

Оглавление

ПРЕДИСЛОВИЕ	5
Глава 1. УСТОЙЧИВОСТЬ ОТКОСОВ ПРИ ОТРЫВКЕ КОТЛОВАНОВ.....	7
1.1. Расчет устойчивости откосов в нескальных грунтах.....	7
1.2. Расчет устойчивости откосов в скальных грунтах.....	13
Глава 2. НАГРУЗКИ НА ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ, ВОЗВОДИМЫЕ ОТКРЫТЫМ СПОСОБОМ	29
2.1. Общие положения	29
2.2. Вертикальная нагрузка.....	32
2.3. Горизонтальная нагрузка.....	34
2.4. Расчет ограждающих конструкций котлованов	37
2.5. Расчет анкеров.....	46
2.6. Расчет подземных конструкций, сооружаемых методом опускных колодцев	50
Глава 3. МЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ПРОТЕКАЮЩИЕ В ПОРОДНОМ МАССИВЕ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ЗАКРЫТЫМ СПОСОБОМ. ГОРНОЕ ДАВЛЕНИЕ	57
3.1. Процессы, сопутствующие проходке выработок закрытым способом	57
3.2. Горное давление. Нагрузки на сооружения	59
Глава 4. РАСЧЕТЫ КРЕПЕЙ И ОБДЕЛОК ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ КАК СТЕРЖНЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ.....	65
4.1. Типы крепей и обделок и используемые расчетные схемы ...	65
4.2. Расчет подземных сооружений с использованием схем стержневых конструкций	70
Глава 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ ВМЕЩАЮЩИМ МАССИВОМ МЕТОДАМИ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД.....	75
5.1. Модели поведения породного массива. Упругая модель.....	75
5.2. Расчет напряженно-деформированного состояния массива вокруг незакрепленных выработок с использованием упругой модели.....	78
5.3. Начальное напряженное состояние массива пород.....	82

Глава 6. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВЫРАБОТКИ КРУГОВОГО ОЧЕРТАНИЯ С ЛИНЕЙНО ДЕФОРМИРУЕМЫМ ПОРОДНЫМ МАССИВОМ.....	84
6.1. Анализ напряженно-деформированного состояния массива вокруг незакрепленной выработки. Понятие о диаграмме равновесных состояний породного массива	84
6.2. Использование диаграммы равновесных состояний массива при подборе крепи, обеспечивающей устойчивость выработки	91
Глава 7. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВЫРАБОТКИ КРУГОВОГО ОЧЕРТАНИЯ С НЕЛИНЕЙНО ДЕФОРМИРУЕМЫМ ПОРОДНЫМ МАССИВОМ.....	98
7.1. Использование упругопластической модели породного массива	98
7.2. Использование упругохрупкой модели породного массива	104
7.3. Метод конечных элементов при решении задач подземного строительства	106
Библиографический список	115

ПРЕДИСЛОВИЕ

Данное пособие написано на основе курса лекций по дисциплине «Механика подземных сооружений», который читался в течение последних тринадцати лет в МГСУ студентам, обучавшимся по учебному плану подготовки инженеров ПГС, специализации «Строительство подземных сооружений промышленно-гражданского назначения».

Цель учебного пособия — помочь студенту, в рамках отведенных учебных часов, получить первоначальные базовые знания о подземных сооружениях различного назначения и их конструктивных особенностях. Пособие также должно способствовать развитию понимания у студента основ взаимодействия подземных сооружений с вмещающим породным массивом, умения выбирать соответствующие расчетные схемы и методы анализа работы системы подземное сооружение — породный массив. По окончании изучения дисциплины «Механика подземных сооружений» студент должен быть подготовлен к восприятию и усвоению материала дисциплин, читаемых на старших курсах и посвященных расчетам, проектированию и конструированию реальных подземных сооружений.

Пособие состоит из семи глав. В первых двух главах рассматриваются подземные сооружения, строительство которых осуществляется открытым способом, т.е. со вскрытием земной поверхности. Сюда входят сооружения, возводимые в котлованах с естественными откосами, а также сооружения, строительство которых осуществляется в условиях плотной городской застройки, в котлованах, требующих устройства ограждающих конструкций. Сюда же относятся сооружения, возводимые методом «опускного колодца».

