

## Устойчивость откосов плотин

Откосы, принятые при конструировании поперечного профиля плотин, подвергаются проверочному расчету на статическую устойчивость. На основании расчетов определяется коэффициент устойчивости, значение которого должно быть больше единицы. Необходимость иметь запас обуславливается в общем случае тремя обстоятельствами:

- 1) неполным соответствием натуре той, обычно несколько условной модели, которую берут в основу вывода расчетных зависимостей, необходимых для определения искомых параметров;
- 2) неточностью методов расчета;
- 3) неточностью численного значения исходных параметров, т. е. различных величин, которыми задаются для расчета при помощи намеченной расчетной схемы сооружения.

Для расчета устойчивости откосов существует ряд методов, которые можно подразделить на аналитические, графические и графоаналитические.

Аналитические методы построены на строгой математической оценке явления взаимодействия сил и с этой стороны являются наиболее совершенными. Вместе с тем сопоставление результатов расчета, полученных аналитическим методом, с другими приближенными методами дает расхождение весьма незначительное. Сложность формул и трудоемкость вычислительных операций ограничивают применение аналитических методов.

Графический метод расчета устойчивости откосов требует особо тщательного исполнения расчетных построений, при этом возникают трудности, связанные с графическим определением направления и приложения сил. Точность этого метода небольшая, в силу чего им мало пользуются в проектной практике.

Для расчета устойчивости откосов земляных плотин наиболее распространен приближенный графоаналитический способ по круглоцилиндрическим поверхностям скольжения.

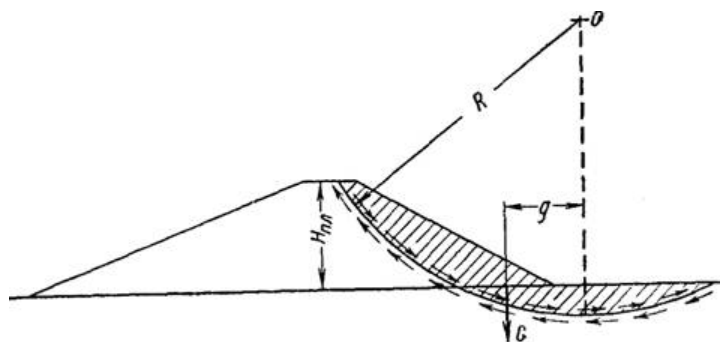


Рис. 105. Схема сползания откоса

Расчет по этому способу ведут в предположении, что массив грунта откосного сооружения может сползти по цилиндрической поверхности с радиусом  $R$ , проведенным из центра вращения  $O$  (рис. 105). Устойчивость откоса оценивается коэффициентом, представляющим отношение моментов всех удерживающих сил к моменту всех сдвигающих. Таким образом, расчетная формула метода круглоцилиндрических поверхностей скольжения имеет вид:

$$K = \frac{M_{уд}}{M_{сд}} \quad (191)$$

где  $K$  - коэффициент запаса устойчивости откосов, принимается в зависимости от

Сочетание нагрузок и воздействий	Коэффициент запаса устойчивости при классе плотин			
	I	II	III	IV
Основные . . . . .	1,3	1,2	1,15	1,1
Особые . . . . .	1,1	1,1	1,05	1,05

**Примечание.** Полученные по расчету значения коэффициентов запаса при основных сочетаниях не должны превышать более чем на 15% их значений по таблице.

Положение центра кривой скольжения, отвечающего минимальному значению коэффициента устойчивости откоса, определяют путем последовательных приближений. Кривая скольжения с минимальным значением  $K_b$  в одних случаях проходит в пределах тела плотины, а в других захватывает и основание. Поскольку заранее установить положение кривой невозможно, приходится выполнить ряд подсчетов, принимая во внимание следующие замечания:

- наиболее опасная кривая сползания песчаного откоса на песчаном основании проходит через подошву откоса;
- наиболее опасная кривая скольжения песчаного откоса на глинистом основании может проходить не только через подошву откоса, но и в его основании.

