

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ПРИБОРТОВЫХ МАССИВОВ КАРЬЕРОВ

Х.М.КАСЫМКАНОВА
E.mail. ksucta@elcat.kg

Макалада карьерлердин каптал массивдеринин туруктуулугун баалоонун проблемасын изилдөө жүргүзүлүп жаткан, долбоорлоочунун жана изилдөөчүнүн жумушун кыйла жеңилдетүүчү жана тездетүүчү ар кандай эсептик схемаларды критикалуу баалоо максатында, негизги багыттарын анализдөө келтирилген.

В статье проведен анализ основных направлений по оценке устойчивости прибортовых массивов карьеров, по которым идет исследование проблемы, с целью критически оценить ту или иную расчетную схему, что в значительной степени облегчит и ускорит работу проектировщика и исследователя.

In article the analysis of the main directions is carried out according to stability of pribortovy massifs of pits on which there is a problem research, on purpose critically to estimate this or that settlement scheme that substantially will facilitate and will accelerate work of the designer and the researcher.

Сложность и разнообразие горногеологических и горнотехнических условий открытых разработок обусловили создание многочисленных способов и методов расчета устойчивости откосов, их насчитывается к настоящему времени около 150.

При проектировании карьеров важное значение имеет правильный выбор методики расчета углов наклона бортов, которая должна обеспечить устойчивость уступов и бортов карьеров; размещение на бортах необходимых съездов и берм; экономичность работ (целесообразный коэффициент вскрыши).

Математической основой существующих методов расчета устойчивости откосов является теория предельного равновесия сыпучей среды, включающая две группы задач, для каждой из которых условие предельного равновесия удовлетворяется в каждой точке какой-то области среды. Как показала практика, наиболее приемлемыми для открытых горных выработок являются решения задач второй группы, поскольку они дают удовлетворительные результаты и для неоднородной среды.

К настоящему времени разработано более 150 методов, способов и приемов расчета устойчивости свободных откосов, многообразие которых вызвало необходимость классифицировать их по тем или иным признакам.

В классификациях М.Е.Певзнера /1/, И.В.Федорова /2/ и Г.Л.Фисенко /3/ в качестве основного признака для отнесения способа расчета к определенному классу принимается форма поверхности скольжения. В классификации А.М.Демина /4/ методы расчета подразделяются по нескольким определяющим признакам: по подходу к решению задачи (теоретические и эмпирические методы); по используемым в расчетах характеристикам (методы, учитывающие силы, направления или деформации); по способу решения (аналитические, графоаналитические, графические); по способу рассмотрения поверхности разрушения (методы, в которых поверхность задается либо отыскивается).

Наиболее полной и совершенной, по мнению многих ученых, является классификация М.Е.Певзнера /2/. Классификация осуществляется по следующей схеме: класс методов – группа методов – основной метод (методы) группы – расчетные способы и схемы, использующие основной метод. Основным классификационным принципом для выделения классов методов является принцип определения параметров устойчивого

откоса. В соответствии с этим выделяются четыре класса методов, каждый из которых предусматривает: класс А – построение контура откоса, являющегося внешней границей зоны, во всех точках которой удовлетворяется условие предельного равновесия; класс Б – построение контура откоса, вдоль которого удовлетворяется равенство угла наклона касательной углу сопротивления сдвигу; класс В – построение в массиве откоса поверхности скольжения, вдоль которой удовлетворяется условие предельного равновесия; класс Г – построение в массиве поверхности скольжения, вдоль которой удовлетворяется условие специального предельного равновесия.

Данная классификация с некоторыми добавлениями и изменениями принята нами за основу при анализе методов и способов расчета устойчивости свободных откосов; при этом в анализ вошли, в основном, способы, наиболее обоснованные в теоретическом отношении и применяющиеся в расчетной практике.

Метод В.В.Соколовского является теоретически наиболее обоснованным методом расчета, позволяющим построить равнопрочный откос бесконечной высоты для однородного массива с любыми физико-механическими характеристиками пород. Таблицы И.С.Мухина и А.И.Срагович /5/, составленные по инициативе В.В.Соколовского, позволяют быстро и легко построить профиль равноустойчивого откоса. Данный метод может служить критерием правильности инженерных способов расчета устойчивости откосов.