В указанных главах подробно рассмотрены вопросы устойчивости откосов котлованов в скальных и нескальных грунтах, сбора нагрузок, действующих на указанные сооружения, а также приведены методы их расчета на статические нагрузки как в процессе строительства, так и в период эксплуатации.

Главы 3—7 посвящены сооружениям, имеющим определенную глубину заложения и возводимым без вскрытия земной поверхности, т.е. закрытым способом. В них рассматриваются механические процессы, происходящие в породном массиве при проходке и раскрытии подземных выработок, приводятся сведения о конструк-

циях крепей и обделок, дается понятие горного давления и его роли при формировании нагрузок, воздействующих на подземные сооружения. Подробно рассматриваются вопросы расчета напряженно-деформированного состояния выработок кругового очертания в условиях упругой, упругопластической и упругохрупкой задач, и показано, как полученные результаты используются для подбора и установки крепей при строительстве подземных сооружений.

В главе 7 рассматриваются основы метода конечных элементов, который в настоящее время является наиболее современным и эффективным методом, используемым для исследования взаимодействия подземных сооружений с вмещающим массивом.

При окончательной редакции учебного пособия авторами были учтены советы и замечания рецензентов, позволившие сделать изложение материала более логичным и удобным для восприятия. Авторы выражают глубокую благодарность рецензентам: профессору Л.В. Маковскому; профессору, доктору технических наук Н.В. Ханову; доценту, кандидату технических наук В.А. Зимнюкову, а также профессору, доктору технических наук И.Я. Харченко.

Глава 1

УСТОЙЧИВОСТЬ ОТКОСОВ ПРИ ОТРЫВКЕ КОТЛОВАНОВ

1.1. Расчет устойчивости откосов в нескальных грунтах

При строительстве гидротехнических объектов, транспортных и промышленно-гражданских сооружений, при добыче полезных ископаемых часто приходится устраивать искусственные поверхности, ограничивающие выемку, насыпь или природный породный массив. Такие поверхности называются *откосами*. Если откос образовался естественным путем и ограничивает породный массив естественного сложения, то он называется *склоном*.

Ограниченный откосом или склоном породный массив при определенных условиях может потерять равновесие и перейти в неустойчивое состояние.

Основными причинами потери устойчивости откосов и склонов являются:

- устройство недопустимо крутого откоса или подрезка находящегося в предельном состоянии склона;
- увеличение внешней нагрузки (возведение сооружений, складирование материалов на откосе или вблизи его бровки);
- изменение внутренних сил (увеличение удельного веса грунта при возрастании его влажности или, напротив, влияние взвешивающего давления воды на грунты);
- неправильное назначение расчетных характеристик прочности грунта или снижение его сопротивления сдвигу за счет повышения влажности и других причин;
- проявление гидродинамического давления, сейсмических сил, различного рода динамических воздействий (движение транспорта, забивка свай и т.п.).

Указанные факторы необходимо принимать во внимание при проектировании и строительстве сооружений, учитывая при этом, что они могут встречаться в самых различных сочетаниях. Ниже приведены некоторые случаи расчета устойчивости откосов. Более подробные сведения по этому вопросу можно найти, например, в [14].

Проведение расчетов устойчивости откосов необходимо, когда строительство подземных сооружений ведется открытым способом, с устройством котлована и последующим возведением в нем сооружения. Если при этом рядом со строительством отсутствует плотная городская застройка, технологически проще и экономичнее возводить сооружения в котлованах с естественными откосами без использования ограждающих конструкций.

Потеря грунтовым откосом устойчивости, как правило, определяется переходом грунта в предельное состояние. При проектировании откосов рассматриваются 2 случая оценки их устойчивости: в первом случае оценивается устойчивость проектируемого откоса; во втором — определяется заложение откоса при заданном коэффициенте устойчивости, вычисленном по формуле

$$k_{st} = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \varphi'} = \frac{c}{c'}, \quad (1.1)$$

где φ, c — расчетные значения прочностных сдвиговых характеристик грунта; φ', c' — значения характеристик, соответствующих предельному состоянию откоса или склона.

