**Приложение №6**

**ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ МАССИВОВ И ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ОТВАЛОВ**

**6.1. Система обеспечения устойчивости отвалов**

6.1.1. *Система обеспечения устойчивости отвалов* – это комплекс работ и исследований по изучению, обоснованию, управлению и контролю состояния отвальных горнотехнических сооружений, выполняемых в течение всего срока их существования с целью обеспечения безопасности и экономической эффективности горных работ и предотвращения их негативного воздействия на окружающую среду.

6.1.2. В рамках системы обеспечения устойчивости отвалов следует выполнять:

1. исследование инженерно-геологических условий;
2. обоснование оптимальных параметров и критериев безопасности;
3. мониторинг (контроль) состояния;
4. разработка и осуществление мероприятий по повышению уровня их надежности и устойчивости.

6.1.3. Система обеспечения безопасности характеризуется цикличностью и определенной последовательностью в выполнении указанных видов работ, что обусловлено поэтапным возведением и длительным сроком их эксплуатации, в течение которого существенно меняются инженерно-геологические условия сооружения.

**6.2. Схематизация инженерно-геологических условий**

6.2.1 Причиной нарушения устойчивости отвальных сооружений является несоответствие параметров отвалообразования прочности отвального массива и его основания.Прочность массива горных пород зависит от его строения, вещественного состава, физического и напряженного состояния, которые, в свою очередь, определяются совокупностью природных и технологических факторов указанных в таблице 6.1.

Выделение факторов, влияющих на устойчивость отвалов в каждом конкретном случае, производится на основании анализа геологических, гидрогеологических, физико-географических и технологических условий отвалообразования.

6.2.2. Гидрогеомеханические условия отвалообразования следует различать по трем категориям сложности: 1 — простые; 2 — сложные; 3 — особо сложные. В качестве критериев для разделения на категории сложности рекомендуется принимать факторы, представленные в таблице 6.2.

Степень сложности определяют по совокупности факторов: если хотя бы один из них имеет более высокую категорию, то можно отнести отвал к соответствующей этому фактору категории.

**6.3. Требования к инженерно-геологическому изучению отвалов**

6.3.1. Инженерно-геологические изыскания выполняются для подготовки проектной документации, строительства, реконструкции и рекультивации отвалов. Подготовка проектной документации, а также строительство, реконструкция и рекультивация отвалов в соответствии с такой проектной документацией не допускаются без выполнения соответствующих инженерных изысканий.

6.3.2. При организации и выполнении инженерно-геологических работ на отвалах следует руководствоваться нормативно-правовой базой производства инженерно-геологических изысканий Госстроя России: СП 47.13330.2012 «СНиП 11-02-96 "Инженерные изыскания для строительства. Основные положения”»,СП 11-105-97 «Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть I. Общие правила производства работ» и другими, а также ведомственными документами.

**Таблица 6.1 –**  Факторы, определяющие прочность отвального массива

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Характеристика отвального сооружения и слагающих его пород** | **Природные факторы** | **Технологические факторы** |
| Состав пород: минеральный и гранулометрический состав твердой фазы, состав цементирующего вещества, химический состав жидкой фазы | 1. Вещественный состав вскрыш-ных пород и отложений основания  2. Преобразование состава пород в отвале за счет физических, химических и физико-химических процессов | 1. Дробление, измельчение, размокание пород в процессе добычи и транспор-тировки |
| Строение отвального сооружения: взаимное расположение, форма, размеры неоднородных элементов отвального массива и основания | 1. Наличие в основании  слоев, линз, их мощность и протяженность | 1. Поступление в отвал различных литологических разностей.  2. Дифференциация складируемого материала по крупности  3. Включение в строение отвалов фильтрационных слоев, упорных дамб, контрфорсов. |
| Физическое состояние пород: совокупность взаимосвязанных физических свойств пород — плотности, влажности, порис-тости; для связных грунтов - консистенция | 1. Обводнение пород в отвале за счет подземных, поверхностных и атмосферных вод  2. Промерзание и оттаивание пород в отвалах  3. Высыхание и усадкапор за счет испарения | 1. Уплотнение пород при отсыпке с помощью специальных технологических мероприятий  2. Осушение отвалов с помощью дренажных мероприятий |
| Напряженное состояние пород: совокупность напряжений в каждой точке породного массива,  обусловленных действием гравитационных и фильтрационных сил | 1. Полное давление, создаваемое весом вышележащих пород.  2. Гидростатическое давление, обусловленное взвешивающим воздействием воды на породы, залегающие ниже депрессионной поверхности.  3. Гидродинамическое давление.  4.Избыточное поровое давление | 1. Вес оборудования, работающего на отвале  2. Интенсивность отвалообразования (скорость увеличения высоты отвала и скорость подвигания отвального фронта) |

**Таблица 6.2** – Категории сложности инженерно-геологических условий отвалообразования

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Категория сложности | | | |
| **1 - простые** | **2 - сложные** | **3 – особо сложны** |
| Местоположение | Зона влияния отвала до границ ответственных\* объектов не распространяется | В зону влияния отвала попадают ответственные объекты | В зону влияния отвала попадают ответственные объекты |
| Гидрогеологические условия | Отсутствие подземных вод или наличие одного выдержанного в плане безнапорного водоносного горизонта | Наличие напорного водоносного горизонта в отвале или в его основании | Наличие в отвале или в его основании нескольких напорных водоносных горизонтов |
| Преобладающий состав пород | Песчано-супесчаный, дресвяно-щебенистый, обломки скальных и полускальных пород | Глинистый | Глинистый |
| Строение массива | Однородный | Неоднородный | Строение массива |

**\****Под ответственными объектами следует понимать открытые и подземные горные выработки, промышленные здания и сооружения, населенные пункты, железнодорожные и другие транспортные коммуникации и т. п.*

6.3.3. Изучение инженерно-геологических условий следует выполнять на стадии составления проекта отвала. В дальнейшем исследования должны предварять каждый очередной этап эксплуатации сооружения, сопровождаемый изменением параметров его внешних откосов (увеличение высоты, изменение контура откоса) и технологии отвалообразования (схемы заполнения, применяемого оборудования, интенсивности отсыпки), перевод сооружения на стадию консервации или рекультивации, также любое технологическое мероприятие, способное повлиять на условия устойчивости внешних откосов (строительство дорог, изменение состава и состояния пород, формирование в непосредственной близости другихгорнотехнических и гидротехнических сооружений, подработка подземными горными работами пр.).

6.3.4. Состав, объемы и методика выполнения исследований определяется инженерной задачей, решаемой для конкретного объекта (строительство, эксплуатация, рекультивация и т.д.), на основании технического задания, разработанного специализированной организацией, имеющей соответствующие разрешительные документы на проектирование горнотехнических сооружений. Организация, выполняющая инженерно-геологические изыскания, также должна иметь соответствующие разрешительные документы.

6.3.5. При постановке и выполнении инженерно-геологических исследований необходимо комплексно использовать полевые и лабораторные методы определения состава, состояния и свойств пород. Полевые методы должны быть ориентированы на массовое опробования оснований отвалов, в первую очередь – для оценки характера неоднородности и изменчивости слагающих их пород. Лабораторные методы должны быть направлены на установление закономерностей изменения состояния и свойств пород под нагрузкой, возрастающей при увеличении высоты сооружения и при выполнении на них рекультивационных или ликвидационных работ. Кроме того, при оценке влияния подработки отвалов методика должна учитывать развитие процессов сдвижения.

6.3.6. В состав инженерно-геологических работ должны быть включены гидрогеологические исследования и натурные изучения напряженно-деформированного состояния водонасыщенных пород техногенных массивов и естественных оснований, направленные на установление режима подземных вод, характера распределения в нагружаемых массивах порового давления и его изменения во времени в связи с проведением различных технологических мероприятий. Для этих целей можно использовать средства постоянно действующих станций гидрогеомеханического мониторинга или выполнять периодические измерения методом зондирования. В особо ответственных случаях следует выполнять крупномасштабные эксперименты по формированию опытной насыпи на поверхности водонасыщенного массива с замером деформаций и напряжений в породах.

6.3.7. Итогом изучения инженерно-геологических условий сооружения является разработка и уточнение геомеханической (гидрогеомеханической) модели объекта, позволяющей оценивать и прогнозировать состояние устойчивости сооружений с учетом различных природных и технологических факторов.

6.3.8. Инженерно-геологические исследования на отвалах, расположенных в пределах шахтных и рудничных полей горных, должны включать дополнительный комплекс работ для определения деформаций основания, изучение геомеханических (гидрогеомеханических) процессов и явлений, развивающихся в породных массивах при ведении подземных горных работ. Они должны производиться по специальной программе с привлечением организаций, имеющих опыт ведения данных видов работ.

6.3.9. По результатам исследований должны быть обоснованы: возможность проведения запланированного технологического мероприятия, рациональная технология его осуществления, оптимальные параметры сооружения и количественные показатели критериев безопасности и контролируемых параметров, обеспечивающие безопасность на данном этапе эксплуатации сооружения, оценка надежности сооружения.

6.3.10. Программа инженерно-геологических исследований должна учитывать целевое назначение, конструкцию, параметры и технологию формирования отвальных сооружений, а также детальное изучение на наиболее ответственных участках сооружения (откосные части отвалов, зоны работы технологического оборудования и т.д.).

6.3.11. Инженерно-геологические изыскания для разработки проекта следует выполнять, принимая во внимание, что отложения отвалов в условиях развития гидрогеомеханических процессов характеризуются переменными во времени физико-механическими свойствами, что обусловлено возрастанием внешней нагрузки и развитием порового давления.

6.3.12. При производстве инженерно-геологических изысканий для получения достоверных сведений о напряженном состоянии в отвалах и их основаниях на различных этапах его формирования целесообразно применять натурный метод измерения порового давления.При выборе способов и методики опробования необходимо учитывать проницаемость пород отвалов и их оснований.

6.3.13. Для прогнозирования напряженного состояния следует использовать параметры коэффициентов консолидации, полученные в полевых условиях, учитывая при этом закономерности их изменения с ростом нагрузки, устанавливаемые в лабораторных условиях.

**6.4. Требования к составу и объёмам инженерно-геологических исследований**

6.4.1. Состав, объемы и режим опробования отвальных массивов и их оснований зависят от стадии исследований и сложности гидрогеомеханических условий (см. табл. 6.2).

6.4.2. На стадии рекогносцировочных исследований необходимо анализировать материалы ранее выполненных инженерно-геологических и гидрогеологических исследований, а также технические проекты по организации отвальных работ на месторождениях.

6.4.3. Полевые исследования на объектах с особо сложными условиями должны начинаться с полевого опробования методами статического зондирования (по возможности, с замером порового давления). Данные виды испытания следует производить по сетке с расстоянием между точками опробования 50—100 м. Замер порового давления по глубине необходимо выполнять для каждого выделенного при статическом зондировании однородного слоя или через 5 м (при отсутствии ярко выраженной слоистости).