Однако в практике открытых работ метод В.В.Соколовского применяется ограниченно: положенные в его основу граничные условия приводят к вогнутой форме откоса с вертикальной стенкой в верхней части, что экономически невыгодно и технологически трудно выполнимо.

По-иному, чем у В.В.Соколовского, поставлены граничные условия при решении задачи В.Т.Сапожниковым /6/: вдоль откоса задано равномерно распределенное давление. В результате решения задачи В.Т.Сапожниковым получен откос выпуклого профиля.

В рассматриваемой задаче бесконечный откос нагружен равномерно распределенной нагрузкой, создаваемой грунтовой массой высотой; задача решена для случая, когда поверхности скольжения одного семейства стягиваются в одну точку – нижнюю точку откоса.

Способ построения откоса выпуклого профиля В.Т.Сапожникова – Г.Л.Фисенко прошел проверку на практике и в теоретическом отношении является достаточно строгим. Высказанные рядом исследователей сомнения относительно правомерности некоторых положений этого способа являются, по нашему мнению, необоснованными. Указанный способ включен в «Методические указания ...» /7/ и широко распространен при построении профилей бортов карьеров выпуклой формы, являющейся наиболее экономичной в связи с меньшими объемами вскрыши по сравнению с бортами плоской и вогнутой форм.

А.М.Деминым /4, 8/ предложен способ построения устойчивых плоских откосов, основанный на математически строгом методе В.В.Соколовского. При этом автор ограничивает массив плоским откосом с углом наклона, равным углу наклона вогнутого откоса на данной глубине. Проведенные для бортов карьеров и отвалов расчеты показали, что способ А. М. Демина дает заниженную в 2-2,5 раза высоту предельного откоса.

Методы класса Б представлены методами Н.Н.Маслова и М.Н.Троицкой.

Метод равнопрочного откоса Н.Н.Маслова базируется на допущении, что во всех точках откоса угол его наклона равен углу сопротивления сдвигу; коэффициент устойчивости такого откоса равен 1. Этот метод получил подтверждение на практике при расчетах устойчивости искусственных земляных сооружений (дамб, плотин, каналов) и природных склонов /9/. В ряде работ рекомендуется использовать метод равнопрочного откоса для расчета длительной устойчивости бортов карьеров. Однако все исследователи при анализе метода отмечают его недостаточную теоретическую обоснованность. К недостаткам метода следует отнести невозможность установления наиболее опасной

поверхности в массиве и определения коэффициента устойчивости откоса. Кроме того, устойчивый угол откоса, определенный по методу, зависит от количества горизонтальных слоев, на которые откос разделяется при расчете. Построенный по данному методу контур откоса более пологий по сравнению с очертанием предельно напряженного откоса, т.е. имеет коэффициент устойчивости больше 1.

В методе М.Н.Троицкой используется внешнее сходство между уравнением сопротивления сыпучих пород сдвигу и уравнением, выражающим зависимость между высотой откоса и его заложением.

Данный метод не имеет под собой теоретической основы и обладает недостатками, присущими методу в части нахождения наиболее опасной поверхности скольжения и определения по ней коэффициента устойчивости откоса. С учетом изложенного метод М.Н.Троицкой не может быть рекомендован для практического использования.

Методы класса В основаны на условии предельного равновесия, которое удовлетворяется только на внутренней границе некоторой области, и сводятся к отысканию в массиве положения поверхности и определению условия равновесия тела, ограниченного этой поверхностью. Методы данного класса наиболее многочисленны и основаны на принятии в расчетных схемах той или иной формы поверхности скольжения: плоской, круглоцилиндрической, в виде логарифмической спирали, сложной криволинейной и ломаной.

Плоская поверхность скольжения. Использование расчетов по плоской поверхности скольжения приводит к завышенным результатам, поэтому область применения этих методов ограничивается сложными откосами, углы падения слоев которых превышают углы внутреннего трения по контактам слоев и меньше угла откоса, и некоторыми типами откосов скальных пород с упорядоченной системой трещин, падающих в сторону откоса под углом, меньшим угла откоса.

Круглоцилиндрическая поверхность скольжения. Группа методов расчета, основанных на принятии круглоцилиндрической поверхности скольжения, подразделяется на две подгруппы, отсек обрушения в одной из которых рассматривается как единое монолитное тело, а в другой – разбивается на отдельные «вертикальные столбики». Подробный анализ этих методов дан в работах /10, 11/.

