

УДК 625.725

Корольков Р.О., канд. техн. наук, Шилін І.В., канд. техн. наук

ВИКОРИСТАННЯ ПРОГРАМНОГО МОДУЛЯ SCAD ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ СТІЙКОСТІ АРМОВАНИХ УКОСІВ НАСИПІВ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ

Анотація. У статті, на конкретному прикладі, розглянута методика розрахунку армування геосинтетичними матеріалами укосів насипів автомобільних доріг. Також виконана перевірка стійкості армованої споруди методом скінчених елементів за допомогою програмного комплексу SCAD.

Ключові слова: геосинтетичні матеріали, автомобільна дорога, армована споруда, метод скінчених елементів, розрахункова схема, стійкість укосу.

Аннотация. В статье, на конкретном примере, рассмотрена методика расчета армирования геосинтетическими материалами откосов насыпей автомобильных дорог. Также выполнена проверка устойчивости армированного сооружения методом конечных элементов с помощью программного комплекса SCAD.

Ключевые слова: геосинтетические материалы, автомобильная дорога, армированное сооружение, метод конечных элементов, расчетная схема, устойчивость откоса.

Annotation. In the article, on a concrete example, the method of calculation of re-enforcement of slopes of embankments of highways geosynthetic materials is considered. Verification of stability of the reinforced building of eventual elements a method is also executed by a programmatic complex SCAD.

Keywords: geosynthetic materials, highway, reinforced building, method of eventual elements, calculation chart, stability of slope.

Актуальність. Підходи до штучних споруд на автомобільних дорогах (мости, шляхопроводи, транспортні розв'язки) представляють собою високі насипи. Будівництво цих споруд все частіше відбувається в стиснених умовах (сільхозгосподарські землі, міська забудова тощо), тому забезпечення стійкості високих армованих насипів з закладанням укосів від 1:0,577 до 1:0,364 є актуальною проблемою.

Актуальність забезпечення стійкості насипів обґрунтовується також ускладненням умов будівництва та експлуатації автомобільних доріг (зростання осьових навантажень, швидкостей руху, інтенсивності транспортного потоку); зміною структури і властивостей ґрунтів внаслідок впливу природних факторів та зовнішніх навантажень.

Як свідчить практика, існують випадки руйнування армоґрунтових конструкцій. Це пов'язано з недостатнім вивченням процесів взаємодії ґрунту насипу та армуючого прошарку, а також неможливість в методиці розрахунку армування врахувати всі фактори, що впливають на довговічність конструкції при експлуатації автомобільної дороги. Одним зі шляхів підвищення достовірності вибраної методики конструювання армованих насипів є моделювання та перевірка стійкості конструкції в програмному модулі SCAD.

В якості прикладу розглянемо розрахунок армування насипу [1] при наступних вихідних даних:

Висота насипу – 5 м;

Закладання укосу – 1:0,5;

Кут внутрішнього тертя ґрунту насипу – 35°;

Питоме зчеплення ґрунту насипу – 10 кН/м²;

Питома вага ґрунту насипу – 20 кН/м³;

Інтенсивність зовнішнього навантаження – 0 кН/м²;

Ширина насипу по верху – 14,5 м;

Частковий коефіцієнт запасу на навантаження – 1,0;

Частковий коефіцієнт довговічності – 1,1;

Частковий коефіцієнт на пошкодження при вкладанні для піску – 1,2;

Частковий коефіцієнт запасу – 1,1;

Частковий коефіцієнт на повзучість матеріалу армування – 5,0.

