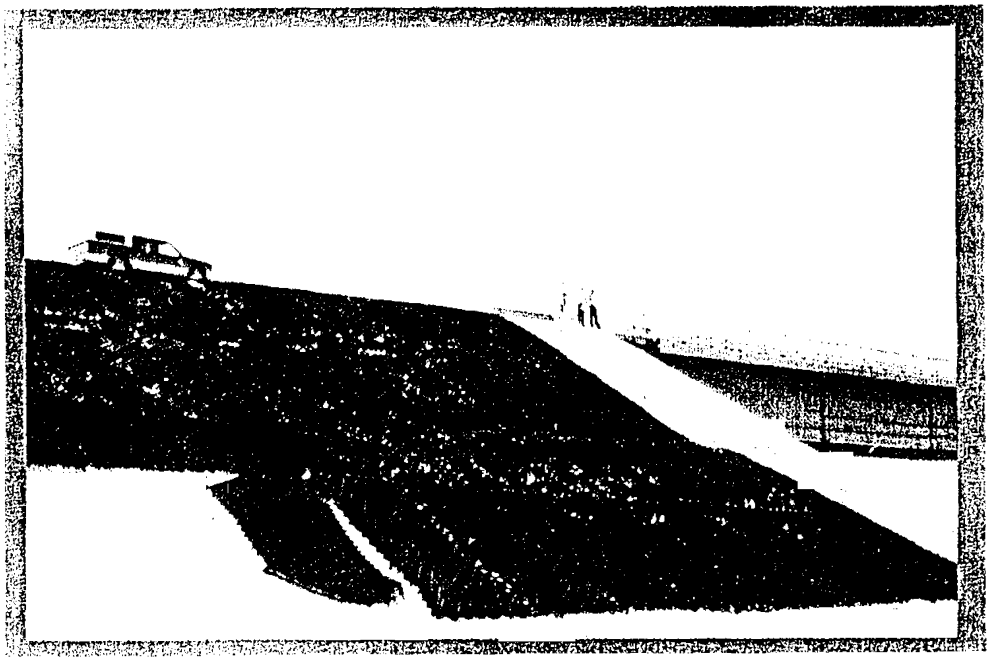
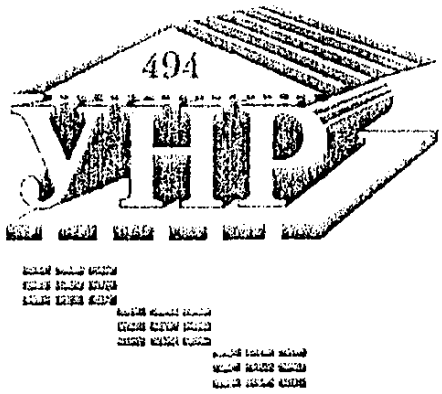
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ДОРОЖНЫЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
СОЮЗДОРНИИ

# МЕТОДИКА РАСЧЕТА УСТОЙЧИВОСТИ ГРУНТОВЫХ НАСЫПЕЙ, АРМИРОВАННЫХ ГЕОРЕШЕТКАМИ



Москва
2000

gost.e-ecolog.ru




Данные материалы (информация) являются коммерческим продуктом и не подлежат копированию в какой бы то ни было форме без письменного разрешения ОАО 494 УНР

140170, Московская обл., г. Бронницы, ул. Строительная, 4
Тел.: (095) 950-82-38, 554-74-94
Тел./факс: (095) 953-86-70
Факс: (095) 924-97-25

E-mail: gost.e-ecolog.ru

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ДОРОЖНЫЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
**СОЮЗДОРНИИ**

# МЕТОДИКА РАСЧЕТА УСТОЙЧИВОСТИ ГРУНТОВЫХ НАСЫПЕЙ, АРМИРОВАННЫХ ГЕОРЕШЕТКАМИ

Москва
2000

# МЕТОДИКА РАСЧЕТА УСТОЙЧИВОСТИ ГРУНТОВЫХ НАСЫПЕЙ, АРМИРОВАННЫХ ГЕОРЕШЕТКАМИ

## 1. Методические основы оптимизационного расчета армированных откосов

Метод армирования земляных сооружений с целью повышения степени их устойчивости известен давно, однако, только в последние годы сфера его использования существенно расширилась в связи с тем, что строительство земляных сооружений приходится осуществлять в сложных условиях, а также в связи с тем, что в широком ассортименте появились новые армирующие материалы, в первую очередь, геотекстильные (геотекстиль, геосетки, георешетки и т.п.). Разнообразие таких материалов и их характеристик позволяет сегодня успешно решать задачу повышения несущей способности земляных сооружений различного назначения, в том числе и повышения до требуемого уровня степени устойчивости откосов земляного полотна автомобильных дорог. Такая задача возникает при строительстве земляного полотна в стесненных условиях, строительстве высоких насыпей, использовании при сооружении земляного полотна местных грунтов, отличающихся сравнительно невысокими прочностными показателями, и в ряде других случаев.

Методические аспекты решения задачи расчета армогрунтовых конструкций, в том числе и армированных откосов земляного полотна, развивались зарубежными и отечественными исследователями на протяжении многих лет. Наряду с известными достижениями в этом направлении существует и определенное количество проблем, требующих дополнительных исследований. В первую очередь, это относится к необходимости повышения уровня соответствия расчетных схем решения задачи реальным условиям работы армирующих прослоек в конструкции.

Существующие методы расчета армированных откосов земляного полотна в определенной мере носят приближенный характер, так как в своем большинстве не в полной мере учитывают особенности работы армирующей прослойки в грунте, ее деформативные свойства. Практически во всех известных разработках в этом направлении размещение прослоек по высоте земляного сооружения принимается фиксированным с постоянным шагом. Расчет ориентирован лишь на определение степени устойчивости конкретной конструкции без решения задачи по наиболее целесообразному, с точки зрения повышения степени устойчивости откосов сооружения до требуемого уровня размещения прослоек, равномерного распределения оползневых нагрузок на каждую из прослоек с учетом деформативных и прочностных свойств армирующего материала. При этом не рассматривается задача определения оптимального (минимально необходимого) количества горизонтов армирования, оптимального места расположения каждого из них в теле земляного полотна, минимальных объемов работ, количества расходуемых материалов, учета технологических условий при проведении строительных работ.

Проведенный анализ существующих методов расчета армированных откосов, а также результатов экспериментальных исследований, выполненных в последние годы, позволил разработать новый, более совершенный и гибкий, по сравнению с известными отечественными и зарубежными аналогами, метод расчета армированных откосов земляного полотна, ориентированный не только на усовершенствование известных разработок, но и позволяющий решать задачу определения оптимального количества армирующих прослоек и их наиболее рационального размещения в теле земляного сооружения. При этом в качестве армирующего элемента может быть рассмотрен любой конкретный материал любого типа (геотекстиль, геосетки, георешетки и т.п.).

