  — угол наклона от вертикали и размер поверхности сдвига по боковым границам отсеков;

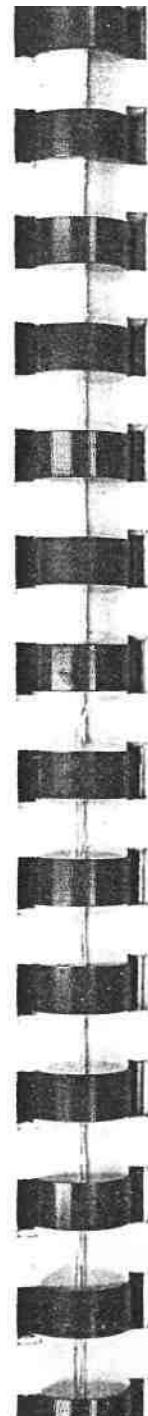
$n$  — количество отсеков, на которое расчленяется призма обрушения.

Данная методика расчета позволяет оценить устойчивость откоса последовательно для всех отсеков призмы обрушения, начиная с верхнего. Для этого определяется компонента силы взаимодействия по боковой грани отсека, которая препятствует (совместно с известной компонентой  $(c'l')_i$  той же силы взаимодействия) потере устойчивости верховой относительно границы расчленения части призмы, по формуле:

$$E_i = H_i + B'_i + D_i |H_{i-1} - B_{i-1} + B'_{i+1} + D_{i+1} |H_{i+2} - B_{i+2} + B'_{i+2} + D_{i+2} |\dots| \dots, \quad (4.28)$$

где

$$H_i = [Q_z \sin (z - \varphi) + Q_x \cos (z - \varphi) - cl \cos \varphi]_i.$$



При этом, если при определении величины  $E_i$  (для исходящих поверхностей сдвига) по формуле (4.28) ее значение для какого-либо отсека призмы будет отрицательным, это свидетельствует о том, что для вышележащего массива не требуется удерживающего усилия, т. е. расположенный выше участок призмы устойчив. В этом случае для данного отсека значение  $E_i$  принимается равным нулю и устойчивость выше- и нижележащего участков призмы оценивается отдельно.

Реализация предельного напряженного состояния по поверхности расчленения призмы на отсеки, определяющая расчетный случай, оценивается по условию:

$$\operatorname{tg} \varphi'_{i \text{ уст.}} = \frac{z_i - c'_i}{\sigma_i} \geq \operatorname{tg} \varphi'_i, \quad (4.29)$$

где  $\operatorname{tg} \varphi'_{i \text{ уст.}}$  — условный коэффициент трения по  $i$ -той поверхности раздела, отвечающий уровню напряжений  $z_i$  и  $\sigma_i$  в ее плоскости при реализации предельного состояния ( $z_i$  и  $\sigma_i$  определяются с использованием величин известных сил взаимодействия  $E_i$  и  $c'_i l$  между элементами с использованием формулы (4.28)).

Рассматриваемый метод позволяет выполнить расчет устойчивости также в том случае, когда предельное состояние массива имеет место лишь по некоторым трещинам раздела [10].

Аналитический метод расчета скальных откосов может быть применен при поверхности смещения произвольной формы и любых действующих на массив силах (фильтрационных, сейсмических и других).

#### 4.4. Сдвиг по полигональной поверхности при наличии крутопадающего в сторону склона напластования (схема Е)

Данная расчетная схема применима при угле наклона трещин напластования  $\alpha_2$  больше угла наклона откоса  $\gamma$  и наличии пологих подсекающих трещин. При  $\alpha_2 < \gamma$  расчет следует вести согласно п. 4.1.

Характер разрушения откосов такого строения зависит от величины безразмерного параметра  $c/ra$ , представляющего собой отношение величины сцепления в трещинах напластования ( $c$ ) к расстоянию между трещинами ( $a$ ) и к плотности породы ( $r$ ). Соответственно различны и методы расчета устойчивости откосов такого строения.

При малой величине параметра  $c/ra$ , когда в межпластиовых трещинах преобладают силы трения, процесс обрушения заключается в проскальзывании пластов друг по другу. При этом наименее устойчивый слой, являющийся инициатором обрушения, зале-

гает на некоторой глубине от поверхности откоса и удерживается в равновесии пригружающими слоями, имеющими большую устойчивость.

Определение обобщенной сдвигающей силы  $N$  и обобщенной силы предельного сопротивления сдвигу  $R$  осуществляется в этом случае по зависимостям:

$$N = \sum_{i=1}^j N_i = G \sum_{i=1}^j A_i, \quad (4.30)$$

$j = 1, 2, \dots, n,$

$$R = \sum_{i=1}^j R_i = G \sum_{i=1}^j B_i, \quad (4.31)$$

$j = 1, 2, \dots, n,$

$$A_i = \sin z_1 + k_c \cos(z_1 - \delta) + \frac{1}{2} \sin \Theta [\cos \alpha_2 - \lambda \sin \alpha_2 - k_c [\sin(z_2 - \delta) + i \cos(z_2 - \delta)]] + \xi_i (\cos \Theta - \lambda \sin \Theta), \quad (4.32)$$

$$B_i = \tan z_1 [\cos \alpha_1 - k_c \sin(z_1 - \delta)] - \frac{1}{2} [\cos \Theta (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) + \tan \varphi_1 \tan \varphi_2 \sin \Theta] [\cos z_2 - \lambda \sin \alpha_2 - k_c [\sin(\alpha_2 - \delta) + i \cos(z_2 - \delta)]] + \frac{c_1}{b \rho \sin \Theta} + \frac{c_2}{a \rho} \left(1 - \frac{1}{2} \sin^2 \Theta\right) + \xi_i [\tan \varphi_1 (1 + i \tan \varphi_2) \sin \Theta + i (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \cos \Theta], \quad (4.33)$$

$$\xi_i = m_i \left[ \sin z_2 + k_c \cos(z_2 - \delta) - \tan \varphi_2 \cos \alpha_2 - \frac{c_2}{a \rho} \right] - (D_i/G) \tan \varphi_2 [\cos z_2 - k_c \sin(z_2 - \delta)], \quad (4.34)$$

где:  $G$  — вес единичного скального блока,

$D_i$  — вес скального массива, находящегося над рассматриваемым слоем (рис. 4.6);

$\tan \varphi$ ;  $c$  — параметры прочности на сдвиг по плоскостям напластования ( $\tan \varphi_2$ ,  $c_2$ ) и по плоскости подсекающей трещины ( $\tan \varphi_1$ ,  $c_1$ ).

$\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  — углы падения подсекающей трещины ( $\alpha_1$ ) и напластования или слоистости ( $\alpha_2$ ),  $\Theta = \alpha_2 - \alpha_1$ ,

$i$  ( $j$ ) — номер слоя, считая от поверхности склона,

$n$  — число слоев в откосе,

$m_i$  — число блоков в  $i$ -том слое, расположенных над нижним блоком,

$\lambda = b/a$  — отношение геометрических размеров скального блока вдоль по напластованию ( $b$ ) к толщине слоя ( $a$ ).

Для откосов прямолинейного очертания величины  $m_i$  и  $D_i/G$  определяются по зависимостям:

$$m_i = i \lambda (\cot \eta - \cot \Theta) - \frac{\lambda}{2} \cot \eta - 1 \geq 0, \quad (4.35)$$

$$D_i/G = (\tan \eta / 2\lambda) \left( m_i - \frac{\lambda}{2} \cot \eta \right)^2, \quad m_i \geq \frac{\lambda}{2} \cot \eta, \quad (4.36)$$

где:  $\eta = \alpha_2 - \beta$ ,  $\beta$  — угол наклона откоса или склона.

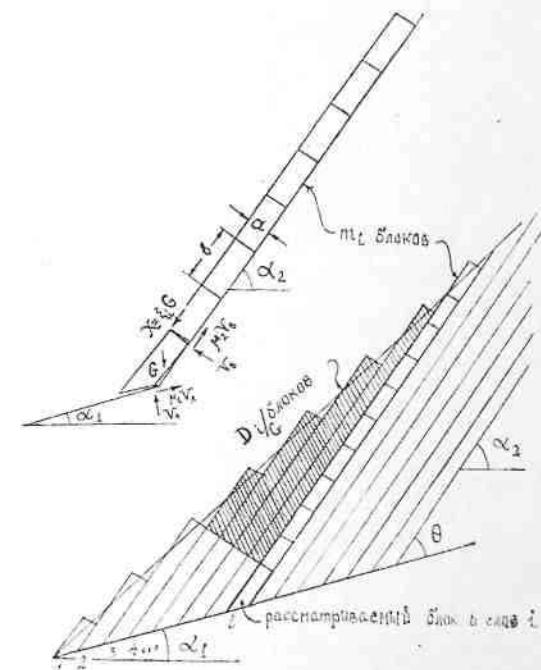


Рис. 4.6.

Для откосов произвольного очертания величины  $m_i$  и  $D_i/G$  определяются графически.