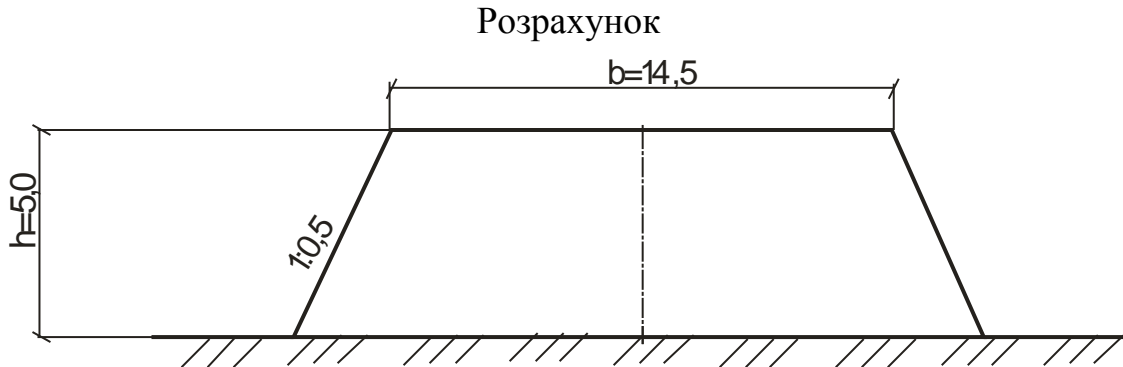


Рисунок 1 – Розрахункова схема для визначення необхідного армування

1. Розраховують нахил поверхні ковзання армованого насипу:

$$\operatorname{ctg} \theta_1 = -\frac{2f_{ds} \cdot \operatorname{tg} \phi - \operatorname{ctg} \phi \cdot \operatorname{ctg} \delta}{2} + \sqrt{\frac{(2f_{ds} \cdot \operatorname{tg} \phi - \operatorname{ctg} \phi \cdot \operatorname{ctg} \delta)^2}{4} + f_{ds} (1 + \operatorname{ctg} \delta)} \quad (1)$$

$$\operatorname{ctg} \theta_1 = -\frac{2 \cdot 0,7 \cdot \operatorname{tg} 35^\circ - \operatorname{ctg} 35^\circ \cdot \operatorname{ctg} 63,4^\circ}{2} + \sqrt{\frac{(2 \cdot 0,7 \cdot \operatorname{tg} 35^\circ - \operatorname{ctg} 35^\circ \cdot \operatorname{ctg} 63,4^\circ)^2}{4} + 0,7 (1 + \operatorname{ctg} 63,4^\circ)} = 0,9002$$

2. Критичний кут ковзання армованого укосу насипу θ_{\max} :

$$\theta_{\max} = \operatorname{arcc} \operatorname{tg} \theta_1.$$

(2)

$$\theta_{\max} = \operatorname{arcc} \operatorname{tg} 0,9002 = 48,01^\circ.$$

3. Загальне армуюче зусилля T_a , яке необхідне для забезпечення заданої внутрішньої стійкості укосу, визначають за формулою:

$$T_a = \frac{\gamma \cdot H^2 \cos \theta_{\max} \cdot \sin \theta_{\max} (1 - \operatorname{ctg} \delta \cdot \operatorname{tg} \theta_{\max} - \operatorname{tg} \phi \cdot \operatorname{ctg} \theta_{\max} + \operatorname{tg} \phi \cdot \operatorname{ctg} \delta)}{2 \cdot \sin \theta_{\max} (\cos \theta_{\max} + f_{ds} \cdot \operatorname{tg} \phi \cdot \sin \theta_{\max})}$$

(3)

$$T_a = \frac{20 \cdot 5^2 \cos 48,01^\circ \cdot \sin 48,01^\circ (1 - \operatorname{ctg} 63,43^\circ \cdot \operatorname{tg} 48,01^\circ - \operatorname{tg} 35^\circ \cdot \operatorname{ctg} 48,01^\circ + \operatorname{tg} 35^\circ \cdot \operatorname{ctg} 63,43^\circ)}{2 \cdot \sin 48,01^\circ (\cos 48,01^\circ + 0,7 \cdot \operatorname{tg} 35^\circ \cdot \sin 48,01^\circ)} =$$

$$= 26,096 \text{ кН}$$

До розрахунку приймаємо розрахункове значення армуючого зусилля з врахуванням значення мінімально допустимого коефіцієнта стійкості армованого укосу $[K_R]$ і коефіцієнта надійності на метод розрахунку (k_{nd}):

$$T_{a\text{ роз}} = [K_R] k_{nd} T_a, \quad (4)$$

де $[K_R]$ – мінімально допустимий коефіцієнт стійкості армованого укосу згідно з [2] (для доріг I і II категорій – 1,5; III і IV – 1,3);

k_{nd} – коефіцієнт надійності на метод розрахунку $k_{nd} = 1,5$.

