

УДК 625.73

**Иван Иосифович ЛЕОНОВИЧ,**  
доктор технических наук,  
профессор, заведующий кафедрой  
"Строительство  
и эксплуатация дорог"  
Белорусского национального  
технического университета

**Николай Павлович ВЫРКО,**  
доктор технических наук,  
профессор, декан факультета  
Белорусского государственного  
технологического университета

**Тамара Казимировна БОГДАНОВИЧ,**  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры  
"Строительство  
и эксплуатация дорог"  
Белорусского национального  
технического университета

**SUBGRADE STIFFNESS  
OF AUTOMOBILE ROADS**

**УСТОЙЧИВОСТЬ  
ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА  
АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ**

*Устойчивость земляного полотна рассматривается с позиции комплексной оценки. Обоснован метод расчета устойчивости откосов насыпей и выемок под воздействием собственного веса, временных нагрузок и эрозии грунтовой поверхности. Приведенные зависимости могут быть использованы как на стадии проектирования земляного полотна, так и в процессе его реконструкции.*

*Subgrade stiffness is analysed from the point of view of complex estimation. A method of defining the embankment slope and cutting stability under the influence of their own weight, temporary loading and erosion of ground surface is substantiated. The described dependences can be used both at the stage of earth way projecting and in the process of its reconstruction.*

**ВВЕДЕНИЕ**

Автомобильным дорогам в транспортной системе Республики Беларусь отводится важная роль. Создание широко разветвленной, благоустроенной сети автомобильных дорог имеет большое значение, так как от дорожных условий в значительной степени зависят стоимость перевозки грузов и производительность автомобильного транспорта. Общая протяженность автомобильных дорог в Республике Беларусь по состоянию на 01.01.06 составляет 84 тыс. км, в том числе: республиканских — 16 тыс. км, местных — 68 тыс. км.

Земляное полотно является основанием дорожной одежды. Прочность и долговечность дорожного покрытия во многом зависят от устойчивости земляного

полотна. Очень важно проектировать и строить земляное полотно таким образом, чтобы оно не изменяло своей формы и оставалось устойчивым под воздействием сил собственного веса, кратковременной динамической нагрузки и различных природно-климатических факторов. Эти факторы приводят земляное полотно к деформированию и разрушению, а именно: к осадке насыпи из-за недостаточного уплотнения грунта при строительстве (рисунок 1а); просадке увлажненных слоев грунта в основании под насыпью вследствие выжимания воды под действием собственного веса насыпи (рисунки 1б, в); к обрушению откосов насыпи из-за большой крутизны и влажности грунтов, слагающих откос (рисунок 2); сползанию насыпи по крутому склону (рисунок 3а); расползанию насыпи под действием собственного веса при оттаивании грунтов или вследствие строительства из переувлажненных или мерзлых грунтов без достаточного уплотнения (рисунок 3б).

Такие негативные процессы необходимо исключать или минимизировать их влияние при проектировании и строительстве земляного полотна.

**ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ УСТОЙЧИВОСТЬ  
ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА**

Земляное полотно дороги должно быть прочным, устойчивым и долговечным независимо от гидрогеологических и погодно-климатических условий местности, времени года. В связи с этим, при проектировании при-

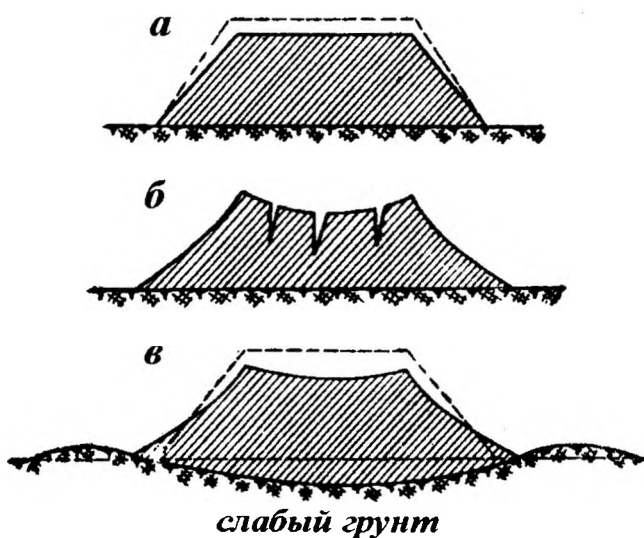
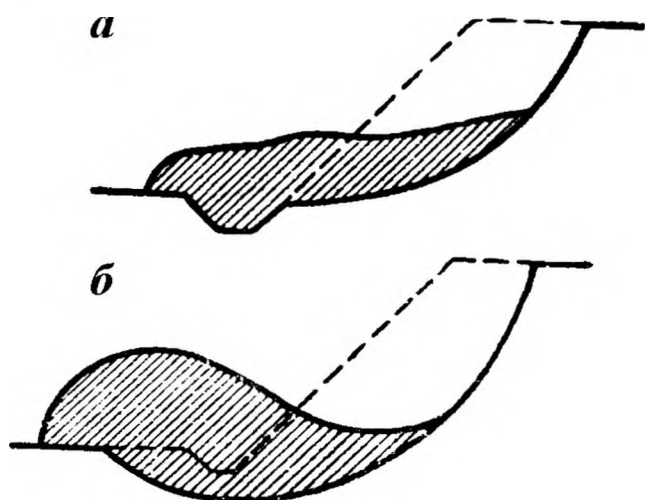