Разработанная методика оптимизационного расчета армированных откосов земляного полотна не ориентирована на решение задач оценки и обеспечения требуемой степени устойчивости основания. При неустойчивом основании задача назначения конструкции откосов земляного полотна, в том числе и армированных, становится методически необоснованна – деформации основания могут явиться причиной выхода из строя конструкции в целом даже при однозначно устойчивых откосах насыпи.

В предложенной методике не рассматривается также задача выбора средств и мероприятий по укреплению поверхности откоса, что в общем случае является обязательным как с точки зрения устранения возможности негативных проявлений процессов выветривания, обсыпания, сползания поверхностных слоев грунта откоса, так и его размывания талыми и дождевыми потоками. Особенно актуальной такая задача является в случаях сооружения откосов повышенной крутизны, в том числе и армированных.

При разработке методического обеспечения решения задачи оптимизационного расчета армированных откосов в основу была положена рабочая гипотеза известного метода перемещений / 1 /, в соответствии с которой армирующая прослойка включается в работу лишь после того, как произошли деформации исходного контура сооружения в допустимой степени. На практике такой уровень деформирования контура сооружения достигается непосредственно в процессе его строительства – при послойном уплотнении грунта.

Методика решения задачи оптимизационного расчета армированного откоса построена на предположении существования ожидаемой поверхности смещения ограниченного сектора откосной части конструкции без учета эффекта ее армирования. Без нарушения общности в качестве такой поверхности может быть рассмотрена круглоцилиндрическая поверхность.

В соответствии с разработанной в Союздорнии / 2 / методологией предполагается поэтапное решение задачи расчета армированных откосов.

На первом этапе по специально разработанной программе для ПЭВМ, реализующей интегральную модификацию известного метода круглоцилиндрических поверхностей скольжения (КЦПС), оценивается степень устойчивости неармированного откоса. Если при этом расчетное значение коэффициента устойчивости Куст откоса оказывается больше требуемого Ктр, нет необходимости в повышении степени устойчивости откоса с использованием любых мероприятий, в том числе и метода армирования.

Если же в результате проведенных расчетов оказывается, что Куст меньше Ктр, целесообразно провести анализ места расположения критической поверхности смещения. В частности, если она заходит в основание конструкции, необходимо осуществление мероприятий по устранению такого эффекта с использованием различных средств и приемов, в том числе и обоснованной укладки непосредственно в основание насыпи армирующих прослоек.

С целью наиболее полного приближения расчетного аппарата к реальным условиям предусмотрена возможность учета при решении задачи расчета армированных откосов влияния равномерно распределенной на фиксированном отрезке поверхности насыпи нагрузки (рис. 1).

Таким образом, если в результате проведенных предварительных расчетов оказывается, что Куст меньше Ктр и дуга не захватывает слои основания, с целью повышения степени устойчивости откоса до требуемого уровня (Куст больше или равно Ктр) может оказаться целесообразным использование метода армирования. При этом в качестве армирующего элемента могут быть использованы различные конкретные материалы (геотекстиль, геосетки, георешетки и др.), обладающие определенными свойствами и характеристиками.

Собственно расчет армированных откосов осуществляется с использованием специально разработанной программы для ПЭВМ. В основу расчетной схемы положено представление о том, что в этом случае критическая дуга должна проходить через подошву откоса, т.е. захватывать весь откос по его высоте, а не отдельную его часть. Результаты многочисленных расчетов свидетельствуют, что в абсолютном большинстве случаев ситуация складывается именно таким образом.

Расчет конструкции осуществляется сверху вниз. При этом место расположения первой (верхней) армирующей прослойки выбирается исходя из условия минимально допустимого по технологическим или некоторым другим соображениям ее заглубления от поверхности насыпи. Примерно по тем же соображениям в качестве естественного ограничения фигурирует величина минимально допустимого расстояния по вертикали между соседними горизонтами армирования. В первом приближении обе ограничительные величины могут составлять 1 м.

С учетом определенных таким образом условий решение задачи оптимизационного расчета армированных откосов осуществляется с ориентацией на характеристики конкретного материала, который предполагается использовать в качестве армирующего. В общем случае по выбранному материалу необходимы количественные оценки следующих характеристик:

- разрывная нагрузка, т/м;
- разрывное удлинение, %;
- толщина, м;
- модуль деформации, т/м.кв;
- коэффициент Пуассона.

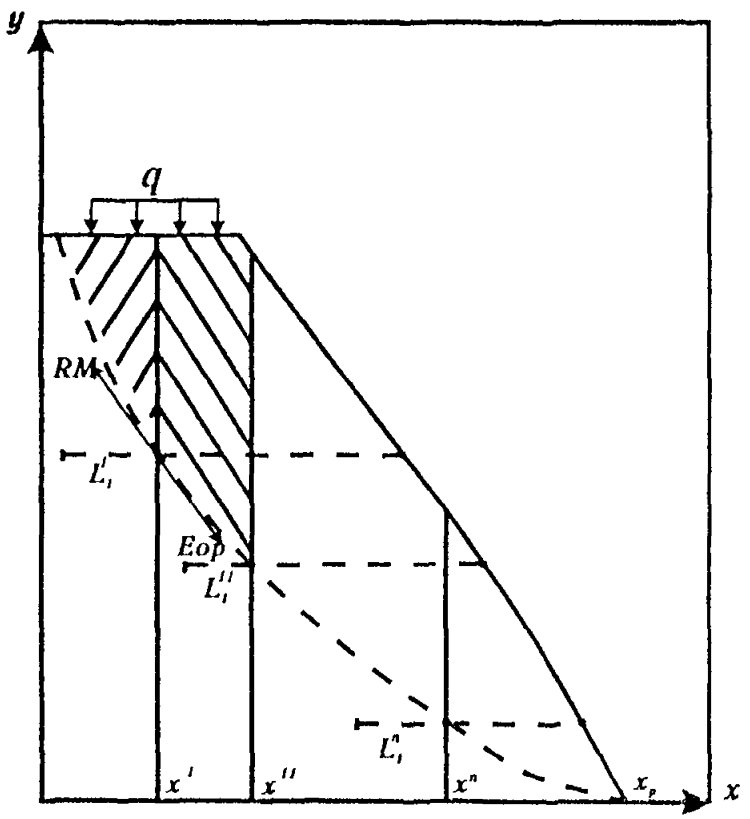



Рис. 1. Методологическая схема оптимизационного расчета армированных откосов

Основным используемым при решении задачи показателем, характеризующим выбранный материал, является величина разрывной нагрузки. Все другие характеристики материала необходимы в том случае, если предполагается определять расчетное значение осадки грунта под прослойкой от нагрузки $E1 = E \cdot \cos \alpha$ , где

E - оползневая нагрузка на горизонт, т/м;

$\alpha$ - в общем случае угол между касательной к поверхности скольжения и нормалью к плоскости прослойки.