Расчет по круглоцилиндрическим поверхностям скольжения ведут при заданном поперечном профиле плотины и известных физико-механических характеристиках грунта. Последние получают на основании лабораторных или полевых исследований. При предварительной оценке устойчивости откоса характеристика грунта может быть взята из таблиц, содержащих осредненные величины. В дальнейшем эти расчеты уточняют на основе детального изучения физико-механических параметров грунтов. При расчете низового откоса необходимо иметь кривую депрессии, положение которой в теле плотины определяется на основе фильтрационных расчетов.

Оценить устойчивость откоса методом круглоцилиндрических поверхностей скольжения, применяя уравнение (191) для всего выделенного массива обрушения, затруднительно, потому что в пределах массива могут меняться физико-механические характеристики грунта. Тогда выделенный массив грунта разбивают на отсеки и рассматривают устойчивость каждого отдельного отсека, в пределах которого параметры грунта принимаются постоянными. Общий коэффициент устойчивости определяют суммированием по отсекам.

Ширина отсеков, вообще говоря, может быть любой, но для удобства расчетов ее лучше принимать равной  $0,1R$ . В этом случае очень просто определяют тригонометрические

функции, входящие в расчетные формулы. Значение  $\sin \alpha$  для любого отсека будет равно порядковому номеру, разделенному на 10. Так,  $\sin \alpha$  пятого отсека равен 0,5, шестого - 0,6 и т. д.

Расчеты устойчивости откосов ведут для единичной длины сооружения, что позволяет исключить в формулах один линейный размер и оперировать только площадью сечения, когда требуется вычисление объемных величин.

Расчет начинают с того, что задаются центром вращения  $O$ , из которого проводят одну из возможных кривых скольжения радиусом  $R$  (рис. 106).

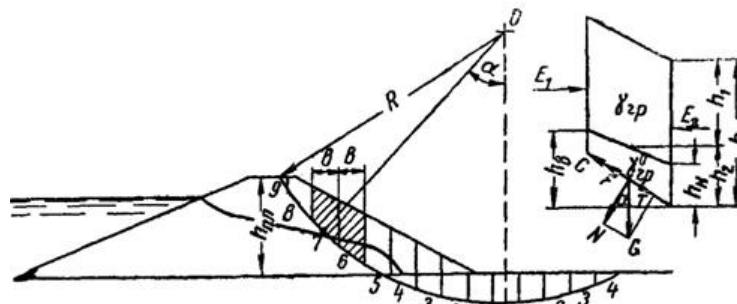


Рис. 106 Расчетная схема устойчивости откоса по круглоцилиндрической поверхности скольжения: справа - один из выделенных отсеков

Численное значение радиуса определяют по масштабу с чертежа. Затем выделенный массив грунта, ограниченный кривой скольжения, разбивают графически на отсеки с шириной  $b$ . Один из отсеков, обычно называемый нулевым, располагают под вертикалью, проходящей через центр вращения  $O$ . Далее по масштабу откладывают в обе стороны от нулевого другие отсеки. Количество их может быть различным, но всегда с каждой стороны от нулевого отсека меньше 10, при условии, если принято

$b = 0,1R$ . Нумерацию отсеков обычно ведут вправо и влево от нулевого отсека, как показано на рисунке 106. Ширина последнего отсека составит какую-то долю от  $b$ . Для этого отсека значение тригонометрических функций вычисляют отдельно, исходя из геометрических соотношений.

Далее для каждого из отсеков по известным действующим на него силам вычисляют моменты и составляют равенство (191). Суммирование по всем отсекам даст коэффициент устойчивости выделенного массива, что позволит решить вопрос о правильности принятого заложения откоса.

