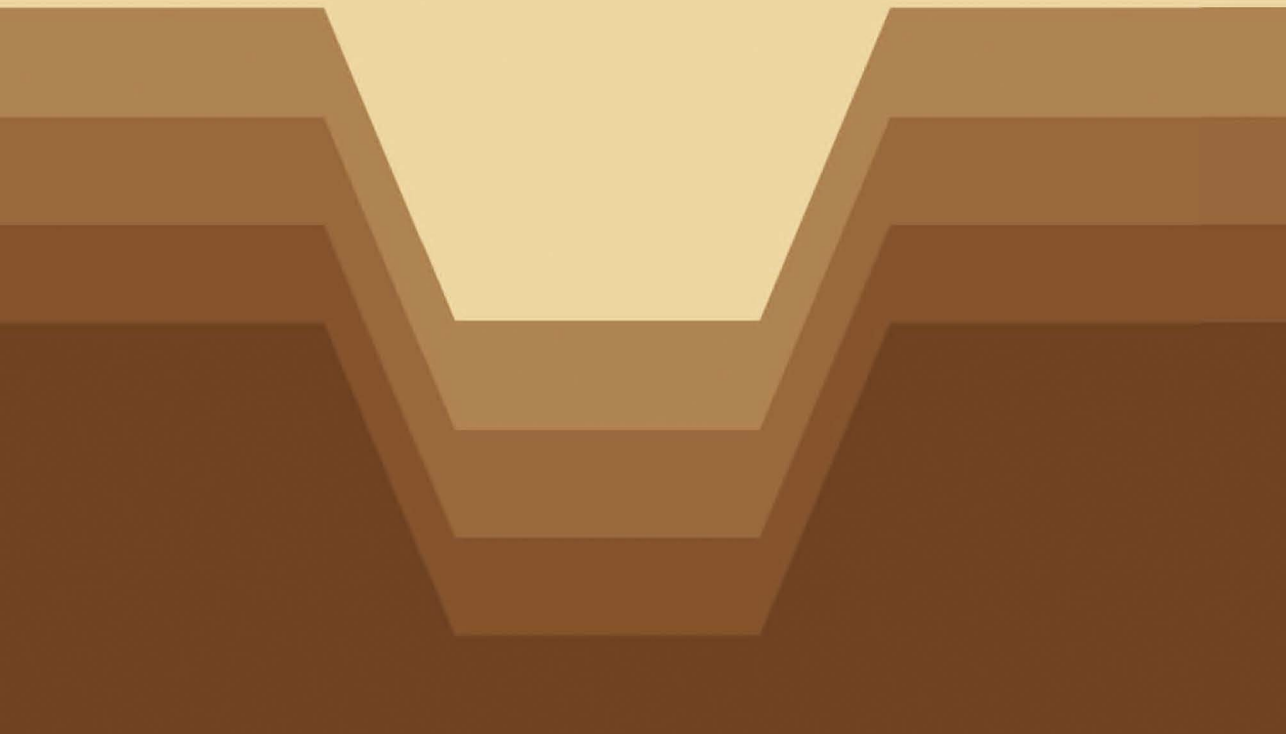


Мангушев Р.А., Никифорова Н.С.,  
Конюшков В.В., Осокин А.И., Сапин Д.А.

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ  
И УСТРОЙСТВО ПОДЗЕМНЫХ  
СООРУЖЕНИЙ  
В ОТКРЫТЫХ КОТЛОВАНАХ**



Р.А. Мангушев, Н.С. Никифорова,  
В.В. Конюшков, А.И. Осокин, Д.А. Сапин

# **ПРОЕКТИРОВАНИЕ И УСТРОЙСТВО ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ В ОТКРЫТЫХ КОТЛОВАНАХ**

**Учебное пособие**

Под редакцией чл.-корр. РААСН,  
доктора техн. наук, профессора Р.А. Мангушева



Издательство Ассоциации строительных вузов  
Москва  
2013

**Рецензенты:**

кафедра оснований, фундаментов, динамики сооружений  
и инженерной геологии Казанского государственного  
архитектурно-строительного университета  
(зав. кафедрой доктор технических наук, профессор *И.Т. Мирсянов*);  
доктор технических наук, профессор кафедры технологии  
строительного производства Санкт-Петербургского государственного  
архитектурно-строительного университета *В.В. Верстов*.

**Мангушев Р.А. и др.**

Проектирование и устройство подземных сооружений в открытых котлованах:  
Учеб. пособие / Р.А. Мангушев, Н.С. Никифорова, В.В. Конюшков, А.И. Осокин,  
Д.А. Сапин. – М., СПб.: Изд-во АСВ, 2013. – 256 с.