Расчет армированного откоса осуществляется в следующей последовательности.

По известной величине P разрывной нагрузки (или нагрузки, при которой достигается допустимый уровень удлинения материала) условие допустимости расположения прослойки на заданном уровне может быть определено из соотношения

$$RM \approx 0{,}75 \cdot P \qquad (1)$$

Коэффициент 0,75 регулирует уровень использования прочностных свойств армирующего материала. В зависимости от значений характеристик материала (величина удлинения при различных нагрузках и др.) значение указанного коэффициента может быть выбрано иным.

Определяется критическое положение поверхности скольжения (КЦПС) при условии ее прохождения через подошву откоса, т.е. значения координат (A, B) места расположения ее центра и значение радиуса R, при которых достигается минимальное значение коэффициента устойчивости неармированного откоса.

Оптимальное место расположения очередного горизонта армирования откоса определяется поиском такой точки Хк, при которой на отрезке (Хн, Хк) выполняется условие (рис. 1)

$$E(Хн, Хк) = RM, \text{ где} \qquad (2)$$

Хн – «х» - координата точки пересечения горизонта расположения предыдущей армирующей прослойки (или точки выхода дуги на поверхность откоса для 1-го горизонта армирования) с дугой скольжения;

$$E(Хн, Хк) = Ктр\ СД(Хн, Хк) - УД(Хн, Хк) \qquad (3)$$

- оползневая нагрузка на горизонт в пределах отрезка (Хн, Хк);

Ктр – требуемое, заданное значение коэффициента устойчивости откоса;

СД (Хн, Хк) – суммарное значение сдвигающих сил (КЦПС) по дуге в пределах отрезка (Хн, Хк);

УД (Хн, Хк) – суммарное значение удерживающих сил на том же отрезке дуги.

При этом расчетный горизонт расположения прослойки в грунте откоса соответствует середине высоты (толщины) полосы армирующего материала.

Расчетное значение Хк итерационным путем выбирается таким образом, чтобы с заданной точностью (например, 0,0001) выполнялось условие (2).

Если при этом оказывается, что расстояние

$$h_i = Ун - Ук, \text{ где} \qquad (4)$$

$$Ун = B - \sqrt{(Хн - A)^2 + R^2} \qquad (5)$$

меньше предельно допустимого, необходимо либо использовать другой армирующий материал, обладающий более высокими прочностными

характеристиками, либо увеличить количество полос на горизонте выбранного армирующего материала с повторением комплекса расчетов до тех пор, пока расстояние по вертикали между соседними горизонтами армирования окажется не меньше предельно допустимого.

При выполнении всех перечисленных условий оптимальное место расположения очередного горизонта армирования можно считать определенным с заданной точностью. После этого можно переходить к определению места расположения следующего горизонта армирования аналогичным образом, полагая

$$Хн\ (i + 1) = Хк\ (i) \qquad (6)$$

При этом в каждом случае анализируется текущее значение Хк. Если при соблюдении условия ( 1 ) в процессе расчетов Хк оказывается больше Хр (см. рис. 1), задача определения минимально необходимого количества горизонтов армирования (и полос материала) и оптимального места расположения каждого из них в теле насыпи с учетом положения критической поверхности скольжения откоса в целом может считаться решенной.

Вместе с тем, при использовании в качестве армирующих современных материалов с высокими прочностными показателями (разрывная нагрузка больше 5-10 т/м) в результате проведенных таким образом расчетов может оказаться, что все горизонты армирования располагаются в низовой части откоса. В таких случаях целесообразно дополнительно рассматривать задачу для верховой, незаармированной по результатам предшествующих расчетов, части откоса, начиная с определения места расположения локальной критической поверхности смещения (A1,B1, R1). При этом возможны два варианта решения этой указанной локальной задачи. с использованием выбранного материала с высокими прочностными характеристиками или же с заменой выбранного материала на другой, более дешевый и обладающий меньшими значениями прочностных показателей.

В первом случае (исходный материал) для обеспечения требуемой степени устойчивости Ктр верховой части откоса может быть назначена схема ее армирования с расстоянием между соседними горизонтами, равным минимально допустимому или несколько большим. В таком случае требуемый уровень устойчивости верховой части откоса будет обеспечен с определенным запасом.

Во втором случае (другой материал) решение задачи осуществляется в соответствии с общей схемой. Различие заключается лишь в том, что при этом в качестве расчетной конструкции следует рассматривать только верхнюю, незаармированную по результатам решения общей задачи, часть откоса, учитывая при этом как минимально допустимое значение глубины от поверхности насыпи расположения верхнего горизонта армирования, так и высоту верхней части конструкции, устойчивой (КЦПС) без дополнительных мероприятий.

По итогам решения такого комплекса задач может быть назначена схема оптимального расположения горизонтов армирования откоса в целом с учетом условий, определяемых как положением общей критической поверхности смещения, так и локальной с обоснованным выбором оптимального количества горизонтов армирования, полос армирующего материала на каждом горизонте.

Назначенная таким образом схема армирования откоса будет работать лишь в том случае, если выполнены некоторые дополнительные условия. В первую очередь, необходимо позаботиться о том, чтобы полоса армирующего материала на каждом горизонте была достаточно жестко зафиксирована в устойчивой части откоса с тем, чтобы предотвратить возможность ее выдергивания за счет действия оползневой нагрузки Это условие может быть выполнено путем обоснованного расчета длины заделки армирующей прослойки в устойчивой части откоса.

Ю.В.Пудовым / 2 / предложено минимально необходимую длину заделки прослойки в устойчивой части откоса при ее горизонтальном расположении определять по формуле

$$L1 = \frac{E_i \cdot \sin\alpha}{E_{ж} \cdot (\operatorname{tg}\varphi_1 + \operatorname{tg}\varphi_2)}, \text{ где} \qquad (7)$$

Ei – оползневая нагрузка на горизонт на отрезке (Хн, Хк);

$\alpha$ - угол между касательной к поверхности скольжения и нормалью к плоскости прослойки в точке их пересечения,

Есж – сжимающая нагрузка в точке пересечения прослойки с поверхностью смещения;

$$E_{ж} = P + \gamma \cdot h, \qquad (8)$$

$\varphi_1$ и $\varphi_2$ - угол внутреннего трения грунта соответственно под и над прослойкой;

$\gamma$ - удельный вес грунта под прослойкой;

h – глубина расположения горизонта армирования от поверхности насыпи;

P – интенсивность внешней нагрузки в точке Хк.

Условие заделки прослойки в неустойчивой части откоса (зоне возможного обрушения) однозначно определяется полным перекрытием прослойкой неустойчивой части откоса с выходом ее на поверхность откоса.

