

## РАСЧЕТНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ БЕЗОПАСНОСТИ

Янгулов И.П.<sup>1</sup>, Елистратов К.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Янгулов Игорь Петрович - студент, ФГБОУ ВО «Пензенский  
государственный университет»

<sup>2</sup>Елистратов Кирилл Владиславович - студент, ФГБОУ ВО «Пензенский  
государственный университет»

**Аннотация:** в данной статье описываются методы расчета коэффициента безопасности при проектировании шоссейных и федеральных трасс.

**Ключевые слова:** почва, нагрузка, коэффициента безопасности, осадка, несущая способность, сдвиг грунта.

## CALCULATED SAFETY FACTORS

Yangulov I.P.<sup>1</sup>, Elistratov K.V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Yangulov Igor Petrovich - student, «Penza state University»

<sup>2</sup>Elistratov Kirill Vladislavovich - student, «Penza state University»

**Abstract:** this article describes methods for calculating the safety factor in the design of highways and federal highways.

**Keywords:** soil, load, safety factor, draft, bearing capacity, soil shift.

УДК 624.24

## Расчетные коэффициенты безопасности

Минимальный коэффициент безопасности, принимаемый равным 1.25 для шоссейных насыпей со стороны склона. Значение данного коэффициента безопасности должно быть увеличено как минимум до 1,30-1,50 для откосов, выход из строя которых может привести к значительному повреждению ответственных конструкций, таких как пологие откосы под опорами моста, подпорных конструкций, а также федеральных и региональных трасс, межштатных дорог и т.д. Выбор коэффициента запаса прочности конструкции для конкретного проекта зависит от:

- Метода определения устойчивости.
- Метода определения прочности на сдвиг.
- Точности геодезических данных



- Вероятности обрушения.
- Степени ответственности конструкции.

Склон, который простирается на относительно большое расстояние и имеет устойчивый подземный профиль поверхности, может быть рассмотрен как постоянно обрушающийся склон. Плоскость разрушения в этом случае параллельна поверхности склона, и может быть применен метод предельного равновесия [1].

### Осыпающиеся склоны в сухих бесвязных почвах

Типовой разрез или "срез" через зону потенциального разрушения склона в сухом бесвязном грунте, (сухом песке) показан на рисунке 1 вместе с действием возникающих сил.

Объемный вес слоя, шириной  $b$  и высотой  $h$ , на погонный метр, задается формулой:

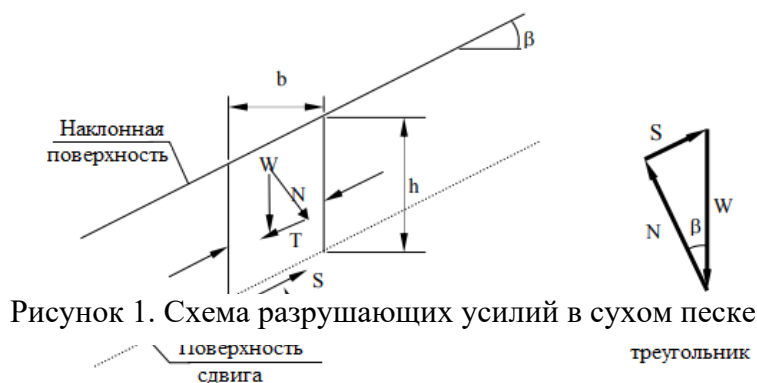
$$W = \gamma * b * h, \quad (1)$$

где  $\gamma$ -удельная масса сухого грунта.