Рисунок 1. Виды деформации земляного полотна:  
а — осадка;  
б, в — просадка



Рисунок 2. Обрушение откосов земляного полотна из-за большой крутизны и влажности грунтов



**Рисунок 3. Разрушение насыпи:**  
**а** — сползание насыпи по крутому спуску;  
**б** — разрушение при недостаточном уплотнении

нятые параметры земляного полотна должны быть проверены расчетом и увязаны с действующими нормативными документами.

В результате расчетов определяется устойчивость откосов насыпей и выемок против обрушения и оплывания; устойчивость насыпей на косогорах против скольжения по контактной поверхности.

При расчете устойчивости откосов земляного полотна должны быть учтены: нагрузки и силовые воздействия, отвечающие каждому конкретному случаю; геотехнические характеристики грунтов тела и основания земляного полотна, а также условия работы земляного полотна в конкретной природной обстановке.

Собственный вес земляного полотна определяется при оптимальной плотности грунта насыпи; подвижная нагрузка — путем приведения ее к эквивалентному слою грунта земляного полотна.

При проведении расчетов устойчивости насыпей и выемок на стадии проектного задания расчетные характеристики могут быть определены по данным общей геотехнической оценки грунтов с использованием соответствующих справочных таблиц и графиков. В таблице 1 приведены прочностные характеристики угла внутреннего трения  $\phi$  и сцепления  $c$  для различных грунтов [1].

Откос земляного полотна считается устойчивым, если в результате расчетов величина его не будет меньше значений, приведенных в таблице 2.

**Таблица 1. Значения прочностных характеристик грунтов**

Грунт	Прочностные характеристики грунта	Характеристика грунта при относительной влажности (доли границы текучести)						
		0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90
Песок: крупный и гравелистый	Угол внутреннего трения $\phi$ , град	43	43	43	43	43	43	43
	средней крупности	40	40	40	40	40	40	40
	мелкий	38	38	38	38	38	38	38
	пылеватый	36	36	36	36	36	36	36
Супесь: легкая	Угол внутреннего трения $\phi$ , град	35	35	34	34	33	0	0
	Сцепление $c$ , кН/м <sup>2</sup>	12	11	10	9	8	0	0
Пылеватые суглинки и глины	Угол внутреннего трения $\phi$ , град	24	21	18	15	13	11	10
	Сцепление $c$ , кН/м <sup>2</sup>	32	26	19	15	10	7	5

**Таблица 2. Коэффициенты устойчивости откосов**

Категория автомобильной дороги	Грунты		
	песчаные с постоянной влажностью	глинистые с постоянной влажностью и песчаные с переменной влажностью	глинистые с переменной влажностью
I, II, III	1,2	1,4	1,5
IV, V	1,1	1,2	1,3

Задача расчета устойчивости откосов высоких насыпей и глубоких выемок заключается в поиске такого положения линии (поверхности) скольжения (рисунок 4), при которой получают минимальный коэффициент устойчивости, однако значение его не должно быть меньше данных, приведенных в таблице 2.

Эта задача является весьма сложной. Сложность ее заключается в том, что при расчете устойчивости откосов необходимо учитывать многочисленные факторы и требования, выполнять большое количество трудоемких расчетов для анализа каждого варианта расположения поверхности скольжения. При этом в расчетах принимается, что сползание грунта происходит по определенной (кругло-цилиндрической, плоской или составной) поверхности скольжения.