В соответствии с зависимостью (7) длина заделки прослойки в устойчивой части откоса определяется величиной оползневой нагрузки на горизонт, а это означает, что она будет увеличиваться пропорционально количеству полос армирующего материала и принимать сравнительно меньшие значения при решении задачи локального армирования верховой части откоса.

## 2. Программное обеспечение оптимизационного решения задачи расчета армированных откосов

В общем случае решение задачи осуществляется с использованием двух разработанных программных комплексов

Первый из них – программный комплекс RUO – предназначен для оценки устойчивости откосов насыпей (выемок) земляного полотна. Комплекс рассчитан на рассмотрение конструкции в целом: насыпь + основание. С такой ориентацией разработаны все составные части комплекса.

Оценка устойчивости откосов осуществляется с использованием разработанной в Союздорнии /2/ интегральной модификации известного метода круглоцилиндрических поверхностей скольжения. В отличие от классической расчетной схемы метода, разработанная его интегральная модификация полностью реализует основную рабочую гипотезу метода: смещение неустойчивой части откоса происходит по дуге окружности, а не по ломаной поверхности, когда отрезок дуги заменяется хордой. При этом в разработанной модификации метода отсутствует необходимость разбиения отсека обрушения на ограниченное количество расчетных блоков, ширина которых оказывает определенное влияние на точность результатов расчетов. Формально предложенная модификация метода рассматривает бесконечное множество расчетных блоков нулевой ширины или, что то же самое, весь отсек обрушения в качестве единого расчетного блока.

В соответствии с основной концепцией метода КЦПС степень устойчивости откоса определяется по значению коэффициента его устойчивости

$$K_{уст} = \frac{\sum_{1}^{n} (P_i \cos\alpha_i \operatorname{tg}\varphi_i + C_i l_i)}{\sum_{1}^{n} P_i \sin\alpha_i} = \frac{\sum_{1}^{n} (N_i \operatorname{tg}\varphi_i + C_i l_i)}{\sum_{1}^{n} T_i}, \text{ где} \qquad (9)$$

n - количество расчетных блоков;

$P_i$ - вес грунта в пределах расчетного блока;

$\alpha_i$ - угол наклона поверхности скольжения к горизонту в пределах расчетного блока;

$\varphi_i$ - угол внутреннего трения грунта на поверхности скольжения;

$C_i$ - удельное сцепление грунта на поверхности скольжения;

$l_i$ - длина хорды, соединяющей концы дуги в пределах блока.

Разработанная интегральная модификация метода ориентирована на координатное представление как дуги скольжения, так и геометрических параметров конструкции.

Если уравнение поверхности откоса (или ее отдельных частей) записать в виде

$$У = А + Вх, \qquad (10)$$

а уравнение дуги круглоцилиндрической поверхности скольжения в виде

$$(X - а)^2 + (y - в)^2 = R^2, \qquad (11)$$

то основные слагающие части выражения (9) могут быть представлены в виде

$$T = \gamma\int_{x_1}^{x_2}\{[A+Bx-b+\sqrt{R^2-(x-a)^2}]\frac{a-x}{R}\}dx =$$

$$=\int_{x_1}^{x_2}\frac{\gamma}{R}\{(A-b)\ a\ x+\frac{1}{2}(Ba+b-A)x^2-\frac{Bx^3}{3}+\frac{1}{3}\sqrt{[R^2-(x-a)^2]^3}\}; \qquad (12)$$

$$N=\frac{\gamma}{R}\int_{x_1}^{x_2}[(A+Bx-b+\sqrt{R^2-(x-a)^2}\,]\sqrt{R^2-(x-a)^2}\,dx=\frac{\gamma}{R}\int_{x_1}^{x_2}\{R^2x-\frac{(x-a)^3}{3}+$$

$$+\frac{A-b+Ba}{2}[(x-a)\sqrt{R^2-(x-a)^2}+R^2\arcsin\frac{x-a}{R}-\frac{B}{3}\sqrt{[R^2-(x-a)^2]^3}\}; \qquad (13)$$

$$I=\int_{x_1}^{x_2}\frac{R}{\sqrt{R^2-(x-a)^2}}dx=R\int_{x_1}^{x_2}\arcsin\frac{x-a}{R}, \text{ где} \qquad (14)$$

a, в, R – соответственно координаты центра и радиус дуги окружности скольжения;

$$\int_{x_1}^{x_2}f(x)=f(x_2)-f(x_1) \qquad (15)$$

С точки зрения организации вычислительного процесса формально назначаются расчетные блоки, в пределах которых не изменяются значения параметров A, B, C, φ в автоматическом режиме.

Для уточнения значений параметров а, в, R критической поверхности скольжения, которой соответствует минимально возможное значение коэффициента устойчивости, организованы направленные итерационные циклы, позволяющие получить решение задачи с высокой точностью: в программах комплекса величина погрешности вычисления не превышает 0,0001.

В общем случае программный комплекс рассчитан на оценку устойчивости откосов конструкций, имеющих сложную геометрию поверхности откоса и сложную неоднородную структуру (рис. 2). Конструкция может состоять из нескольких (до 10) слоев, каждый из которых может отличаться видом и свойствами слагающего его грунта, геометрическими параметрами, принадлежностью к насыпи или основанию.

Программный комплекс ориентирован на геометрическое представление исходной информации по каждой рассчитываемой конструкции и на определенный способ ее представления.

По каждому варианту предусмотрен ввод следующих данных:

1. Признак IPR, в соответствии со значением которого в автоматизированном режиме осуществляется настройка программного комплекса на определенную схему организации вычислений.
2. Далее по каждому слою конструкции (насыпь + основание) предусмотрен ввод следующих данных (нумерация слоев – сверху вниз):

$h_i$ - толщина слоя, м;

$m_i$ - заложение откоса в пределах слоя;

$l_i$ - протяженность бермы, примыкающей к нижней границе слоя, м;

$C_i$ - сцепление грунта слоя, т/м.кв;

$\varphi_i$ - угол внутреннего трения грунта слоя, град.;

$\gamma_i$ - удельный вес грунта слоя, т/м.куб.

При этом для слоев основания конструкции необходимо назначать $m_i = l_i = 0$.

Программно подготовленные таким образом исходные данные на расчет варианта переводятся в координатную форму представления и в соответствии с заданным значением признака IPR осуществляется расчет варианта. Предусмотрена возможность рассмотрения 5 различных значений признака IPR:

0 – осуществляется свободный от дополнительных ограничений поиск положения критической поверхности скольжения, не отрицающий возможности захвата ею верхних слоев основания, если его присутствие в конструкции определено исходными данными;

1 – свободный поиск при условии, что в любом случае дуга не проходит через конструктивные слои основания;

2 – обязательное условие прохождения дуги через одну контрольную точку (X1, У1), расположенную на поверхности конструкции;

3 – обязательное условие прохождения дуги через две контрольные точки (X1, У1) и (X2, У2), расположенные на поверхности конструкции;

4 – известно фиксированное (a, в, R) положение поверхности скольжения.