Откос считается устойчивым при выполнении условия $k_{st} \geq k_{st}^H$, где k_{st}^H — нормативный коэффициент устойчивости, значение которого, как правило, находится в пределах 1,1...1,3.

1.1.1. Устойчивость откоса в идеально сыпучих грунтах ($\varphi \neq 0, c = 0$)

А. Рассмотрим равновесие частицы, свободно лежащей на поверхности откоса с углом заложения α при заданном значении расчетного угла внутреннего трения φ грунта, слагающего откос (рис. 1.1, а). В этом случае, поскольку грунт несвязный и характеризуется только углом внутреннего трения φ , устойчивость частицы обеспечивается тогда, когда сдвигающая сила T равна или меньше удерживающей силы трения T' .

Зная вес частицы G , условие ее устойчивости запишем как

$$T \leq T', \quad (1.2)$$

где $T = G \sin \alpha$; $T' = G \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi$; $\alpha \operatorname{tg} \varphi$ — угол внутреннего трения.

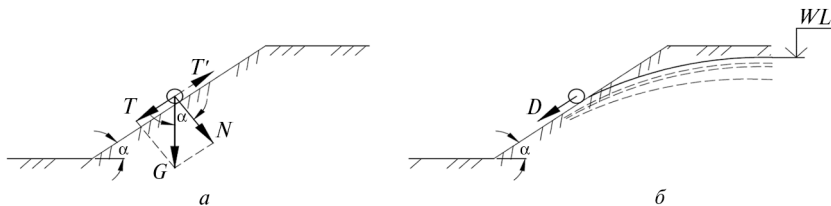


Рис. 1.1. Расчетные схемы устойчивости откоса в идеально сыпучих грунтах [14]

Из неравенства (1.2) следует, что

$$\operatorname{tg} \alpha \leq \operatorname{tg} \varphi \text{ или } \alpha \leq \varphi. \quad (1.3)$$

Из выражения (1.3) видно, что, если угол заложения откоса равен или меньше угла внутреннего трения грунта, откос обладает устойчивостью. Необходимо установить, насколько откос устойчив. Для этого необходимо определить угол заложения откоса, соответствующий потере его устойчивости. В предельном состоянии условие (1.3) принимает вид

$$\alpha = \varphi'. \quad (1.4)$$

Из равенства (1.4) следует, что *в предельном состоянии у сыпучих грунтов углу внутреннего трения φ соответствует определенный угол заложения откоса α* . Исходя из этого, угол α иногда называют углом предельного заложения откоса, или углом естественного откоса. Используя (1.1) и (1.4), угол α определяется равенством

$$\operatorname{tg} \varphi' = \operatorname{tg} \varphi / k_{st}. \quad (1.5)$$

Преобразовав равенство (1.5), можно получить как выражение для определения угла естественного откоса α

$$\alpha = \operatorname{arctg}(\operatorname{tg} \varphi / k_{st}), \quad (1.6)$$

так и выражение для подсчета коэффициента его устойчивости

$$k_{st} = \operatorname{tg} \varphi / \operatorname{tg} \alpha. \quad (1.7)$$

Как указывалось выше, устойчивость откоса считается обеспеченной при $k_{st} \geq k_{st}^H$.

Б. При проектировании часто требуется определить угол заложения откоса, гарантирующий его устойчивость в соответствии с заданным нормативным коэффициентом устойчивости. В этом случае в уравнении (1.7) вместо k_{st} нужно подставить k_{st}^H и решить уравнение относительно α :

$$\alpha = \arctg(\operatorname{tg} \varphi / k_{st}^H). \quad (1.8)$$

1.1.2. Влияние грунтовых вод

В несвязных сыпучих грунтах, характеризующихся наличием только угла внутреннего трения, при наличии грунтовых вод, уровень которых выше уровня подошвы откоса, фильтрационный поток выходит на его поверхность (рис. 1.1, б), в результате чего появляется гидродинамическая сила D , что значительно снижает устойчивость откоса. В этом случае при определении коэффициента устойчивости откоса следует, рассматривая равновесие частицы на поверхности откоса, сдвигающую силу увеличить, добавив к ней значение фильтрационной составляющей D . Учитывая, что кривая депрессии выходит на откос по касательной к его поверхности под углом, практически равным углу естественного откоса α , и принимая гидравлический градиент в точке выхода потока равным

$$i = \sin \alpha, \quad (1.9)$$

фильтрационное гидродинамическое давление D на единицу объема грунта, характеризующего пористостью n , можно определить по формуле

$$D = \gamma_w n i = \gamma_w n \sin \alpha, \quad (1.10)$$

где γ_w — удельный вес воды; n — пористость грунта.