Для склона с углом  $\beta$ , как показано на рисунке 1, нормальная ( $N$ ) и тангенциальная ( $T$ ) компоненты силы  $W$  определяются как:

$$N = W \cos \beta \quad (2)$$

$$T = W \sin \beta \quad (3)$$



Прочность на сдвиг вдоль плоскости разрушения задается формулой:

$$S = N \tan \varphi \quad (4)$$



Коэффициент безопасности ( $FS$ ) определяется как отношение допустимой прочности на сдвиг к прочности, необходимой для удержания конструкции. Таким образом,  $FS$  определяется как:

$$FS = \frac{S}{T} = \frac{N \tan \varphi}{N \sin \beta} = \frac{(W \cos \beta) \tan \varphi}{W \sin \beta} = \frac{\tan \varphi}{\tan \beta} \quad (5)$$

Для обрушающихся склонов  $FS$  не зависит от глубины залегания  $h$  и зависит только от угла внутреннего трения  $\varphi$  и угла наклона к поверхности  $\beta$ . Наклон, как говорят, достиг состояния предельного равновесия, когда  $FS=1.0$ . Кроме того, при  $FS = 1,0$  максимальный угол наклона будет ограничен углом внутреннего трения  $\varphi$  [2].

### Постоянное обрушение в $c$ - $\varphi$ почвах с параллельной фильтрацией

Если водонасыщенный склон в  $c$ - $\varphi$  почве просачивается параллельно поверхности склона, как показано на рисунке 2, применяют те же понятия предельного равновесия для определения  $FS$ , которые теперь будет зависеть от нормальных усилий ( $N'$ ). В последующем для оценки сдвига используются соответствующие параметры прочности,  $c'$  и  $\varphi'$ .

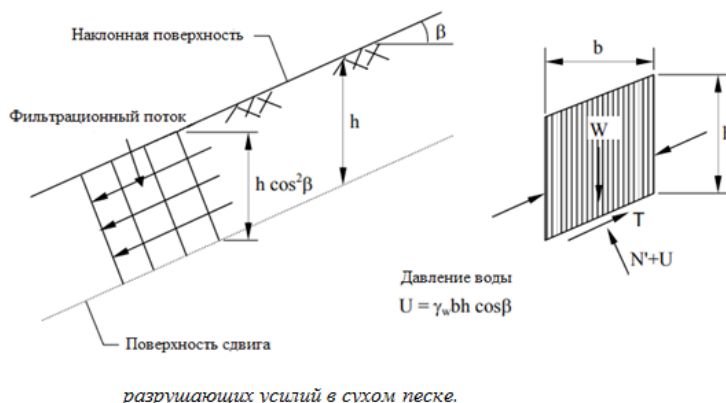


Рисунок 2. Постоянное обрушение склона в  $c$ - $\varphi$  почвах с параллельной фильтрацией

Сила поровой воды, действующая на основание среза слоя, на погонный метр конструкций (см. рисунок 2):

$$U = (\gamma_w * h * \cos^2 \beta) \frac{b}{\cos \beta} = b * h * \cos \beta, \quad (6)$$



где  $h$  - любая глубина, меньшая или равная глубине насыщения, а  $b$  – погонная ширина.

Имеющаяся сила трения,  $S$ , вдоль плоскости разрушения будет зависеть от угла внутреннего трения  $\varphi'$  и нормальной силы,  $N' = N - U$ , где  $N$ -полная нормальная сила.

$S$  определяются по следующей формуле:

$$S = c' \frac{b}{\cos \beta} + (N - U) \tan \varphi' \quad (7)$$

Тогда коэффициент безопасности:

$$FS = \frac{S}{T} = \frac{(c' b / \cos \beta) + (N - U) \tan \varphi'}{W \sin \beta} \quad (8)$$

Подставляя  $W = \gamma_{sat} b h$  в приведенное выше выражение, получаем  $FS$  равно:

$$FS = \frac{c' + h(\gamma_{sat} - \gamma_w)(\cos^2 \beta) \tan \varphi'}{\gamma_{sat} h \sin \beta \cos \beta}, \quad (9)$$

где  $\gamma' = (\gamma_{sat} - \gamma_w)$ .