При значениях признака IPR = 2, 3, 4 комплекс предлагает пользователю сообщить ему дополнительную информацию – значения (X1, У1), или (X1, У1) и (X2, У2), или (a, в, R) в зависимости от значения признака IPR. Такая информация должна быть представлена в координатном виде в системе координат бровка-подошва откоса (рис. 1). В этой же системе координат представляются и результаты решения задачи.

При подготовке исходных данных на расчет варианта следует иметь в виду, что значения удельного веса грунтов по всем слоям конструкции не должны существенно различаться, так как при расчетах в качестве осредненного весового показателя грунта в пределах расчетного блока принимается значение удельного веса грунта слоя, в пределах которого проходит дуга.

В рамках общей задачи результаты оценки устойчивости неармированного откоса, предварительно полученные с использованием программного комплекса RUO, позволяют:

- определить значение коэффициента устойчивости откоса, в соответствии с которым сделать вывод о необходимости осуществления мероприятий по повышению степени устойчивости откоса до требуемого уровня;
- проанализировать положение критической поверхности скольжения, оценить влияние основания конструкции на устойчивость откосов;
- в соответствии с эпюрой распределения по протяженности поверхности скольжения оползневой нагрузки оценить целесообразность использования того или иного армирующего материала для обеспечения требуемой степени устойчивости откоса методом армирования.

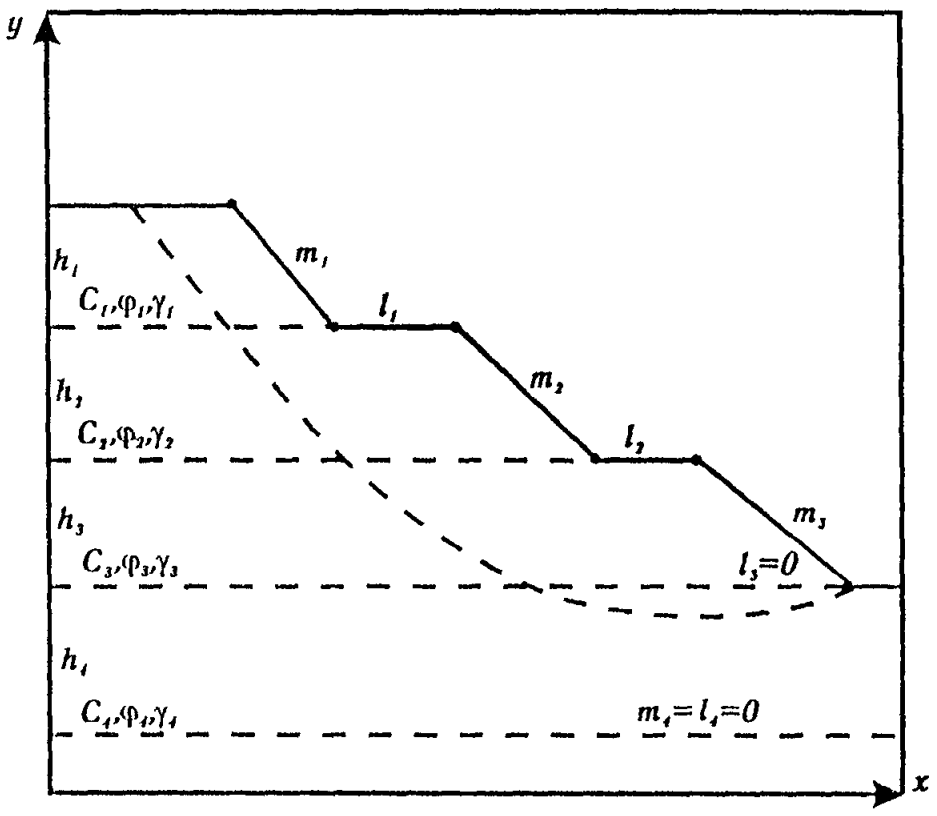



Рис 2 Схема расчета устойчивости откоса сложного профиля с использованием интегральной модификации метода круглоцилиндрических поверхностей скольжения

По каждому рассчитанному варианту в табличной форме выводятся основные исходные данные, а также дополнительная, введенная в зависимости от значения признака IPR, информация.

В качестве результатов расчетов выводятся значение коэффициента устойчивости неармированного откоса и параметры критической поверхности скольжения в системе координат бровка-подошва откоса. В табличной форме выводится информация, характеризующая закономерность изменения баланса удерживающих и сдвигающих сил и других показателей как по отдельным блокам (для удобства пользования шириной не более 1 м), так и по протяженности дуги.

С использованием полученных таким образом результатов расчетов могут быть определены условия и подготовлены исходные данные для решения задачи оптимизационного расчета армированного откоса с использованием разработанного для этой цели программного комплекса ОРАО.

Перечень исходных данных для этого комплекса несколько изменен по сравнению с данными для RUO с сохранением при этом общего принципа их формирования для расчета конкретной конструкции.

В соответствии с тем, что при расчете в этом случае предполагается, что дуга проходит через подошву откоса, нет необходимости в рассмотрении признака IPR и во вводе дополнительной информации в том составе и виде, на которые был ориентирован комплекс RUO.

Помимо этого, в расчете армированных откосов в общем случае могут оказаться необходимыми и несколько расширенные данные, касающиеся характеристик слагающих откос грунтов. Дополнительно к информации, необходимой для работы с комплексом RUO, в этом случае по каждому конструктивному слою могут понадобиться значения модуля деформации (т/м.кв.) и коэффициент Пуассона грунта слоя.

В качестве дополнительной информации при работе с комплексом ОРАО вводится следующая информация:

- интенсивность равномерно распределенной на ограниченном отрезке поверхности насыпи внешней нагрузки q и границы XG1 и XG2 такого отрезка относительно бровки откоса. При нулевом значении нагрузки границы отрезка не вводятся;
- требуемое значение коэффициента устойчивости откоса Ктр;
- номер в локальной базе данных материала, выбранного в качестве армирующего. В случае отсутствия информации о конкретном материале в локальной базе данных комплекса ОРАО возможен ввод его характеристик с экрана.

По каждому рассчитанному варианта выводятся в полном объеме исходные данные, а также результаты расчетов в следующем составе:

результаты оценки устойчивости откоса в целом и его верховой части;

в табличной форме полученная в результате расчетов схема армирования откоса.

## 3. Примеры использования разработок

Пример 1

В качестве примера, в определенной степени иллюстрирующего возможности программных комплексов и результаты расчетов на их основе, была рассмотрена однородная по структуре насыпь с простым заложением откосов повышенной крутизны (рис. 3).