Поверхность скольжения считается:

— кругло-цилиндрической для всех связных грунтов при крутизне откоса менее  $60^\circ$  (рисунок 5а);

— плоской:

а) для несвязных грунтов;

б) для всех грунтов при крутизне откоса более  $60^\circ$  (рисунок 5б);

в) для насыпей на косогорах, если грунт основания имеет большее сопротивление сдвигу, чем грунт насыпи (рисунок 5в);

г) при обнажении откосов выемки слоев плотного грунта с кровлей, наклонной в сторону откоса (рисунок 5г);

— составной — при наличии кровли плотного слоя ниже подошвы насыпи или дна выемки (рисунок 5д).

Определение формы и центра кривой поверхности скольжения, при которой коэффициент устойчивости будет минимальным, проводится методом последовательного приближения с повторением расчета устойчивости для нескольких поверхностей с наиболее невыгодным ее положением.

В тех случаях, когда отсутствует уверенность в форме поверхности скольжения, при расчетах следует проверить устойчивость откосов по всем поверхностям скольжения и за основу взять наихудший.

Положение поверхности скольжения считается критическим:

а) если угол откоса больше  $30^\circ$ , а сопротивление сдвигу грунта не снижается по глубине. Критическая поверхность скольжения выходит через подошву откоса не заглубляясь в основание (рисунок 6а);

б) если угол откоса меньше  $30^\circ$ . Критическая поверхность скольжения выходит через подошву откоса с захватом основания (рисунки 6б, в). При наличии на некоторой глубине слоя плотных грунтов поверхность скольжения касается их кровли.

В мягких глинистых грунтах, когда глубина залегания плотных пород не превышает половины высоты откоса, следует дополнительно проводить проверку устойчивости по схеме "плоского сдвига", по составной поверхности скольжения, когда часть кривой заменяется прямой, проходящей по кровле плотных пород (рисунок 6г).

Учитывая изложенное выше, а также в соответствии с [2], расчет устойчивости откосов земляного полотна производится по методу кругло-цилиндрических поверхностей скольжения. При расположении насыпи на склонах (косогорах) поверхность скольжения принимается плоской.

В [2] расчет устойчивости откосов высоких насыпей и глубоких выемок рекомендуется производить графо-аналитическим способом, в основу которого положено, что обрушение откоса происходит по кругло-цилиндри-

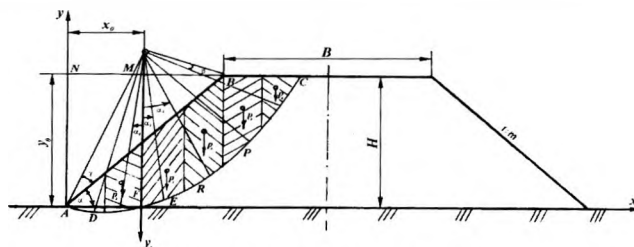


Рисунок 4. Расчетная схема

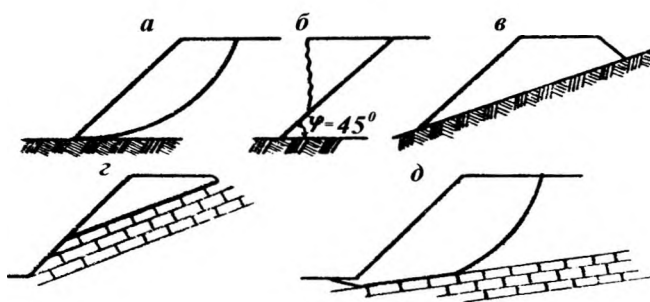


Рисунок 5. Виды поверхностей скольжения

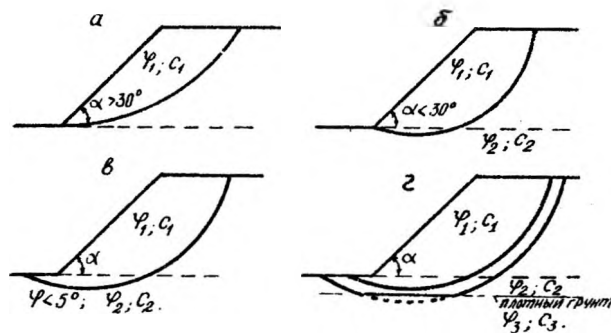


Рисунок 6. Положение поверхности скольжения в зависимости от угла откоса

ческой поверхности скольжения; наиболее опасный центр поверхности скольжения находится по графику Н. Ямбу. Недостатком данного метода является зависимость точности расчета коэффициента устойчивости от количества блоков, которые должны быть примерно одинаковой ширины, но не более 2–3 м, а также длительность расчета во времени.