ISBN 978–5–93093–941–5

В книге выполнен обзор и анализ существующих конструкторских и технологических методов устройства котлованов и их ограждений, рассмотрены различные методы по их расчету и проектированию, способы водопонижения в котлованах и водозащиты подземных сооружений, требования к геомониторингу и научному сопровождению во время их строительства. Представлен отечественный и зарубежный опыт возникших проблем при устройстве котлованов больших глубин и размеров. Приведены примеры успешного устройства котлованов больших объемов и глубин открытым способом в городах Москве и Санкт-Петербурге.

Предназначено для студентов строительных вузов, обучающихся по магистерским программам по специализации «Строительство», специалитета «Строительство уникальных зданий и сооружений», слушателей институтов повышения квалификации и инженерно-технических работников и руководителей проектных и производственных организаций.

ISBN 978–5–93093–941–5

© Мангушев Р.А., Никифорова Н.С.,  
Конюшков В.В., Осокин А.И.,  
Сапин Д.А., 2013  
© Издательство АСВ, 2013

## Оглавление

Введение .....	6
<b>1. Конструктивные и технологические методы, используемые при устройстве котлованов .....</b>	<b>9</b>
1.1. Котлованы с естественными и закрепленными откосами .....	9
1.2. Методы оценки устойчивости откосов .....	10
1.3. Основные типы шпунтовых ограждений .....	19
1.4. Удерживающие бермы, разгрузочные траншеи .....	23
1.5. Распорные подкосные и анкерные крепления шпунтовых ограждений котлованов .....	24
1.6. Ограждения котлованов типа «стена в грунте» .....	34
1.7. Ограждения котлованов из бурокасательных и буросекущихся свай .....	38
1.8. Ограждение котлованов с помощью глубинного перемешивания и струйной цементации грунтов .....	40
1.9. Применение метода Top-Down при устройстве глубоких котлованов больших размеров .....	49
1.10. Технология открытой разработки грунта с одновременным погружением опускного колодца .....	52
<b>2. Методы расчета ограждений котлованов .....</b>	<b>54</b>
2.1. Определение бокового давления грунта .....	54
2.1.1. Активное давление грунта .....	55
2.1.2. Пассивное давление грунта .....	56
2.1.3. Давление покоя .....	58
2.1.4. Учет подземных вод при устройстве открытых котлованов .....	59
2.1.5. Учет распределенной нагрузки по бровке котлована .....	61
2.2. Расчеты устойчивости .....	62
2.2.1. Приближенный метод расчета устойчивости ограждения .....	62
2.2.2. Устойчивость стенок траншеи при устройстве стены в грунте .....	64
2.3. Определение усилий в ограждающих конструкциях .....	67
2.3.1. Схемы Э.К. Якоби и Блюма–Ломейера .....	67
2.3.2. Графоаналитический расчет (метод упругой линии) .....	68
2.4. Проверка поперечного сечения ограждающих конструкций .....	71
2.4.1. Металлический шпунт .....	71
2.4.2. Траншейная стена в грунте .....	72
2.5. Численное моделирование ограждений котлованов .....	77
2.5.1. Выбор модели грунта. Идеально упругопластическая модель с критерием прочности Кулона–Мора. Модель упрочняющегося грунта (Hardening Soil Model) .....	78
2.5.2. Назначение размеров расчетной модели .....	84
2.5.3. Определение $\gamma_{sat}$ и $R_{inter}$ .....	86
2.5.4. Распространенные ошибки при задании фаз расчета .....	88
2.5.5. Дренированное и недренированное поведение грунтов .....	89
2.6. Примеры расчетов ограждений котлованов .....	91
2.6.1. Расчет консольной стенки на устойчивость .....	91
2.6.2. Расчет раскрепленной стенки на устойчивость .....	94