Расчеты осуществлялись в два этапа.

Реализация первого этапа расчетов – оценка устойчивости неармированного откоса с использованием программного комплекса RUO (без учета внешней нагрузки) осуществлялась в соответствии со следующими исходными данными.

IPR = 0
толщина слоя H = 10 м
заложение откоса = 0,5
протяженность бермы = 0
сцепление грунта C = 1 т/м.кв.
угол внутреннего трения грунта = 10 град
удельный вес грунта = 1,9 т/м куб.
Признак конца исходных данных 99999.
Получены следующие результаты расчетов:
коэффициент устойчивости откоса Куст = **0,493;**
параметры критической поверхности **скольжения** :
a = 9,72 м, в = 13,5 м; R = 14,3 м.

Баланс сил по блокам и по протяженности дуги

| Очередной блок | | | | | | | Накопленные суммы | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| X1 | X2 | L | S | UD | SD | K | L | S | UD | SD | K |
| -4,15 | -3,32 | 2,52 | 1,08 | 2,56 | 1,91 | 1,39 | 2,52 | 1,08 | 2,65 | 1,91 | 1,39 |
| -3,32 | -2,49 | 1,78 | 2,65 | 2,20 | 4,44 | ,49 | 4,30 | 3,73 | 4,85 | 6,35 | ,76 |
| -2,49 | -1,66 | 1,47 | 3,79 | 2,19 | 5,94 | ,37 | 5,77 | 7,53 | 7,04 | 12,29 | ,53 |
| -1,66 | -,83 | 1,29 | 4,70 | 2,31 | 6,84 | ,34 | 7,06 | 12,23 | 9,35 | 19,13 | ,49 |
| -,83 | 0 | 1,18 | 5,46 | 2,47 | 7,34 | ,34 | 8,24 | 17,69 | 11,81 | 26,48 | ,45 |
| 0 | ,83 | 1,10 | 5,44 | 2,48 | 6,73 | ,37 | 9,34 | 23,13 | 14,29 | 33,20 | ,43 |
| ,83 | 1,67 | 1,03 | 4,60 | 2,27 | 5,18 | ,44 | 10,37 | 27,72 | 16,57 | 38,39 | ,43 |
| 1,67 | 2,50 | ,99 | 3,68 | 2,03 | 3,75 | ,54 | 11,36 | 31,41 | 18,60 | 42,13 | ,44 |
| 2,50 | 3,33 | ,95 | 2,70 | 1,74 | 2,45 | ,71 | 12,31 | 34,11 | 20,34 | 44,59 | ,46 |
| 3,33 | 4,17 | ,92 | 1,66 | 1,42 | 1,33 | 1,07 | 13,22 | 35,77 | 21,76 | 45,91 | ,47 |
| 4,17 | 5,00 | ,89 | ,56 | 1,07 | ,40 | 2,70 | 14,12 | 36,33 | 22,83 | 46,31 | ,49 |

X1 – левая граница блока, м
X2 – правая граница блока, м
L – длина дуги, м
S – площадь отсека обрушения, м.кв
UD – удерживающие силы, т/пог.м
SD – сдвигающие силы, т/пог.м
K – коэффициент устойчивости.

Учет действия внешней нагрузки не изменяет значение коэффициента устойчивости откоса, несколько конкретизируя лишь положение критической поверхности смещения: a = 7,16 м; в = 11,02 м; R = 11,22 м.

Таким образом, с использованием метода армирования материалом № 20 необходимо повысить значение коэффициента устойчивости откоса с Куст = 0,493 до Куст = 1,7.

Исходя из полученных таким образом результатов предварительных расчетов, были получены решения задачи оптимизационного расчета армированного откоса в двух вариантах: при минимально допустимых расстояниях между соседними горизонтами армирования 0,5 м и 1 м. Основные результаты таких расчетов приведены в таблице 1

Таблица 1

Результаты расчетов армированных откосов

| Горизонт | Глубина расположения от поверхности, м | Количество полос материала | Длина заделки в уст. части | Расход армир материала, м |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 4,83 | 1 | 1,352 | 6,19 |
| 2 | 5,85 | 1 | 1,203 | 5,85 |
| 3 | 6,58 | 1 | 1,194 | 5,59 |
| 4 | 7,19 | 1 | 1,188 | 5,29 |
| 5 | 7,75 | 1 | 1,263 | 4,99 |
| 6 | 8,36 | 1 | 1,253 | 4,45 |
| 7 | 9,17 | 1 | 1,241 | 3,38 |
| ВСЕГО (при расстоянии между горизонтами армирования не менее 0,5 м): | | | | |
| 7 | | 7 | | 35,74 |
| 2-ой вариант (расстояние между соседними горизонтами не менее 1 м) | | | | |
| 1 | 4,83 | 1 | 1,352 | 6,19 |
| 2 | 5,85 | 1 | 1,203 | 5,85 |
| 3 | 7,19 | 2 | 2,375 | 12,94 |
| 4 | 8,37 | 2 | 2,505 | 11,40 |
| ВСЕГО | | | | |
| 4 | | 6 | | 36,38 |

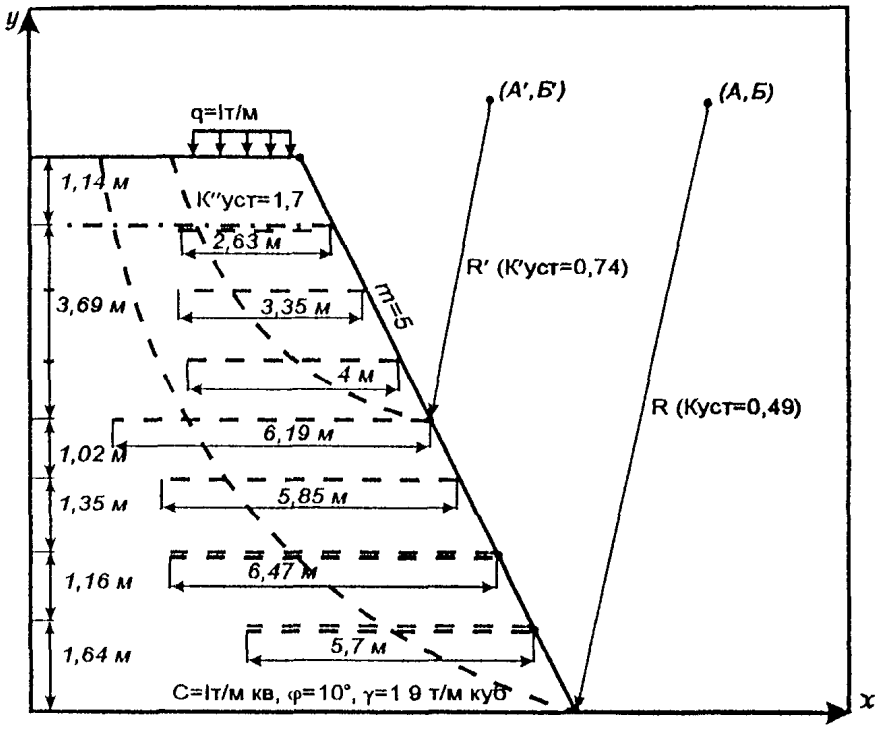



Рис 3 Результаты расчета контрольной конструкции при минимально допустимом расстоянии между соседними горизонтами армирования 1 м и Ктр = 1,7