6.4.4. Для обоснования оптимальных параметров отвалов необходимо детально изучить инженерно-геологических условия на участках, приуроченных к упорным призмам сооружения. Ширина такого участка устанавливается расчетами устойчивости или приближенно определяется из соотношения а = Н/tgα, где H и α — соответственно высота и результирующий угол откоса проектируемого отвала.В пределах выделенных участков буровые работы ведут на поперечниках, перпендикулярных бровке откоса отвала и расположенных относительно друг друга на расстоянии, зависящем от степени сложности инженерно-геологических условий. Для условий 1-й категории сложности достаточно одного поперечника, для 2-й и 3-й — расстояние между линиями поперечников равно соответственно 200—300 и 50—100 м. На каждом из поперечников следует бурить не менее трех скважин.

6.4.5. Число скважин и точек опробования необходимо определять с учетом скважин, пробуренных на более ранних стадиях.

6.4.6. Частота отбора проб из скважин для лабораторных исследований определяется необходимостью получения более достоверных показателей физико-механических свойств. Образцы отбираются из каждого визуально выделенного однородного слоя, при мощности его более 2 м — из каждого двухметрового интервала. В зоне тонкого переслаивания частота отбора должна составлять 20—25 см на 1 м погонной длины скважины.

6.4.7. При применении испытаний пород с помощью крыльчатки и прессиометра число опытов для каждого выделенного в разрезе инженерно-геологического элемента должно быть не менее трех.

6.4.8. При выполнении инженерно-геологических исследований в некоторых случаях необходимо использовать геофизическихметоды для выявления зон повышенной обводненности и распространения слабых водонасыщенных пород.

6.4.9. При исследованиях грунтов с содержанием крупноблочного материала более 30 % необходимо применять штамповые и крупномасштабные сдвиговые испытания в шурфах.

6.4.10. Прогнозирование состава, состояния и свойств пород отвалов следует осуществлять, учитывая следующие горно-геологические условия разработки месторождения:

* инженерно-геологический тип, литология, вещественный (минеральный и гранулометрический) состав и тип цемента (для скальных и полускальных пород) пород вскрышной толщи, поступающих в отвалы и гидроотвалы, прочность пород на одноосное сжатие;
* технологию вскрышных и отвальных работ;
* последовательность поступления в отвал определенных типов пород;
* параметры отвала и интенсивность его формирования.

6.4.11. Моделирование пород отвальных массивов и последующее определение их физико-механических свойств можно проводить в лабораторных условиях на специальных приборах в зависимости от предполагаемого состава пород в отвале и эффективных напряжений, определяемых массой вышележащих пород и поровым давлением в них (для водонасыщенных отвалов). Для пород глинистого, суглинистого, супесчаного и песчаного составов можно использовать стандартные инженерно-геологические приборы с площадью 40 см2. Дресвяно-щебенистые отложения отвалов и песчано-глинистые отложения с содержанием крупнообломочных разностей рекомендуется изучать на специальных приборах с большим объемом и площадью рабочих камер.

6.4.12. При изучении гидрогеологических условий основания отвалов необходимо устанавливать: наличие и характер водоносных горизонтов; фильтрационные и компрессионные свойства водоносных и водоупорных пород; граничные условия водоносных пластов; условия их питания и разгрузки; гидравлическую связь между пластами; влияние техногенных факторов на изменение режима водоносных пластов.

6.4.13. Гидрогеологические исследования должны включать в себя опытно-фильтрационные работы (опытные и кустовые откачки, наливы, нагнетания, выпуски) и гидрогеологическую съемку основания отвала с фиксацией мест и расходов источников подземных вод. Состав и объем опытно-фильтрационных работ зависит от категории сложности гидрогеомеханических условий. Если условия соответствуют 1-й категории сложности на площади проектируемого отвала, то достаточно выполнить одну опытную откачку (налив), для 2-й — по одной откачке (наливу, выпуску) в пределах каждого из выделенных «однородных» участков, а при весьма сложных гидрогеомеханических условиях следует запланировать как минимум одну кустовую откачку.

6.4.14. Глубину бурения скважин и опробования породных массивов при инженерно-геологических и гидрогеологических работах следует выбирать таким образом, чтобы обеспечить изучение гидрогеомеханических условий в пределах предполагаемой сферы взаимодействия отвального сооружения и основания, т.е. в основании мощной толщи «слабых» пород глубина опробования должна соответствовать высоте проектируемого отвала; а в разрезе «слабых» пород мощностью менее высоты отвала глубина опробования должна несколько превышать мощность «слабых» пород (с учетом заглубления в более прочные отложения на 1—3 м).

6.4.15. Завершающий этап инженерных изысканий — дополнительные инженерно-геологические и гидрогеологические исследования. Обычно их проводят после утверждения технического проекта одновременно с отвальными работами для уточнения параметров сооружений и порядка ведения отвальных работ. На этом этапе необходимо организовать:

* геодезические наблюдения за устойчивостью и деформациями откосов отвалов;
* наблюдения за уровнем и напорами подземных вод в теле отвала и его основании;
* гидрогеологическую съемку поверхности отвала, его участков и основания с фиксацией мест и расходов высачивания подземных вод;
* изучение фильтрационных деформаций на откосах отвалов;
* •контроль эффективности дренажа водоносных пластов самоизливающимися и водопонижающими скважинами путем замеров напоров и дебитов;
* бурение скважин с отбором монолитов для лабораторного изучения состояния и свойств техногенных и естественных массивов для контроля их изменения во времени;
* натурное опробование пород крыльчаткой, прессиометром и др.;
* опытные наливы в шурфы по площади отвала.

6.4.16. Прогноз изменения состояния и свойств породных массивов в особых случаях требует организации и выполнения опытно-промышленных экспериментов, к которым относятся опытно-эксплуатационные водопонижения и опытные отсыпки отвалов. Необходимость таких крупномасштабных опробований обосновывается специальным заданием.

6.4.17. Для прогноза напряженно-деформированного состояния отвальных сооружений, определения их оптимальных параметров, а также для разработки и проектирования технологических мероприятий по безопасному и эффективному отвалообразованию необходимо определять следующие показатели.

Прочностные параметры: прочностные: полное сопротивление сдвигу τ, МПа;  угол внутреннего трения φ, градусы; сцепление С, МПа.

Характеристики деформируемости: коэффициент уплотнения а, МПа-1; модуль деформации Eо, МПа; структурную прочность σстр, МПа.

Характеристики водопроницаемости: коэффициент фильтрации Кф, м/с; коэффициент консолидации Cv, м2/с; коэффициент водонасыщения G; коэффициент пористости е; начальный градиент I0.

Параметры, определяющий изменчивость во времени напряженно-деформированного состояния пород: коэффициент консолидации Сv м2/с; коэффициент порового давления В.

Кроме того, для каждого из изучаемых в лаборатории образцов следует изучить их гранулометрический состав и другие дополнительные классификационные показатели: естественная влажность; плотность; плотность минеральной части; пределы пластичности. На основе этих данных вычисляют: плотность скелета; плотность с учетом гидростатического взвешивания; число пластичности и. показатель консистенции.

6.4.19 Допускается на первой стадии проектирования для предварительных расчетов в качестве параметров использовать характеристики отвалов-аналогов.

**6.5 Прогноз напряженного состояния пород отвалов, их оснований и расчет фильтрационных деформаций откосов**

*Общие положения*

6.5.1 Напряженное состояние водонасыщенных пород характеризуется зависимостью:

σ эф = σ пол - U, (6.1)

где  σ эф — эффективные напряжения, действующие в скелете породы на контактах частиц, определяющие величину сил трения в массиве, способствующие уплотнению отложений с податливым скелетом; σпол — полные напряжения, соответствующие действию веса вышележащих пород, веса сооружения или горнотранспортного оборудования; U— напряжения в поровой воде (нейтральные давления), обусловленные действием гидростатического взвешивания или гидродинамического давления.

Полные напряжения в грунтах основания и теле отвала на любой момент формирования сооружения вполне определены (вес вышележащих пород плюс дополнительная внешняя нагрузка), напряжения в поровой воде изменяются во времени как в процессе формирования сооружения, так и в последующий период. Поэтому задача по прогнозу напряженного состояния пород отвальных сооружений сводится к прогнозу в них гидродинамического режима подземных вод или порового давления.

6.5.2 Напряжения в поровой воде (нейтральное давление в массиве горных пород) определяются для безнапорных потоков силами гидростатического взвешивания; эти силы учитывают при расчете эффективного напряжения по следующей формуле:

*U пс*= **γ***в hi* *g,* (6.2)

где **γ***в* — плотность воды; *g* — ускорение свободного падения; *hi*—высота столба воды над расчетной точкой массива водонасыщенных пород.

При напорном режиме подземных вод гидродинамическое (нейтральное) давление в расчетных точках определяют по зависимости:

*U гд* = **γ***в Ii* *g* (6.3)

где *Ii*— градиент напора в точке *i.*

При оценке напряженного состояния массива по формуле (6.2) гидродинамическое давление учитывают введением фиктивной силы, величину которой вычисляют из выражения:

*U псi*= **γ***в Hi* *g* (6.4)

где *Hi* —напор над расчетной точкой *i.*

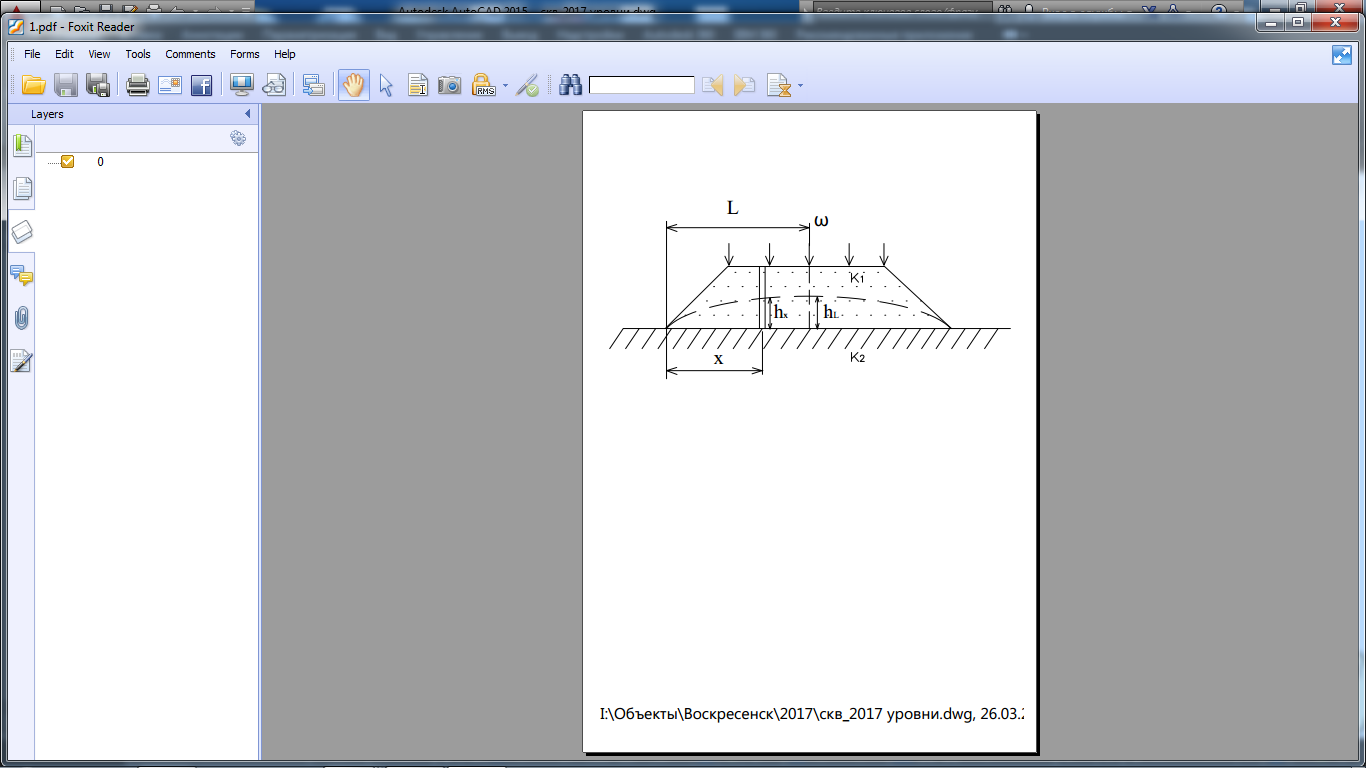
*Прогноз гидродинамического режима подземных вод в отвалах и их основаниях*

6.5.3. Прогнозные оценки гидродинамического режима подземных вод в отвалах и их основаниях, как правило, ограничиваются расчетом уровней (напоров) водоносных горизонтов, которые определяют устойчивость отвальных сооружений, возможные фильтрационные деформации их откосов, а также степень изменения естественного режима подземных вод в районе месторождения. Уровни подземных вод прогнозируют на базе гидродинамических расчетных методов или математического моделирования процессов фильтрации. Реализация этих методов требует соответствующих исходных данных о фильтрационных параметрах, граничных и начальных условиях, характеризующих ту или иную расчетную схему.