2.6.3. Расчет консольной или раскрепленной в одном уровне стенки методом упругой линии.....	96
2.6.4. Пример численного моделирования ограждения котлована типа «стена в грунте». Численный расчет технологической осадки.....	101
<b>3. Оценка влияния устройства котлованов на осадки соседних зданий и сооружений .....</b>	<b>114</b>
3.1. Определение радиуса зоны влияния устройства котлованов.....	114
3.2. Полуэмпирический метод прогноза осадок зданий в зоне влияния глубоких котлованов.....	115
3.3. Эмпирико-аналитический метод прогноза осадок зданий в зоне влияния глубоких котлованов.....	120
<b>4. Защита котлованов, подземных частей зданий и сооружений от воздействия подземных вод.....</b>	<b>125</b>
4.1. Методы осушения строительных котлованов .....	125
4.2. Проектирование установок для искусственного понижения уровня подземных вод в котлованах.....	129
4.3. Методы защиты подземных частей зданий и сооружений от воздействия подземных вод .....	131
4.3.1. Воздействие подземных вод на сооружения .....	132
4.3.2. Виды воды в грунте .....	132
4.3.3. Защита от воздействия грунтовых вод, используемая в старых зданиях Санкт-Петербурга.....	133
4.3.4. Водоотвод и водопонижение подземных вод с использованием дренажей.....	140
4.3.5. Способы устройства гидроизоляции и гидроизоляционные материалы .....	143
<b>5. Геотехнический мониторинг при строительстве подземных сооружений открытым способом .....</b>	<b>155</b>
5.1. Цели и задачи геотехнического мониторинга .....	155
5.2. Основные инструментальные методы проведения геотехнического мониторинга .....	157
5.3. Аппаратура и методика наблюдений.....	158
5.3.1. Методика измерений осадок зданий и сооружений.....	158
5.3.2. Методика измерений деформаций ограждающих конструкций котлованов .....	159
5.3.3. Наблюдения за перемещениями грунтового массива с помощью инклинометрической системы.....	161
5.3.4. Оформление результатов геотехнического мониторинга.....	162
5.4. Примеры проведения геотехнического мониторинга.....	165
<b>6. Возникновение аварийных ситуаций при строительстве крупных подземных сооружений в России и за рубежом.....</b>	<b>170</b>
6.1. Основные причины возникновения аварийных ситуаций.....	170
6.2. Природно-климатические факторы .....	171
6.3. Аварии, вызванные использованием в расчетах неполных или недостоверных материалов инженерно-геологических изысканий .....	178
6.4. Аварии в результате принципиальных ошибок при проектировании.....	185
6.5. Аварии, связанные с грубыми строительными ошибками и отступлениями от проектных решений.....	193

<b>7. Примеры успешного устройства подземных конструкций в глубоких котлованах</b> .....	200
7.1. Опыт устройства крупных подземных сооружений в г. Москве .....	200
7.2. Опыт устройства крупных подземных сооружений в г. Санкт-Петербурге .....	208
7.2.1. Основные проблемы при освоении подземных пространств в Санкт-Петербурге .....	208
7.2.2. Подземный 4-уровневый паркинг на Комендантской площади (торгово-развлекательный центр (ТРЦ) «Атмосфера»).....	209
7.2.3. Устройство подземного объема торгового комплекса «Стокманн» (Stockmann).....	213
7.2.4. Устройство подземного объема под деревянным зданием Каменноостровского театра .....	216
7.2.5. Особенности устройства подземного пространства торгово-развлекательного комплекса на Лиговском проспекте.....	218
7.2.6. Строительство подземной части второй сцены Государственного академического Мариинского театра (ГАМТ-2) в Санкт-Петербурге .....	221
Заключение .....	225
Литература .....	226
Приложения .....	231

## ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие крупного города невозможно представить без масштабного освоения подземного пространства с использованием разработки глубоких котлованов открытым способом, который в отличие от других методов устройства подземных сооружений (например, закрытым методом) является более рискованным, предполагает большие объемы земляных работ, зачастую увеличивает сроки и стоимость строительства.

Наличие вблизи нового строительства соседних зданий, а в центральной части городов это часто историческая застройка, находящаяся под охраной государства, предъявляет особые требования к обеспечению их работоспособного технического состояния и сохранению исторического архитектурного облика.

Требования СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений» ограничивают предельные дополнительные деформации основания фундаментов исторических зданий в зависимости от категории технического состояния конструкций в пределах 0,5...1,0 см. Как показывает практический опыт авторов, обеспечить эти требования при устройстве глубоких котлованов в условиях плотной городской застройки без научно-технического сопровождения профессиональных инженеров-геотехников довольно сложно. Многочисленные факторы, которые необходимо учитывать при проектировании и строительстве, такие как технологические осадки при устройстве ограждений и откопке котлованов, отвод поверхностных вод и понижение подземных вод, применение новых малоизученных технологий и материалов на объектах, анализ результатов мониторинга, требуют тщательного научно-технического подхода, комплексного экспериментального и аналитического изучения.

В настоящее время в Москве и Санкт-Петербурге разработаны специальные технические нормы, регламентирующие необходимость проведения геотехнического обоснования проекта нового сооружения и оценки его влияния на здания, входящие в зону риска нового строительства на различных стадиях производства работ. Особые требования предъявляются и к мониторингу при строительстве вновь возводимых сооружений и окружающих их зданий.

Нормативный документ федерального значения СП 22.13330.2011 регламентирует для строительства зданий и сооружений I уровня ответственности и при выполнении реконструкции в условиях окружающей застройки проводить научно-техническое сопровождение строительства силами специализированных организаций.