Откос считается устойчивым, если при всех возможных значениях  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) удовлетворяется условие \*:

$$S = n_c N - \frac{1}{k_n} R = \sum_{i=1}^j S_i \leq 0, \quad (4.37)$$

\* Обычно при анализе устойчивости откоса достаточно вычислить значение  $S_i$  для первых 8–15 слоев. В дальнейшем устойчивость слоев значительно повышается.

где:

$$S_i = G \left( n_c A_{i,c} - \frac{B_{i,c}}{k_u} \right). \quad (4.38)$$

При наличии фильтрационного потока его влияние на устойчивость откоса учитывается через параметры  $m_i$  и  $D_i/G$ .

Величина  $m_i$  в этом случае определяется по зависимости:

$$m_i = \frac{1}{b} \left[ I_{M,i} + \frac{\rho l_{c,i}}{\rho - 1} - b \right], \quad (4.39)$$

где:  $I_{M,i}$  — часть длины  $i$ -го слоя, находящаяся под уровнем кривой депрессии (рис. 4.7),  
 $I_{c,i}$  — часть длины  $i$ -го слоя, расположенная над поверхностью воды;  
 $\rho$  — плотность скальной породы.

Для вычисления параметра  $D_i/G$  необходимо учесть снижение  $D_i$  на величину  $U_{2i} - U_{3i}$  (рис. 4.7), а также снижение веса блока  $G$  на величину выталкивающей силы.

При значительной величине с/ра проскальзывания слоев друг относительно друга не наблюдается, а происходит отрыв скального

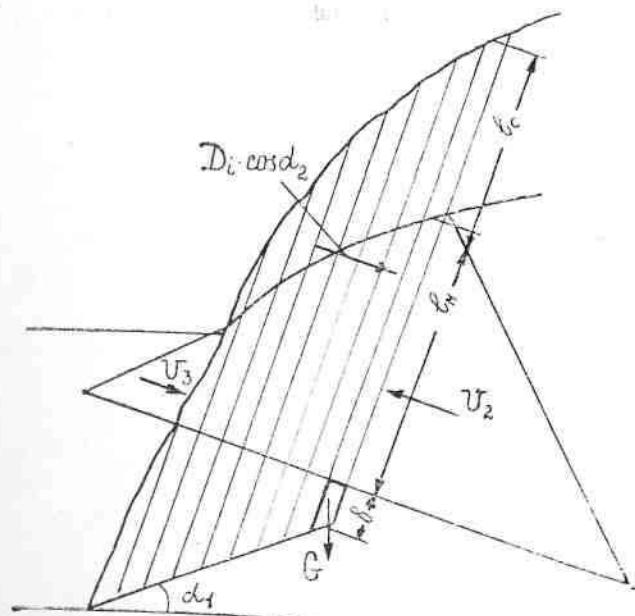


Рис. 4.7.

massiva и его смещение по подсекающей трещине как единого целиного.

В этом случае расчет устойчивости осуществляется с использованием зависимостей (4.1) и (4.2), приведенных выше.

Устойчивость откосов рассматриваемого строения можно считать обеспеченней, если доказана справедливость неравенства (4.37), а также неравенства (3.4) с вычислением сил  $N$  и  $R$  по формулам (4.1) и (4.2).

#### 4.5. Разрушение откосов с напластованием, падающим в глубь склона (схема Ж)

Разрушение откосов в скальных массивах с падением пластов в глубь склона обычно связано с перегибом пластов и опрокидыванием блоков на гребне откоса, что в свою очередь приводит к формированию потенциальных зон обрушения. Опрокидывающиеся верхние блоки передают дефицит своей устойчивости на нижерасположенные блоки, чем вызывают их опрокидывание или смещение по плоскостям трещин, сопряженных с напластованием (слоистостью) или возникших при изгибе пластов.

Дефицит устойчивости  $i$ -го пласта (блока), начиная от подошвы откоса, может быть определен по одной из следующих зависимостей:

$$S_{i,0} = \frac{1}{h_{i,0}} \left( n_c A_{i,0} - \frac{B_{i,0}}{k_u} \right), \quad (4.40)$$

$$S_{i,c} = n_c A_{i,c} - \frac{B_{i,c}}{k_u}, \quad (4.41)$$

где:

$$A_{i,0} = \frac{1}{2} G_i [b_i \sin z_1 - a \cos z_1 + k_c |a \sin(z_1 - \delta) + b_i \cos(z_1 - \delta)|] + S_{i+1} h_{2i} + \frac{1}{2} a U_{1i} + \frac{1}{3} I_{M,i} (U_{2i} - U_{3i}), \quad (4.42)$$

$$B_{i,0} = a (S_{i+1} \operatorname{tg} \varphi_2 + c_2 I_i), \quad (4.43)$$

$$A_{i,c} = G_i [\sin z_1 + k_c \cos(z_1 - \delta)] + S_{i+1} + U_{2i} - U_{3i}, \quad (4.44)$$

$$B_{i,c} = \operatorname{tg} \varphi_2 [G_i [\cos z_1 - k_c \sin(z_1 - \delta)] - U_{1i}] + a c_1. \quad (4.45)$$

В вышеприведенных формулах:

$G$  — вес рассматриваемого пласта (блока),  
 $S_{i,0}$ ,  $S_{i,c}$  — дефициты устойчивости, возникающие соответственно при опрокидывании блока и при его скольжении,

$S_{i+1}$  — дефицит устойчивости, передаваемый на рассматриваемый блок вышерасположенным,



$\operatorname{tg} \varphi_2$ ,  $c_2$  — параметры прочности на сдвиг по плоскостям напластования ( $\operatorname{tg} \varphi_2$ ,  $c_2$ ) и по трещинам сопряженной системы ( $\operatorname{tg} \varphi_1$ ,  $c_1$ ),  
 $\alpha_2$ ,  $\alpha_1$  — углы падения напластования и сопряженной системы трещин (рис. 4.8),

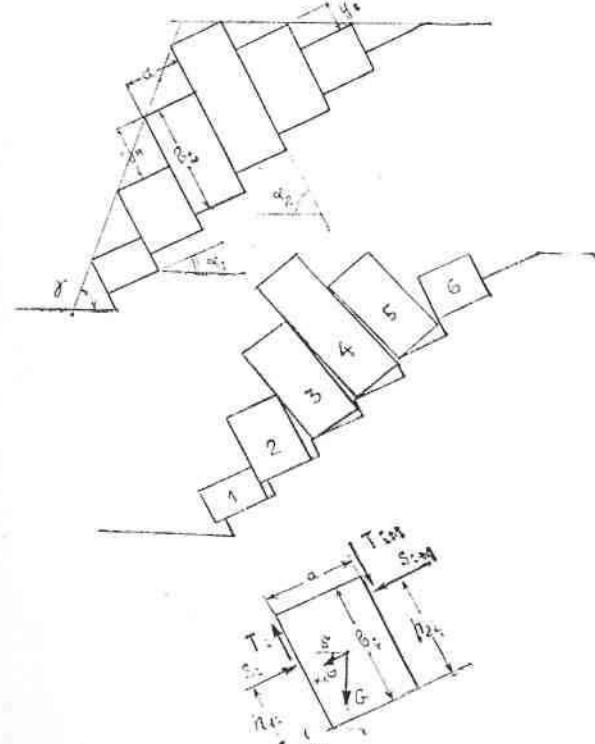


Рис. 4.8.

$a$  — толщина пластов (ширина блоков),  
 $b_i$  — высота расчетных блоков,

$l_i$  — длина участка, на котором действуют силы сцепления между  $i$ -тым и  $(i+1)$ -ым блоками,

$h_{1i}$ ,  $h_{2i}$  — плечи приложения дефицитов сил (рис. 4.8),  
 $U_H$ ,  $U_{2i}$ ,  $U_{3i}$  — силы гидростатического давления воды, действующие на основание и грани расчетного блока,  
 $l_{M_i}$  — длина части расчетного блока под уровнем воды.

За расчетное значение дефицита устойчивости, используемое при дальнейшем вычислении, принимается наибольшее из полученных значений  $S_{1,o}$  и  $S_{1,e}$ .

Величины  $h_{1i}$ ,  $h_{2i}$  и  $l_i$  определяются следующим образом:

- для блоков до бровки откоса (блоки 1—3 на рис. 4.8):

$$\left. \begin{aligned} h_{1i} &= b_i - y_u, \\ h_{2i} &= b_i, \\ l_i &= h_{1i+1} \end{aligned} \right\} \quad (4.46)$$

— для блока на бровке (блок 4):

$$\left. \begin{aligned} h_{1i} &= b_i - y_u, \\ h_{2i} &= b_i - y_s, \\ l_i &= b_{i+1} \end{aligned} \right\} \quad (4.47)$$

— для блоков за бровкой (блоки 5, 6):

$$\left. \begin{aligned} h_{1i} &= b_i, \\ h_{2i} &= b_i - y_s, \\ l_i &= b_{i+1} \end{aligned} \right\} \quad (4.48)$$

В формулах (4.46) — (4.48)  $y_u$  и  $y_s$  — превышения блоков друг над другом до и за бровкой на поверхности откоса (рис. 4.8):

$$\left. \begin{aligned} y_u &= a \operatorname{tg} \alpha_1, \\ y_s &= a \operatorname{tg} (\gamma - \alpha_1) \end{aligned} \right\}, \quad (4.49)$$

где:  $\gamma$  — угол наклона откоса.