Если взять произвольный отсек (на рисунке 106 справа), расположенный влево от вертикали  $O-O$ , собственный вес его  $G$  с учетом того, что грунт, расположенный выше кривой депрессии находится в состоянии естественной влажности, а ниже кривой депрессии взвешен в воде, может быть выражен формулой:

$$G = h_1 b \gamma_{zp_1} + h_2 b \gamma_{zp_2}^0 \quad (192)$$

где  $h_1$  - высота части отсека с грунтом естественной влажности и с объемным

весом  $\gamma_{zp_1}$  ( $h_1$  берут по масштабу с чертежа);

$h_2$  - высота части отсека с грунтом, насыщенным водой, с объемным весом  $\gamma_{zp_2}^0$  уменьшенным за счет взвешивания ( $h_2$  берут по масштабу с чертежа).

Для удобства расчетов вместо действительной высоты отсека, состоящей из нескольких частей с различными объемными весами, принимают приведенную высоту отсека  $h_{np}$  такого же веса, но с приведенным объемным весом грунта  $\gamma_{np}$ . Такое приведение выполняется по формуле:

$$h_{np} = h_1 \frac{\gamma_1}{\gamma_{np}} + h_2 \frac{\gamma_2}{\gamma_{np}} + h_3 \frac{\gamma_3}{\gamma_{np}} + \dots h_n \frac{\gamma_n}{\gamma_{np}} \quad (193)$$

Если, сделать приведение к грунту естественной влажности, расположенному выше

кривой депрессии с объемным весом  $\gamma_{zp_1}$ , то формула примет вид:

$$h_{np} = h_1 + h_2 \frac{\gamma_2}{\gamma_{zp_1}} + h_3 \frac{\gamma_3}{\gamma_{zp_1}} + \dots h_n \frac{\gamma_n}{\gamma_{zp_1}} \quad (194)$$

Число членов в формулах (193) и (194) соответствует числу частей, на которые разбивают отсек по высоте с различным объемным весом.

С учетом приведения отсека к грунту с постоянным объемным весом, равным объемному весу грунта выше кривой депрессии, собственный вес отсека выразится формулой:

$$G = h_{gh_1} b \gamma_{zp} \quad (195)$$

где  $\gamma_{zp}$  - объемный вес приведенного грунта.

Точка приложения собственного веса отсека по линии действия силы может быть перенесена на подошву отсека без нарушения равновесия отсека.

На отсек действуют удерживающие силы - сила трения и сцепления, скольжения, сдвигающая сила - составляющая собственного веса отсека и фильтрационная сила.

Наряду с этим на выделенный отсек справа и слева действуют реактивные силы  $E$ . Допуская, что эти силы равны друг другу и противоположно направлены, а кроме того, считая внутренними, их возможно исключить из рассмотрения.

Каждую из перечисленных сил, участвующих в устойчивости откоса, можно определить через исходные параметры для последующего учета в уравнении момента.

Силу трения  $F$  вычисляют как произведение нормальной составляющей собственного веса на коэффициент трения, который для грунтов численно равен тангенсу угла внутреннего трения:

$$F = N \operatorname{tg} \varphi \quad (196)$$

Нормальная составляющая собственного веса, принимая во внимание формулу (195), равна

$$N = h_{np} b \gamma_{zp} \cos \alpha \quad (197)$$

где  $\alpha$  - угол между направлением силы собственного веса и нормалью к подошве откоса, тот же угол  $\alpha$  находится между вертикалью  $O-O$  и радиусом, проведенным из центра  $O$  в середину рассматриваемого отсека. С учетом формулы (197) сила трения равна

$$F = h_{np} b \gamma_{zp} \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad (198)$$

Касательная составляющая собственного веса отсека равна

$$T = G \sin \alpha \quad (199)$$

или при подстановке значения  $G$  из формулы (195):

$$T = h_{np} b \gamma_{zp} \sin \alpha \quad (200)$$

Фильтрационную силу, являющуюся объемной силой, определяют по формуле:

$$\Phi = \gamma_e \Delta \omega l \quad (201)$$

где  $\Delta \omega$  - площадь, занятая в отсеке фильтрационным потоком;

$l$  - градиент напора в пределах отсека выражен формулой:

$$l = \frac{h_e - h_n}{b} \cos \alpha \quad (202)$$

Точку приложения фильтрационной силы допустимо принять по линии, соединяющей середины отрезков  $h_e$  и  $h_n$ .