Зная D , запишем для единичного объема грунта уравнение предельного равновесия частицы с учетом фильтрационных сил:

$$\gamma_w n \sin \alpha + \gamma_{sb} \sin \alpha - \gamma_{sb} \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi = 0, \quad (1.11)$$

где γ_{sb} — удельный вес грунта с учетом взвешивающего действия воды.

Используя равенство (1.5), после несложных преобразований уравнения (1.11) получим формулу для рассматриваемого случая в виде

$$k_{st} = \frac{\gamma_{sb} \operatorname{tg} \varphi}{(\gamma_w n + \gamma_{sb}) \operatorname{tg} \alpha}. \quad (1.12)$$

1.1.3. Устойчивость вертикального откоса в идеально связных грунтах ($\varphi = 0$; $c \neq 0$)

В откосах, сложенных связными грунтами, угол предельного заложения изменяется с увеличением его высоты. При этом откос может быть вертикальным, сохраняя устойчивость до тех пор, пока его высота не превысит предельную высоту h_0 .

Для определения значения высоты h_0 рассмотрим вертикальный откос (рис. 1.2). Напряженное состояние в массиве в этом случае формируется таким образом, что наибольшие напряжения развиваются в точке A у подошвы откоса, где, увеличиваясь с ростом его высоты, образуется область предельного равновесия, что в конце концов (при $h = h_0$) приводит к потере устойчивости откоса по плоскости AC , с образованием призмы обрушения. В этом случае в точке A при высоте откоса h_0 максимальное главное напряжение будет равно природному давлению ($\sigma_1 = \gamma h_0$), соответствующему состоянию предельного равновесия. Минимальное главное напряжение в точке A будет равно нулю, т.е. $\sigma_3 = 0$, поскольку граница откоса представляет собой свободную вертикальную поверхность.

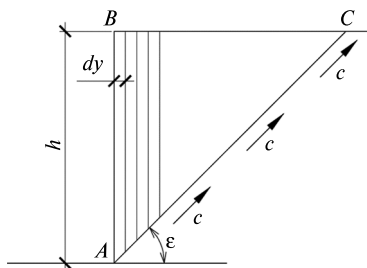


Рис. 1.2. Схема к расчету устойчивости откоса грунта, обладающего только сцеплением [2]

Разобьем призму обрушения ABC на вертикальные элементы, имеющие ширину dy (см. рис. 1.2) и не взаимодействующие друг с

другом. Трение и сцепление между элементами не учитываются. Размер элемента в направлении нормально рисунку равняется 1,0. По плоскости AC составим уравнение предельного равновесия элемента.

Подсчитав вес элемента dy :

$$dG = \gamma h_0 dy \quad (1.13)$$

и спроектировав его на поверхность AC , определим сдвигающую силу T :

$$dT = \gamma h_0 dy \sin \omega \quad (1.14)$$

Сила сопротивления сдвигу определяется величиной сил сцепления в связном грунте C . Спроектировав их на ось, нормальную поверхности AB , получим

$$dT' = C / \cos \omega dy \quad (1.15)$$

Используя выражения (1.14) и (1.15), составим уравнение предельного равновесия и решим его относительно h_0 . В результате получим

$$h_0 = 2C / \gamma \quad (1.16)$$

Коэффициент устойчивости вертикального откоса (при $h \leq h_0$) определится отношением удерживающей силы к сдвигающей

$$k_{st} = dT' / dT = \frac{C dy}{\cos \omega \gamma h_0 \sin \omega dy} = \frac{2C}{\gamma h_0 \sin 2\omega} \quad (1.17)$$