Откос устойчив, если выполняются условия:

$$\left. \begin{aligned} S_{1,o} &\leq 0, \\ S_{1,e} &\leq 0 \end{aligned} \right\}. \quad (4.50)$$

#### 4.6. Отсутствие выдержаных поверхностей ослабления

При отсутствии в скальном массиве выдержанных систем трещин и поверхностей ослабления он рассматривается как квазизотропный. В этом случае его обрушение может произойти по формирующейся в теле откоса трещине. Для определения формы и положения этой возможной поверхности обрушения необходимо выполнить анализ напряженно-деформированного состояния откоса одним из существующих методов с учетом упруго-пластического поведения массива.

При бессистемной мелкой трещиноватости массива, когда высота откоса  $H$  в 20 раз и более превышает приведенный размер отдельного скального блока  $a_0$ , расчет его устойчивости может быть выполнен по схеме 3 на рис. 4.1 методами, разработанными в институте ВНИМИ [4, 8].

#### 4.7. Сдвиг объемных скальных блоков (схема И)

Наиболее распространенным случаем обрушения объемных скальных блоков является смещение по двуграниному углу («желобу»), образованному трещинами двух диагональных систем, падающих в сторону откоса или двумя отдельными крупными трещинами (рис. 4.9).

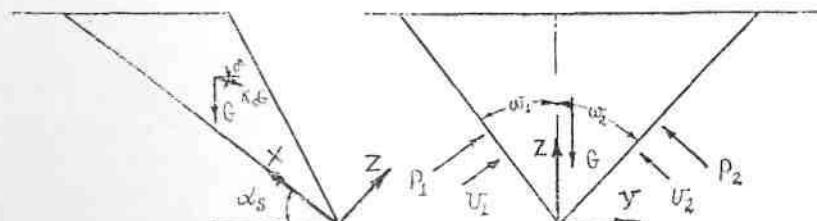
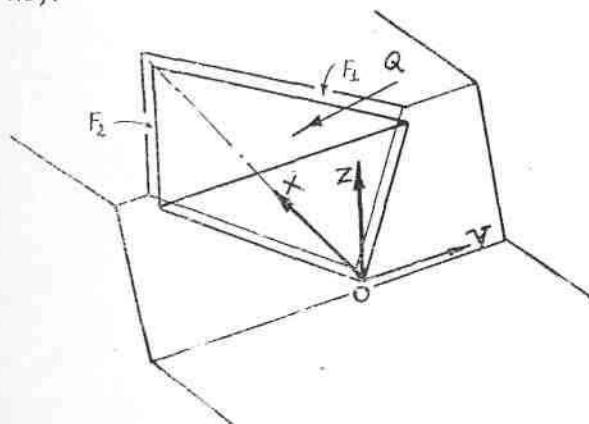


Рис. 4.9

Критерий устойчивости такого скального блока определяется зависимостью (3.4), параметры которой вычисляются следующим образом:

$$N = G[\sin z_s + k_c \cos(\alpha_s - \delta)] - Q \cos \gamma_x, \quad (4.51)$$



$$R = P_1 \operatorname{tg} z_1 + P_2 \operatorname{tg} z_2 + c_1 F_1 + c_2 F_2, \quad (4.52)$$

$$P_1 = [G(\cos z_s - k_c \sin(z_s - \delta)) + Q(\cos \gamma_z - \cos \gamma_y \operatorname{tg} \omega_2)] \frac{\cos \omega_2}{\sin(\omega_1 + \omega_2)} - U_1, \quad (4.53)$$

$$P_2 = [G(\cos z_s - k_c \sin(z_s - \delta)) + Q(\cos \gamma_z + \cos \gamma_x \operatorname{tg} \omega_1)] \frac{\cos \omega_1}{\sin(\omega_1 + \omega_2)} - U_2, \quad (4.54)$$

где:  $G$  — вес скального блока;  
 $\operatorname{tg} \varphi, c$  — параметры прочности на сдвиг по подсекающим трещинам,

$z_s$  — угол падения ребра пересечения плоскостей трещин,  
 $\omega_1, \omega_2$  — углы, образуемые плоскостями трещин с вертикальной плоскостью, проходящей через ребро их пересечения (рис. 4.9),

$F_1, F_2$  — площади подсекающих скальный блок плоскостей трещин,  
 $U_1, U_2$  — силы гидростатического давления воды на боковые грани скального блока,

$\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$  — величина углов между внешней силой  $Q$  и соответственно координатными осями  $Ox$  (совпадает с ребром пересечения),  $Oy$  (горизонтальна) и  $Oz$  (перпендикулярна ребру пересечения),  
 $Q$  — внешняя сила, действующая на скальный блок.

Углы  $z_s$ ,  $\omega_1$  и  $\omega_2$  определяются по формулам:

$$z_s = \operatorname{arc tg} \frac{\operatorname{tg} \omega_1 \operatorname{tg} \omega_2 \sin(\beta_1 - \beta_2)}{\operatorname{tg} \omega_2 \sin \beta_2 - \operatorname{tg} \omega_1 \sin \beta_1} \cos \beta_s, \quad (4.55)$$

$$\omega_1 = \operatorname{arc sin} [\sin z_1 \sin z_s \cos(\beta_1 - \beta_s) + \cos z_1 \cos z_s], \quad (4.56)$$

$$\omega_2 = \operatorname{arc sin} [\sin z_2 \sin z_s \cos(\beta_s - \beta_2) + \cos z_2 \cos z_s], \quad (4.57)$$

$$\beta_s = \operatorname{arc tg} \frac{\operatorname{tg} z_1 \cos \beta_1 - \operatorname{tg} z_2 \cos \beta_2}{\operatorname{tg} z_2 \sin \beta_2 - \operatorname{tg} z_1 \sin \beta_1}. \quad (4.58)$$

В формулах (4.55) — (4.58):  $\beta_2 < \beta_s < \beta_1$ ;  $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$  — соответственно углы и азимуты падения отчленяющих блок трещин,  
 $\beta_s$  — азимут падения ребра пересечения трещин.

Для скальных откосов (уступов) прямолинейного очертания с горизонтальной верхней поверхностью площади поверхностей трещин  $F_1$  и  $F_2$  и вес блока  $G$  определяются по формулам:

$$F_1 = \frac{H^2 e \sin \beta_1}{2 \sin \alpha_s \sin(\beta_1 - \beta_0)}, \quad (4.59)$$

$$F_2 = \frac{H^2 e \sin \xi_2}{2 \sin \alpha_s \sin (\beta_0 - \beta_2)}, \quad (4.60)$$

$$G = \frac{H^3 \varphi e \sin (\beta_1 - \beta_2)}{6 \sin (\beta_1 - \beta_0) \sin (\beta_0 - \beta_2)}, \quad (4.61)$$

где:

$$e = \operatorname{ctg} \alpha_s \cos (\beta_0 - \beta_s) - \operatorname{ctg} \alpha_0, \quad (4.62)$$

$$\xi_1 = \arccos [\cos \alpha_s \sin (\beta_1 - \beta_s)], \quad (4.63)$$

$$\xi_2 = \arccos [\cos \alpha_s \sin (\beta_s - \beta_2)]. \quad (4.64)$$

В вышеприведенных зависимостях:

$H$  — высота откоса,

$\alpha_0, \beta_0$  — соответственно угол и азимут падения плоскости откоса.

Предельная высота  $H_{\text{пр}}$  таких откосов, находящихся только под действием сил собственного веса, определяется следующим образом:

$$H_{\text{пр}} = \frac{3 \sin (\omega_1 + \omega_2) [c_1 \sin \xi_1 \sin (\beta_0 - \beta_2) + c_2 \sin \xi_2 \sin (\beta_1 - \beta_0)]}{2 \sin^2 \alpha_s \sin (\beta_1 - \beta_2) [n_c k_h \sin (\omega_1 + \omega_2) - \operatorname{ctg} \alpha_s (\operatorname{tg} \psi_1 \cos \omega_2 + \operatorname{tg} \psi_2 \cos \omega_1)]}. \quad (4.65)$$

В горных районах часто встречаются большие оползневые тела, которые могут прийти в движение при их подрезке, обводнении или другом инженерном воздействии.

Такие оползневые тела обычно имеют пирамидальную форму и расчет их устойчивости в условиях плоской задачи может привести к значительным погрешностям.