Сила сцепления  $C$  вычисляется как произведение длины подошвы отсека на удельное сцепление:

$$C = \Delta L c \quad (203)$$

Условие равновесия рассматриваемого отсека при учете всех внешних действующих сил и в соответствии с формулой (191) можно выразить уравнением:

$$K = \frac{FR + CR}{TR + \Phi r} \quad (204)$$

Подставляя значение каждой из сил, действующих на отсек в развернутом виде, получают

$$K = \frac{h_{np} \gamma_{zp} b \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi + \Delta L c R}{h_{np} \gamma_{zp} b \sin \alpha R + \gamma_e \Delta \omega l r} \quad (205)$$

Для выделенного массива значение коэффициента устойчивости откоса определяют суммированием по всем отсекам.

Тогда расчетное уравнение после сокращения на  $R$  примет вид.

$$K = \frac{\sum h_{np} \gamma_{zp} b \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi + \sum \Delta L c}{\sum h_{np} \gamma_{zp} b \sin \alpha + \sum \gamma_e \Delta \omega l \frac{r}{R}} \quad (206)$$

Первый член в знаменателе, представляющий собой касательную силу от собственного веса отсека, суммируют алгебраически, исходя из того, что на одной части выделенного массива она проявляется как сдвигающая, а на другой части - как удерживающая. Знак суммы проще учитывать при синусах угла  $\alpha$  и принимать для отсеков, расположенных слева от вертикали  $O-O$  плюс, а справа - минус.

Фильтрационные силы можно суммировать по отсекам, принимая во внимание направление в каждом из них, или с некоторым приближением определять по всему выделенному массиву грунта. В последнем случае силу  $\Phi$  следует разложить на две составляющие  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , имеющие различное направление и соответственно точки приложения (рис.107).

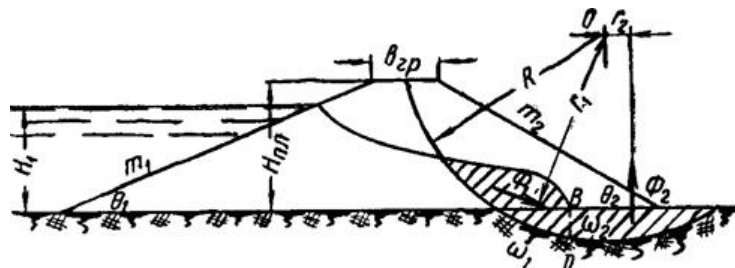


Рис. 107 Учет фильтрационных сил при расчете устойчивости откоса

Силу  $\Phi_1$  определяют как произведение площади  $\omega_1$  на средний градиент в пределах

этой площади. Границами рассматриваемой площади служит кривая депрессии, кривая скольжения и для случая дренированных плотин - вертикаль, проходящая через ось дренажа. Средний градиент напора  $I_{cp}$  здесь берется как частное от деления разности высот фильтрационного потока на расстояние между этими

точками. Точка приложения силы  $\Phi_1$  находится в центре тяжести площади  $\omega_1$ ;

радиус  $r_1$  берут по масштабу с чертежа.

Сила  $\Phi_2$  определится как произведение площади  $\omega_2$  на средний градиент в

пределах этой площади. Граница площади  $\omega_2$  - горизонтальная линия, проходящая через ось дренажа, кривой скольжения и ранее проведенная вертикаль  $BD$  (рис. 107). Направление силы  $\Phi_2$  можно принять по вертикали вверх с точкой приложения в

центре площади  $\omega_2$ . Плечо силы  $\Phi_2$ , равное  $r_2$ , берут также по масштабу с чертежа.