Авторами разработан аналитический метод расчета коэффициента устойчивости откосов земляного полотна:

— при расположении насыпи на горизонтальном участке, когда обрушение откоса происходит по кругло-цилиндрической поверхности скольжения;

— то же, но обрушение происходит по плоской поверхности скольжения;

— при расположении насыпи на косогоре круче 1:3, когда обрушение происходит по поверхности контакта;

— когда насыпь подтопляется водой и обрушение происходит по кругло-цилиндрической поверхности скольжения;

— для насыпи высотой более 6 м, с переменным заложением откоса; обрушение может произойти как по кругло-цилиндрической, так и по плоской поверхности скольжения;

— с учетом воздействия внешней нагрузки от транспортных средств.



где  $l$  — принимаемое расстояние между шкалой  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ .

Номограмма для определения грунта призмы обрушения построена по уравнению

$$V = V_1 + V_2 = \frac{1}{2}eH + \frac{2}{3}ah, \quad (10)$$

где  $V_1$  — объем грунта, ограниченный треугольником, м<sup>3</sup>;  
 $V_2$  — объем грунта, ограниченный сегментом, м<sup>3</sup>;  
 $H$  — высота насыпи или глубина выемки, м;  
 $e$  — расстояние от бровки земляного полотна до места выхода кривой скольжения, м;  
 $a$  — основание сегмента или длина хорды кривой скольжения, м;  
 $h$  — высота сегмента, м.

Иными словами, объем грунта призмы обрушения состоит из двух частей: первая — объем, ограниченный треугольником, вторая — объем, ограниченный сегментом с основанием  $a$  и высотой  $h$ .

Следовательно, для определения объема призмы грунта обрушения необходимо построить две номограммы: одну — для определения  $V_1$ , а вторую — для определения  $V_2$ .

В уравнении (10) объем грунта призмы обрушения, ограниченный треугольником, равен

$$V_1 = \frac{1}{2}eH. \quad (11)$$

Приведем данные уравнения (11) к уравнению (6), для чего уравнение прологарифмируем:

$$\lg V_1 = \lg H + \lg e - \lg 2. \quad (12)$$

Обозначим:

$$f_1(\alpha_1) = \lg H; \quad f_2(\alpha_2) = \lg e - \lg 2; \quad f_3(\alpha_3) = \lg V_1.$$

Тогда получим:

$$f_3(\alpha_3) = f_1(\alpha_1) + f_2(\alpha_2). \quad (13)$$

Уравнение (11) приняло вид (13) и согласуется с уравнением (6). Следовательно, уравнение (11) можно изобразить номограммой с тремя параллельными шкалами. Найдем уравнение шкал для независимых переменных  $H$  и  $e$ , приняв, что высота насыпи изменяется от 1 до 25 м, а расстояние от бровки земляного полотна до места выхода кривой скольжения составляет от 0,1 до 15,0 м.

В уравнение шкалы (7) для  $H$  в общем виде подставим вместо функции  $f_1(\alpha_1)$  ее значение

$$y_1 = k \lg H + P.$$

Определим модуль  $k$  и ориентировочный коэффициент  $P$  с таким расчетом, чтобы в начале шкалы иметь насыпь высотой 1 м, а в конце — 25 м, причем высота шкалы номограммы равна 25 см:

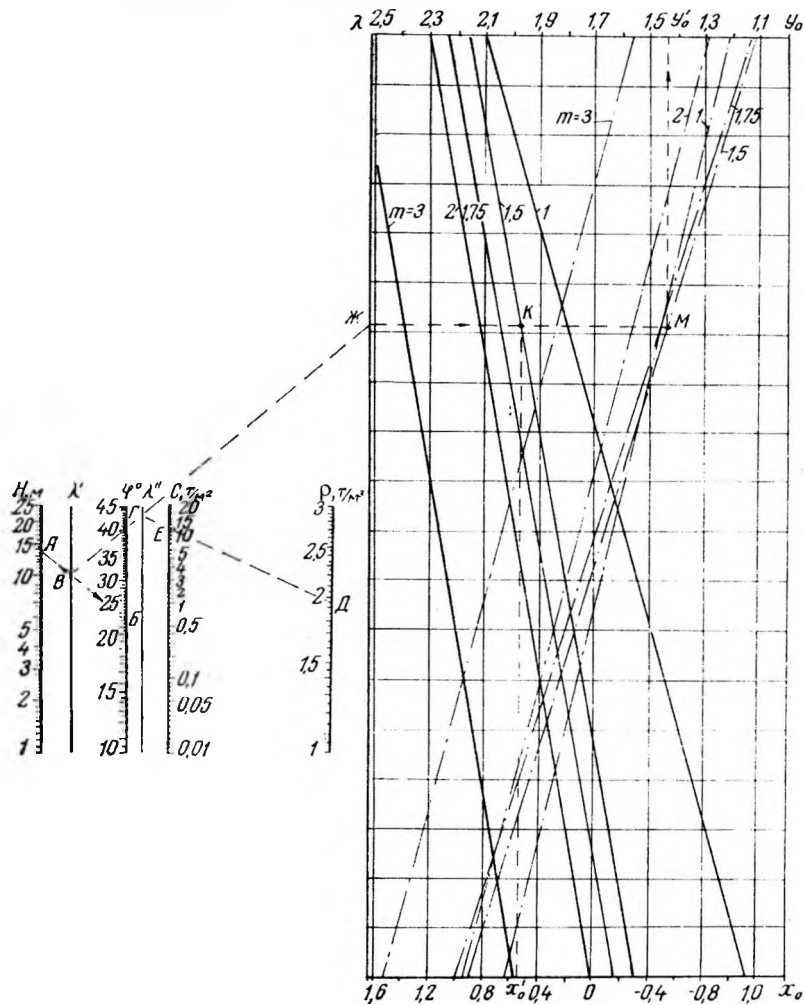


Рисунок 8. Номограмма для определения вспомогательных координат центра кривой скольжения  $x_0$  и  $y_0$

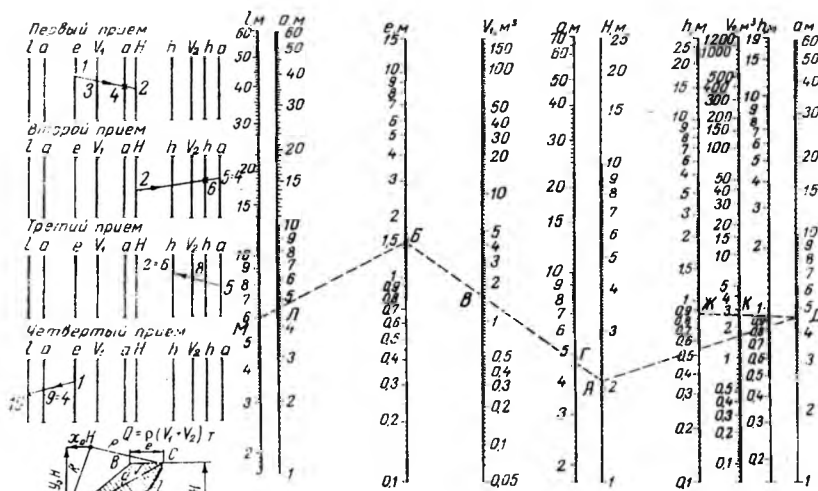


Рисунок 9. Номограмма для определения объема грунта призмы обрушения и длины кривой скольжения при  $m = 1,5$

$$0 = k \lg 1 + P \quad P = 0;$$

$$25 = k \lg 25 + P \quad k = 17,85.$$

Уравнение шкалы (7) для  $H$  примет вид

$$y_1 = 17,85 \lg H. \quad (14)$$

Аналогично находим уравнения для шкал  $e$  и  $V_1$ :

$$y_2 = 11,5 \lg e + 11,5, \quad (15)$$

$$y_3 = 7 \lg V_1 + 9,15. \quad (16)$$

По выведенным уравнениям (14)–(16) построены соответствующие шкалы ( $H$ ,  $e$ ,  $V_1$ ), представленные на рисунке 9.

Таким образом, по данной номограмме с тремя параллельными шкалами по известным  $H$  и  $e$  можно определить объем грунта  $V_1$ , ограниченный треугольником. Для определения объема  $V_2$ , ограниченного сегментом, также построена номограмма с тремя параллельными шкалами  $a$ ,  $h$  и  $V_2$ .