Расчет устойчивости такого объемного оползневого тела выполняется в следующей последовательности:

а) оконтуривается на топографическом плане возможное тело оползня (по имеющимся изменениям рельефа, трещинам, выходам на поверхность слабых зон),

б) определяется форма возможной поверхности смещения в виде горизонталей, которые наносятся на топографический план,

в) строится характерный профиль поверхности смещения в направлении наиболее вероятного движения оползня; криволинейные участки профиля заменяются прямолинейными и, таким образом, поверхность смещения разбивается на ряд участков, имеющих различные углы падения,

г) вычисляются объемы скального массива, располагающиеся на соответствующих участках поверхности смещения, для чего используется топографический план с горизонталиями дневной поверхности и поверхности смещения,

д) выполняется расчет устойчивости оползневого тела методом, изложенным в п. 4.2.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение 1

Значения коэффициентов сейсмичности  $k_c$  и коэффициентов надежности  $k_n$ , используемые при расчетах устойчивости скальных откосов

Таблица 1

Сейсмичность района, баллы	< 6	7	8	9
Значение коэффициента сейсмичности $k_c$	0	0,025	0,05	0,10
Класс сооружения	I	II	III	IV
Значение коэффициента надежности $k_n$	1,25	1,20	1,15	1,10

Таблица 2

Класс сооружения	I	II	III	IV
Значение коэффициента надежности $k_n$	1,25	1,20	1,15	1,10

Примечание: Класс сооружения (откоса) устанавливается согласно главе СНиП по основным положениям проектирования речных гидротехнических сооружений.

### Приложение 2

Линеаризация функции прочности на сдвиг по скальной трещине.

Пусть требуется линеаризовать зависимость прочности на сдвиг по трещине:

$$\tau_{\text{пр.}} = f(z) = z \operatorname{tg} \left[ i_0 \left( 1 - \frac{z}{R_{tc}} \right)^{10} + \varphi_0 \right] \quad (1)$$

при известных величинах  $i_0$  и  $R_{tc}$  в заданном интервале значений  $z_1 < z < z_2$ .

Разложим функцию  $f(z)$  в ряд Тейлора и сохраним в разложении первые два члена:

$$\text{где: } \tau_{\text{пр.}} = f(\bar{z}) + (z - \bar{z}) f'(\bar{z}), \quad (2)$$

$$f(\bar{z}) = \bar{z} \operatorname{tg} \left[ i_0 \left( 1 - \frac{\bar{z}}{R_{tc}} \right)^{10} + \varphi_0 \right], \quad (3)$$

$$f'(\bar{z}) = \operatorname{tg} \left[ i_0 \left( 1 - \frac{\bar{z}}{R_{tc}} \right)^{10} + \varphi_0 \right] - \frac{10 i_0 \frac{\bar{z}}{R_{tc}} \left( 1 - \frac{\bar{z}}{R_{tc}} \right)^9}{\cos^2 \left[ i_0 \left( 1 - \frac{\bar{z}}{R_{tc}} \right)^{10} + \varphi_0 \right]}, \quad (4)$$

$$\bar{z} = \frac{z_1 + z_2}{2}. \quad (5)$$



Искомая линейная зависимость прочности на сдвиг по трещине в рассматриваемом интервале нормальных напряжений записывается в виде:

$$\tau_{\text{пр.}} = \operatorname{tg} \varphi^H z + c^H, \quad (6)$$

где:

$$c^H = \bar{z} \bar{e}, \quad (7)$$

$$\operatorname{tg} \varphi^H = \operatorname{tg} \left[ i_0 \left( 1 - \frac{\bar{z}}{R_{tc}} \right)^{10} + \varphi_0 \right] - e \quad (8)$$

$$e = \frac{0,174 i_0 \frac{\bar{z}}{R_{tc}} \left( 1 - \frac{\bar{z}}{R_{tc}} \right)^9}{\cos^2 \left[ i_0 \left( 1 - \frac{\bar{z}}{R_{tc}} \right)^{10} + \varphi_0 \right]}. \quad (9)$$

Уравнение (9) преобразовано для подстановки значений угла  $i_0$  в градусах

Рассмотрим конкретный пример получения величин  $\operatorname{tg} \varphi^H$  и  $e^H$ .

На рис. 1 представлены результаты проведенных испытаний сопротивляемости сдвигу скального массива, описываемые уравнением:

$$\tau_{\text{пр.}} = z \operatorname{tg} \left[ 21,5^0 \left( 1 - \frac{z}{20} \right)^{10} + 45^0 \right], \quad \text{МПа}$$

Линеаризуем полученную зависимость для двух интервалов значений нормальных напряжений в плоскости трещины:

$$0 < z \leq 1 \text{ МПа и } 1 < z \leq 2 \text{ МПа}$$

а) для интервала  $0 < z \leq 1 \text{ МПа}$  ( $\bar{z} = 0,5 \text{ МПа}$ ):

$$e = \frac{0,174 \cdot 21,5 \cdot \frac{0,5}{20} \left( 1 - \frac{0,5}{20} \right)^9}{\cos^2 \left[ 21,5^0 \left( 1 - \frac{0,5}{20} \right)^{10} + 45^0 \right]} = 0,332$$

$$c^H = 0,5 \cdot 0,332 \approx 0,17 \text{ МПа}$$

$$\operatorname{tg} \varphi^H = \operatorname{tg} 61,7^0 - 0,332 = 1,52$$

Полученная линейная зависимость имеет вид:

$$\tau_{\text{пр.}} = 1,52 z + 0,17, \quad \text{МПа}$$

б) Для интервала  $1 < \sigma \leq 2$  МПа ( $\bar{\sigma} = 1,5$  МПа):

$$\epsilon = \frac{0,174 \cdot 21,5 \cdot \frac{1,5}{20} \left(1 - \frac{1,5}{20}\right)^n}{\cos^2 54,9} = 0,421$$

$$c^H = 1,5 \cdot 0,421 \approx 0,63 \text{ МПа}$$

$$\operatorname{tg} \varphi^H = \operatorname{tg} 54,9^\circ - 0,421 = 1,00.$$

Искомая линейная зависимость:

$$\tau_{\text{пр}} = \sigma + 0,63, \text{ МПа.}$$

Графики полученных зависимостей приведены на рис. 1.

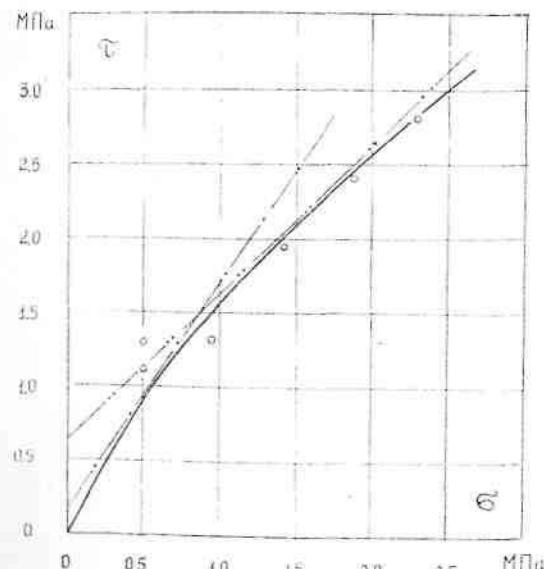


Рис. 1. Примеры линеаризации криволинейной зависимости

$$[\tau] = \sigma \operatorname{tg} \left[ 21,5^\circ \left(1 - \frac{\sigma}{20}\right)^{1^n} + 45^\circ \right]$$

на интервалах

$$0 < \sigma \leq 1,0 \text{ МПа} \quad [\tau] = 1,52 \sigma + 0,17, \text{ МПа}$$

$$1,0 < \sigma \leq 2,0 \text{ МПа} \quad [\tau] = \sigma + 0,63, \text{ МПа}$$

## ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ УСТОЙЧИВОСТИ СКАЛЬНЫХ ОТКОСОВ

Ниже приведены примеры анализа устойчивости скальных откосов для всех рассмотренных в главе 4 расчетных схем. Расчеты выполнены по первой группе предельных состояний, как наиболее употребимой на практике.

### 1. Откос с пологим падением напластования в сторону склона.

Рассмотрим в качестве примера откос, представленный на рис. 2. Массив сложен известняками с напластованием, падающим в сторону склона под углом  $18^\circ$ . Параметры прочности на сдвиг по напластованию  $\operatorname{tg} \varphi = 0,48$ ;  $c = 0,05$  МПа. Плотность скальной породы  $\rho = 2,65 \text{ т}/\text{м}^3$ . Сейсмичность района оценивается в 8 баллов, т. е.  $k_s = 0,05$ ,  $n_c = 0,9$ . Направление сейсмической силы принимается горизонтальным ( $\delta = 0^\circ$ ). Коэффициент надежности  $k_n = 1,25$ .