6.5.4. Для предварительной оценки положения уровней безнапорного потока подземных вод в отвалах можно воспользоваться следующей зависимостью (рис.6.1):

|  |  |
| --- | --- |
|  | (6.5) |

где *hx*- уровень (глубина) безнапорного одномерного потока на горизонтальном водоупоре в точке с координатой *x* (отсчитывают от основания одного из откосов отвала); *L*- расстояние между двумя границами разгрузки потока (противоположными откосами отвала); *h0*и *hL*- уровни потока в точках с координатами *х* = 0 и *х* = *L*, т. е. на границах (откосах отвала);*ω* - интенсивность инфильтрационного питания потока; *К-*коэффициент фильтрации фильтрующей толщи (отвала).



**Рисунок 6.1** – Схема к расчету положений уровня безнапорного потока в отвале

Для наиболее частого случая, неподтопленных откосов, *h0*= *hL*= 0.

Формула (6.5) справедлива для схемы одномерного потока, которая отвечает условию *Ly*> 8*Lx*, где *Ly* и *Lx* - линейные размеры планового потока (расстояния между откосами прямоугольного отвала).

6.5.5. Для оценки уровней планового безнапорного потока на горизонтальном водоупоре можно воспользоваться следующей формулой:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (6. 6) |

где

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |

В частности, для центральной точки планового потока (центра отвала) глубину потока можно определить по зависимости:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (6.7) |

где функцию *F****L*** определяют по табл. 6.3.

**Таблица 6.3** – Функция *F****L***

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *L* | 0,5 | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 | 4 |
| *FL* | 0,051 | 0,1 | 0,140 | 0,181 | 0,208 | 0,24 |

6.5.6. Входящую в формулы (6.6) и (6.7) величину инфильтрации обычно определяют с большими сложностями. Для прогноза уровней в отвалах можно для ориентировочных прогнозных расчетов принять следующие допущения. При коэффициентах фильтрации отвальных пород, превышающих величину 10-2 м/сут, интенсивность инфильтрации может быть принята равной средней интенсивности атмосферных осадков (в виде дождя) на расчетный период. В основе критерия лежит предпосылка: при подобной (относительно высокой) проницаемости отвалов весь объем осадков инфильтруется по площади отвалов.

При коэффициентах фильтрации отвальных пород *К* < 10-2 м/сут величина инфильтрации атмосферных осадков ограничена пропускной способностью этих пород. В этом случае можно принять *ω / K* = 1. Уровень подземных вод в отвалах при *ω / K* = 1 следует определять в области *х*, ограниченной условием:

*x (L — x) < z2*, (6.8)

где *z* — высота отвала; *L* — расстояние между противоположными откосами отвала.

6.5.7. Для более надежного определения фильтрационных характеристик отвала и интенсивности инфильтрационного питания следует использовать результаты замера уровней потока в отвале по створу, представленному двумя пьезометрами. Интерпретация результатов наблюдений сводится в данном случае к определению обобщенного параметра *ω / K* по формулам (6.5) или (6.6). Однозначность определения обобщенного параметра по результатам замеров уровней в двух и более пьезометрах обеспечивает контроль расчетной схемы и надежность расчетной характеристики для последующих прогнозных оценок уровенного режима подземных вод в отвалах.

6.5.8. Для схем типа положение уровней (напоров) в теле отвала (в приоткосной части массива) можно определить по результатам непосредственного замера уровня (напора) в точке с координатой *х*, с последующим расчетом по формулам:

- для безнапорных потоков

|  |  |
| --- | --- |
|  | (6.9) |

- для напорных пластов

|  |  |
| --- | --- |
|  | (6.10) |

6.5.9. Распределение напоров в каждом из относительных водоупоров, залегающих в основании отвала и перекрывающих водоносный пласт с напором Н0(рис. 6.2), можно определить по формуле:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (6.11) |

где *i* - номер водоупора (счет от кровли водоносного пласта); *Нn*- напор в кровле водоупора номер *n; mnи К0n* — мощность и коэффициент фильтрации водоупора номер *n*.

Напор может быть принят равным нулю в подошве отвалов, сложенных относительно проницаемыми породами (при *К/Ко>*10, см. рис. 6.2). Отвал слабопроницаемых пород, согласно рассматриваемой схеме, следует считать относительным водоупором.

|  |  |
| --- | --- |
| Описание: C:\Users\804206\AppData\Local\Temp\FineReader12.00\media\image4.jpeg | Описание: C:\Users\804206\AppData\Local\Temp\FineReader12.00\media\image5.jpeg |
| **Рисунок 6.2** – Распределение напоров в неоднородном водоупоре | **Рисунок 6.3** – Схема к расчету напоров в основании отвала |

6.5.10. Прогноз изменений напора водоносного пласта, залегающего в основании отвала, может быть выполнен в результате решения следующего уравнения:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (6.12) |

где Δ*Н* - искомое изменение напора водоносного пласта в основании отвала (рис. 6.3); *Т, а*— проводимость и коэффициент пьезопроводности этого пласта; *Ко, mо* - коэффициент фильтрации и мощность относительного водоупора в кровле пласта; *Н* — средний напор подземных вод по площади отвала, отсчитываемый от естественного напора водоносного пласта в основании отвала *Но, F, r0* - площадь отвала и его приведенный радиус:

6.5.11. Прогноз фильтрационных деформаций рыхлых песчаных отложений в основании фильтрующего откоса отвала целесообразно выполнять в следующей последовательности:

1. Определяют фильтрационный расход потока, выходящего на откос. В частности, для простейшего случая расход *q* определяют по формуле:

*q = ω L*/2, (6.13)

где *ω* - интенсивность инфильтрации по площади отвала; *L* - расстояние между противоположными откосами отвала.

2. Рассчитывают высоту промежутка высачивания на откосе отвала (рис. 6.4, а):

*hb* = 0,5*q*/*К*, (6.14)

где К — коэффициент фильтрации отвальных пород.

3. Определяют уклон поверхности языка оплывания Iоплпо зависимости:

*Iопл* = 0,5*Xtgφ* , (6.15)

где *φ* - угол внутреннего трения оплывающих пород; *X* - коэффициент, определяемый по графику (рис. 6.4, б) в зависимости от гранулометрического состава пород (*d*50 - средний диаметр частиц породы) и удельного фильтрационного расхода *q*, см2/сек (1 м2/сут = 0,116 см2/с).

4. Длину языка оплывания определяют по зависимости:

*Lопл = hb*/ *Iопл ,*  (6.16)



**Рисунок 6.4** – Определение параметров языка оплывания в основании фильтрующего откоса

*Прогноз порового давления в породах отвалов и их оснований*

6.5.12. Прогноз порового давления, развивающегося в массиве грунтов при нагружении, выполняют с применением математических методов, позволяющих в количественной форме оценить изменение его величины в пространстве и времени. Достоверность прогнозных оценок зависит от того, насколько полно в расчетной схеме отражено влияние различных природных и технологических факторов на условия протекания физического процесса. Для обоснования выбора расчетной схемы весьма важно сформировать представление о причинах возникновения и механизме развития порового давления в конкретной природной и технологической обстановке. С этой целью ниже рассмотрены некоторые физические предпосылки к построению схем развития порового давления в породах отвалов и их оснований.

6.5.13. При отсыпке отвального яруса под действием давления от его веса в породах основания отвала возникают дополнительные сжимающие напряжения, изменяющие структуру грунта и приводящие к деформированию массива. При этом часть внешнего давления воспринимается водой, заключенной в поровом пространстве, обусловливая возникновение избыточного порового давления в пределах области деформирования скелета грунта. Вследствие разности напоров внутри этой области и на ее границах появляется возможность оттока воды и уплотнения пород. Отжатие поровой воды из массива сопровождается уменьшением избыточного порового давления и нарастанием эффективных напряжений в скелете пород; этот процесс носит название «фильтрационной консолидации». Интенсивность развития фильтрационной консолидации зависит от характера внешней нагрузки, мощности уплотняющегося массива, условий его дренирования, деформационных и фильтрационных свойств пород. В сжимаемых грунтах с относительно высокой проницаемостью (*К*> 10-1 м/сут) избыточное поровое давление полностью рассеивается обычно за период нагружения массива и, наоборот, в слабопроницаемых грунтах (К<10-5м/сут) оно изменяется в течение времени, несоизмеримо большего, чем срок строительства и эксплуатации отвального сооружения. Поэтому прогноз консолидации глинистых пород целесообразно выполнять при коэффициентах фильтрации *К* от 10-1 до 10-5 м/сут (или при коэффициентах консолидации *Сw* от 10-3 до 1 м2/сут).

6.5.14. Оценка условий развития порового давления в водонасыщенном массиве при его нагружении требует учета фактора, условно именуемого структурностью породы. По этому признаку глинистые породы можно разделить на следующие категории: бесструктурные (текучие, текучепластичные, например, намывные, болотные, илистые, пойменные отложения) и обладающие структурной прочностью (породы мягкопластичной и более плотной консистенции).

При нагружении бесструктурных грунтов внешняя нагрузка в начальный момент практически полностью передается на поровую воду, вызывая в каждой точке массива «мгновенное» увеличение порового давления, равного по величине приложенной нагрузке. В процессе фильтрационной консолидации избыточное поровое давление постепенно рассеивается.

В породах, обладающих структурной прочностью *Рстр*, внешняя нагрузка *Р* в начальный момент воспринимается скелетом; при этом избыточное поровое давление возникает лишь в той части массива, где сжимающие напряжения приводят к разрушению структурных связей в скелете грунта. Однако движение воды в массиве может начаться лишь при градиенте напора, большем некоторого начального градиента *I0.* Эти обстоятельства приводят к ограничению зоны развития процесса фильтрационной консолидации, которая получила название «активной зоны», ее мощность *ha* определяют по формуле:

*ha*= (*Р - Рстр*) / *ρ*в *I0.* (6.17)

где **γ**в - вес единицы объема воды.