Для  $c' = 0$ , приведенное выше выражение может быть упрощено до:

$$FS = \frac{\gamma' \tan \varphi'}{\gamma_{sat} \tan \beta} \quad (10)$$

Как мы можем видеть из формулы (10), для бесвязного материала с параллельной фильтрацией  $FS$  также не зависит от глубины наклона, высоты  $h$ , также, как и для сухого бесвязного материала, согласно формуле (5).

Разница заключается в том, что  $FS$  для сухого материала уменьшается на коэффициент  $\gamma'/\gamma_{sat}$  для насыщенных бесвязных материалов, с учетом эффекта фильтрации. Для наиболее типичных почв это снижение составит около 50 процентов в сравнении с сухими насыпями.

Из приведенного выше можно предположить, что если линия фильтрации расположена на нормированной высоте,  $m$ , над поверхностью разрушения, где  $m = z/h$  в этом случае получим:

$$FS = \frac{c' + h \cos^2 \beta [(1-m)\gamma_m + m\gamma'] \tan \varphi'}{h \sin \beta \cos \beta [(1-m)\gamma_m + m\gamma_{sat}]}, \quad (11)$$



где,  $\gamma_{sat}$  и  $\gamma_m$  - это насыщенные и влажные удельные веса почвы ниже и выше линии фильтрации.

Приведенное выше уравнение может быть легко преобразовано для определения критической глубины поверхности разрушения в  $c'-\phi'$  грунте для любых условий фильтрации [3].

### Разрушение по дуге окружности

Опыт и наблюдения за разрушениями насыпей, построенных на относительно глубоких отложениях мягких грунтов, показали, что при разрушении насыпь опускается вниз, прилегающий грунт поднимается, а поверхность разрушения проходит по дуге окружности, как показано на рисунке 3.

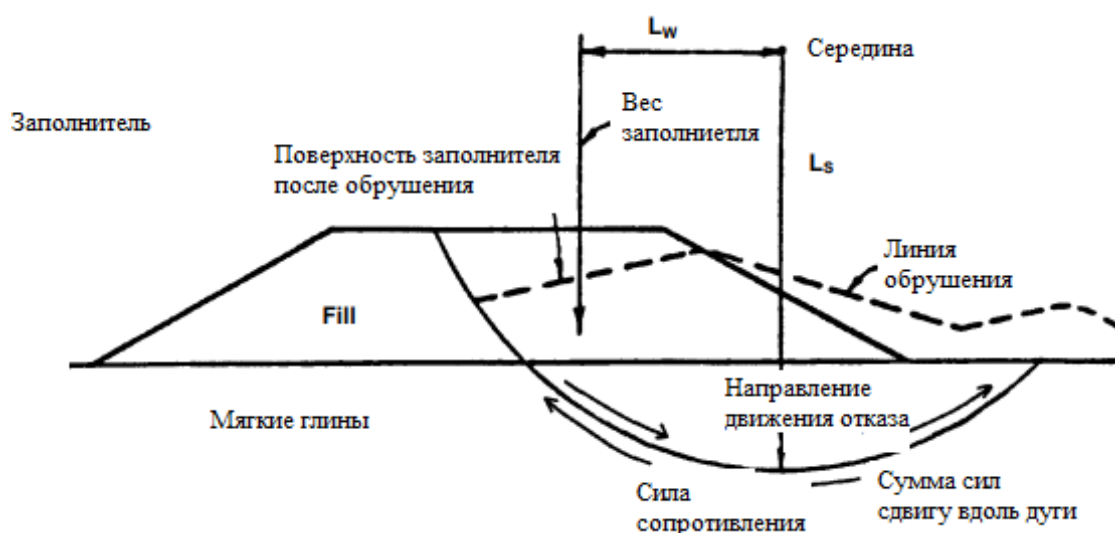


Рисунок 3. Типичный случай обрушения по дуге окружности.