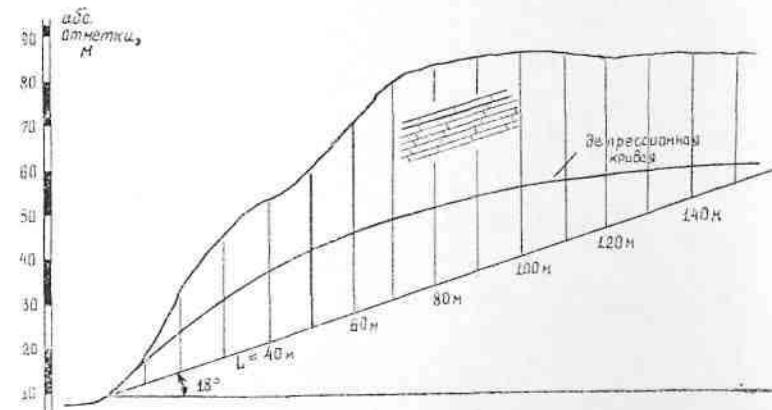


Рис. 2.

Последовательность выполнения расчета следующая:

а) рассматриваемый откос разбивается вертикальными сечениями на ряд массивов, начиная от подошвы склона. Для удобства расстояния между сечениями выбираются одинаковыми,

б) для каждого из массивов определяются его вес и действующие на него внешние силы (в нашем случае — силы гидростатического давления воды и сейсмическая сила),

в) по формулам (4.1), (4.2), (3.4) находятся значения обобщенных сил  $N$  и  $R$ , а также величина дефицита устойчивости  $S$ , соответствующие каждому массиву.

Результаты вычисления устойчивости откоса сведены в табл. 3.

Из графы 8 таблицы следует, что рассматриваемый откос при заданном значении коэффициента надежности  $k_u$  является неустойчивым, поскольку величины  $S$  для массивов с размером по пологопадающей трещине напластования  $L$  от 30 м до 80 м получились положительными. При этом наименьшие коэффициенты устойчивости  $k_y = 1,08$  имеют массивы с  $L = 40 \div 60$  м (см. графу 7).

Повышение устойчивости откоса может быть достигнуто не-

Таблица 3  
Расчет устойчивости откоса с пологим падением пластов  
в сторону склона

$L$ , мп	$G$ , мп	$U_1$ , мп	$U_2$ , мп	С фильтрационным давлением				Без фильтрационного давления			
				$N$ , мп	$R$ , мп	$k_y$	$S$ , мп	$N$ , мп	$R$ , мп	$k_y$	$S$ , мп
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
20	4,5	1,0	0,5	2,1	2,5	1,17	-0,11	1,6	3,0	1,87	-0,96
30	10,2	2,1	0,9	4,5	4,9	1,10	0,13	3,6	6,1	1,69	-1,64
40	17,6	3,6	1,2	7,4	8,0	1,08	0,26	6,3	9,9	1,57	-2,25
50	26,0	5,2	1,4	10,6	11,5	1,08	0,34	9,3	14,2	1,52	-2,99
60	35,8	7,0	1,6	14,3	15,5	1,08	0,47	12,8	19,1	1,49	-3,76
70	47,2	9,7	1,6	18,4	20,3	1,10	0,32	16,8	24,7	1,47	-4,64
80	59,4	10,5	1,5	22,6	25,4	1,12	0,02	21,2	30,7	1,45	-5,48
90	71,5	12,2	1,4	26,8	30,6	1,14	-0,36	25,5	36,6	1,44	-6,33
100	83,4	13,9	1,2	30,9	35,6	1,15	-0,67	29,8	42,5	1,43	-7,18
110	94,1	15,4	1,0	34,6	40,4	1,17	-1,16	33,7	47,9	1,422	-7,99
120	104,6	16,7	0,7	38,0	44,9	1,18	-1,72	37,3	53,0	1,421	-8,83
130	113,9	17,7	0,5	41,1	49,1	1,19	-2,29	40,7	57,7	1,417	-9,53
140	122,6	18,6	0,3	44,0	53,1	1,21	-2,88	43,8	62,1	1,418	-10,26
150	130,5	19,2	0,1	46,7	56,9	1,22	-3,49	46,6	66,1	1,420	-10,94

\*) В скобках приведен вес отсека с учетом его взвешивания.

сколькими способами, в частности, снижением уровня депрессионной кривой (путем дренажа или установки цемзавесы) и, как следствие, уменьшением или полным устранением фильтрационных сил, действующих на откос.

В графах 9—12 таблицы приведены результаты оценки устойчивости рассматриваемого откоса при отсутствии фильтрационного давления. Как видим, массив в этом случае становится устойчивым с большей степенью запаса (минимальный коэффициент устойчивости  $k_y = 1,42$ ).

## 2. Откос на полигональной поверхности смещения

2.1. Отсутствуют крупные трещины, расчленяющие оползающий скальный массив.

Рассмотрим устойчивость склона водохранилища, подсеченного пологопадающей зоной нарушения, аппроксимированной ломаной линией ABC, и отсеченного от основного массива крутопадающей трещиной CD (рис. 3).

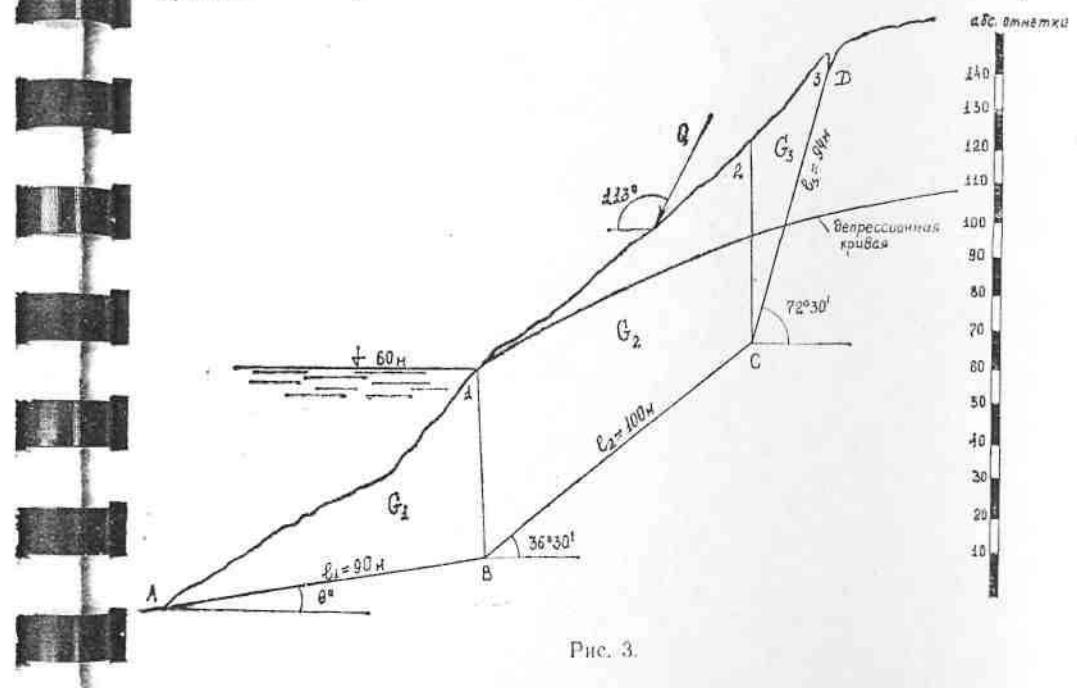


Рис. 3.

Параметры прочности на сдвиг по отдельным участкам поверхности смещения, углы падения соответствующих участков и их размер приведены в левой части таблицы 4 (графы 2—5).

Плотность скальной породы  $\rho = 2,5 \text{ т}/\text{м}^3$ .

Коэффициент надежности  $k_u = 1,15$ , коэффициент сейсмичности  $k_c = 0,025$  ( $n_c = 0,9$ ),  $\delta = -5^\circ$  (задано наихудшее направление сейсмической силы).

Уровень воды в водохранилище поддерживается на отметке 60 м, расчетная кривая депрессии показана на рисунке.

На откос действует внешняя нагрузка  $Q = 15,6 \text{ МН}$  под углом  $\beta = 113^\circ$ .

Для анализа устойчивости откоса он разбивается на три отсека вертикальными линиями, как это показано на рис. 3.

Таблица 4  
Расчет устойчивости откоса с полигональной поверхностью смещения методом дефицита сил

Номер отсека	$\gamma_p$ , град.	п а р а м е т р								
		$t_p$ , м	$\operatorname{tg} \varphi_p$	$c_p$ , МПа	$G_{ip}$ , мн	$Q_{ip}$ , мн	$U_{H,i}$ , мн	$U_{2i}$ , мн	$U_{3i}$ , мн	$S_i$ , мн
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3	72,5	94	0,70	0	18,5	0	0	4,71	4,20	13,3
2	36,5	100	0,80	0,075	102,0	15,6	40,0	4,20	12,5	23,2
1	9	90	0,75	0,20	46,3	0	—	—	—	-17,0
					(27,8)*					

Величины  $S_i$  для каждого из отсеков определились по формуле (4.11).

В соответствии со СНиП II-7-81 при расчете инерционных сил вес погруженного в воду 1-го отсека определялся без учета взвешивающего действия воды.