При наибольшем значении $\sin 2\omega$, т.е. при $\omega = 45^\circ$, коэффициент устойчивости имеет минимальное значение

$$k_{st} = 2C / h\gamma \quad (1.18)$$

1.1.4. Устойчивость вертикального откоса в грунтах, обладающих трением и сцеплением ($\varphi \neq 0$, $c \neq 0$)

Используя, как и в подразделе 1.1.3, уравнение предельного равновесия для вертикального откоса, запишем критерий Кулона

через главные напряжения: $\sigma_1 = \gamma h_0$ и $\sigma_3 = 0$. После преобразований получим формулу для определения предельного значения высоты вертикального откоса в виде

$$h_0 = \frac{2c \cos \varphi}{\gamma(1 - \sin \varphi)}. \quad (1.19)$$

При $\varphi = 0$ выражение (1.19) будет сведено к выражению (1.16).

1.1.5. Инженерный метод расчета устойчивости откосов и склонов

В приведенных выше методах расчета устойчивости откосов рассматриваются однородные изотропные грунты. В то же время в реальных случаях приходится иметь дело с существенной неоднородностью грунтовых массивов. Кроме того, в этих методах не учитываются сложные схемы нагружения, влияние сейсмических, фильтрационных сил и ряд других воздействий. В связи с этим в проектной практике применяются инженерные методы расчета устойчивости, содержащие различные упрощающие допущения.

В качестве примера рассмотрим широко используемый в инженерной практике метод круглоцилиндрических поверхностей скольжения, в соответствии с которым расчет проводился в условиях плоской задачи как для скальных, так и для нескальных массивов [14].

Метод основан на предположении нарушения устойчивости откоса в результате смещения какой-то его части по произвольной траектории скольжения, представляющей собой дугу окружности с центром в точке O и радиусом r (рис. 1.3, *a*). Выделенная таким образом часть откоса представляет собой возможную призму обрушения, которая рассматривается как жесткое недеформируемое тело.

В качестве коэффициента устойчивости откоса принимается отношение моментов вращения выделенной части откоса (M_{st} и M_{sa}) относительно точки O по часовой и против часовой стрелки от сил, его удерживающих и сдвигающих соответственно:

$$k_{st} = M_{st}/M_{sa}. \quad (1.20)$$

Вычисление моментов, входящих в формулу (1.20), осуществляется путем разбиения выделенной части откоса на вертикальные

элементарные отсеки. Разбивка производится таким образом, чтобы в пределах каждого i -го элементарного отсека сдвиговые характеристики грунта φ и c не изменялись. Силами, действующими на элементарный отсек, являются его вес Pg_i и (если имеется) нагрузка, действующая на поверхность откоса в пределах отсека Pq_i . Равнодействующая этих сил $(Pg_i + Pq_i)$ прикладывается в центре основания отсека и раскладывается на нормальную N_i и касательную T_i составляющие к дуге скольжения в точке их приложения, величины которых вычисляются по формуле

$$N_i = (Pg_i + Pq_i) \cos \alpha_i; T_i = (Pg_i + Pq_i) \sin \alpha_i. \quad (1.21)$$

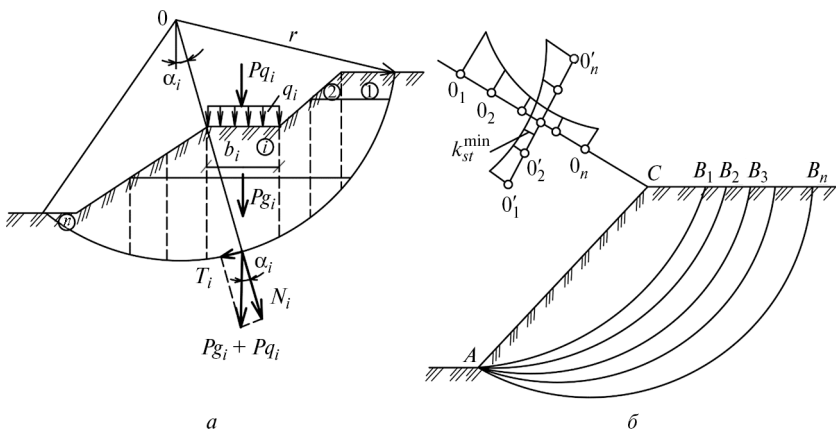


Рис. 1.3. Схема расчета устойчивости откосов методом круглоцилиндрических поверхностей скольжения [14]:
 а — расчетная схема; б — определение наиболее опасной поверхности скольжения; 1, 2, ..., n — номера элементов

Используя выражение (1.21), подсчитывают суммарные моменты от удерживающей и сдвигающей сил, вращающих выделенную часть откоса относительно центра 0.