В Градостроительном кодексе РФ согласно ст. 1, ч. 22 в редакции Федерального закона от 28.11.2011 г. № 337 введен новый участник строительства – технический заказчик. Технический заказчик – это физическое или юридическое лицо, которое уполномочено застройщиком (инвестором) и от имени застройщика (инвестора) составлять технические задания и договоры на изыскания, проектирование и строительство, производить проверку состава, объемов, качества и сроков выполнения всех работ, принимать и подписывать результа-

ты этих работ. Конечно, застройщик и инвестор могут самостоятельно осуществлять функции технического заказчика на объекте, но в этом случае они несут ответственность за состав, объемы, качество и безопасность результатов изысканий, проектирования и строительства наравне со своими подрядчиками, выполняющими эти виды работ.

Необходимость устройства подземных сооружений, в которых расположены паркинги, подсобные и технические помещения, часто соединенные с подземными транспортными коммуникациями и развязками, требует сложного проектирования и строительства котлованов глубиной свыше 4 м в районах со сложившейся городской застройкой.

Эта сама по себе непростая задача в ряде крупных городов, таких как Москва и Санкт-Петербург, усложняется специфическими грунтовыми условиями – большой толщиной насыпных и слабых водонасыщенных грунтов различного генезиса и свойств, залегающих в верхней части грунтовой толщи, а также наличием под землей сложной подземной инфраструктуры – технологических коммуникаций, линий метро, инженерных сетей и др.

При устройстве котлованов в плотной городской застройке глубиной свыше 4 м используются различного рода конструктивные и технологические мероприятия по ограждению котлованов, обеспечивающие их устойчивость, прочность и деформативность. В последнее время кроме традиционных методов устройства ограждений из шпунтовых профилей, раскрепляемых анкерными и распорными элементами, стали активно применяться сравнительно новые технологические методы: «стена в грунте», в том числе с сочетанием метода раскрепления перекрытиями (Top-Down), струйная технология (jet-grouting), глубинное перемешивание грунтов (DSM) и др.

Высокие риски, связанные с проектированием и устройством грунтовых выемок большой глубины и объемов, требуют достоверного численного прогноза поведения не только этих земляных сооружений при их откопке, но также анализа возможного развития осадок фундаментов существующих зданий.

В настоящем пособии, разработанном как дополнение к общему курсу дисциплины «Основания и фундаменты», выполнен обзор и анализ основных существующих конструктивных и технологических способов устройства котлованов и их ограждений, рассмотрены различные методы по их расчету и проектированию, методы водопонижения в котлованах при их разработке и способы устройства гидроизоляции подземных сооружений, отмечены основные требования к геотехническому мониторингу.

Отечественный и зарубежный опыт имеет как многочисленные примеры объектов с успешным устройством котлованов больших глубин и размеров, так и примеры объектов, на которых произошли серьезные аварийные ситуации. К настоящему времени накоплен определенный положительный опыт устройства котлованов больших объемов и глубин открытым способом в таких городах, как Москва, Санкт-Петербург, Екатеринбург, Пермь, Казань, и многих других городах России. В настоящем пособии рассмотрены примеры объектов, которые были выполнены в г. Москве и г. Санкт-Петербурге силами



различных проектных, производственных и научно-исследовательских организаций. На некоторых из приведенных объектов авторы книги принимали непосредственное участие в проектировании, строительстве и научно-техническом сопровождении.

Настоящее учебное пособие разработано сотрудниками кафедры геотехники Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (СПбГАСУ) и кафедры механики грунтов, оснований и фундаментов Московского государственного строительного университета (научно-исследовательского университета) (МГСУ НИУ) и рекомендуется для студентов бакалавров и магистров специальности «Строительство», специализации «Подземное строительство», а также инженеров, специализирующихся в области геотехники.

Введение, заключение, гл. 1, гл. 4, гл. 5 (совместно с Н.С. Никифоровой и В.В. Конюшковым), гл. 6 (совместно с В.В. Конюшковым), гл. 7 (совместно с Н.С. Никифоровой и А.И. Осокиным) написаны д.т.н., проф. Р.А. Мангушевым; гл. 3, гл. 5 (совместно с Р.А. Мангушевым), гл. 7 (совместно с Р.А. Мангушевым, А.И. Осокиным) – д.т.н., проф. Н.С. Никифоровой; гл. 2 (совместно с инж. Д.А. Сапиным), гл. 5 (совместно с Р.А. Мангушевым и Н.С. Никифоровой), гл. 6 (совместно с Р.А. Мангушевым) – к.т.н., доц. В.В. Конюшковым.

Авторы выражают благодарность рецензентам – докторам технических наук, профессорам В.В. Верстову и И.Т. Мирсяяпову, замечания которых были учтены при подготовке книги к изданию.