При отказе силы движения и сопротивления действуют следующим образом:

- Сдвигающее усилие складывается из собственного веса насыпи. Вращающий момент представляет собой произведение веса насыпи, действующей через ее центр тяжести, на горизонтальное расстояние от центра тяжести до центра вращения ( $L_w$ ).
- Сила сопротивления сдвигу - это общая сила сдвига, действующая вдоль дуги разрушения. Момент сопротивления - это произведение силы сопротивления на радиус окружности ( $L_s$ ).



Коэффициент безопасности неустойчивости склона равен отношению момента сопротивления к моменту вращения.

$$\text{Коэффициент безопасности} = \frac{\text{Общая прочность на сдвиг} \cdot L_S}{\text{Вес грунта} \cdot L_w} = \frac{\text{момент сопротивления}}{\text{момент вращения}}$$

Отказ происходит, когда коэффициент безопасности меньше 1, т. е. момент вращения > момента сопротивления [3].

### Требования по определению коэффициента безопасности

Эмпирическое правило, основанное на упрощенной теории несущей способности, может быть использовано для предварительной "оценки" коэффициента безопасности ( $FS$ ) от разрушения насыпи по дуге окружности, построенной на глинистом основании, без наличия свободной воды. Согласно правилу:

$$FS \approx \frac{6c}{\gamma_{fil} \cdot H_{fil}}, \quad (12)$$

где  $c$  - значение удельного сцепления грунта глинистого основания (кПа)

$\gamma_{fil}$  - удельный вес грунта (кН/м<sup>3</sup>)

$H_{fil}$  - высота слоя (м)

Поскольку эмпирическое правило предполагает, что нет никакого влияния от грунтовых вод,  $c$  и  $\gamma_{fil}$  являются решающими параметрами напряжения.

Например, коэффициент безопасности для предлагаемой насыпи, показанный на рисунке 4, можно рассчитать следующим образом:

$$FS = \frac{6 \cdot 11}{13 \cdot 30} = 1,69$$

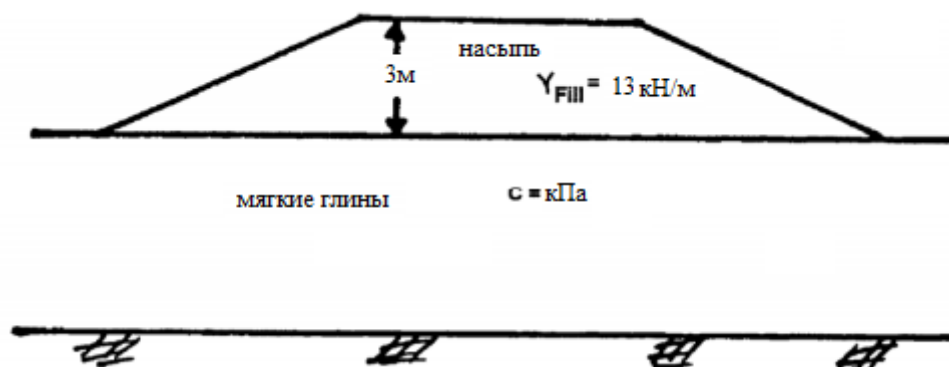


Рисунок 4. Пример предложенной насыпи.



Коэффициент безопасности, рассчитанный с помощью этого эмпирического правила, никогда не должен использоваться для окончательного проектирования. Это простое уравнение, очевидно, не учитывает такие факторы, как прочность заполнителя или угол внутреннего заполнения, и не определяет местоположение критической поверхности разрушения. Если коэффициент безопасности, вычисленный с помощью эмпирического правила, меньше 2,5, то требуется более сложный анализ устойчивости основания.