Информация, представленная в таблице, свидетельствует о том, что относительно критической поверхности скольжения (A, B, R) откоса в целом требуемая степень его устойчивости (Куст = 1,7) обеспечивается в зависимости от поставленных условий (минимально допустимое расстояние между соседними горизонтами армирования) соответственно семью или четырьмя горизонтами армирования. При этом в первом из рассмотренных случаев на каждом горизонте для обеспечения требуемой степени устойчивости откоса достаточно разместить одну полосу армирующего материала № 20. Во втором случае количество горизонтов армирования откоса сокращается до 4, при этом на двух нижних из них целесообразно укладывать по две полосы материала № 20.

Как в том, так и в другом случае верхний горизонт армирования рекомендуется размещать на глубине 4,83 м от поверхности откоса. Это означает, что относительно критической поверхности смещения откоса в целом (A, B, R – на рис. 3) условие (1) баланса сил по дуге выполняется и для верховой части (H = 4,83 м) откоса.

Вместе с тем, не исключен вариант, что при обеспечении требуемой степени устойчивости нижней части откоса в его верхней (незаармированной) части может образоваться локальная критическая поверхность смещения.

Анализ результатов выполненных расчетов (комплекс RUO) свидетельствует о том, что для насыпи, аналогичной исходной, но высотой 4,83 м может организоваться такая локальная поверхность скольжения (A′, B′, R′ – на рис. 3). При этом значение коэффициента устойчивости откоса относительно такой поверхности скольжения составляет Куст = 0,74. Значение коэффициента устойчивости откоса верховой части насыпи выше значения коэффициента устойчивости откоса насыпи в целом, но меньше требуемого (1,7) значения коэффициента устойчивости откоса.

В этом плане целесообразно установить ту высоту верхней части откоса, при которой значение коэффициента устойчивости соответствует требуемому значению.

Как показывают результаты исследований, значение коэффициента устойчивости откоса насыпи нелинейно зависит от ее высоты. При этом для каждой рассматриваемой конструкции такая зависимость при сохранении общих тенденций характеризуется индивидуальными особенностями.

Во всяком случае, всегда существует высота верхней части откоса, в пределах которой значение коэффициента устойчивости не меньше требуемого значения. Вполне естественным образом можно предположить, что армирование такой верхней части откоса, в принципе, нецелесообразно. Дополнительное армирование верховой части откоса в связи с этим может быть логичным на диапазоне высотных отметок, границами которого являются высота верхней части откоса и уровень заложения верхней прослойки, рассчитанный относительно критической поверхности скольжения откоса в целом.

Для армирования этой части конструкции использование исходного армирующего материала может оказаться экономически нецелесообразным, потому что его прочностные характеристики существенно выше оползневых нагрузок, рассчитанных относительно дуги (A′, B′, R′).

Поэтому, поскольку армирование верховой части откоса необходимо для обеспечения требуемого уровня ее устойчивости, задача может решаться разными путями

Если по тем или иным соображениям предполагается решать задачу армирования всего откоса с использованием при этом только исходного материала, результаты решения задачи для его верховой части могут быть получены, исходя из известного традиционного принципа «в запас» без надлежащей оценки величины такого запаса.

Как уже указывалось, в качестве исходного был выбран материал № 20, обладающий следующими характеристиками (решетка типа «Tensar»):

разрывная нагрузка – 11,2 т/м;

разрывное удлинение – 17%;

толщина – 0,0018 м;

модуль деформации – 6500 т/м кв;

коэффициент Пуассона – 0,85.

Другой возможный путь решения задачи армирования верховой части откоса может определяться заменой исходного материала на другой, более дешевый и с относительно меньшими прочностными показателями.

При расчете контрольного примера был выбран первый из названных путь решения задачи, основанный на использовании только исходного армирующего материала

Как показали результаты расчетов (рис. 3), верхняя часть откоса высотой $h_b$ = 1,14 м является устойчивой в соответствии с выбранными оценочными критериями (Куст = Ктр = 1,7) В соответствии с принятыми условиями, минимально допустимая высота верха откоса, не подлежащая армированию, составляет $h_т$ = 1 м, что не превосходит высоты устойчивого верха конструкции

Таким образом, зона локального армирования верховой части откоса простирается от 1,14 м до $h_а$ = 4,83 м в отметках от его поверхности.

Минимально необходимое количество горизонтов локального армирования верховой части откоса в таком случае может быть определено из соотношения

$$n_в = \frac{h_а - h_у}{h_в} = \frac{4\,83 - 1\,14}{1,14}, \text{ где} \qquad (16)$$

$h_а$ - глубина (от поверхности откоса) заложения верхнего из основных горизонтов армирования, м;

$h_у$ - высота верхней части откоса, не подлежащей армированию, м;

$h_в$ - высота верхней, устойчивой части откоса, м;

$h_т$ - минимально допустимая глубина от поверхности откоса заложения верхнего горизонта армирования откоса в целом, м.

В общем случае высота верхней части откоса, в пределах которой нежелательно размещение горизонтов армирования, определяется из условия

$$h_у = \max\{h_в, h_т\} \qquad (17)$$

соседними локальными горизонтами, включая верхний из основных) составляет

$$\Delta h = \frac{h_в - h_у}{n_в} = \frac{4.83 - 1.14}{3} = 1\,23\ м \qquad (18)$$

При работе с программным комплексом ОРАО все этапы расчетов выполняются в автоматизированном режиме и не требуют вмешательства пользователя.

Окончательная схема армирования откоса в соответствии с результатами расчетов представлена на рис. 3. Здесь приведены расчетные уровни размещения горизонтов армирования, указаны расчетные расстояния между соседними горизонтами.

Приведены также и минимально необходимые длины полос армирующего материала и их количество на каждом горизонте. При этом минимально допустимое расстояние между соседними горизонтами армирования было принято равным 1 м, а требуемое значение коэффициента устойчивости откоса Ктр = 1,7.

Длина полос армирующего материала на каждом горизонте определялась в каждом случае как сумма расстояний по горизонту от поверхности откоса (образующей) до критической (общей или локальной) поверхности смещения и минимально необходимой длины заделки полосы в устойчивой части откоса.