Авторы надеются, что представленный в данной книге материал может быть полезен при проектировании и строительстве подземных сооружений в различных городах Российской Федерации, готовы к совместному сотрудничеству со специалистами и организациями, которых интересуют проблемы механики грунтов, оснований и фундаментов, практической геотехники, и с благодарностью отнесутся к советам и замечаниям по книге, которые можно присылать по адресу: 198005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4, СПбГАСУ, кафедра «Геотехника». Электронная почта: [nrk-cgt@yandex.ru](mailto:nrk-cgt@yandex.ru).

# 1. КОНСТРУКТИВНЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ УСТРОЙСТВЕ КОТЛОВАНОВ

## 1.1. Котлованы с естественными и закрепленными откосами

При устройстве фундаментов и подземного пространства зданий и сооружений, как правило, производится разработка котлованов открытым способом.

Проектирование котлованов начинается с составления заказчиком технического задания на инженерно-геологические изыскания площадки, в котором указываются состав и объемы полевых и лабораторных исследований грунтов. В случае необходимости выполняется геотехническое обоснование устройства котлована с учетом реальной геотехнической ситуации на площадке строительства силами специализированной организации.

В проекте разрабатываются основные конструктивные решения и ПОС (проект организации строительства). В проектной документации предусматривается привязка котлована к схеме планировочной организации земельного участка с указанием его основных геометрических размеров, осей, абсолютных и относительных отметок дна и бровки. Кроме того, указываются поэтапные технологические схемы откопки котлована, рекомендуемые мероприятия по предотвращению нарушения природной структуры грунтов при производстве работ, понижении уровня подземных вод, разрабатываются мероприятия по защите фундаментов соседней застройки от дополнительных деформаций и т.д. Строительным подрядчиком разрабатывается проект производства работ (ППР) и осуществляется его реализация.

С целью обеспечения безопасного ведения работ в открытых котлованах необходимо обеспечить устойчивость его откосов. Для этого откосам котлованов придаются соответствующие уклоны или применяются специальные ограждения и раскрепления. Выбор тех или иных мероприятий зависит от глубины котлована, особенностей напластования грунтов, уровня подземных вод, технологических схем производства работ, расстояния до фундаментов зданий и сооружений, попадающих в зону влияния нового строительства.

При разработке котлованов глубиной до 5 м в маловлажных грунтах с  $S_r < 0,5$ , а также при строительстве на свободных площадках, удаленных от соседних зданий и сооружений, допускается ведение земляных работ с устройством его бортов в виде свободных откосов без специальных креплений.

Полускальные грунты, глинистые грунты твердой, полутвердой, тугопластичной и даже мягкопластичной консистенции способны держать вертикальный откос в пределах некоторой глубины. В этих случаях борта котлованов допускается выполнять вертикальными. При работе в котлованах со связными грунтами устройство фундаментов и другие работы нулевого цикла следует производить как можно быстрее, поскольку увлажнение грунтов атмосферными или подземными водами может значительно уменьшить силы сцепления и привести к обрушению вертикального откоса.

Без специальных расчетов наибольшая допустимая крутизна откосов при откопке котлованов глубиной до 5 м может быть принята по табл. 1.1 (по СНиП 12-04-2002).

Таблица 1.1

**Допустимая наибольшая крутизна откосов выемок глубиной  $H$ , м**

№ п/п	Вид грунта	Крутизна откоса (отношение его высоты к заложению) при глубине выемки, м, не более		
		1,5	3,0	5,0
1	Насыпные неслежавшиеся	1:0,67	1:1	1:1,25
2	Песчаные	1:0,5	1:1	1:1
3	Супесь	1:0,25	1:0,67	1:0,85
4	Суглинок	1:0	1:0,5	1:0,75
5	Глина	1:0	1:0,25	1:0,5
6	Лессовые	1:0	1:0,5	1:0,5

*Примечания:*

1. При напластовании различных видов грунта крутизну откосов назначают по наименее устойчивому виду от обрушения откоса.
2. К неслежавшимся насыпным относятся грунты с давностью отсыпки до двух лет для песчаных; до пяти лет – для пылевато-глинистых грунтов.

**1.2. Методы оценки устойчивости откосов**

Устойчивость откоса котлована считается обеспеченной, если выполняется условие

$$k_{st} \geq k_{st.n}, \tag{1.1}$$

где  $k_{st}$  – коэффициент устойчивости откоса или склона;

$k_{st.n}$  – нормативный коэффициент устойчивости, задаваемый в проекте. Как правило, его значение находится в пределах 1,1...1,3.

Для определения устойчивости откосов применяются аналитические, графические и графоаналитические методы расчетов.