Следовательно, определение схемы изменения порового давления в породах, характеризующихся наличием структурной прочности и начальным градиентом фильтрации, требует сопоставления величины внешней нагрузки *Р* и структурной прочности *Рстр*, выделения зоны, где *Р ≥ Рстр,* полагая, что в ней возникает начальное избыточное поровое давление *Р0 = Р - Рстр.* В соответствии с этим значением определяют действующий градиент напора*Iд*, который должен быть сопоставлен с *I0.* Если в каждой точке области деформированного скелета удовлетворяется условие *Iд ≥ I0*, то вся она рассматривается как активная зона. В противном случае наряду с активной следует выделять «мертвую» — пассивную зону, где инициированное начальное поровое давление не изменяется, так как здесь *Iд<I0*. Наличие начального градиента предопределяет сохранение остаточного порового давления после окончания процесса фильтрационной консолидации также и в пределах активной зоны. Его величина изменяется от 0 на границе дренажа до *Р - Рстр* на границе активной зоны.

Рассмотренная схема отражает условия развития порового давления в породах, подвергшихся воздействию постоянной по величине внешней нагрузки. Если нагрузка, приложенная к поверхности массива, постепенно возрастает во времени, то граница области разрушения скелета постепенно перемещается. Соответственно может перемещаться и граница области фильтрационной консолидации.

6.5.15. Для выполнения прогноза изменения порового давления необходимо проанализировать геологическое строение массива, деформационные и фильтрационные свойства слагающих его пород, характер нагружения и обосновать расчетную схему, наиболее полно отражающую эти природные и технологические условия отвалообразования. Любая расчетная схема предполагает наличие определенной области (математического поля), охарактеризованной детерминированными физическими свойствами, а также начальными и граничными условиями.

Можно выделить несколько схем прогноза порового давления в породах отвалов и их оснований для случаев, наиболее часто встречающихся при решении задач по устойчивости отвальных сооружений. Эти расчетные схемы соответствуют имеющимся аналитическим решениям одномерных задач теории консолидации, поэтому они могут называться типовыми. Типовые схемы сведены к анализу консолидации однородного по свойствам слоя пород под влиянием постоянной или переменной внешней нагрузки.

6.5.16. Условия консолидации пород целесообразно схематизировать прежде .всего с учетом особенностей технологии отвалообразования, выделяя следующие схемы: I - уплотнение слоя пород постоянной мощности под действием внешней нагрузки, «мгновенно» приложенной к границе слоя; II - уплотнение слоя пород постоянной мощности под действием внешней, постепенно возрастающей нагрузки; III - уплотнение слоя пород

В рамках схемы I выполняют прогноз порового давления в основании отвалов - под действием веса каждого отдельного отвального яруса; в отвальном ярусе (или другом элементе отвального массива) - под действием каждого последующего яруса.

Схема II рекомендуется к использованию для оценки динамики развития избыточного порового давления в основании отвалов, формируемых наибольшими по мощности ярусами, или в основании приоткосной части отвалов, которые отсыпаются на полную высоту.

Схема III отражает условия консолидации отвальных массивов в процессе их формирования: складирования «слабых» водонасыщенных грунтов. При этом формирование порового давления в каждом слое массива происходит под действием внешней нагрузки от веса увеличивающейся по мощности вышележащей толщи отвала (гидроотвала). Особенность данной схемы заключается также в том, что в процессе консолидации пород растет не только внешняя нагрузка, но и изменяется область консолидации, т. е. увеличивается длина пути фильтрации воды.

6.5.17. Для выполнения расчетов порового давления в рамках выделенных схем необходимо охарактеризовать их начальными и граничными условиями. Под начальными условиями консолидации пород подразумевают характер распределения избыточного порового давления, вызванного в породном массиве внешней нагрузкой *Р* в начальный момент ее приложения *t* = 0. При этом предполагается, что начальные условия устанавливаются «мгновенно», так как время передачи нагрузки на скелет и воду пренебрежимо мало по сравнению с последующим периодом фильтрационной консолидации. Начальные условия зависят от характера внешней нагрузки и свойств нагружаемого массива. Начальные условия применительно к схеме I, устанавливаемые при нагружении массива постоянной внешней нагрузкой, характеризуются равномерным распределением избыточного порового давления по всей высоте *h* расчетного слоя. При этом для бесструктурных грунтов высота расчетного слоя соответствует фактической мощности массива *h = M*, а начальное поровое давление равно величине внешней нагрузки *Р*. Для пород, обладающих структурной прочностью *Рстр* и начальным градиентом фильтрации, в качестве расчетного слоя рассматривается активная зона *ha*, а начальное поровое давление в ней принимают равномерно распределенным по всей мощности *ha* и равным *Р - Рстр*.

В соответствии с этим схему I целесообразно разделить на две категории:

I—A: t = 0 0 ≤ *z*≤ *MP0uz= Р = const*;

I—Б: t = 0 0 ≤ *z* ≤ *ha P0uz= Р - Рстр= const*;

Схемы II и III характеризуются нулевыми начальными условиями (*Р0u*=0).

6.5.18. Процесс изменения поля начального порового давления во времени *t*> 0 характеризуют и определяют условия на границах области фильтрации. Для определения граничных условий в каждом конкретном случае необходимо учитывать физическую характеристику границ расчетного слоя. Применительно к типовым схемам фильтрационной консолидации границы расчетного слоя могут быть представлены либо границей дренажа, либо непроницаемым контуром. Изменение порового давления в слое возможно, если хотя бы на одной из границ слоя давление остается ниже чем в массиве. В частности, давление на границе дренажа в любой момент времени *t*> 0 может быть равным нулю. Такие граничные условия фиксируются на поверхности его основания, нагружаемого проницаемыми отвальными породами (если коэффициент фильтрации проницаемых пород на порядок и более превышает коэффициент фильтрации пород основания). Обычно от границы дренажа производят отсчет координаты *z* по высоте расчетного слоя. Противоположная граница расчетного слоя совпадает либо с фактической границей уплотняемой толщи (*z* = *М*), либо с границей активной зоны (*z* = *ha*). В первом случае граница может характеризоваться либо как граница дренажа, либо как непроницаемый контур (если *К* подстилающей толщи более чем на порядок ниже *К* уплотняющихся пород).

Граница активной зоны характеризуется постоянным давлением в течение всего фильтрационного процесса и после его окончания.

6.5.19. В зависимости от сочетания граничных условий можно выделить несколько вариантов расчетных схем I—А и I—Б (табл. 6.4).

Для бесструктурных грунтов (I—А):

I—А—1—с постоянным (нулевым) давлением на границе дренажа и непроницаемым контуром на противоположной границе слоя;

I—А—2 — с постоянным (нулевым) давлением на обеих границах слоя (с двумя проницаемыми границами).

Для дифференциации схемы I—Б следует установить характер фактической нижней границы массива (проницаемая или водоупор) и сопоставить высоту активной зоны*ha* с фактической мощностью массива *М*.

Если в основании уплотняющейся толщи (слоя) залегают водоупорные породы, то за нижнюю границу расчетного слоя может быть принята либо граница активной зоны (при М >*ha*), либо фактическая граница массива (при *М* <*ha*). В первом варианте следует принять схему I—Б—1, в которой одна из границ слоя характеризуется нулевым давлением, а вторая — постоянным давлением *Р - Рстр*. Во втором варианте (I—Б—2) одна из границ слоя характеризуется нулевым давлением, другая является непроницаемым контуром, давление на котором изменяется от начального (*Р - Рстр*) до величины *Р ∞u= I0М.*

Если в основании массива залегают сильно проницаемые породы, то фильтрация воды при консолидации возможна в двух направлениях. При условии *ha*<*M*/2 формируются две зоны фильтрационной консолидации, разделенные «мертвой» зоной. В этом случае у каждой из дренирующих границ следует выделять активную зону, характеризуя ее условиями схемы I—Б—1, принимая за *z* = 0—«свою» границу дренажа. При условии *ha*>*М*/2 в массиве формируется единая фильтрационная область с двумя границами дренажа. Для конкретизации характера изменения давлений внутри области целесообразно разделить ее на две симметричные зоны (по отметке *z*= *М/2*). Рассматривая каждую из них независимо и в отдельности, можно принять схему I—Б—2.

**Таблица 6.4** - Схемы для прогноза консолидации пород по условиям

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Начальные | Граничные | |
| I-А | I-А-1 I-А-2 | |
| C:\Users\804206\AppData\Local\Temp\FineReader12.00\media\image7.jpeg | C:\Users\804206\AppData\Local\Temp\FineReader12.00\media\image7.jpeg | C:\Users\804206\AppData\Local\Temp\FineReader12.00\media\image7.jpeg |
| I-Б | I-Б-1 | |
| C:\Users\804206\AppData\Local\Temp\FineReader12.00\media\image7.jpeg | C:\Users\804206\AppData\Local\Temp\FineReader12.00\media\image7.jpeg | C:\Users\804206\AppData\Local\Temp\FineReader12.00\media\image7.jpeg |
| I-Б-2 | |
| C:\Users\804206\AppData\Local\Temp\FineReader12.00\media\image7.jpeg | C:\Users\804206\AppData\Local\Temp\FineReader12.00\media\image7.jpeg |
| II-А | II-А-1 | II-А-2 |
| C:\Users\804206\AppData\Local\Temp\FineReader12.00\media\image7.jpeg | C:\Users\804206\AppData\Local\Temp\FineReader12.00\media\image7.jpeg | C:\Users\804206\AppData\Local\Temp\FineReader12.00\media\image7.jpeg |
| III-А | III-А-1 | III-А-2 |
|  | C:\Users\804206\AppData\Local\Temp\FineReader12.00\media\image8.jpeg | C:\Users\804206\AppData\Local\Temp\FineReader12.00\media\image9.jpeg |

6.5.20. При дифференциации схем II и III (с переменным внешним давлением) в соответствии с граничными условиями приходится ограничиться только вариантами II—А и III—А, выделенными для бесструктурных грунтов, поскольку они позволяют использовать решения теории фильтрационной консолидации. Для пород, характеризующихся структурной прочностью и начальным градиентом фильтрации, учет непостоянства внешней нагрузки осложнен нелинейностью процесса, и, в частности, подвижностью нижней границы области фильтрации. Прогноз порового давления при таких условиях требует применения математического моделирования.

Варианты схем (II—А—1, II—А—2, III—А—1, III—А—2), выделенные по граничным условиям для бесструктурных грунтов (см. таблицу 6.4), не требуют пояснений.