Тем не менее, это эмпирическое правило может быть очень полезно на ранней стадии проектирования, чтобы произвести быструю предварительную проверку того, может ли устойчивость основания быть проблемой, и существует ли необходимость более подробного анализа. Он также может быть использован в полевых условиях во время бурения скважин и отбора проб. Например, если испытания на сдвиг (с помощью прибора с лопастями) проводятся на месте в рамках полевых исследований для предлагаемой насыпи, специалист-геотехник может использовать прочность, определенную прибором в формуле (12) для оценки  $FS$  в поле. Эта оценка может помочь в руководстве программой бурения, отборе проб и испытаний, пока буровая бригада находится на объекте, и помочь обеспечить адекватное изучение и отбор проб критических пластов.  $FS$ , рассчитанные по эмпирическому правилу, могут быть использованы для грубой оценки результатов, полученных расчетными программами [3].

### **Методы анализа устойчивости (Общие)**

Существует несколько методов, которые могут быть использованы для выполнения анализа устойчивости насыпи разрушению по дуге окружности над мягким грунтом. Самый простой базовый метод известен как **Нормальный** или **Обычный метод срезов**, также известный как метод **Феллениуса** или метод **Шведского кругового анализа**. Обычный метод срезов может быть легко выполнен посредством ручных вычислений, а также является методом, с помощью которого вычисление сдвигающих и сил сопротивления является простым и легко удостоверяемым. Для этого метода поверхность разрушения принимают за дугу окружности, как показано на рисунке 5, а коэффициент



безопасности от скольжения вдоль поверхности разрушения определяют, как отношение момента суммарных имеющих сил сопротивления на поверхности пробного разрушения к чистому моменту движущих сил, обусловленных весом насыпи, т. е.:

$$FS = \frac{\text{Сумма удерживающих моментов} \cdot \text{плечо}(P)}{\text{Сумма сдвигающих моментов} \cdot \text{плечо}(P)} \quad (13)$$

Заметим, что поскольку метод состоит из вычисления сдвигающей и сил сопротивления вдоль дуги разрушения, момент  $R$  является одинаковым для обеих сил. Таким образом, формуле (13) сводится к:

$$FS = \frac{\text{Сумма удерживающих моментов}}{\text{Сумма сдвигающих моментов}} \quad (14)$$

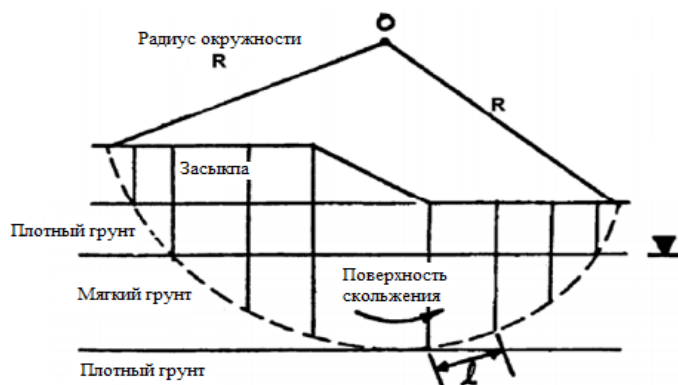


Рисунок 5. Геометрия обыкновенного метода срезов.

Для анализа устойчивости откоса масса в пределах поверхности разрушения делится на вертикальные срезы, как показано на рисунках 4.

При анализе с использованием обычного метода срезов допускаются следующие предположения:

1. Имеющаяся прочность на сдвиг грунта может быть описана уравнением Мора-кулона:

$$\tau = c + (\sigma - u) \tan \varphi, \quad (15)$$

где:

$\tau$  - прочность на сдвиг

$c$  - удельное сцепление

$(\sigma - u) \tan \varphi$  - фрикционная составляющая прочности на сдвиг





$\sigma$  = общее нормальное напряжение на поверхности разрушения у основания среза, обусловленное весом грунта и воды над поверхностью разрушения

$u$  - давление подъема воды на поверхности разрушения

$\varphi$  - угол внутреннего трения грунта

$\tan \varphi$  - коэффициент трения вдоль поверхности разрушения

2. Коэффициент безопасности одинаков для всех срезов.
3. Коэффициенты безопасности по отношению к сцеплению ( $c$ ) и трению ( $\tan \varphi$ ) равны.
4. Сдвиговые и нормальные силы на сторонах каждого среза не учитываются.
5. Давление воды ( $u$ ) учитывается путем уменьшения общего веса среза, силой подъема воды, действующей у основания среза.