Как уже указывалось, программный комплекс ОРАО не ориентирован на решение задач оценки устойчивости основания насыпи и обеспечения местной (поверхностной) устойчивости откоса в промежутках между соседними горизонтами армирования.

В принципе, изложенная методика оптимизационного расчета армированных откосов может быть использована при разработке схем армирования откоса материалами разных видов и типов, в том числе и георешетками.

При этом в случаях использования в качестве армирующих материалов синтетических полотен и сеток решение задачи обеспечения местной устойчивости откосов может быть обеспечено, в том числе и устройством обойм из того же материала.

При использовании георешеток такой вариант решения указанной задачи может быть реализован далеко не всегда. Индивидуальные особенности материалов такого типа определяют необходимость поиска специальных методов и приемов их применения в таких случаях.

В таблице 2 приведены основные результаты оптимизационного решения задачи армирования выбранным материалом откосов насыпи, представленной на рис. 3.

Таблица 2

Результаты расчета контрольной насыпи

| | N | H, м | K, шт | l, м | E, т/пог.м | L, м |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 1,19 | -1 | 2,64 | 0 | 2,64 |
| | 2 | 2,40 | -1 | 3,37 | 2,67 | 3,37 |
| | 3 | 3,60 | -1 | 3,98 | 6,84 | 3,98 |
| | 4 | 4,83 | 1 | 6,19 | 8,40 | 6,19 |
| | 5 | 5,85 | 1 | 5,85 | 8,40 | 5,85 |
| | 6 | 7,10 | 2 | 6,47 | 16,80 | 12,94 |
| | 7 | 8,36 | 2 | 5,70 | 16,80 | 11,40 |
| Всего | 7 | - | 9 | - | - | 46,37 |

N – номер (сверху вниз) горизонта армирования;
H – глубина (от поверхности) заложения горизонта армирования;
K – количество полос арм. материала на горизонте;
l - длина полосы арм. материала на горизонте;
E – расчетная оползневая нагрузка на горизонт;
L – расчет арм. материала на горизонте.

При этом для 4 – 7 горизонтов армирования расчеты выполнялись с учетом прочностных свойств выбранного материала, в соответствии с которыми (и с количеством полос материала на горизонте) определялись максимально допустимые величины оползневой нагрузки на каждый из горизонтов армирования.

Поскольку, как уже указывалось ранее, использование выбранного материала на верхних (1 – 3) горизонтах армирования не во всех случаях оказывается экономически оправданным, в таблице приведены расчетные величины оползневой нагрузки для каждого из верхних горизонтов. При этом условно количество полос армирующего материала на каждом из них обозначено отрицательным числом (K = -1). Это означает, что в таких случаях исходный материал может быть заменен другим, с меньшими значениями прочностных показателей, и при выполнении условий (1) и (2) в зависимости от прочностных свойств нового материала на каждом из верхних горизонтов армирования может быть назначено количество полос такого материала, суммарные прочностные показатели которых соответствуют рассчитанной величине оползневой нагрузки на горизонт.

В соответствии с результатами выполненных расчетов величина оползневой нагрузки на первом (табл. 2) горизонте армирования, как и предполагалось, оказалась близкой к нулевому значению, так как глубина расположения горизонта соответствует высоте (1,14 м) устойчивой верхней части насыпи. Вместе с тем, опускать ниже верхний горизонт армирования нецелесообразно, потому что в этом случае будут нарушены условия устойчивости верха конструкции в целом, что крайне нежелательно.

материала на каждом горизонте (примерно на 0,5 м) на технологические издержки, суммарный расход материала для армирования откосов рассмотренной насыпи составляет порядка 50 м без рассмотрения возможного дополнительного расходования армирующего материала на укрепление поверхности откоса.

**Использованная литература:**


1. Львович Ю.М., Семендяев Л.И., Пудов Ю.В.
   Методы проектирования земляного полотна автомобильных дорог в сложных условиях пересеченной местности.
   М., 1995. – (Автомоб. дороги: Обзорн. инф./Информавтодор; Вып. 3). – 59 с.

2. Семендяев Л.И.
   Проблема комплексной оценки устойчивости земляного полотна автомобильных дорог при индивидуальном проектировании в сложных условиях пересеченной местности.
   М., 1995. - (Автомоб. дороги: Обзорн. инф./Информавтодор; Вып. 5). – 77 с.



**Кандидат технических наук Л.И.Семендяев**

# О Т З Ы В

на методику расчета грунтовых насыпей,
армированных георешетками

**На основании анализа существующих методик расчета армогрунтовых конструкций и предлагаемой методики можно сделать следующие выводы:**

Известные методики расчета армогрунтовых конструкций предполагают схему армирования с постоянным по высоте шагом относительно критической (Кмин) поверхности обрушения неустойчивой части грунтового откоса. Таким образом, расчет осуществляется без учета индивидуальных условий работы армирующего материала на каждом из горизонтов армирования.

Предлагаемая методика ориентирована на поиск оптимального решения с учетом конкретных условий работы армирующего материала в теле грунтового откоса на каждом горизонте армирования.

*При этом расчет осуществляется относительно потенциальной* поверхности обрушения, в качестве которой принимается либо критическая (если коэффициент устойчивости больше единицы), либо условно предельная поверхность (при коэффициенте устойчивости меньше единицы).

Расстояние между соседними горизонтами армирования и количество полос армирующего материала на каждом из них определяются, исходя из условия баланса допустимой на материал нагрузки и оползневого давления на горизонте.

В итоге обеспечивается решение, характеризующееся, в отличие от других методик, следующими особенностями:

1. Обоснованным обеспечением требуемой (Ктр) степени устойчивости армированного грунтового откоса.
2. Оптимальным (а не назначенным) количеством горизонтов армирования и оптимальным местом расположения каждого из них в теле откоса.
3. Минимально необходимой длиной армирующего материала на каждом из горизонтов армирования с учетом его заделки в устойчивой части откоса.
4. Равномерным нагружением армирующего материала по всем горизонтам армирования.
5. *Учетом дополнительной пригрузки и границ ее распределения* за бровкой откоса.
6. Возможностью дополнительного рассмотрения условий армирования верховой и низовой частей откоса (с запасом в случае использования исходного армирующего материала).

При этом, как показал сопоставительный анализ, степень требуемой устойчивости грунтового откоса обеспечивается с меньшим (до 2-х раз) расходом армирующего материала.

На основании вышеизложенного можно рекомендовать предложенную методику, как наиболее оптимальную, для проектирования грунтовых насыпей, армированных любыми современными материалами, включая георешетки

Кандидат технических наук,
доцент кафедры Инженерной геологии и геотехники
Московского государственного автомобильно-дорожного института
(технического университета) П А Фонарев

gost.e-ecolog.ru