Согласно расчетной схеме Д.Тейлора, в момент предельного равновесия на отсек обрушения действуют сила собственной массы; элементарные силы сцепления, которые могут быть приведены к одной равнодействующей; элементарные силы реакции, которые могут быть разложены на элементарные нормальные и касательные составляющие и также приведены к равнодействующей. Сущность его метода сводится к определению путем построения многоугольника сил величины силы сцепления, которая должна быть приложена к поверхности скольжения для приведения системы в равновесие.

О.Фрейлихом рассмотрена аналогичная схема сил, которая приводит к тем же результатам, что и метод Д.Тейлора. В методе М.Како при определении плеча касательной силы введено менее обоснованное допущение по сравнению с методом Д.Тейлора.

На основе обобщения работ Д.Тейлора, О.Фрейлиха и М.Како Р.Р.Чугаевым /11/ была предложена более строгая расчетная схема, удовлетворяющая всем трем условиям статики ($\sum x = 0$; $\sum y = 0$; $\sum M = 0$). Им выведена аналитическая зависимость между сцеплением и углом внутреннего трения (кривая связи), которая в предыдущих методах находилась графически. Дальнейшие исследования в этом направлении позволили Р.Р.Чугаеву найти упрощенный способ построения кривой связи, который сводится к построению прямой линии $k=f(p)$.

Разбивку отсека обрушения на отдельные «вертикальные столбики» впервые предложил Свен Гультен. В предложенной им расчетной схеме на вертикальный столбик пород в момент предельного равновесия действуют собственная масса столбика; неизвестные по величине и направлению силы взаимодействия между столбиками реакция как равнодействующая сил трения, сцепления и нормальной силы. Линия

действия силы (равнодействующей сил трения и нормальной силы) касательна к кругу трения радиуса. Поскольку каждый столбик находится в равновесии, то все четыре силы, действующие на него, образуют замкнутый многоугольник, а линии действия этих сил пересекаются в одной точке.

В способе Г.Крея угол наклона сил взаимодействия между блоками принимается равным 0, причем рассматривается сыпучий грунт. В дальнейшем О.В.Вяземским и Г.Н.Ягодиным /12/ в расчетную схему Г.Крея были введены силы сцепления. По мнению Р.Р.Чугаева, метод Г.Крея является наиболее обоснованным теоретически.

В методе К.Терцаги направление сил взаимодействия между блоками принимается по касательной к линии скольжения в данной точке; при этом силы взаимодействия между блоками не учитываются. Отсюда следует, что в теоретическом отношении метод К.Терцаги является менее строгим по сравнению с методом Г.Крея.

Анализируя точные, но громоздкие методы Д. Тейлора и Г. Крея и простой, но не вполне строгий метод К.Терцаги, Р.Р.Чугаев разработал метод «весового давления», в котором в отличие от метода К.Терцаги в уравнении равновесия нормальные силы принимаются равными массе грунта. Данный метод достаточно прост и по точности не уступает методам Д.Тейлора и Г.Крея. Метод «весового давления», по существу, является методом алгебраического сложения сил.

В методах расчета, основанных на круглоцилиндрической поверхности скольжения, последняя обычно строится по В.Феллениусу /13/. По мнению Г.Л.Фисенко, способ В.Феллениуса дает несколько завышенные результаты по сравнению с методом В.В.Соколовского; это объясняется неучетом в способе отрыва, образующегося в верхней части поверхности скольжения, кроме того, расчетная поверхность не всегда является наиболее слабой.

М.И.Гольдштейном /14/ была сделана попытка учесть неодновременность разрушения откоса во всех точках поверхности скольжения. Однако этот прием не позволяет определить предельный угол устойчивого откоса при известных его высоте и расчетных значениях сцепления и угол внутреннего трения.

Поверхность скольжения в виде логарифмической спирали. Н.П.Пузыревский /15/ вывел уравнение кривой скольжения для сыпучего грунта, однако его метод не позволяет определить положение наиболее слабой поверхности. На работах Н.П.Пузыревского основан способ П.И.Кожевникова. В двух последних способах авторами были допущены ошибки при выводе формул для определения величин сдвигающих сил, действующих по наиболее слабой поверхности, что исключает возможность их использования в инженерной практике.