6.5.21. Для расчетов величины избыточного порового давления в соответствии с предложенной схематизацией условий консолидации рекомендуются следующие формулы:

по схемам I—А—1 и I—А—2: *Рu*(*z, t*) = *Р0uF1* (*z, t*) (6.18)

по схемам I—Б—1 и I —Б—2: *Рu*(*z, t*) = *Р0uF1* (*z, t*) ≥ *I 0 z*; (6.19)

по схемам II—A—1 и II—A—2: *Рu*(*z, t*) = *Р*(*t*) *F2* (*z, t*); (6.20)

по схеме III—A—1: *Pu*(*z, t*) = *Р*(*t*) *F3* (*z, t*); (6.21)

по схеме III—A—2: *Pu*(*z, t*) = *Р*(*t*) *F4* (*z, t*) (6.22)

где *Pu*(*z, t*) - избыточное поровое давление в расчетный момент времени *t* в точке с координатой *z*, отсчитываемой от проницаемой границы (для всех схем III координату *z* отсчитывают от нижней границы слоя); *Р0u* - начальное поровое давление (*Р0u* = *Р* для бесструктурных грунтов; *Р0u* = *Р-Pстр* для пород со структурной прочностью *Рстр*); *Р* — внешняя нагрузка, *const*; *Р* = **γ***отвhотв*, где *hотв* - высота отвального яруса; **γ***отв*- вес единицы объема отвальных пород; *P*(*t*) - переменная внешняя нагрузка;

Величина переменной нагрузки *P*(*t*) для схемы II определяется как: *P*(*t*) = *h*(*t*) **γ***отв*, где *h*(*t*) - мощность отсыпаемых отвальных пород в расчетный момент времени *t* или *P*(*t*) = *Vн t*, где *Vн* - скорость нагружения; для схемы III: *P*(*t*) = *ρ1M*(*t*), где *M*(*t*) - мощность отсыпаемого слоя в момент времени *t*; **γ***1 -* вес единицы объема отсыпаемых пород с учетом гидростатического взвешивания;

*F1* (*z, t*); *F2* (*z, t*); *F3* (*z, t*); *F4* (*z, t*) - функции, зависящие от аргументов *ž* (приведенной координаты расчетной точки) и *Ť* (приведенного времени); значения функций определяют по графикам (рис. 6.4 – 6.7).

Значение приведенной координаты *ž* определяется по формуле: *ž* = *z* / *h*,

где для схем I—А—1, II—А—1, III— А— 1, III—А—2: *h = M*

для схем I—А—2, II—А—2: *h = М / 2*;

для схемы I — Б— 1: *h = ha*;

для I — Б—2: *h = h*\* (где *= h*\* - см. таблицу 6.4).

Значение приведенного времени *Ť* для всех схем кроме III определяется по формуле: *Ť =t*(*π2Cw/* 4 *h2*); для схемы III по формуле: *Ť =Vн2 / Cw*,где *Cw–* к-т консолидации пород.

6.5.22. При решении многих задач фильтрационной консолидации приходится рассматривать более сложные условия формирования избыточного порового давления. Например, довольно часто требуется определить поровое давление в нагружаемом массиве, в котором к моменту приложения внешней нагрузки процесс фильтрационной консолидации, вызванный предыдущим нагружением, еще не завершился. В таких случаях изменение порового давления целесообразно рассматривать в виде совокупности отдельных периодов. При этом для каждого периода в качестве начальных условий следует принимать поле давлений, сформировавшееся на конец предыдущего периода. Поясним эти положения на примере.

|  |  |
| --- | --- |
| C:\Users\804206\AppData\Local\Temp\FineReader12.00\media\image10.jpeg | C:\Users\804206\AppData\Local\Temp\FineReader12.00\media\image10.jpeg |
| **Рисунок 6.4** – График функции *F*1(*z, t*) | **Рисунок 6.5** – График функции *F*2(*z, t*) |
| C:\Users\804206\AppData\Local\Temp\FineReader12.00\media\image11.jpeg | C:\Users\804206\AppData\Local\Temp\FineReader12.00\media\image12.jpeg |
| **Рисунок 6.6** – График функции *F*3(*z, t*) | **Рисунок 6.7** – График функции *F*4(*z, t*) |

Формирование порового давления в массиве в период времени от*t* = 0 до *t* = *t1*  происходит от воздействия первой ступени нагружения *Р1*, а в период t > t1 — от двух нагрузок *Р1*и *Р2*. На конец первого периода, т. е. в момент времени *t1* давление в каждой точке*z* определяют в соответствии с формулой (7.18): *Рu*(*z, t1*) = *Р1F1* (*z, t*). Начальные условия для второго периода в момент времени t1 принимают равными *P0u*(*z, t1*) = *Р1F1* (*z, t*) + *Р2*. Исходя из этого начального *Рu* дальнейший расчет производят в рамках одной из схем, например, по схеме I—А—1). Окончательное выражение для определения порового давления в момент времени *t2*, отсчитываемого от *t1*, выглядит следующим образом:

*Pu(z, t2)* = [*P1 F1(z*,*t1*) + *P2*] *F1* (*z, t2*) (6.23)

Рассмотрим еще один пример. Требуется определить поровое давление в намывных породах гидроотвала на момент начала отсыпки на нем отвалов по истечении *t2*лет после окончания намыва. Известно, что намыв гидроотвала производился в течение времени *t1* лет. Задачу решают следующим образом: по одному из выражений (6.23) или (6.24) рассчитывают поровое давление на момент окончания намыва, которое принимают начальным для момент отсыпки отвала на гидроотвале, а окончательное выражение для прогноза Рu записывают в виде:

*Pu(z, t2)* = [*P1 F3(z*,*t1*) + *P2*] *F1* (*z, t2*) (6.24)

**6.6. Расчет устойчивости откосов отвалов**

6.6.1. Из наблюдаемых на отвалах видов деформаций - оползней, осыпей, просадок и оплывин - наиболее опасным и широко распространенным видом в практике отвалообразования являются оползни. Основная причина их образования оползней - несоответствие параметров отвалов несущей способности отвальной массы и пород основания отвалов. В зависимости от положения нижней границы поверхности скольжения оползни разделяют на три типа - надподошвенные, контактные и подподошвенные.Надподошвенные оползни отвалов характеризуются плавной криволинейной поверхностью скольжения, образующейся в теле отвала и выходящей в нижнюю бровку откоса (рис. 6.8). Подподошвенные оползни возникают при размещении отвалов на основании, породы которого обладают низкой несущей способностью, или в этих породах сохраняются высокие напоры. Они характеризуются плавной криволинейной поверхностью скольжения, захватывающей породы основания, и образованием вала выпирания у нижней бровки откоса (рис.6.9).Контактные оползни (иногда их называют подошвенными) характеризуются ломаной поверхностью скольжения, проходящей по контакту отвал-основание или контакту между слоями в породах основания (рис. 6.10).Данными видами оползней определяются и схемы расчета устойчивости отвалов, соответствующие конкретной схеме возможной деформации отвала.

Горно-геологические условия отвалообразования, встречающиеся в практике открытых горных работ:

- отвалы прочных или слабых пород на прочном основании;

- то же, на наклонном слоистом основании;

- то же, на слабом слое (подподошвенный тип оползня).

|  |  |
| --- | --- |
| *а*  *ε=*450-φ/2  *ω=*450+φ/2  *ω*  *H90*  *ε*  *α*  *H* | *ψ*  *α*  *H*  *ψ=*(φ1-φ2)/2  *а*  *θ*  *α*  *ε* |
| **Рисунок 6.8** – Построение поверхности скольжения для условий формирования надподошвенного оползня в однородном отвале | **Рисунок 6.9** – Построение поверхности скольжения для условий формирования подподошвенного оползня |
| *а*  *λ*  *β*  *H90*  *α*  *H* | |
| **Рисунок 6.10** – Построение поверхности скольжения для условий формирования подошвенного оползня | |
|  | |

6.6.2. Расчеты предельных параметров внешних и внутренних отвалов производятся с коэффициентом запаса, величина которого зависит от следующих факторов:

- погрешности методов расчета, включая и погрешности самих расчетов;

- погрешности определения основных расчетных характеристик сопротивления сдвигу отвальной смеси;

- изменения этих характеристик с течением времени под влиянием различных факторов (длительная прочность);

- погрешности определения объемного веса отвальных пород, составляющих призму возможного обрушения.

Рекомендуемые значения коэффициента запаса устойчивости приведены в табл.6.5.

**Таблица 6.5** - Рекомендуемые значения коэффициента запаса устойчивости для различных условий отвалообразования.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Отвалообразующие породы | Тип отвала | Основание отвала | Рекомендуемый коэффициент запаса устойчивости |
| Скальные и полускальные породы | Внешний | Прочное | 1,05 |
|  | Внутренний | Слоистое | 1,05\*-1,10 |
| Рыхлые песчано-глинистые породы | Внешний | Прочное | 1,10 |
|  |  | Слоистое | 1,10\*-1,20 |
|  | Внутренний | Прочное | 1,10\*-1,15 |
|  |  | Слоистое | 1,20 |
| Слабые глинистые породы | Внешний | Прочное | 1,20 |
|  |  | Слабое, слоистое | 1,20\*-1,30 |
|  | Внутренний | Прочное | 1,20 |
|  |  | Слоистое | 1,20\*-1,30 |
| Скальные, полускальные.  Рыхлые песчано-глинистые породы | Нагруженный | Любое | 1,10\*-1,20  1,20\*-1,30 |

\* *Допустимо при использовании в расчетах показателей физико-механических свойств пород отвалов и их оснований, определенных методом обратных расчетов или натурными испытаниями.*

6.6.3. Потеря устойчивости отвала определяется следующими условиями:

- достижением напряженным состоянием предельного и скольжением отвальной массы по круглоцилиндрической поверхности;

- достижением напряженным состоянием предельного и сползанием отвальной массы по прямолинейному участку или криволинейной поверхности;

- достижением напряженным состоянием предельного в основании отвала.

6.6.4. Оценка устойчивости отвала по первому предельному состоянию рекомендуется выполняться на основании одного из трех методов:

- метод предельного равновесия;

- метод предельного состояния;

- численные методы анализа, основанные на решении уравнений механики сплошной или дискретной сред (метод конечных элементов, метод конечных разностей, метод сглаженных частиц и т.д.).

6.6.5. Оценка устойчивости отвала по второму предельному состоянию или прогноз деформаций отвальной массы выполняется на основании аналитических решений или численных методов анализа, основанных на решении уравнений механики сплошной или дискретной сред.

6.6.6. Устойчивость отвалов прочных пород на прочном основании.

Параметры отвалов, расположенных на прочном основании, определяются физико-механическими свойствами отвальной массы.Прочными породами называются скальные и полускальные породы различного состава, величина сцепления в куске которых превышает 2 МПа или величина сопротивления одноосному сжатию более 8 МПа.Прочное основание отвалов может быть представлено скальными, полускальными и песчано-гравелистыми породами, не имеющими четко выраженной слоистости, слабых контактов и слабых прослойков. Основание, имеющее угол наклона до 10°, является горизонтально-пологим; при углах наклона более 10° - наклонным.

Расчеты устойчивости отвалов прочных пород на прочном горизонтально-пологом основании показывают, что высота яруса таких отвалов может быть практически не ограничена. При размещении на горизонтально-пологом основании максимальную высоту отвалов устанавливают технико-экономическими расчетами с учетом удорожания транспортирования при увеличении высоты отвала, расходов на устройство и поддержание транспортных путей, возможности применения мощного оборудования на высоких отвалах и их рекультивации.

6.6.7. Устойчивость отвалов слабых пород на прочном основании.

В практике разработки МПИ чаще всего встречаются два типа отвальных смесей: отвалообразующие породы, близкие по своим прочностным свойствам и резко отличающиеся по прочности. В первом случае сопротивление сдвигу таких смесей определяют как средневзвешенную величину совокупности физико-механических характеристик пород нарушенной структуры, составляющих отвал.

