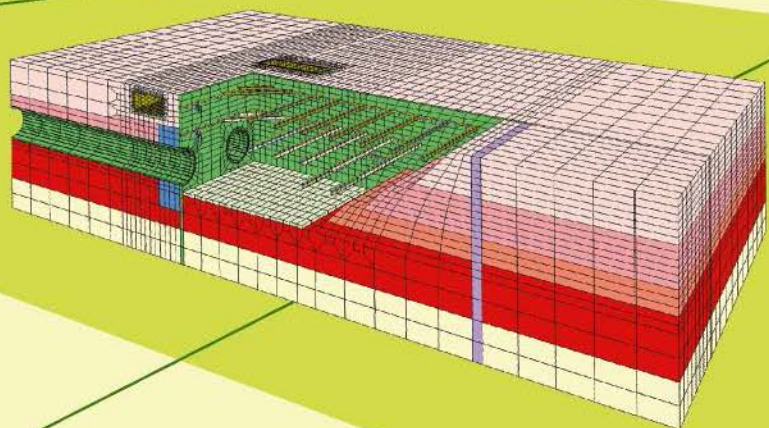




М.Г. Зерцалов, М.В. Никишкин

ВВЕДЕНИЕ В МЕХАНИКУ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ



ГЕОМЕХАНИКА

Министерство образования и науки Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

М.Г. Зерцалов, М.В. Никишкин

ВВЕДЕНИЕ В МЕХАНИКУ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Под редакцией профессора, доктора технических наук
М.Г. Зерцалова

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением вузов РФ
по образованию в области строительства в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений, обучающихся по программе
специалитета по специальности (направлению)
08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений»
(14.04.2015 г., № 102-15/885)*

Москва 2015

УДК 624.1
ББК 38.78
3-58

Рецензенты:

профессор *Л.В. Маковский*, заведующий кафедрой мостов и транспортных тоннелей (ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет»);
доктор технических наук, профессор *Н.В. Ханов*, заведующий кафедрой гидротехнических сооружений;
кандидат технических наук *В.А. Зимнюков*, доцент кафедры гидротехнических сооружений (ФГБОУ ВПО «МСХА им. К.А. Тимирязева»);
доктор технических наук, профессор *И.Я. Харченко*, заместитель начальника Научно-инженерного центра по освоению подземного пространства АО «Мосинжпроект» (г. Москва)

Зерцалов, М.Г.

3-58 Введение в механику подземных сооружений : учебное пособие / М.Г. Зерцалов, М.В. Никишкин ; под ред. М.Г. Зерцалова ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Нац. исследоват. Моск. гос. строит. ун-т. Москва : НИУ МГСУ, 2015. 116 с.
ISBN 978-5-7264-1148-4

Главная задача пособия — дать студенту базовые знания, позволяющие понять основные закономерности взаимодействия возводимых различными способами подземных сооружений с вмещающим породным массивом. Рассмотрено строительство подземных сооружений открытым и закрытым способами.

Для студентов строительных вузов, обучающихся по специальности 08.05.01 Строительство уникальных зданий и сооружений.

УДК 624.1
ББК 38.78

ISBN 978-5-7264-1148-4

© НИУ МГСУ, 2015

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

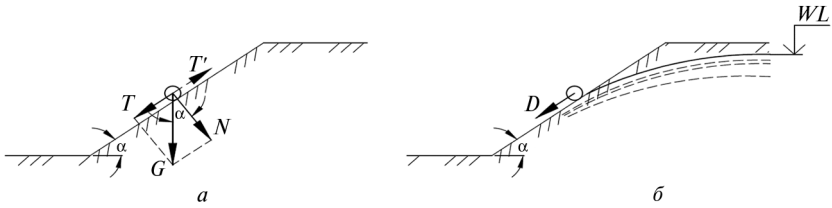


Рис. 1.1. Расчетные схемы устойчивости откоса в идеально сыпучих грунтах [14]

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 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.

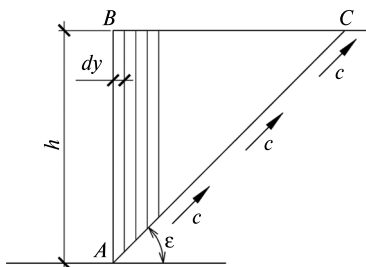


Рис. 1.2. Схема к расчету устойчивости откоса грунта, обладающего только сцеплением [2]

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

Учебное издание

Зерцалов Михаил Григорьевич,
Никишкин Михаил Васильевич

ВВЕДЕНИЕ В МЕХАНИКУ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Редактор *Т.Н. Донина*
Корректор *В.К. Чупрова*
Верстка макета *О.Г. Горюновой*
Дизайн обложки *Д.Л. Разумного*

Подписано в печать 21.10.2015 г. И-67. Формат 60×84/16.
Уч.-изд. 8,2. Усл.-печ. л. 6,98. Тираж 100 экз. Заказ 332

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Национальный исследовательский
Московский государственный строительный университет»
(НИУ МГСУ).

129337, Москва, Ярославское ш., 26.

Издательство МИСИ – МГСУ.

Тел. (495) 287-49-14, вн. 13-71, (499) 188-29-75, (499) 183-97-95.

E-mail: ric@mgsu.ru, rio@mgsu.ru.

Отпечатано в типографии Издательства МИСИ – МГСУ.

Тел. (499) 183-91-90, (499) 183-67-92, (499) 183-91-44