Метод Ю.С.Козлова /16/ не является строгим; в нем расчет предельной высоты откоса производится по методу Г.Л.Фисенко /3/, а ширина призмы возможного обрушения определяется при условии построения поверхности скольжения в виде логарифмической спирали.

Наиболее обоснованным с теоретической точки зрения является метод КарПТИ /17-18/, в нем центр логарифмической спирали принят в точке пересечения линии откоса и отвесной линии, проходящей через середину призмы возможного обрушения. Данный метод дает возможность аналитически рассчитывать предельную высоту откоса и ширину призмы обрушения и оценивать коэффициент устойчивости откоса.

Поверхность скольжения сложной криволинейной формы. К группе методов, основанных на принятии поверхности скольжения сложной криволинейной формы, относятся методы Г.Л.Фисенко, С.Н.Никитина, Л.В.Савкова и др.

Наиболее известен и широко применяется в практике метод Г.Л.Фисенко /3/. В этом методе построение поверхности скольжения осуществляется на основе положений теории сыпучей среды, разложение сил производится по схеме К.Терцаги. Поверхность скольжения состоит из окружности и отрезка вертикальной прямой, начинается на глубине H_0 под углом $(45^\circ + p/2)$ к горизонту и выходит в откос под углом $(45^\circ - p/2)$.

Предельная высота откоса, найденная этим методом, весьма близка к значениям высот, полученным на практике и при моделировании, однако ширина призмы возможного обрушения зачастую оказывается заметно заниженной.

Попытка устранить известный недостаток метода Г.Л.Фисенко в части определения ширины призмы возможного обрушения была предпринята А.М.Мочаловым /19/, который предложил аналитический способ расчета устойчивости откосов. В этом способе поверхность скольжения отстраивается по методу Г.Л.Фисенко, и для нее на основе многоугольника сил определяется предельная высота откоса; ширина призмы обрушения принимается с учетом данных моделирования в 1,5 раза больше соответствующей величины по Г.Л.Фисенко. Следовательно, предельная высота откоса и ширина призмы возможного обрушения соответствуют разным поверхностям скольжения, что дает основание считать способ А.М.Мочалова математически недостаточно корректным. Однако достаточно хорошая сходимости расчетных и фактических данных позволяет рекомендовать данный способ к использованию в инженерных расчетах.

Ломаная поверхность скольжения. Методы расчета по ломаной поверхности скольжения могут использоваться в двух случаях: когда известно положение поверхности ослабления в массиве откоса /11, 20/ и в случае прислоненного откоса /22/.

В класс Г включены методы Н.Н.Куваева /21/, Г.Л.Фисенко /3/ и др.

Метод Г.Л.Фисенко позволяет найти параметры устойчивых откосов при подрезке слоев, падающих в сторону выемки, при заоткоске по наслоению. Н.Н.Куваев предложил методы расчета откосов скальных трещиноватых пород. П.Н.Панюков решает пространственную задачу об устойчивости массива при сложной поверхности ослабления.

При наличии в анизотропном массиве поверхностей ослабления, которые по всей их протяженности либо на отдельных участках могут являться поверхностями скольжения, определение местоположения наиболее слабой поверхности находится подбором с использованием методов алгебраического сложения сил или многоугольника сил. Основным методом сравнения сил, действующих по поверхности скольжения, является метод многоугольника сил как наиболее отвечающий условиям устойчивости анизотропного массива.

Как показывает анализ, вопрос устойчивости свободных откосов изучен довольно полно. Однако, поскольку причин и условий, способствующих развитию оползней откосов, много, универсального способа расчета не существует.

Выбор способа расчета должен производиться исходя из его теоретической обоснованности и наиболее полного отражения свойств реального массива при условии минимального объема расчетов и графических построений.

На стадии проектирования карьера можно и необходимо ориентироваться на большую степень риска. А уже при постановке откосов в стационарное положение их устойчивость можно повысить, например, изменением развития горных работ, применением специальной технологии, искусственным укреплением неустойчивых участков бортов.