Момент от суммарной сдвигающей силы определяют, используя выражение

$$M_{sa} = r \sum_{i=1}^n T_i = r \sum_{i=1}^n (Pg_i + Pq_i) \sin \alpha_i, \quad (1.22)$$

где n — число элементарных отсеков в выделенной части откоса.

Удерживающей силой является сила сопротивления сдвигу вдоль плоскости скольжения, которая для элементарного отсека подсчитывается с использованием закона Кулона:

$$T'_i = N_i \operatorname{tg} \varphi_i + c_i l_i = (Pg_i + Pq_i) \cos \alpha_i \operatorname{tg} \varphi_i + c_i l_i, \quad (1.23)$$

где l_i — длина дуги основания i -го элемента, определяемая как $l_i = b_i / \cos \alpha_i$, здесь b_i — ширина элемента.

После чего момент от суммарной удерживающей силы подсчитывается по формуле

$$M_{sr} = r \sum_{i=1}^n T'_i = r \left[\sum_{i=1}^n (Pg_i + Pq_i) \cos \alpha_i \operatorname{tg} \varphi_i + \sum_{i=1}^n c_i l_i \right]. \quad (1.24)$$

Зная величины моментов от сдвигающей и удерживающей сил относительно центра O , коэффициент устойчивости откоса определяют, используя выражение

$$k_{st} = \frac{\sum_{i=1}^n (Pg_i + Pq_i) \cos \alpha_i \operatorname{tg} \varphi_i + \sum_{i=1}^n c_i l_i}{\sum_{i=1}^n (Pg_i + Pq_i) \sin \alpha}. \quad (1.25)$$

Устойчивость выделенной части грунтового откоса относительно выбранного центра вращения O считается обеспеченной, если удовлетворяется условие $k_{st} \geq k_{st}^H$. При реальном проектировании требуется найти минимальное значение коэффициента устойчивости откоса, которому соответствует наиболее опасное положение кривой скольжения. Для этого из точки пересечения A поверхности откоса с земной поверхностью проводится наклонная линия (см. рис. 1.3, б), параллельная плоскости откоса. Далее из точки C проводится нормально к откосу линия, на которой задаются несколько центров вращения O_1, O_2, \dots, O_n . Относительно этих центров определяются значения коэффициентов устойчивости и строится эпюра $k_{st,i}$. Через точку, в которой коэффициент устойчивости имеет минимальное значение (0_{\min}), перпендикулярно проводится вторая линия. На этой линии также задаются несколько центров вращения O'_1, O'_2, \dots, O'_n относительно которых определяются коэффициенты

устойчивости откоса. На основании этих значений снова строится эпюра коэффициентов $k_{st,i}$ и отыскивается минимальное значение коэффициента, определяющее наиболее опасное положение кривой скольжения.

При значениях $k_{st} \geq k_{st}^H$ устойчивость откоса или склона считается обеспеченной.

В заключение следует отметить, что рассмотренный графоаналитический метод круглоцилиндрических поверхностей скольжения, позволяющий с достаточной точностью определять устойчивость откосов, при пользовании им «вручную» является весьма трудоемким. Однако использование для этих целей ЭВМ позволило успешно решить указанную проблему, что способствует широкому распространению метода при решении инженерных задач.

1.2. Расчет устойчивости откосов в скальных грунтах

При расчете устойчивости откосов в скальных грунтах важным этапом является определение механизма их разрушения, который во многом определяет вероятность наступления события, позволяет правильно рассчитать коэффициент запаса и, если необходимо, разработать инженерные меры по укреплению откоса. С подобной задачей приходится сталкиваться, например, при устройстве порталов тоннелей на скальных склонах или строительстве автодорог в горных условиях.