Уравнения шкал для  $a$ ,  $h$ ,  $V_2$  и  $l$  (длина кривой скольжения) получены способом, описанным выше.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА УСТОЙЧИВОСТИ С ПОМОЩЬЮ НОМОГРАММ

1. По номограмме (рисунок 8) в зависимости от высоты насыпи  $H$ , удельного сцепления  $c$ , угла внутреннего трения  $\varphi$ , плотности грунта  $\rho$  и заложения откоса  $m$  определяем вспомогательные координаты центра кривой скольжения  $x_0$  и  $y_0$ .

2. Определяем координаты наиболее опасной кривой скольжения для заданной высоты насыпи или глубины выемки по формулам:

$$x = x_0 H,$$

$$y = y_0 H.$$

3. Вычерчиваем в масштабе поперечный профиль насыпи и определяем место положения центра кривой скольжения. Из центра через подошву откоса проводим кривую скольжения и замеряем расстояние от бровки земляного полотна до места выхода кривой скольжения.

4. В зависимости от  $e$ ,  $H$ ,  $m$  по номограмме определяем объем грунта призмы обрушения  $V$  и длину кривой скольжения  $l$ .

5. Зная объем грунта призмы обрушения, определяем ее вес по формуле

$$Q = \rho(V_1 + V_2),$$

где  $V_1$ ,  $V_2$  — объемы грунта, определяемые по номограмме рисунка 9, м<sup>3</sup>;  
 $\rho$  — плотность грунта, т/м<sup>3</sup>.

6. Координаты центра тяжести призмы обрушения  $x_c$  и  $y_c$  находим по формулам [3].

7. Определяем угол наклона касательной, проведенной через точку приложения равнодействующей сдвигающих сил, по формуле

$$\operatorname{tg} \Theta = \frac{0,5 H \rho \cdot \operatorname{tg} \varphi + c}{\rho(l - 0,5 H m) y_c},$$

где  $c$  — удельное сцепление, т/м<sup>2</sup>;  
 $\varphi$  — угол внутреннего трения, град.

8. Определяем коэффициент запаса устойчивости

$$K = \frac{\varphi}{\Theta} + \frac{c l}{Q \sin \Theta}.$$

Таким образом, предложенная методика позволяет находить довольно просто минимальное значение коэффициента устойчивости.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Откосы земляного полотна разрушаются, главным образом, под воздействием климатических факторов, при неправильном подборе грунтов и их отсыпкой в насыпь, недостаточном уплотнении, несоблюдении водно-теплого режима. Разрушение происходит с разной интенсивностью в зависимости от свойств грунтов и климатических условий.

2 Для предотвращения разрушения откосов применяют различные защитные устройства, которые можно объединить в следующие группы [4]:

— укрепление грунтов откоса — засев трав и создание дернового покрова, посадки кустарника, обработка грунта органическими вяжущими;

— защитные одежды из дерна и древесных материалов — одерновка (одежды из дерна) плашмя, в стенку, в клетку, в плетневых клетках, хворостяная выстилка, хворостяные плиты, фашинные укрепления;

— защитные одежды из каменных материалов — покрытие камнем одиночное или двойное, а также мощение в плетневых клетках, устройство асфальтобетонного слоя, каменная наброска, такая же наброска в плетневых клетках и габионы, каменная и бетонная кладки разных видов, бетонные и железобетонные плиты.

3 Многие из перечисленных методов укрепления трудоемки в изготовлении и требуют ручной работы (одерновка, фашины, мощение), поэтому их применение ограничивается.

Предпочтение отдается укреплению откосов из железобетонных сборных плит благодаря возможности получить укрепления практически любой прочности для защиты откосов от всех воздействий, а также хорошему внешнему виду.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вырко Н.П. Определение устойчивости откосов высоких насыпей и глубоких выемок с помощью ЭВМ. — Мир-2. / Н.П. Вырко, И.И. Леонович, В.А. Гончарова, Л.И. Гром. — Мн., 1978. — 53 с.
2. Пособие П2-01 к СНиП 2.05.02-85 Проектирование земляного полотна автомобильных дорог. — 147 с.
3. Леонович И.И. Механика земляного полотна / И.И. Леонович, Н.П. Вырко. — Мн.: Наука и техника, 1975. — 232 с.
4. Бируля А.К. Проектирование автомобильных дорог. — М.: Научно-техническое издательство министерства автомобильного транспорта и шоссейных дорог РСФСР. — 1961. — 500 с.

Статья поступила в редакцию 26.06.06.