Следует иметь в виду, что фильтрационная сила  $\Phi_1$  всегда будет входить в знаменатель формулы (206), в то время как составляющая  $\Phi_2$  может входить как в знаменатель, так и вычислитель, в зависимости от того, с какой стороны от вертикали она расположена. Это значит, что в одних случаях она проявляется как сдвигающая сила, а в других - как удерживающая. В большинстве практических случаев момент силы  $\Phi_2$  получается небольшой как за счет самой силы, так и плеча ее. Исходя из этого, моментом силы  $\Phi_2$  часто пренебрегают.

При суммировании силы сцепления, являющейся вторым членом в числителе формулы (206), необходимо учитывать участки с различными значениями удельного сцепления. Длины дуг отдельных участков находят через радиус  $R$  и угол  $\alpha$ .

В частном случае, когда расчет устойчивости откоса ведется для плотин без воды, что бывает в строительный период, и грунты тела плотины и основания несвязанные, без сцепления, формула (206) упрощается, принимая вид:

$$K = \frac{\text{tg } \varphi}{\text{tg } \theta_2} \quad (207)$$

где  $\theta_2$  - угол наклона низового откоса к горизонту.

Отсюда можно сделать вывод: откос будет устойчив, если угол наклона откоса к горизонту меньше угла внутреннего трения грунта. Формула (207) справедлива и для случая, когда основание сложено из грунтов с большим углом внутреннего трения, чем угол внутреннего трения тела плотины.

При применении метода круглоцилиндрических поверхностей скольжения центр вращения  $O$  нужно найти для наиболее опасной окружности, для которой коэффициент запаса имеет минимальное значение.

Приблизительно местоположение наиболее опасных центров вращения, отвечающих минимальному значению  $K$ , находят следующим образом (рис. 108). Из точки  $B$ , соответствующей подошве откоса, вниз опускают вертикаль, на которой откладывают расстояние, равное  $H_{пл}$ . Через точку  $A$  вертикального отрезка влево проводят горизонтальную линию и на ней откладывают расстояние, равное  $5H_{пл}$ . Через точку на конце горизонтального отрезка и бровку откоса проводится луч  $M - M$ . Вдоль этого луча берут ряд центров скольжения  $O_1, O_2, O_3, O_4$  и т. д., для каждого из центров находят коэффициент устойчивости. На основании этих вычислений строят график изменения  $K$  по длине луча  $M - M$ , отмечая точку с минимальным значением  $K$ . Через эту точку проводят нормаль  $N - N$  к лучу  $M - M$ , по длине которой также берут ряд центров скольжения  $O_5, O_6, O_7, O_8$  и т. д. Аналогично предыдущему выполняют график изменения  $K$  и по линии  $N - N$  отмечают точку, отвечающую минимальному значению  $K$ .

Кривая скольжения с центром  $O$ , для которого получился минимум  $K$ , и считается наиболее опасной кривой. Вопрос об устойчивости откоса решается путем сравнения минимального значения  $K$  с нормативным коэффициентом.