На основе анализа большого числа разрушений откосов были установлены 3 основные схемы потери ими устойчивости в виде: сдвига части массива по подсекающей плоскости; сдвига клиновидного блока; опрокидывания скальных блоков в сторону склона (рис. 1.4, *а–в*). Более подробно с этим вопросом можно ознакомиться, например, в [3].

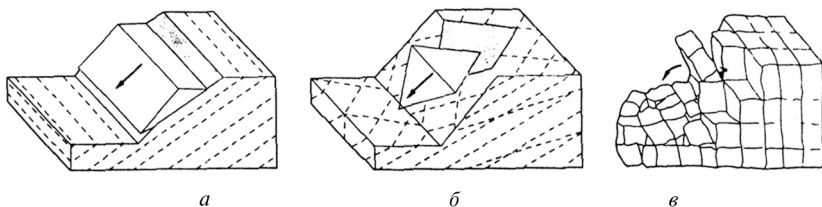


Рис. 1.4. Основные механизмы потери устойчивости скальными откосами: *а* — сдвиг по плоскости; *б* — сдвиг клиновидного блока; *в* — опрокидывание блоков

1.2.1. Сдвиг по плоскости

В качестве примера рассмотрим наиболее простую схему сдвига по плоскости. Сдвиг под действием собственного веса (см. рис. 1.4, *a*) может произойти у скального блока, подсекаемого плоскостью скольжения, имеющей падение в сторону поверхности склона. При этом должны существовать другие нарушения сплошности, плоскости которых отделяют блок от массива и образуют его боковые поверхности. Сдвиг реализуется при условии, если угол наклона плоскости скольжения превысит угол трения по контакту между плоскостью и блоком. В этом случае можно достаточно просто подсчитать коэффициент запаса на сдвиг. На рис. 1.5 показаны 2 встречающихся на практике варианта: трещина, отделяющая блок от массива, в одном случае выходит на поверхность откоса, в другом — пересекает откос.

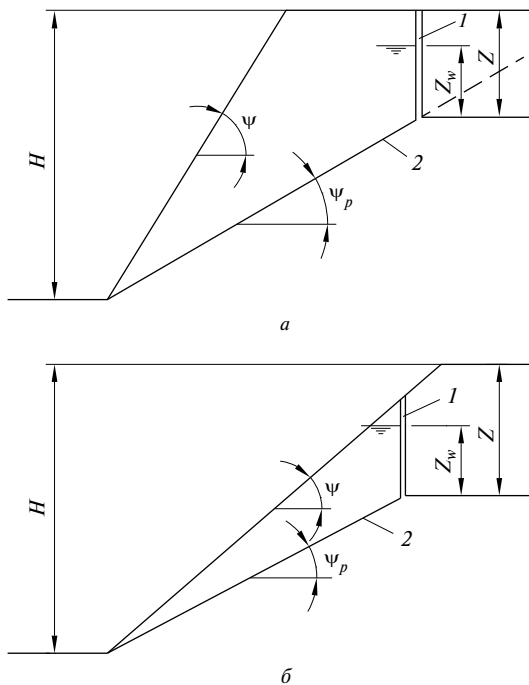


Рис. 1.5. Схема для анализа сдвига по плоскости: *a* — плоскость отрыва выходит на поверхность массива за перегибом откоса; *б* — на откос; *1* — плоскость отрыва; *2* — плоскость сдвига

Глубина трещины определяется расстоянием z от поверхности массива. Принимается допущение, что скальный массив водонепроницаем, сползающий блок абсолютно жесткий, прочность на сдвиг вдоль плоскости скольжения определяется законом Кулона и все действующие на блок силы проходят через его центр тяжести.

Рассмотрим случай, когда трещина, отделяющая блок от массива, заполнена на глубину z водой, которая фильтрует вдоль поверхности скольжения. При этом падение напора от трещины до подошвы откоса происходит по линейному закону, а подошва откоса дренируется.