При втором типе смеси, например, представленном смесью прочных пород с каким-либо глинистым заполнителем, сопротивление сдвигу изменяется в иной пропорции, и наибольшее влияние на нее будут оказывать породы с более низкими физико-механическими свойствами. При содержании в отвалообразующих породах от 15 до 40% глинистого заполнителя происходит снижение сопротивления сдвигу - от сопротивления сдвигу прочных пород до сопротивления сдвигу глинистого заполнителя (рис. 6.11).

Максимальная высота устойчивых отвалов слабых пород на прочном основании ограничивается значением, при котором сопротивление смеси сдвигу достигает максимума – τ = max.

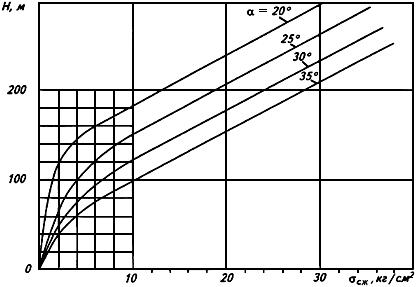
В диапазоне напряжений от 0 до точки σ1 (рис. 6.12), характеризующей напряжение, при котором начинается разворот и разрушение отдельных кусков пород вдоль поверхности скольжения, сопротивление сдвигу будет определяться только углом трения, близким к углу естественного откоса.

При напряжениях σ > σ1  процесс уплотнения с увеличением сопротивления пород сдвигу происходит до тех пор, пока нижняя часть массива отвала не перейдет в двухфазное состояние и сопротивление сдвигу смеси достигнет максимума. Высота отвала при этом является предельной.

Расчет устойчивости отвалов слабых пород на прочном основании производят одним из методов предельного равновесия с учетом развития с учетом развития избыточного порового давления (обводненный откос) или без него («сухой» откос).

|  |  |
| --- | --- |
| Описание: Правила обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах | Описание: Правила обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах |
| **Рисунок 6.11** – Зависимость изменения угла внутреннего трения отвальной смеси от содержания глинистого наполнителя | **Рисунок 6.12** – Схема, иллюстрирующая формирование сопротивления сдвигу по поверхности скольжения для пород различной прочности |

Предельную высоту отвалов, сложенных слабыми породами, можно предварительно определить по графику (рис. 6.13).



**Рисунок 6.13** – Обобщенный график зависимости высоты устойчивого отвала от временного сопротивления сжатию пород в куске и результирующего угла откоса отвала

6.6.8 Устойчивость отвалов на наклонном слоистом основании.

Отсыпка отвалов на слоистое основание, с точки зрения устойчивости, является одним из наиболее сложных вариантов отвалообразования.

Степень влияния слабого контакта или слоя в основании отвала на параметры устойчивых отвалов определяется соотношением физико-механических свойств отвальных пород, угла наклона контакта или слоя и показателей сопротивления сдвигу по ним.

6.6.7. Методы предельного равновесия

Методы предельного равновесия, базируются на следующих допущениях:

- используется гипотеза затвердевшего тела;

- допускается определенная форма поверхности скольжения;

- напряжения заменяются силами;

- принимаются допущения о давлении грунтовых вод и сейсмичности.

Применение метода предельного равновесия требует на первом этапе задания поверхностью скольжения и последующую итерацию ее положения до выявления критической с минимальным значением коэффициента устойчивости.

Форма поверхности скольжения принимается на основе расчетов по круглоцилиндрическим, полигональным (предопределенным) поверхностям, либо комбинированным или заданным в виде логарифмической спирали.

Для выполнения практических расчетов на основании метода предельного равновесия, рекомендуется применять методы Бишопа, Моргенштерна и Прайса, Спенсера (таблица 6.6).

Метод предельного равновесия рекомендуется использовать во всех случаях, где детальный прогноз напряженно-деформированного состояния отвальной массы/грунтового основания, включая избыточное поровое давление не оказывает влияния на результаты расчета коэффициента устойчивости. К таким случаям не относятся следующие задачи:

- формирование избыточного порового давления в теле отвала и грунтовом основании, недренированное деформирование отвальной массы при формировании отвала;

- коэффициент запаса устойчивости откоса определяется величиной или скоростью деформаций отвальной массы на контуре откоса;

- породный массив сложен из разнородных инженерно-геологических элементов (слоистый массив), деформационные характеристики пород каждого из инженерно-геологических элементов которого значительно отличаются друг от друга;

- породы склонные к развитию дилатансии.

**Таблица 6.6** – Учет основных теоретических положений различными методами теории предельного равновесия

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Учет теоретических положений | Методы расчета устойчивости откоса отвала по предельному равновесию | | | | | | |
| Бишопа | Спенсера | Моргенштерна и Прайса | Феллиниуса | Янбу упрошенный | Янбу обощенный | Сарма |
| Равновесие сил | +\* | + | + | +\* | + | + | + |
| Равновесие моментов | + | + | + | + | - | + | + |
| Расчет круглоцилиндрической поверхности скольжения | + | + | + | + | + | + | + |
| Расчет некруглоцилиндрической поверхности скольжения | - | + | + | - | + | + | + |
| Учет нормальных сил между вертикальными слоями | + | + | + | - | + | + | + |
| Учет сдвигающих сил между вертикальными слоями | + | + | + | - | + | + | + |

*Примечание: \* - только вертикальные силы.*

6.6.9. Рекомендации по оценке устойчивости отвалов численным моделированием.

Более общими методами определения коэффициента запаса устойчивости откоса, лишенными, являются методы решения уравнений механики сплошной среды на основании численных методов анализа. Использование численного моделирования позволяет решать геомеханические задачи, связанные с проектированием отвалов в сложных инженерно-геологических и гидрогеологических условиях. Положенный в основу программ численного моделирования метод расчета устойчивости путем снижения прочностных характеристик имеет ряд преимуществ перед традиционно методами расчета устойчивости на основе уравнений предельного равновесия.

В общем виде устойчивость откоса определяется коэффициентом устойчивости, представляющим собой отношение максимально возможной прочности грунта минимальному значению, необходимому для обеспечения равновесия .При определении коэффициента запаса на основании проведения численных расчетов методом снижения прочности МСП в качестве критериев оценки устойчивости рекомендуется использовать деформационный, силовой или энергетический критерии. Параметры этих критериев должны устанавливаться с учетом принятых для расчета моделей деформирования грунта и формулировки конечныхэлементов. При выполнении расчетов коэффициента запаса устойчивости откосов отвалов допускается использовать принятые авторами программы критерии отличные от трех представленных выше.

При выполнении расчетов устойчивости откосов необходимо определить коэффициент запаса устойчивости необходимо рассматривать следующие расчетные случаи, характеризуемые различным напряженно-деформированным состоянием грунтового массива и отвальной массы:

- расчетный случай, соответствующий моменту завершения формирования отвала;

- расчетный случай, соответствующий различным этапам сооружения отвала;

- расчетный случай, соответствующий длительной стадии эксплуатации отвала;

- расчетный случай, соответствующий резкому изменению положения уровня подземных вод в теле отвала.

Режим деформирования отвала и грунтового основания (дренированный или недренированный) устанавливается, исходя из скорости формирования отвала и фильтрационных характеристик грунтов. В зависимости от режима деформирования, типа грунта и модели деформирования грунтов принимаются к расчету либо полученные для случая полных, либо эффективных напряжений. При невозможности выделить режим деформирования расчет напряженно-деформированного состояния отвальной массы и грунтового основания выполняется в нестационарной постановке, задаваясь фактическими показателями фильтрационных характеристик грунтов и скоростью формирования отвала. В этом случае расчет ведется с использованием характеристик грунтов, полученные для случая эффективных напряжений.

На настоящий момент при выполнении оценки устойчивости откоса численными методами анализа в качестве условий пластичности принимается условие Кулона-Мора. В зависимости от применяемого программного продукта для расчета коэффициента запаса устойчивости откоса могут использоваться другие условия пластичности или более сложные модели деформирования геоматериала, основанные на одном из условий пластичности.

Коэффициент запаса устойчивости определяется на основании метода снижения прочности (МСП и SRM). Формула для его определения, выраженная для условия пластичности Кулона-Мора, имеет вид

(6.25)

где  и - исходные параметры прочности;  – фактическое нормальное напряжение;  и  - параметры прочности, сниженные в ходе расчета до минимальных значений, достаточных для поддержания равновесия.

Если условие пластичности отличается от условия Кулона-Мора, необходимо параметры этого условия привести к эквивалентным значения  и и использовать для определения коэффициента запаса уравнение, представленное выше.

Метод снижения прочности реализован в большинстве программах, работающих на основе метода конечных элементов и конечных разностей (Plaxis, FLAC, RS2/RS3, MidasGTS, Abaqus и др.). Прогноз разрушения осуществляется путем одновременного понижения обоих показателей прочности: и;  – коэффициент снижения прочности, соответствующий коэффициенту устойчивости в момент разрушения.

Последовательность расчета предполагает на начальном этапе присвоение коэффициенту снижения прочности () значения =1. В дальнейшем в ходе расчета Куст увеличивается, при этом сопротивление сдвигу и деформация оцениваются на каждом этапе до наступления разрушения. Результаты вычислений приводятся в виде графиков, на которых показано влияние коэффициента снижения прочности () на смещение контрольной точки (узла сетки конечных элементов). Критерий разрушения модели определяется условием Кулона-Мора. Если в результате конечно-элементного расчета будет получено решение для последнего устойчивого состояния откоса, то график расчетов примет горизонтальное положение и коэффициент снижения прочности будет соответствовать коэффициенту устойчивости Куст. Поверхность скольжения при использовании численных методов анализа формируется во время расчета. Существенным преимуществом метода снижения прочности по сравнению с методами предельного равновесия является то, что поверхность скольжения и коэффициент устойчивости определяются одновременно в процессе расчета и определяются развитием геомеханических процессов в отвальной массе/грунтовом основании.

Коэффициент запаса устойчивости при выполнении численного моделирования рекомендуется определять по следующей формуле

(6.26)

где – номер итерации процедуры МСП при определении коэффициента запаса устойчивости откоса.

Преимуществом МСП является использование численного моделирования, что позволяет принять в расчете уплотнение пород при расчете устойчивости на слабом (сжимаемом) основании с учетом процессов консолидации и его упрочнения, что весьма затруднительно учесть при расчете методами предельного равновесия. Дополнительным преимуществом МСП является возможность выполнения расчета устойчивости с учетом формируемого избыточного порового давления в насыпном водонасыщенном массиве и основании насыпи, способствующего снижению устойчивости откосных частей. При таком расчете устойчивость водонасыщенных насыпей на водонасыщенных глинистом основании оказывается значительно ниже.

При выполнении оценки устойчивости откоса численными методами анализа необходимо корректно сформировать напряженное состояние отвального массива и пород в основании отвала, что достигается за счет постадийного введения в модель элементов, отвечающих за механическую работу отвальной породы, то есть формирование процессов в породном массиве позволяет отразить истинную траекторию нагружения каждого элементарного участка отвального массива. Размер стадии выбирается, исходя из опыта проведения расчетов на аналогичных объектах.

Механические характеристики пород отвального массива необходимо принимать в зависимости от рассматриваемой стадии формирования отвала. Если принятая модель позволяет автоматически изменять механические характеристики рассматриваемых сред, то изменения параметров модели или типа модели на каждой стадии не осуществляется.