Обобщая вышеизложенное о методах расчета устойчивости анизотропных откосов, следует отметить, что в расчетных схемах не находят отражения параметры пликативных нарушений. В практике же встречаются случаи, когда поверхности ослабления имеют неровную, извилистую и волнообразную форму, связанную с характером нарушений поверхностей.

Считается общепризнанным, что конкретные математические схемы имеет смысл разрабатывать только тогда, когда собрано достаточно фактических данных и прослежена основная закономерность изучаемого явления. В противном случае математические гипотезы и решения уходят, не сыграв особой роли в изучении данного явления. При исследовании устойчивости уступов и бортов карьеров задача состоит в том, чтобы, зная пределы применения расчетных схем и их обоснованность в теоретическом отношении,

наиболее полно учитывать совокупность природных условий месторождения и технологию горных работ.

Список литературы

1. Певзнер М.Е. Борьба с деформациями горных пород на карьерах. – М.: Недра, 1978. – 265 с.
2. Федоров И. В. Методы расчета устойчивости склонов и откосов. – М.: Госстройиздат, 1962.
3. Фисенко Г. Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов. – М.: Недра, 1965. – 378 с.
4. Демин А. М. Устойчивость открытых горных выработок и отвалов. – М.: Недра, 1973. – 232 с.
5. Мухин И.С., Срагович А.И. Построение предельных контуров равноустойчивых откосов. – М.: Изд-во АН СССР, 1954. – 24 с.
6. Сапожников В.Т. Решение задачи об откосе выпуклого профиля //Труды ВНИМИ. – 1960. – № 38. – С. 41-53.
7. Методические указания по определению бортов, откосов уступов и отвалов строящихся и эксплуатируемых карьеров. – Л.: ВНИМИ, 1972. – 164 с.
8. Демин А.М. Закономерности проявлений деформаций откосов в карьерах. – М.: Недра, 1981. – 144 с.
9. Опыт оценки устойчивости склонов сложного геологического строения методом конечных элементов и экспериментами на моделях. – М.: Изд-во МГУ, 1973. – 277 с.
10. Панюков П.Н., Ржевский В.В., Истомина В.В., Гальперин А.М. Геомеханика отвальных работ на карьерах. – М.: Недра, 1972. – 184 с.
11. Чугаев Р.Р. Земляные гидротехнические сооружения (Теоретические основы расчета). – Л.: Энергия, 1967. – 459 с.
12. Вяземский О.В., Ягодин Г.Н. О приближенном методе расчета устойчивости земляных и бетонных сооружений по круглоцилиндрическим и иным произвольным поверхностям скольжения // Изв. ВНИИГ. – 1957. – Т. 57. – С. 77-90.
13. Феллениус В. Статика грунтов. – М.: Госстройиздат, 1933.
14. Гольдштейн М.Н. Проектирование противооползневых мероприятий // Вопросы геотехники. – 1971. – № 18. – С. 180.
15. Пузыревский Н.П. Фундаменты. – М.: Госстройиздат, 1934.
16. Козлов Ю.С. Определение параметров призмы возможного обрушения в откосах уступов, бортов карьеров и отвалах //ФТПРПИ. – 1972. – № 4. – С. 73-76.
17. Шпаков П.С., Окатов Р.П., Шабурников А.В. Аналитический метод решения задачи устойчивости откосов в карьерах // Технология разработки месторождений полезных ископаемых. – 1974. – Вып. 2. – С. 29-35.
18. Шпаков П.С., Попов И.И. Определение ширины призмы обрушения в изотропном горном массиве //Технология разработки месторождений полезных ископаемых. – 1975. – Вып. 3. – С. 109-111.
19. Мочалов А.М. Расчет устойчивости откосов плоского профиля в однородной среде // Труды ВНИМИ. – 1976. – № 100. – С. 116-128.
20. Маслов Н.Н. Механика грунтов в практике строительства: (Оползни и борьба с ними). – М.: Стройиздат, 1977. – 320 с.
21. Куваев Н. Н. Роль трещиноватости в устойчивости откосов и требования к методике ее изучения // Труды ВНИМИ. – 1964. – № 51. – С. 185-195.
22. Шпаков П.С., Поклад Г.Г., Омаров С.Т., Ожигин С.Г. Оценка устойчивости реальных откосов //Прогнозная оценка инженерно-геологических условий при открытой разработке месторождений Урала. – Свердловск, 1989. – С. 22.