Аналитические методы расчетов в плоской постановке используются для выемок, имеющих горизонтальную поверхность откоса и сложенных однородными грунтами.

**А. Устойчивость откоса котлована, сложенного идеально сыпучим грунтом ( $c = 0, \varphi \neq 0$ ) – песком или крупнообломочным грунтом**

Из решения простой задачи равновесия следует (рис. 1.1, а), что теоретически предельный угол откоса сыпучего грунта  $\alpha$  равен углу его внутреннего трения  $\varphi$ . Иногда этот угол называют углом естественного откоса  $\alpha = \varphi$ .

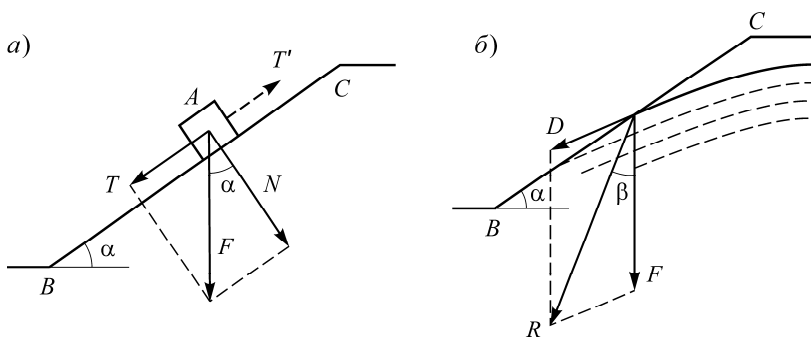


Рис. 1.1. Схемы к устойчивости сыпучего грунта:  
*a* – сухого; *б* – при действии фильтрационных сил

Для обеспечения устойчивости откоса силы, удерживающие частицы грунта, должны быть больше сдвигающих сил, что обеспечивается при выполнении следующего условия:

$$k_{st} \operatorname{tg} \alpha \leq \operatorname{tg} \varphi_1, \quad (1.2)$$

где  $\varphi_1$ , град – угол внутреннего трения грунта по первой группе предельных состояний.

Учет гидродинамического давления от движения воды выполняют в случае, если уровень подземных вод в массиве сыпучего грунта находится выше подошвы откоса. В этом случае возникает фильтрационный поток, выходящий на поверхность (рис. 1.1, б), что приводит к снижению устойчивости откоса. Тогда, рассматривая равновесие частицы на поверхности откоса, при действии сдвигающей силы необходимо добавить гидродинамическую составляющую  $D$ . Принимают, что кривая депрессии выходит на откос по касательной к его поверхности, т.е. под углом  $\alpha$ . Тогда, согласно законам гидромеханики, интенсивность фильтрационной силы (гидродинамического давления) на единицу объема пористого тела (грунта) составит:

$$D = \gamma_w n i, \quad (1.3)$$

где  $\gamma_w$  – удельный вес воды,  $\text{кН/м}^3$ ;

$n$  – пористость грунта;

$i$  – гидравлический градиент в точке выхода потока, представляемый как

$$i = \sin \alpha.$$

В точке выхода воды через поверхность откоса действуют силы  $D$  и  $F$  (см. рис. 1.1, б), которые приводятся к равнодействующей  $R$ . Сила  $R$  отклонена от вертикали на угол  $\beta$ . В этом случае устойчивый угол откоса находят из условия

$$k_{st} \operatorname{tg} \alpha \leq \operatorname{tg} (\varphi_1 - \beta). \quad (1.4)$$

**Б. Устойчивость вертикального откоса в идеально связных грунтах ( $c \neq 0, \varphi = 0$ )**

Предельный угол заложения откосов, сложенных связными грунтами, в отличие от сыпучих грунтов не является постоянным и меняется с увеличением высоты откоса. При этом, если высота не превышает предельного значения  $h_{пр}$ , то связный грунт благодаря сцеплению может выдержать вертикальный откос (см. табл. 1.1). Для строителей при отрывке котлованов весьма важно

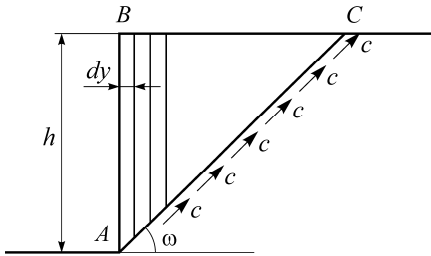


Рис. 1.2. Схема к расчету откоса, сложенного идеально связным грунтом

знать, на какую глубину можно разрабатывать грунт с вертикальным откосом без его крепления.

Рассмотрим для такого грунта устойчивость вертикального откоса  $AB$  высотой  $h$  (рис. 1.2).