Расчеты показали (см. графу 11), что несмотря на положительные величины  $S_i$  верхних двух отсеков, откос в целом устойчив, т. к. общий дефицит откоса отрицателен и равен  $S = -17$  мн. Полученное подбором значение коэффициента устойчивости рассматриваемого откоса равно  $k_y = 1,52$ .

2.2. Имеются крупные трещины, расчленяющие оползающий скальный массив.

#### а) графический метод.

Определим устойчивость скального откоса, изображенного на рис. 4а. Массив рассечен на взаимодействующие отсеки двумя крупными трещинами —  $BB'$  и  $CC'$ . Основные параметры откоса представлены в таблице 5. Дополнительные расчетные данные:  $\rho = 2,65 \text{ т}/\text{м}^3$ ,  $\delta = 0^\circ$ ,  $k_u = 1,25$ .

Расчетная сейсмичность района 6 баллов, т. е.  $k_c = 0$  и  $n_c = 1,0$ .

Таблица 5  
Исходные данные для определения устойчивости откоса методом многоугольника сил

Номер отсека	$\gamma_p$ , град.	$t_p$ , м	$\operatorname{tg} \varphi_p$	п а р а м е т р				
				$C_p$ , МПа	$t'_p$ , м	$\operatorname{tg} \varphi'_p$	$G_{ip}$ , мн	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
3	58	54	0,55	0,10	45	0,70	0,15	21,6
2	25	54	0,60	0,15	44	0,50	0,15	73,4
1	10,5	65	0,60	0,12	—	—	—	35,1

\* Приведен вес отсека с учетом его взвешивания.

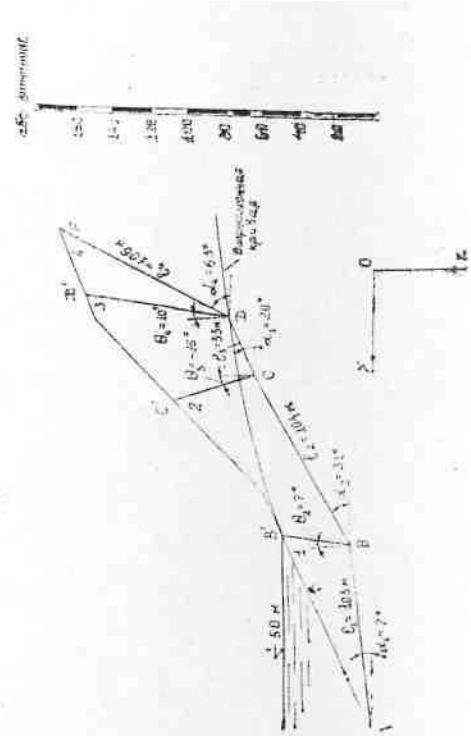


Рис. 5.

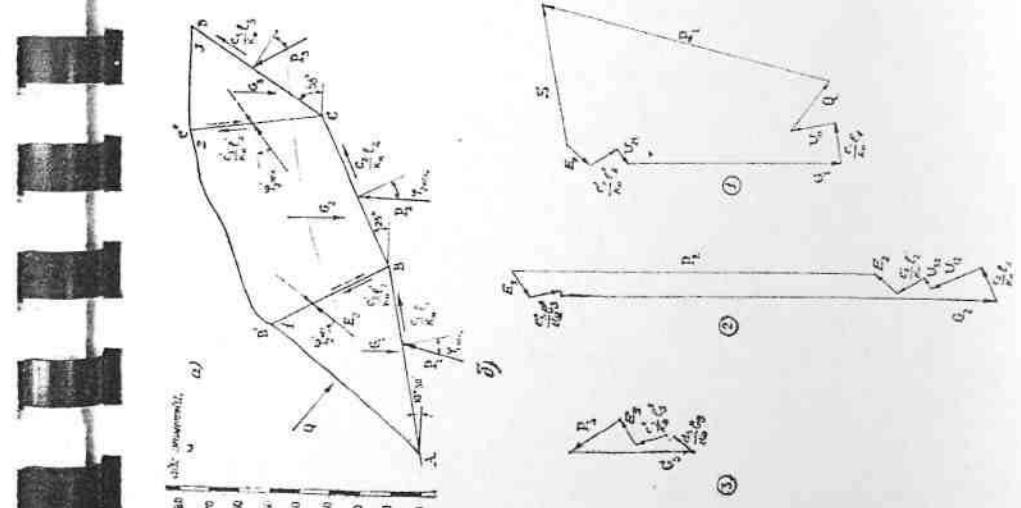


Рис. 4.

Для оценки устойчивости откоса используем метод многоугольника сил.

Построение веревочных многоугольников сил производим с верхнего 3-го отсека по методике, описанной в п. 4.3.1. Из условия замыкания многоугольника сил, действующего на этот отсек, определяем величину и направление силы взаимодействия  $E_3$  (рис. 4б). С найденной силы  $E_3$  начинается построение многоугольника сил для 2-го отсека. Предполагая, что 2-й отсек также находится в предельном состоянии, определяем реакцию  $E_2$ , необходимую для графического анализа устойчивости нижнего отсека.

В результате построения многоугольника сил для 1-го отсека получаем, что откос в целом является устойчивым, имея отрицательный дефицит устойчивости, равный  $S = -23$  МН (рис. 4б).

#### б) аналитический метод.

Требуется определить устойчивость горного склона водохранилища, представленного на рис. 5. Поверхность смещения склона аппроксимируется четырьмя прямолинейными плоскостями, а массив потенциальной призмы обрушения рассечен на взаимодействующие отсеки тремя тектоническими трещинами. Основные геометрические и прочностные характеристики откоса приведены в табл. 6 (графы 2–9).

Рассматриваемый склон расположен в районе с сейсмичностью 7 баллов ( $k_c = 0,025$ ), расчетное значение величины угла  $\delta = 10^\circ$ . Плотность породы массива  $\rho = 2,7 \text{ т/m}^3$ .

Заданная величина коэффициента надежности  $k_u = 1,25$ .

Уровень воды в водохранилище поддерживается на отметке 50 м, кривая депрессии показана на рис. 5.

Порядок расчета устойчивости откоса следующий. В соответствии с расчетной схемой потенциальная призма обрушения рассчитывается по поверхностям ослабления, секущим призму (трещины  $BB'$ ,  $CC'$ ,  $DD'$ ) на четыре взаимодействующих отсека.

Производится определение составляющих расчетных нагрузок  $Q'_{xi}$  и  $Q''_{xi}$  от сил собственного веса пород и воздействия воды на каждый отсек призмы обрушения (см. табл. 6, графы 10, 11). Для 1-го отсека  $Q'_{x1} = 0$ , поскольку воздействие воды на этот отсек заключается в приложении к нему силы взвешивания, направленной вертикально вверх. Составляющие силовых нагрузок на отсеки от сейсмического воздействия  $Q'_{xi}$  и  $Q''_{xi}$  приведены в графах 12 и 13 таблицы.

Величины составляющих расчетных суммарных нагрузок на каждый отсек приведены в графах 14 и 15 табл. 6.

Следующим этапом для поверхностей ослабления  $BB'$ ,  $CC'$  и  $DD'$  (боковым границам отсеков) производится проверка реализации предельного напряженного состояния по формуле (4.29). Нормальные  $\sigma_i$  и касательные  $\tau_i$  напряжения по поверхностям ос-



Таблица 6

Расчет устойчивости естественного склона с полигональной поверхностью смещения методом ВНИИГА (8.9)

Номер отсека	параметр										$E_i$ , МН				
	$a_i$ , град.	$t_i$ , м	$tg \varphi_i$	$c_i$ , МПа	$l_p$ , м	$tg \varphi'_i$	$c'_i$ , МПа	$Q'_{xi}$ , МН	$Q''_{xi}$ , МН	$Q_{xi}$ , МН					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
4	63	106	0,40	0	10	81	0,50	0,03	33,91	0	0,15	0,84	34,06	0,84	23,0
3	20	33	0,35	0,65	-15	45	0,27	0	76,04	0,34	0,33	1,89	76,37	2,23	24,2
2	31	104	0,70	0,1	7	38	0,35	0,005	72,07	6,34	0,39	2,19	72,46	8,53	17,9
1	7	103	0,80	0,15	—	—	—	—	34,20	0	0,23	1,31	34,33	1,31	—

лабления в призме обрушения определяются с использованием расчетных значений сил взаимодействия  $E_i$  между элементами для квазиплошной призмы. Для этого с использованием зависимости (4.28) без учета поверхностей ослабления определяются значения  $E_i$  (графа 1б) при принятии постоянной величины угла наклона сил взаимодействия для всей призмы [10].

В данном примере по всем поверхностям ослабления, секущим призму обрушения откоса, наблюдается предельное состояние скального массива.

По формулам (4.25–4.27) определяются расчетные значения обобщенной силы предельного сопротивления сдвигу  $R$  и обобщенной активной сдвигающей силы  $N$  для всей призмы обрушения откоса. Для рассматриваемого откоса  $N=74,0$  МН и  $R=86,1$  МН.