Расчетная численная модель должна позволять учитывать изменение избыточного порового давления в породах отвального массива в результате его нагружения отсыпкой новой насыпи (яруса отвала). Задача при этом должна решаться в нестационарной гидрогеомеханической постановке, когда процессы фильтрации жидкости и деформирования среды должны решаться в рамках единой системы уравнений. В случае отсутствия возможности в принятом программном продукте к решению совместной системы уравнений допускается раздельное решение фильтрационных и деформационных задач. В этом случае, на стадии нагружения массива принимается, что средние напряжения полностью передаются на жидкую фазу (воду), в то время как эффективные напряжения изменяются только за счет действия касательных напряжений. Коэффициент запаса устойчивости отвала определяется после каждой расчетной стадии.

Величину уровня подземных вод рекомендуется определять на основании фактических гидрогеологических замеров по пьезометрическим скважинам. В случае отсутствия экспериментальных данных расчет положения уровня подземных вод осуществляется на основании гидродинамических расчетов. При этом следует использовать фильтрационные параметры свойства пород отвалов, определенные на основании натурных методов.

Плотность дискретизации расчетной области устанавливается в процессе расчета и зависит от принятых моделей деформирования отвального массива и пород основания, формулировки конечного элемента, интенсивности развития пластических деформаций. Повышение плотности дискретизации расчетной области выполняется до тех пор, пока разница между значением коэффициента запаса устойчивости между двумя вариантами плотности дискретизации не снизиться менее чем на 5%. Рекомендуется плотность дискретизации расчетной области повышать локально в зонах формирования поверхностей скольжения.

При определении коэффициентов запаса рекомендуется использовать треугольные, прямоугольные, тетраэдальные и призматические элементы второго порядка. Допускается использовать линейные прямоугольные и призматические элементы.

Наиболее представительная картина трансформации напряженно-деформированного состояния пород отвального массива и основания отвала, включая развитие избыточного порового давления, может быть получена на основании моделирования постадийного нагружения с учетом принятого режима формирования отвала. Допускается также применять методы оценки устойчивости откоса отвалов, которые не позволяют оценить изменение напряженно-деформированного состояния породного массива, однако величины избыточного порового давления должны быть в явном виде внесены в расчетную модель.

При выполнении расчета устойчивости отвалов, массив и основание которых сложены породами с низкими фильтрационными характеристиками, определение избыточного порового давления в них следует осуществлять с учетоминтенсивности формирования отвала по высоте и площади, т.е. с учетом календарного графика отсыпки отвала. Расчетная модель при этом должна позволять решать совместную задачу фильтрации и деформирования пористых сред. Допускается выполнять последовательное моделирование развития напряженно-деформированного состояния отвала. На первом этапе проводиться статический расчет, при котором режим деформирования отвального массива и грунтового основания выбирается как недренированный. На втором этапе рассматривается стадия консолидационного уплотнения, на которой моделируется рассеивание избыточного порового давления. Мощность одновременно вводимого в модель слоя пород при отсыпке отвала принимается мощности одного отвального яруса.

Положение гидростатического уровня грунтовых вод в массиве отвала (депрессионную поверхность) рекомендуется определять предварительно на основании аналитических расчетов или фактических замеров уровня воды, а также гидродинамического моделирования с корректировкой расчетной модели по натурным данным.

Традиционно при выполнении расчетов устойчивости отвалов рекомендуется использовать упругопластическую модель, основанную на условии пластичности Кулона-Мора. Для выполнения практических расчетов допускается использовать модели деформирования грунта, функционал которых отличается от традиционной упругопластической модели (модели Кулона-Мора), но отвечают реальному механическому поведению грунтового массива. Их анализ позволил рекомендовать для выполнения прогноза устойчивости отвала следующие модели деформирования грунтов, получившие наибольшее распространение при решении практических задач (таблица 6.7): упругопластическая модель Кулона-Мора или ее аналоги; модель упрочняющегося грунта (Hardeningsoilmodel) или ее аналоги; упругопластические модели деформирования грунтов с объемным упрочнением.

**Таблица 6.7** – Рекомендации по выбору моделей деформирования грунтов для решения задач по первому предельному состоянию (по напряжению) для оценки устойчивости отвалов

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Наименование грунта | Условие  дренажа | Тип модели деформирования грунта | | |
| Упругопластическая модель Кулона-Мора или ее аналоги | Модель упрочняющегося грунта (Hardeningsoilmodel) или ее аналоги | Упругопластические модели деформирования грунтов с объемным упрочнением |
| Песчаные грунты | Дренированное | Эффективные характеристики прочности сдвигу, соответствующие критическому состоянию. Расчет ведется в эффективных напряжениях.  (рыхлое состояние) | | |
| Эффективные характеристики прочности сдвигу, соответствующие предельному состоянию. Расчет ведется в эффективных напряжениях (плотное состояние) | | |
| Глинистые грунты | Дренированное | Эффективные характеристики прочности сдвигу, соответствующие критическому состоянию. Расчет ведется в эффективных напряжениях | | |
| Недренированное | Недренированная прочность сдвигу, соответствующая плотности грунта в природных условиях. Расчет ведется в полных напряжениях. | Эффективные характеристики прочности сдвигу, соответствующие критическому состоянию\*. Расчет ведется в эффективных напряжениях. | |

*Примечание: \* - необходимо удостовериться в способность принятой модели деформирования грунта корректно следовать траектории нагружения при недренированном режиме работы.*

Поведение глинистых грунтов при недренированном деформировании может быть корректно предсказано с применением отдельных моделей деформирования грунтов через изменение эффективных напряжения и избыточного порового давления. Если установлено, что модель деформирования грунта не обладает такой способностью, расчет должен вестись в полных напряжениях задаваясь недренированной прочностью сдвига.

Для прогноза деформирования отвала рекомендуется применять модели, основанные на теории пластического течения с одинарной или двойной поверхностями упрочнения, а также модели, основанные на расширенной для грунтов теории деформационной пластичности. В этом случае для прогноза деформаций отвала рекомендуются следующие модели деформирования грунтов, получившие наибольшее распространение при решении практических задач (таблица 6.8): упругопластическая модель упрочняющегося грунта (Hardeningsoilmodel) или ее аналоги; упругопластические модели деформирования грунтов с объемным упрочнением; модели грунтов основанные на теории Hypoplasticity.

**Таблица 6.8** – Рекомендации по выбору моделей деформирования грунтов для решения задач по второму предельному состоянию (по деформациям)

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Преимущественный режим работы грунта | Тип модели деформирования грунта | | |
| Упругопластическая модель упрочняющегося грунта (Hardeningsoilmodel) или ее аналоги | Упругопластические модели деформирования грунтов с объемным упрочнением | Модели грунтов, основанные на теории Hypoplasticity |
| Изменение объема | + | + | + |
| Изменение формы | + | - | + |
| Изменение объема и формы | + | - | + |
| Знакопеременное нагружение | - | - | + |

*Примечание: в таблице приведены модели деформирования грунтов, получившие широкое распространение в практике расчета деформирования. Другие модели деформирования грунтов могут применяться при должном обосновании.*

Широко применяемая в геомеханике модель Кулона-Мора или ее аналоги для прогноза деформаций отвала не используется.При расчете уплотнения формирующегося отвального массива необходимо учитывать развитие больших деформаций, поэтому такая задача является геометрически нелинейной и должна решаться в рамках теории больших деформаций.

Моделирование развития геомеханических процессов при статическом и динамическом разжижении грунтов можно производить с использованием численных методов анализа. Для этих целей рекомендуется применять следующие модели деформирования грунтов (таблица 6.9): UBCSAND model, PM4Sandmodel, SANISANDmodel, Barodesymodel, Hypoplasticsandmodel, CASMmodel.

**Таблица 6.9** – Наличие моделей деформирования грунтов для моделирования их статического и динамического разжижения грунтов

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Наименование модели | Наименование программного комплекса | | | | | |
| Plaxis | FLAC | Abaqus | RS2/RS3 | Midas GTS | Z-Soil |
| UBCSAND model | + | +\* | - | - | - | - |
| PM4Sand  model | +\* | +\* | - | - | - | - |
| SANISAND model | +\* | +\* | +\* | - | - | - |
| Barodesy  model | +\* | - | +\* | - | - | - |
| Hypoplastic sand model | +\* | - | +\* | - | - | - |
| CASM  model\*\* | - | - | - | - | - | - |

*Примечание: По мере развития программных комплексов их функционал может быть дополнен представленными в таблице моделями; \* - модель реализована в виде пользовательской процедуры; \*\* - модель реализована только в программном комплексе CRISP (Criticalstatesoilmechanicsprogram)*

**6.7 Мероприятия по обеспечению устойчивости отвальных сооружений**

*Рекомендации по формированию отвалов*

6.7.1. Параметрами отвалов можно управлять, изменяя технологию отвальных работ. В зависимости от инженерно-геологических условий отвалообразования применяют схемы, либо обеспечивающие устойчивость отвальных откосов, либо допускающие их управляемое деформирование.

6.7.2. Устойчивость отвалов в некоторых случаях обеспечивают уменьшением их высоты и угла откоса. Если данное мероприятие нежелательно по экономическим или технологическим соображениям, то устойчивость отвальных сооружений обеспечивается применением специальных противооползневых мероприятий, таких как: - селективное размещение вскрышных пород в отвалы; - подготовка основания; - пригрузка нижней и разгрузка верхних частей откоса; - изменением направления фронта отвалообразования.

6.7.3. Селективное отвалообразование предполагает организацию такой последовательности размещения пород в отвалы, при которой обеспечивается формирование откосных частей сооружения из наиболее прочных пород или создание техногенного массива с возрастанием прочности пород в восходящем направлении – снизу в верх.

6.7.4. Инженерная подготовка основания отвалов включает следующие мероприятия: - полное удаление пород слабого слоя или контакта по всей территории отвала; - частичное удаление пород слабого слоя или контакта и замена их прочными, не размокающими, хорошо фильтрующими породами; - террасирование основания; - взрывное нарушение слабых контактов в основании отвалов.

Слабый слой в основании отвала удаляют полностью в том случае, если при наличии этого слоя устойчивость отвала не обеспечивается, а условия отвалообразования не допускают применения технологических схем с деформациями откосов (внутренние бестранспортные отвалы, внешние и внутренние отвалы с малоподвижным оборудованием). Породы слабого слоя можно удалять частично как по площади, так и по глубине. Доля площади, с которой удаляют слабые породы, зависит от прочностных свойств этих пород τ сл и нового замененного основания τ пр согласно формуле:

m = (6.27)

где m — относительная величина площади, на которой удалены слабые породы; τ пр - сопротивление сдвигу пород, необходимое для обеспечения устойчивости отвала заданных параметров.

Подготовка наклонного основания внутренних отвалов при бестранспортной системе разработки может производиться в виде террасирования. Это мероприятие оказывает существенное влияние на устойчивость отвала лишь в случае полного или частичного удаления слабых пород и замещения их более прочными. Если основание внутренних отвалов представлено слабыми контактами, залегающими среди прочных пород, можно рекомендовать взрывное нарушение слабых контактов. Относительную площадь основания, где производится взрывание, определяют также по формуле (6.27).