Из условий задачи равновесия удерживающих и сдвигающих сил, действующих на элементарный отсек шириной  $dy$ , наименьшее значение  $k_{st}$  будет при наибольшей величине  $\sin 2\omega$ , которая может достигнуть единицы при  $2\omega = 90^\circ$ .

Наихудшие условия для устойчивости возникнут при  $\omega = 45^\circ$ . В таком случае при  $k_{st} = 1$ , т.е. в условиях предельного равновесия, высота вертикального откоса составит

$$h_{пр} = 2c_1 / \gamma_1, \tag{1.5}$$

где  $h_{пр}$  – предельная высота откоса, м;  
 $c_1$  – удельное сцепление грунта, кПа;  
 $\gamma_1$  – удельный вес грунта откоса, кН/м<sup>3</sup>.

Для получения устойчивого откоса обычно снижают сцепление, принимая его расчетное значение по первому предельному состоянию  $c_1$ , учитывающему неоднородность грунта. Кроме того, вводят нормативный коэффициент устойчивости  $k_{st.n}$  в пределах 1,1...1,3. Тогда

$$h_{пр} = 2c_1 / (k_{st.n} \gamma_1). \tag{1.6}$$

Как отмечалось ранее, грунт откоса котлованов подвергается температурно-влажностным воздействиям, которые могут существенно уменьшить силы сцепления. В связи с этим незащищенный вертикальный откос может существовать лишь непродолжительное время.

**В. Устойчивость вертикального откоса в связных грунтах ( $c \neq 0, \varphi \neq 0$ )**

В случае если глинистый грунт обладает и сцеплением, и углом внутреннего трения, то предельная высота вертикального откоса определится из выражения

$$h_{пр} = \frac{2c_1}{k_{st.n} \gamma_1 \operatorname{tg}(45^\circ - \varphi_1/2)}. \tag{1.7}$$

### Г. Устойчивость откосов котлованов по теории предельного равновесия

Решение таких задач в плоской постановке было предложено В.В. Соколовским для откосов, сложенных однородными грунтами, обладающими трением и сцеплением и на горизонтальной поверхности которых действует внешняя нагрузка различной интенсивности.

В этом случае, применив теорию предельного равновесия грунтов, можно решить два типа задач:

1) задано очертание плоского откоса и требуется определить наибольшую интенсивность внешней нагрузки на верхней горизонтальной поверхности грунта;

2) задана интенсивность нагрузки на верхней горизонтальной поверхности грунта, необходимо определить равноустойчивое очертание откоса, т.е. такое, при котором предельное напряженное состояние возникает во всех точках откоса.

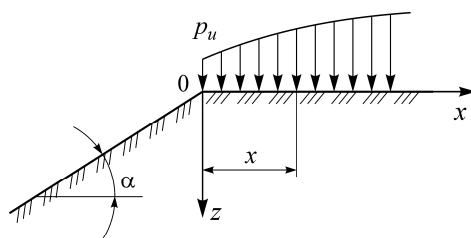


Рис. 1.3. Схема к расчету устойчивости плоского откоса по теории предельного равновесия

При однородных грунтах и плоском откосе (рис. 1.3) задача первого типа решена в безразмерных величинах  $\bar{p}$  (табл. 1.2).

Таблица 1.2

#### Безразмерные величины $\bar{p}$ для определения предельного давления на верхнюю горизонтальную поверхность откоса

$\bar{x}$	При $\phi$ , град											
	10		20		30		40					
	При $\alpha$ , град											
	0	10	0	10	20	10	20	30	10	20	30	40
0	8,34	7,51	14,8	12,7	10,9	24,3	19,6	15,7	55,9	41,4	30,6	22,5
1	9,64	8,26	20,6	16,6	13,1	39,8	28,8	20,3	126,0	81,1	50,9	31,0
2	10,80	8,95	25,4	19,9	15,0	52,9	36,7	24,2	186,0	115,0	68,4	38,1
3	11,80	9,59	29,8	23,0	16,7	65,1	44,1	27,8	243,0	148,0	84,9	44,4
4	12,80	10,20	34,0	25,8	18,3	76,8	51,2	31,1	299,0	179,0	101,0	50,4
5	13,70	10,80	38,0	28,7	19,9	88,3	58,1	34,3	354,0	211,0	117,0	56,2
6	14,50	11,30	41,8	31,4	21,4	99,6	65,0	37,4	409,0	241,0	132,0	61,7