В формуле (15) выражается через общие прочностные параметры. Уравнение легко можно было бы выразить в обозначениях прочностных параметров. Поэтому следует выбрать и уточнить соглашение, которое будет использоваться при анализе устойчивости, будь то общее напряжение или эффективное напряжение. В проблемных почвах, включая водонасыщенные, инженер может высчитать нормальные и тангенциальные силы, используя либо общий вес грунта и граничные водные параметры (как плавучесть, так и несбалансированные гидростатические силы), либо веса погружных (плавучих) грунтов и несбалансированные гидростатические силы. Результаты аналогичны. Когда используются общая масса и граничные водные параметры, рассматривается устойчивость всего блока. При использовании погружных масс и гидростатических сил рассматривается равновесие минерального скелета. Здесь используется общее обозначение веса, поскольку этот метод является самым простым для вычисления [2].

### Сдвиг

Сдвиг имеет место быть:

1. грунт основания содержит тонкие пласты слабых глинистых или органических грунтов.



2. мелкий слой слабой почвы расположен на поверхности земли и подстиляется твердой почвой.
3. грунт основания содержит тонкие песчаные или иловые линзы, зажатые между менее проницаемыми грунтами. Слабые слои или линзы обеспечивают плоскость слабости, вдоль которой может происходить скольжение. В случае песка или илистых линз, захваченных между менее проницаемыми почвами, механизм, который может вызвать скольжение, выглядит следующим образом. По мере возрастания нагрузки на заполнитель, давление воды увеличивается в линзе песка или иле. Поскольку вода не может выйти из-за непроницаемого грунта сверху и снизу, песок или ил теряет силу трения в результате снижения межзеренного эффективного напряжения между зернами почвы из-за избыточного давления поровой воды [4].

Пример типичного "сдвига" проиллюстрирован на рисунке 6.

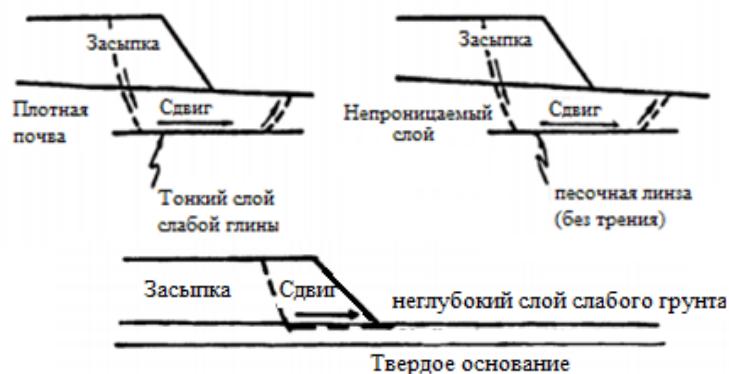


Рисунок 6. Механизм сдвига блока.

#### *Список литературы*

1. Берлинов М. В. Основания и фундаменты: учебник для вузов. - Издательство "Лань", 2021. - 320 стр.
2. Рыжков И. Б., Зубаиров Р. Р. Механика грунтов, основания и фундаменты. Практикум: учебное пособие для вузов - Издательство "Лань", 2021. - 204 стр.
3. Берлинов М.В., Ягупов Б.А. Расчет оснований и фундаментов - Издательство "Лань", 2011. - 272 стр.



4. Мангушев Р.А., Осокин А.И., Усманов Р.А. Устройство и реконструкция оснований и фундаментов на слабых и структурно-неустойчивых грунтах - Издательство "Лань", 2011. - 460 стр.