Оцениваем устойчивость откоса по условию (3.2) при значениях коэффициентов  $n_c=0,9$  (для особого сочетания нагрузок) и  $k_n=1,25$  (для первого класса сооружений):

$$S = 0,9 \cdot 74,0 - \frac{1}{1,25} \cdot 86,1 = 66,6 - 68,88 = -2,28 \text{ МН}$$

Таким образом, рассматриваемый склон в условиях сейсмического воздействия и взвешивающих и фильтрационных сил, вызванных наличием водохранилища, является устойчивым.

### 3. Откос с крутым падением напластования в сторону склона

Проанализируем устойчивость откоса, изображенного на рис. 6. Исходные данные:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 25^\circ, \quad z_2 = 62^\circ, \quad \operatorname{tg}\varphi_1 = \operatorname{tg}\varphi_2 = 0,75 \\ a &= 1,5 \text{ м}, \quad \lambda = 0,25, \quad \rho = 2,5 \text{ т/м}^3, \quad k_n = 1,20 \end{aligned}$$

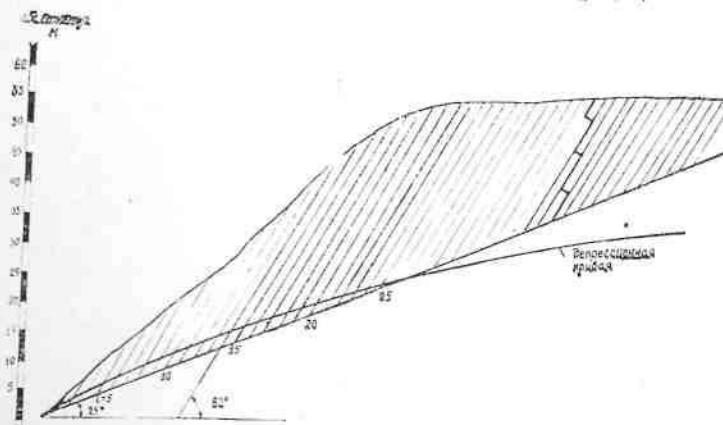


Рис. 6.

Сейсмичность района равна 6 баллам ( $k_c=0$ ).

Положение депрессионной кривой показано на рисунке.

Устойчивость откоса необходимо определить на строительный период ( $n_c=0,95$ ).

3.1. Сцепление между блоками скального массива пренебрежимо мало.

Результаты анализа устойчивости откоса при отсутствии сил сцепления ( $c_1=c_2=0$ ) представлены в табл. 7.

Таблица 7

Расчет устойчивости откоса при отсутствии сцепления в межблочных контактах

$i$	$m_i$	$\frac{D_i}{G}$	$\hat{z}_i$	$A_i$	$B_i$	$k_{yi}$	$S_i$	$s_i$
							кн	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	0	0	0,498	0,637	1,28	-12,7	-12,7
2	0	0	0	0,498	0,637	1,28	-12,7	-25,4
3	0	0	0	0,498	0,637	1,28	-12,7	-38,1
4	0,56	0	0,30	0,692	0,798	1,15	-1,7	-39,8
5	0,84	0,21	0,37	0,738	0,835	1,13	1,2	-38,6
6	1,31	0,77	0,42	0,772	0,862	1,12	3,3	-35,3
7	1,80	1,37	0,47	0,804	0,889	1,11	5,1	-30,2
8	2,26	2,24	0,41	0,763	0,857	1,12	2,4	-27,8
9	2,72	3,37	0,26	0,663	0,776	1,17	-3,7	-31,5
10	3,42	5,41	0	0,498	0,637	1,28	-12,7	-44,2

Таблица 8

Расчет устойчивости откоса, смещающегося как единое целое

$L_s$	$G_s$	$U_{1s}$	$U_{2s}$	$N_s$	$R_s$	$k_y$	$S_s$
		мн	мн	мн	мн		
1	2	3	4	5	6	7	8
20	2,1	0,22	0,02	0,9	2,3	2,55	-1,1
30	4,5	0,41	0,02	1,9	4,2	2,21	-1,7
40	8,1	0,57	0,015	3,5	7,1	2,03	-2,6
50	13,9	0,72	0,01	5,9	11,4	1,93	-3,9
60	19,0	0,82	0	8,0	15,3	1,91	-5,1
70	25,1	0,84	0	10,6	19,9	1,88	-6,5
80	30,9	0,84	0	13,1	24,4	1,862	-7,9
90	35,8	0,84	0	15,2	28,2	1,855	-9,1
100	40,0	0,84	0	26,9	31,5	1,864	-10,2
110	43,3	0,84	0	18,3	34,3	1,874	-11,2

Вычисление величин  $A_i$  и  $B_i$  осуществлялось по формулам:

$$A_i = 0.498 + 0.648 \xi_i, \quad B_i = 0.637 + 0.536 \xi_i,$$

$$\xi_i = 0.530 m_i - 0.352 \frac{D_i}{G}.$$

Определение параметров  $m_i$  и  $\frac{D_i}{G}$  производилось графически.

В граfe 7 таблицы приведены коэффициенты устойчивости отдельных слоев  $k_{y,i}$ , определяемые как отношения величин  $B_i$  и  $A_i$ .

Вычисление дефицитов  $S = \sum_i S_i$  (графа 9) показывает, что в целом откос является устойчивым, несмотря на неустойчивость отдельных слагающих его слоев (величины  $S_i$  для слоев с 5-го по 8-й являются положительными).

3.2. Сцепление между блоками скального массива достаточно велико.

Рассматривая тот же самый откос, предположим, что в контактах между блоками имеется сцепление  $c_1 = c_2 = 0,05$  МПа.

Расчет по методике послойного разрушения в данном случае не позволит получить реальные результаты, т. к. послойного разрушения в этих условиях не произойдет, о чем свидетельствует расчет параметра  $\xi_i$  по уравнению (4.34):

$$\xi_i = -0.830 m_i - 0.352 \frac{D_i}{G}.$$

Таким образом, величина  $\xi_i$  для любых  $i$  отрицательна, т. е. верхние блоки в слое не имеют своих дефицитов устойчивости, которые бы они передавали на нижний блок.

В таблице 8 приведены результаты расчета устойчивости откоса по методике, предполагающей возможность смещения скального массива как единого целого по пологонадающей плоскости. Вычисление величин  $N$  и  $R$  осуществлялось по зависимостям (4.1) и (4.2).

Из граф 7 и 8 таблицы следует, что откос является устойчивым с достаточно большой степенью запаса ( $k_{y,\min} = 1,855$ ).

#### 4. Откос с напластованием, падающим в глубь склона

Рассмотрим в качестве примера откос, представленный на рис. 7. Плоскости падают в глубь склона под углом  $60^\circ$ . Толщина пластов  $a = 4$  м.

Остальные исходные данные:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} q_1 &= 0,55; & c_1 &= 0,05 \text{ МПа}; & \operatorname{tg} q_2 &= 0,60; & c_2 &= 0,06 \text{ МПа}; \\ \rho &= 2,6 \text{ т/м}^3; & k_c &= 0,05; & n_c &= 0,9; & \delta &= 0^\circ; & k_a &= 1,20. \end{aligned}$$

Подземные воды залегают на большой глубине, так что влияния на устойчивость откосов не оказывают. Результаты расчетов сведены в табл. 9.

В графах 6 и 7 таблицы приведены значения дефицита устойчивости расчетных блоков (слоев) при «опрокидывании» и при

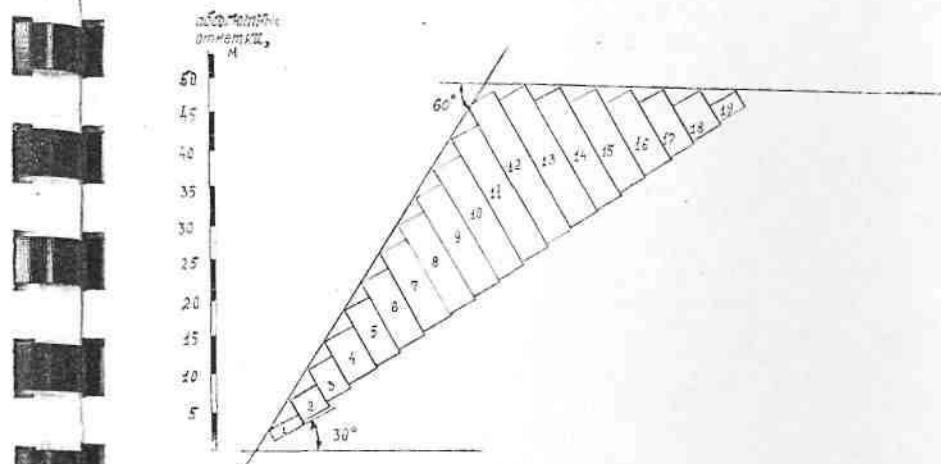


Рис. 7.

«скольжении», вычисленные по зависимостям (4.40) и (4.41). За расчетное значение  $S_i$  необходимо принимать наибольшее из них, которое и приведено в графике 8.