Зная  $\bar{p}$ , находят предельную нагрузку на верхней горизонтальной поверхности откоса:

$$p_u = \bar{p}c_1 + c_1 \operatorname{ctg} \phi_1. \quad (1.8)$$

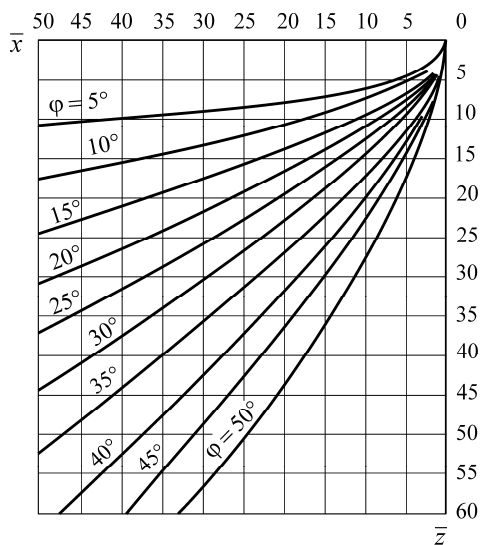


Рис. 1.4. Очертания равноустойчивых откосов в безразмерных координатах

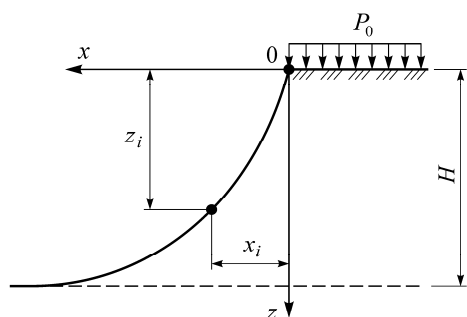


Рис. 1.5. Построение линии предельно равноустойчивого откоса аналитическим способом

Задача второго типа также решена В.В. Соколовским для случая, когда на верхней горизонтальной поверхности откоса распределена равномерно распределенная нагрузка и требуется определить очертания равноустойчивого откоса:

$$p_0 = \frac{2c_1 \cos \varphi_1}{1 - \sin \varphi_1}. \quad (1.9)$$

Решение этой задачи в виде очертания равноустойчивых откосов в безразмерных координатах представлено на рис. 1.4.

Для нахождения действительного очертания равноустойчивого откоса определяют  $z$  и  $x$ , задаваясь различными значениями  $\bar{z}$  или  $\bar{x}$  по формулам (1.10):

$$z = \frac{c_1 \bar{z}}{\gamma_1}; \quad y = \frac{c_1 \bar{x}}{\gamma_1}. \quad (1.10)$$

Построить линию предельно равноустойчивого откоса можно также по формуле Н.Н. Маслова (рис. 1.5), зная две координаты: вертикальную координату на глубине от бровки откоса  $z_i$  (задается произвольно с шагом 0,2...1,0 м) и соответствующую ей горизонтальную координату  $x_i$ , которая определяется из выражения:

$$x_i = \frac{\gamma_1 z \operatorname{tg} \varphi_1 + c_1 \ln (P_0 \operatorname{tg} \varphi_1 + c_1) - c_1 \ln [(P_0 + \gamma_1 z) \operatorname{tg} \varphi_1 + c_1]}{k_{st.n} \gamma_1 \operatorname{tg}^2 \varphi_1}, \quad (1.11)$$

где  $P_0$  – нагрузка, действующая на бровке котлована,  $\text{кН/м}^2$ .

В случае если на бровке откоса отсутствует внешняя нагрузка  $P_0$ , то выражение (1.11) упрощается до вида:

$$x_i = \frac{\gamma_1 z \operatorname{tg} \varphi_1 + c_1 \ln c_1 - c_1 \ln (\gamma_1 z \operatorname{tg} \varphi_1 + c_1)}{k_{st.n} \gamma_1 \operatorname{tg}^2 \varphi_1}. \quad (1.12)$$

Учебное издание

**Рашид Александрович Мангушев**  
**Надежда Сергеевна Никифорова**  
**Владимир Викторович Конюшков**  
**Анатолий Иванович Осокин**  
**Дмитрий Александрович Сапин**

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ И УСТРОЙСТВО ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ В ОТКРЫТЫХ КОТЛОВАНАХ

Редактор: *В. Ш. Мерзлякова*  
Компьютерная верстка: *В. Ю. Алексеев*  
Компьют. дизайн обложки: *Н. С. Кузнецова*

Диапозитивы предоставлены издательством

Подписано в печать 10.07.2013. Формат 70×100<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс». Печать офсетная.  
Усл. 16 п. л. Тираж 500 экз. Заказ №

Лицензия ЛР №0716188 от 01.04.98.

Издательство Ассоциации строительных вузов (АСВ)  
129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, отдел реализации: оф. 511  
**тел., факс:** (499) 183-56-83  
**http://www.iasv.ru, e-mail:** [iasv@mgsu.ru](mailto:iasv@mgsu.ru)