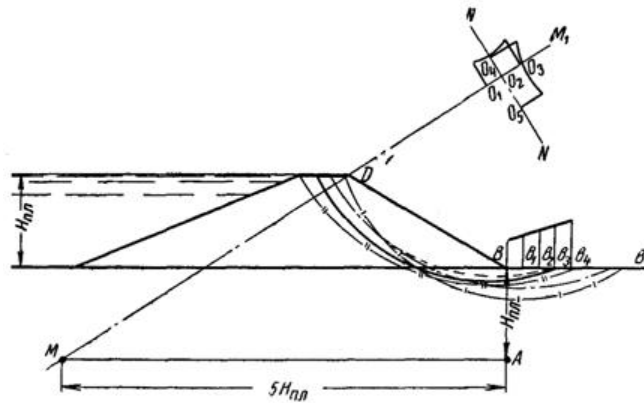


Рис. 108. Нахождение опасных центров скольжения

Приведенные расчеты (определение наиболее опасного центра вращения) приходится проделывать для ряда окружностей, проходящих через точки вдоль линии **B-B**. Вначале берут точку **B** у подошвы откоса, затем намечают ряд других точек **B<sub>1</sub>**, **B<sub>2</sub>**, **B<sub>3</sub>** и т. д. в сторону от подошвы откоса (рис. 108). Для каждой из этих точек находят минимальный коэффициент **K**, после чего строят график изменения коэффициентов вдоль линии **B-B**. Окружность, проведенную через точку на линии **B-B**, где получился минимальный коэффициент, можно считать наиболее опасной.

Таким образом, чтобы решить вопрос об устойчивости откоса, требуется значительное количество однотипных вычислений.

В отношении получения минимального значения **K** по линии **B-B** полезно принять во внимание высказывание Р. Р. Чугаева, который считает, что практически достаточно рассмотреть только одну точку **B**, лежащую непосредственно у подошвы откоса; переход от **B** к **B<sub>1</sub>**, **B<sub>2</sub>** и т. д. во многих случаях ведет к незначительному уменьшению **K** в области луча **M-M**. При этом условии для расчета заданного откоса для приближенного нахождения **K** минимум можно ограничиться рассмотрением 7-8 окружностей обрушения,

В ряде частных задач устойчивость откосов может быть определена по графикам. Так, для откосов, сложенных из однородного связного сухого грунта, и оснований из такого же грунта проверку устойчивости заданного очертания откоса можно выполнить по графику Тейлора (рис. 109).

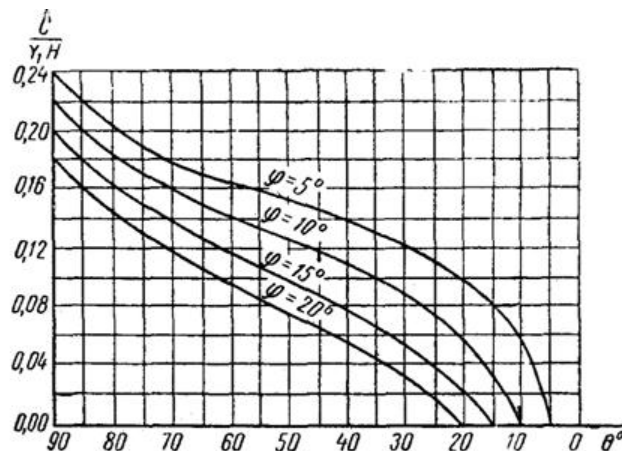


Рис. 109 График для расчета устойчивости откосов из однородных грунтов

Этот график построен для предельного состояния и дает связь между высотой откоса

**H**, характеристиками грунта  $\gamma_{\text{сп}}$ ,  $\varphi$  и **c** и углом наклона откоса к горизонту  $\theta$  а

по оси абсцисс графика отложен угол  $\theta$ , а по оси ординат - безразмерный коэффициент **M**, определяемый по формуле:

$$M = \frac{c}{\gamma_{\text{сп}} H} \quad (208)$$

Для ряда значений угла внутреннего трения  $\varphi$  на графике дана своя кривая.

При помощи графика Тейлора можно установить величину устойчивого угла  $\theta$  для откоса при заданных характеристиках грунтов и высоте насыпи **H**.

В этом случае вычисляют коэффициент **M**, после чего для заданного угла внутреннего

трения  $\varphi$  находят предельное значение угла  $\theta$ . Угол наклона откоса к горизонту принимают меньше предельного с учетом коэффициента запаса.