Таблица 9

Расчет устойчивости откоса с напластованием, падающим под углом  $60^\circ$  в глубь склона

$i$	$b_i$	$G_i$	$h_{1i}$	$h_{2i}$	$S_{i,a}$	$S_{i,c}$	$S_i$	Характер разрушения
	м	мн	м	м	мн	мн	мн	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
19	2,5	0,26	2,5	—	0	0	0	Устойчив
18	5,5	0,57	5,5	3,2	0	0	0	
17	8,0	0,83	8,0	5,7	0	0	0	
16	10,5	1,09	10,5	8,2	0	0	0	
15	13,0	1,35	13,0	10,7	0,01	0	0,01	
14	15,5	1,61	15,5	13,2	0,07	0	0,07	
13	18,0	1,87	18,0	15,7	0,17	0,10	0,17	

Продолжение табл. 9

1	2	3	4	5	6	7	8	9
12	20,5	2,13	18,2	18,2	0,34	0,21	0,34	Опрокидывание
11	19,0	1,98	16,7	19,0	0,46	0,34	0,46	
10	17,5	1,82	15,2	17,5	0,53	0,44	0,53	
9	15,5	1,61	13,2	15,5	0,53	0,48	0,53	
8	14,0	1,46	11,7	14,0	0,49	0,46	0,49	Скольжение
7	12,0	1,25	9,7	12,0	0,39	0,40	0,40	
6	10,5	1,09	8,2	10,5	0,26	0,31	0,31	
5	8,5	0,88	6,2	8,5	0,10	0,20	0,20	
4	7,0	0,73	4,7	7,0	0	0,09	0,09	
3	5,0	0,52	2,7	5,0	—	-0,03	-0,03	Устойчивы
2	3,5	0,36	1,2	3,5	—	-0,13	-0,13	
1	1,5	0,16	—	1,5	—	-0,15	-0,15	

Анализируя результаты расчетов, можно отметить, что:

- верхние четыре блока (19—16) устойчивы,
- блоки с 15 по 8 подвержены опрокидыванию (т. к. у них  $S_{t,o} > S_{t,e}$ ),
- блоки с 7 по 4 подвержены скольжению (т. к. у них  $S_{t,o} < S_{t,e}$ ),
- нижние три блока являются устойчивыми.

Откос в целом устойчив, поскольку полученная величина  $S_1$  отрицательна.

### 5. Расчет устойчивости объемного скального блока

Рассмотрим устойчивость скального блока, изображенного на рис. 8.

Параметры отчленяющих блок трещин сведены в таблицу 10.

Высота уступа  $H=15$  м, азимут и угол падения плоскости откоса:  $\beta_0=160^\circ$ ,  $\alpha_0=80^\circ$ .

Остальные исходные данные:

$$\rho = 2,75 \text{ т м}^{-3}; k_c = 0,05; n_c = 0,9; \delta = 0^\circ;$$

$$Q = 300 \text{ т}; \gamma_x = 40^\circ; \gamma_y = 60^\circ; \gamma_z = 66^\circ; k_n = 1,25.$$

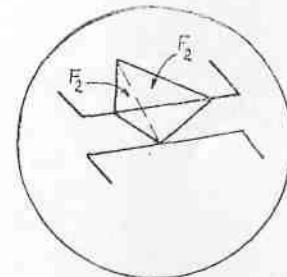
Порядок расчета следующий. Используя зависимости (4.55) и (4.58), находим угол и азимут падения ребра пересечения плоскостей трещин:

$$\gamma_s = 46,5^\circ; \beta_s = 158^\circ.$$

С помощью формул (4.56) и (4.57) находим углы  $\omega_1$  и  $\omega_2$ :  $\omega_1 = 47,5^\circ$ ,  $\omega_2 = 69^\circ$ .

По формулам (4.59) — (4.61) определяем площади опирания блока по трещинам  $F_1$  и  $F_2$  и вес скального блока  $G$ :

$$F_1 = 131 \text{ м}^2, F_2 = 226 \text{ м}^2, G = 23,8 \text{ МН}.$$



дбс. отметки

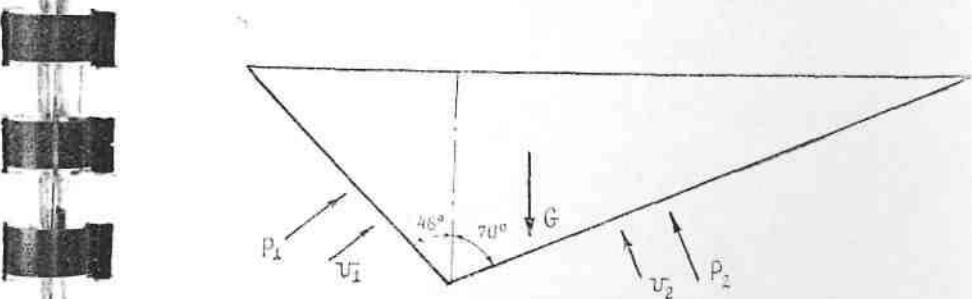
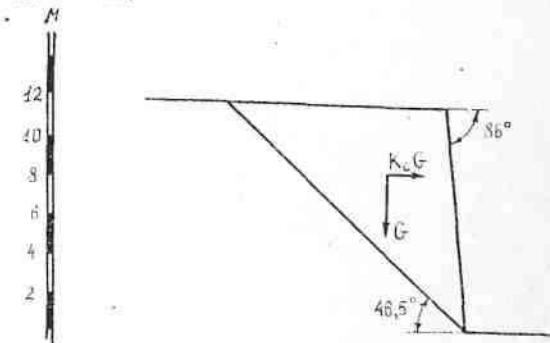


Рис. 8.

Таблица 10  
Параметры трещин, отчленяющих скальный блок

номер трещины	параметр				
	$\gamma_F$ , град.	$\beta_F$ , град.	$\operatorname{tg} \varphi_F$	$c_F$ , МПа	$U_F$ , МН
1	2	3	4	5	6
1	60	210	0,60	0,06	2,5
2	50	130	0,70	0,04	3,0

Обобщенные силы  $N$  и  $R$  определяются по уравнениям (4.51) и (4.52):

$$N = 16,6 \text{ МН}; R = 26,5 \text{ МН}.$$

Общий дефицит устойчивости откоса:

$$S = -6,3 \text{ МН}.$$

Таким образом, рассматриваемый скальный блок является устойчивым.

#### РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М., «Наука», 1969.
2. Газиев Э. Г. Устойчивость скальных массивов и методы их закрепления. М., Стройиздат, 1977.
3. Газиев Э. Г., Тиден Е. Н. Определение параметров систем трещин вероятностным методом. «Инженерная геология», 1979, № 4.
4. Методические указания по определению углов наклона бортов, откосов, уступов и отвалов строящихся и эксплуатируемых карьеров. Л., изд-во ВНИМИ, 1972.
5. В. А. Мироненко, В. М. Шестаков. Основы гидрогеомеханики. М., «Недра», 1974.
6. Речицкий В. И. Влияние сцепления на устойчивость и характер разрушения скальных откосов с крутым падением напластования в сторону склона. «Энергетическое строительство», № 7, 1977.
7. Руководство по полевым исследованиям сопротивления скальных оснований гидрооружий сдвигу. П 01-73, Л., «Энергия», 1973.
8. Фисенко Г. Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов. М., «Недра», 1965.
9. Фрейберг Э. А. Устойчивость скального откоса с рассеченной природными поверхностями ослабления призмой обрушения. Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, т. 130, 1979.
10. Фрейберг Э. А., Кауфман М. Д. Расчеты устойчивости скальных склонов и откосов. Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, т. 147, 1981.
11. Goodman R. Methods of Geological Engineering in Discontinuous Rocks. West Publishing Company, 1976.
12. Kovari K., Fritz P. Stabilitätsberechnung ebener und räumlicher Felsböschungen. «Rock Mechanics», No 8, 1976.

#### ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр
Введение	3
Глава 1. Исходные данные для расчетов устойчивости скальных откосов	4
Глава 2. Методы определения основных исходных данных	6
Глава 3. Основные принципы расчета устойчивости скальных откосов	10
Глава 4. Рекомендуемые методы расчета устойчивости скальных откосов	13
4.1. Сдвиг по плоской поверхности	13
4.2. Сдвиг по полигональной поверхности при отсутствии крупных секущих трещин	16
4.3. Сдвиг по полигональной поверхности смещения при наличии крупных секущих трещин	19
4.4. Сдвиг по полигональной поверхности при наличии крутопадающего в сторону склона напластования	23
4.5. Разрушение откосов с напластованием, падающим в глубь склона	27
4.6. Отсутствие выдержаных поверхностей ослабления	29
4.7. Сдвиг объемных скальных блоков	30
Приложения	33
Рекомендуемая литература	50
Оглавление	51

Л-68102.                   Подписано в печать 17/II-86 г.  
Заказ 333. Тираж 300. Объем 3<sup>1</sup>/<sub>4</sub> л. л. Цена 42 коп.

Типография института «Гидропроект».