Спроектируем все действующие на блок силы на плоскость скольжения и составим уравнение равновесия

$$G \sin \psi_p + W \cos \psi_p = c_T L + (G \cos \psi_p - U - W \sin \psi_p) \operatorname{tg} \psi_T, \quad (1.26)$$

где G — вес блока; ψ_p — угол падения плоскости скольжения; L — длина поверхности скольжения (на единицу ширины откоса); U — равнодействующая давления воды на блок вдоль поверхности скольжения; W — равнодействующая давления воды на блок по трещине, отделяющей его от массива; c_T и ψ_T — соответственно сцепление и угол трения вдоль поверхности скольжения.

Величины L , U и W определяются из рис. 1.5 тригонометрическими отношениями:

$$\begin{aligned} L &= (H - z) / \sin \psi_p; \\ U &= \gamma_w z_w L / 2; \\ W &= \gamma_w z_w^2 / 2. \end{aligned} \quad (1.27)$$

Вес блока для случаев, когда отделяющая блок трещина пересекает поверхность массива за перегибом откоса и выходит на откос, определим соответственно по формулам:

- за перегибом откоса (см. рис. 1.5, а):

$$G = \gamma H^2 \{ [1 - (z/H)^2] \operatorname{ctg} \psi_p - \operatorname{ctg} \psi \} / 2; \quad (1.28)$$

- выходит на откос (см. рис. 1.5, б):

$$G = \gamma H^2 [(1 - z/H)^2 \operatorname{ctg} \psi_p (\operatorname{ctg} \psi_p \operatorname{tg} \psi - 1)] / 2, \quad (1.29)$$

где ψ — угол заложения откоса.

На основании выражения (1.26) коэффициент устойчивости блока на сдвиг K_{yc} определится из соотношения

$$K_{yc} = \frac{c_T L + (G \cos \psi_p - U - W \sin \psi_p) \operatorname{tg} \varphi_T}{G \sin \psi_p + W \cos \psi_p}. \quad (1.30)$$

Практическое применение полученной формулы проиллюстрируем двумя примерами.

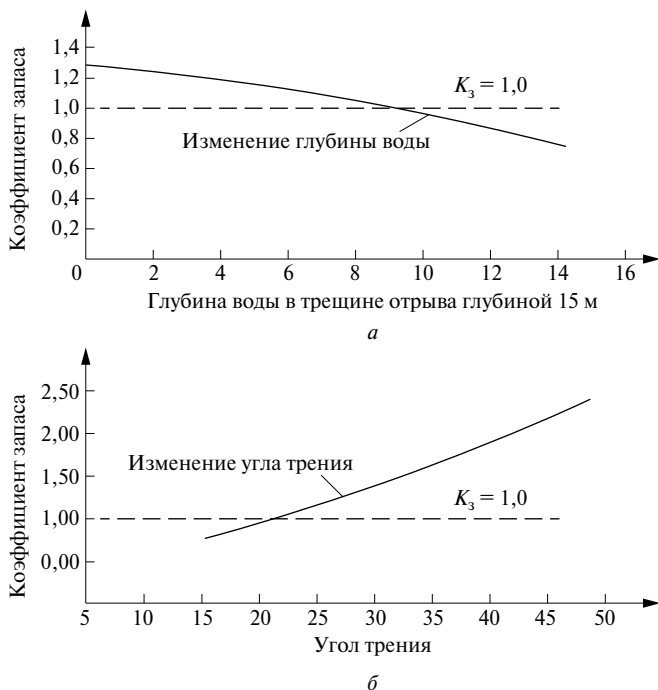


Рис. 1.6. Анализ сдвига блока по плоскости, показывающей изменение коэффициента запаса в зависимости от: *a* — изменения глубины воды; *б* — изменения угла трения вдоль плоскости сдвига

На рис. 1.6, *a* показано изменение коэффициента устойчивости блока в зависимости от изменения глубины воды в отделяющей его от массива трещине. При изменении глубины воды в трещине от 0 до 15 м и при постоянном угле трения вдоль плоскости скольжения $\varphi_T = 30^\circ$ коэффициент запаса устойчивости K_{yc} уменьшается с 1,30

Конец ознакомительного фрагмента.
Приобрести книгу можно
в интернет-магазине
«Электронный универс»
e-Univers.ru