6.7.5. При отсыпке внешнего отвала на слабое основание большой мощности рекомендуется в качестве противооползневого мероприятия его пригрузка опережающим отвалом. Опережающий отвал отсыпают на выходе поверхности скольжения в основании отвала и ориентируют параллельно фронту отвалообразования. Высота опережающего отвала не должна быть меньше величины, обеспечивающей безопасность отвалообразования; ее регулируют по необходимости.

6.7.6. При отсыпке отвалов на наклонное основание может быть рекомендовано изменение направления фронта отвалообразования. Эффективность мероприятия зависит от угла разворота фронта отвалообразования относительно простирания и достигает максимума при углах разворота более 45°. С увеличением угла наклона основания положительное влияние мероприятия растет.

6.7.7. На участках с низкой несущей способностью пород основания отвальные работы в ряде случаев могут производиться при постоянно деформирующихся откосах. Вести такие работы можно в следующих условиях: при плавном и медленном характере деформации откосов; а также применяя оборудование с большими линейными параметрами, которое располагают вне призмы возможного оползания (ленточный отвалообразователь, драглайн и т. д.); кроме того используют мобильное технологическое оборудование (бульдозеры, автосамосвалы), находящееся за предохранительным валом вне призмы возможного обрушения короткий промежуток времени, и специальные мероприятия, обеспечивающие увеличение ширины отвальной заходки или предварительную подготовку основания под работающим на отвале технологическим оборудованием.

6.7.8. Особенности работы ленточных отвалообразователей или шагающих экскаваторов на отвалах, откосы которых подвергаются постоянным деформациям, состоят в том, что это оборудование следует располагать вне призмы оползания, ширину которой первоначально устанавливают расчетом и корректируют по результатам натурных наблюдений. При работе по данной схеме приемная способность отвальной заходки существенно увеличивается за счет оползания отвальных масс.

6.7.9. Отвалообразование с применением мобильного технологического оборудования может производиться при кратковременном нахождении его на верхней площадке отвального яруса за предохранительным валом вне призмы возможного оползания. Порядок работ по данной схеме предполагает ведение отвальных работ на последовательно сменяемых отвальных участках, ширину каждого из которых определяют технологические условия отвалообразования (объемы вывозимых в отвал пород, возможности разгрузки и разворота автосамосвалов с учетом работы бульдозеров). При выборе высоты отвалов необходимо руководствоваться тем, что на характер развития деформаций не должен влиять вес технологического оборудования, а деформирование должно происходить медленно, при сохранении плавного характера процесса. Так, при ведении отвальных работ с применением автосамосвалов весом 320 т минимальная высота яруса составляет 10 м, а максимальная может быть значительно больше при соблюдении второго условия.

Критическое состояние, при котором отвалообразование нужно переносить на соседний участок, определяется прогрессирующим характером деформирования откосов (значительное нарастание скорости смещения), а также полным оконтуриванием оползневого тела трещиной отрыва на верхней площадке и образованием вала выпирания у нижней бровки откоса. Работы на данном блоке могут быть возобновлены при затухании деформации.

6.7.10. При организации отвальных работ на гидроотвалах следует учитывать возможность развития оползневых деформаций подподошвенного типа, приводящих к частичному или полному выдавливанию намывных отложений из-под отвала. Полное выдавливание слабых пород в краевых частях гидроотвалов позволяет повысить оптимальные параметры отвальных сооружений.

6.7.11. Формирование отвальных насыпей на слабом основании сопровождается развитием оползней подподошвенного типа или деформаций оседания, сопровождающихся выдавливанием пород основания, которые в конечном итоге приводят к изменению их мощности, а иногда и формы. Поэтому при обосновании устойчивых параметров отвалов и безопасной технологии отвалообразования на территориях, сложенных породами с низкой несущей способностью, встает весьма важная инженерно-техническая задача - прогнозирование величин внедрения отвальной насыпи в слабое основание и изменение мощности последнего. Прогнозирование данного процесса требует учета значительных по величине пластических деформаций, развивающихся в слабых породах при их взаимодействии с отсыпаемой насыпью.

Традиционно при выполнении численного моделирования геомеханических процессов используется метод конечных элементов (МКЭ) в Лагранжевой постановке, в которой материал жестко связан с узлами элементной сетки и смещения узлов приводят к деформациям элементов. В такой постановке достаточно просто оперировать граничными условиями и отслеживать их изменения в процессе численного моделирования. Однако при наличии больших деформаций происходит значительное искажение элементной сетки, что с определенного момента приводит к накоплению недопустимых погрешностей при определении первичных (усилия, перемещения) и вторичных переменных (напряжения и деформации), а в последующем - к значительному расхождению решения. Поскольку при отсыпке сухих пород отвала ожидается их значительное внедрение в породы основания, которое будет сопровождаться очень большими деформациями, то решение такой задачи в Лагранжевой постановке с применением неявных методов анализа весьма затруднено.

Альтернатива Лагранжевой постановке - Эйлерова постановка, в которой узлы элементной сетки остаются неподвижными, а материал перемещается через элементную сетку, при этом допускается заполнение элемента не на 100%. Такая постановка обычно применяется при решении нелинейных проблем, включая задачи об экстремальных контактных условиях, значительных деформациях и перемещениях тела, динамических процессах, задачах, связанных с повреждениями, разрушением, эрозией.

Представленный выше подход может быть реализован в качестве базового функционала в программном комплексе Abaqus/Explicit, широко применяемом для выполнения геомеханических расчетов. Механическое поведение пород отвала и слабого основания описывается упругопластической моделью Кулона-Мора, согласно которой среда характеризуется двумя упругих и двумя пластических параметра: сцеплением (*c*), и углом внутреннего трения(φ).

*Дренаж отвалов и их оснований*

6.7.12. Осушение рыхлых пород во внутренних или внешних отвалах приводит к снижению их влажности и повышению сопротивления сдвигу, что позволяет увеличить емкость отвальных сооружений. Снижение уровней подземных вод в теле отвалов способствует уменьшению взвешивающего влияния воды на массив отвальных пород, увеличению эффективных напряжений в подошве отвала и его основании, что также обеспечивает увеличение емкости отвалов. Снижение уровней подземных вод в отвалах приводит к ограничению фильтрационных деформаций рыхлых пород на откосах отвала. Снижение напоров в водоносных пластах, залегающих в основании отвала, способствует изменению напряженного состояния толщи слабопроницаемых пород, экранирующих водоносный пласт; увеличение эффективных напряжений в этих породах способствует повышению общей устойчивости отвала и его основания, позволяет повысить емкость отвала (без увеличения отведенной под него площади).

6.7.13. Предотвращения увлажнения отвальных пород достигают за счет применения средств заградительного дренажа, обеспечивающего сокращение притоков подземных вод к рабочему борту карьера. При отсыпке внутренних отвалов ограничение водонасыщения пород в отвалах достигают путем дренажа подошвы карьера (с применением средств водоотвода и открытого водоотлива). Отсыпку внешних отвалов следует выполнять при соответствующих профилактических мероприятиях, обеспечивающих отвод поверхностных вод и атмосферных осадков за пределы площади, отведенной под отвалы. Мероприятия обычно сводятся к проходке дренажных канав на участках отвалообразования и нагорных канав, оконтуривающих эти участки. Применяемый иногда на практике «отжим» водоемов и водотоков отвалами требует в каждом конкретном случае особого обоснования, учитывающего как устойчивость отвалов с обводненным основанием, так и природоохранные моменты.

6.7.14. Снижения уровней подземных вод в отвалах достигают за счет применения следующих технических средств: дренажных подушек, укладываемых в подошве отвала при его селективной отсыпке; системы продольных и поперечных канав, пройденных в основании отвалов и заполненных фильтрующим материалом до отсыпки отвалов; вертикальных скважин, заполненных фильтрующим материалом («песчаных свай»), пройденных по сетке на площади отвалов или образующих контурные системы (параллельные фронту отсыпки отвалов).

Дренирование внешних или внутренних отвалов с применением тех или иных технических средств должно быть обосновано технико-экономическим расчетом, который включает прогноз дренажного эффекта, оценку устойчивости отвала (при сниженных и не сниженных уровнях), а также сопоставление затрат на дренажные мероприятия с экономическим эффектом, полученным в результате оптимизации параметров отвалов за счет снижения уровней подземных вод.

6.7.15. Для предотвращения фильтрационных деформаций на откосах отвалов применяют дренажные пригрузки, представленные грубообломочным материалом и отсыпаемые на фильтрующий откос с перекрытием промежутка высачивания подземных вод. Кроме того, возможно использование горизонтальных самотечных скважин, которые целесообразно бурить с откосов на участках понижений кровли относительных водоупоров.

При наличии под отвалами горных выработок (подземного дренажного комплекса) возможно применение сквозных фильтров для перехвата подземного потока к откосу. Оборудование сквозных фильтров целесообразно применять, если коэффициент фильтрации отвальных пород более 0,5 м/сут.

Применение водопонижающих скважин для предотвращения фильтрационных деформаций откосов отвала может быть оправдано лишь в качестве временного мероприятия, обеспечивающего ограничение водопритока при сооружении дренажных пригрузок на откосе. Эксплуатация водопонижающих скважин возможна при коэффициентах фильтрации отвальных пород более 5 м/сут (с учетом сравнительно небольшой мощности подземного потока в прибортовой зоне отвалов).

6.7.16. Дренирование водоносных пластов, приуроченных к основанию отвалов, выполняют либо для уменьшения влажности слабопроницаемых пород в подошве отвала, либо для снижения напоров подземных вод с целью изменения напряженного состояния относительных водоупоров в основании отвалов. Снижение уровней подземных вод, связанных с безнапорным горизонтом, залегающим непосредственно в подошве отвала, может быть достигнуто за счет проходки дренажных канав (или траншей), оконтуривающих отвал. Более эффективной является система продольных и поперечных канав, пройденных до отсыпки отвала и заполненных грубообломочным материалом. Для ограничения питания безнапорного водоносного горизонта, залегающего под отвалами, целесообразна проходка нагорных канав, перехватывающих поверхностный сток.

Для снижения напоров в водоносных пластах, отделенных от подошвы отвала относительным водоупором, возможно использование самоизливающих скважин. Скважины целесообразно бурить в виде рядов (контуров) в основании откосов отвалов и по возможности обеспечивать отвод воды от устья скважин по мере их перекрытия отвалом. Для оценки эффективности контурных систем самоизливающих скважин используют зависимость:

S z= S x (2 )/ () (6.28)

где S z — понижение напора в точке с координатой х (отсчитывается от дренажного контура); S x — понижение напора на скважине (определяется отметкой ее устья); σ - расстояние между скважинами в ряду; г - радиус скважины; а - коэффициент пьезопроводности дренируемого пласта.

Дебит каждой скважины ряда можно оценить по формуле:

Q = 2 π σ T S / (σ + 2π ), (6.29)

где Т—проводимость дренируемого пласта\*.

Эффективность самоизливающих скважин определяют только снижением напора в приоткосной зоне отвала; она не должна оцениваться расходом самоизлива (скважины могут быть эффективными и при незначительных дебитах). В конструкции самоизливающих скважин, как правило, не предусмотрено оборудование их фильтровой колонной; она ограничена кондуктором для крепления приустьевой части ствола.

Самоизливающие скважины можно использовать для обеспечения устойчивости как внешних, так и внутренних отвалов.

Дренаж основания отвалов, как правило, следует увязывать со схемой дренажа карьерного поля в целом.