$$T_{a\text{ роз}} = 1,5 \cdot 1,5 \cdot 26,096 = 58,717 \text{ кН}$$

4. Розраховують необхідну кількість армуючих геосинтетичних прошарків:

$$N_{\text{арм}} = \frac{T_{a\text{ роз}}}{T_D}. \quad (5)$$

$$N_{\text{арм}} = \frac{58,717}{7,58} = 7,746 \approx 8.$$

5. Визначають глибину вертикальної тріщини відриву:

$$h_{90} = \frac{2 \cdot c}{\gamma} \operatorname{ctg} \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right). \quad (6)$$

$$h_{90} = \frac{2 \cdot 10}{20} \operatorname{ctg} \left(45^\circ - \frac{35^\circ}{2} \right) = 1,92 \text{ м.}$$

6. Розраховують відстань між армуючими прошарками:

$$d_a = \frac{H - 0,5 \cdot h_{90}}{N_{\text{арм}}}. \quad (7)$$

$$d_a = \frac{5 - 0,5 \cdot 1,92}{8} = 0,505 \text{ м.}$$

Перший прошарок від поверхні насипу розміщують на глибині $0,5h_{90}$ (0,96 м), а перший від основи насипу – на відстані $d_a = 0,5$ м, далі прошарки розподіляють рівномірно по висоті насипу та визначають глибину їх закладання (z_i) від поверхні насипу.

7. Розподіляють прошарки рівномірно по висоті насипу та визначають глибину їх закладання (z_i) від поверхні насипу.

$$z_1=0,96 \text{ м}; z_2=1,47 \text{ м}; z_3=1,98 \text{ м}; z_4=2,49 \text{ м}; z_5=3 \text{ м}; z_6=3,5 \text{ м}; z_7=4 \text{ м}; z_8=4,5 \text{ м}.$$

8. Знаходять кут біля вершини насипу β :

$$\begin{aligned} \beta &= 90 - \delta. \\ \beta &= 90 - 63,4 = 26,6^\circ. \end{aligned} \quad (8)$$

9. Розраховують вертикальне напруження σ_{z_i} з врахуванням технології спорудження насипу та стадійного укладання армуючих геосинтетичних прошарків:

$$\sigma_{z_i}^* = \frac{\rho g}{\text{ctg } \beta + \beta + \frac{\pi}{2}} \left\{ -z_i \cdot \left[\beta \cdot (1 + 2 \sin^2 \beta \cos^2 \beta) + \cos^2 \beta \text{ctg } \beta + \frac{\pi}{2} \sin^2 \beta \right] + \right. \\ \left. + 2 \cos^4 \beta (z_i \cdot \text{tg } \beta) \ln(\text{tg } \beta) - 2 \sin \beta \cos^3 \beta (z_i \cdot \text{tg } \beta) \times \text{arctg}(\text{ctg } \beta) \right\}; \quad (9)$$

$\sigma_{z_1} = -15,51878$ МПа; $\sigma_{z_2} = -23,76313$ МПа; $\sigma_{z_3} = -32,00748$ МПа; $\sigma_{z_4} = -40,25183$ МПа; $\sigma_{z_5} = -48,49618$ МПа; $\sigma_{z_6} = -56,57887$ МПа; $\sigma_{z_7} = -64,66157$ МПа; $\sigma_{z_8} = -72,74427$ МПа.

10. Розраховують довжину анкерування армуючого прошарку у стійку частину насипу:

$$L_{\text{анк}} \geq 1 + \frac{T_{Di} \cdot [K_R]}{2 \cdot f_{ds-g} \cdot \sigma_z^* \cdot \text{tg } \phi}, \quad (10)$$

$L_{\text{анк}1} = 1,747392$ м; $L_{\text{анк}2} = 1,488092$ м; $L_{\text{анк}3} = 1,362372$ м; $L_{\text{анк}4} = 1,288151$ м; $L_{\text{анк}5} = 1,239165$ м; $L_{\text{анк}6} = 1,204999$ м; $L_{\text{анк}7} = 1,179374$ м; $L_{\text{анк}8} = 1,159444$ м.

11. Розраховують довжину геосинтетичного прошарку у призмі обвалення:

$$L_{\text{пр.обв}} = X_\theta - X_\delta, \quad (11)$$

де X_θ – горизонтальна проекція лінії ковзання на рівні закладення армуючого прошарку;

X_δ – горизонтальна проекція лінії укосу на рівні закладення армуючого прошарку.

$$X_\theta = \frac{h_{ai}}{\text{tg } \theta}, \quad (12)$$

де h_{ai} – висота закладення армуючого прошарку.

$$X_{\delta} = \frac{h_{ai}}{\operatorname{tg} \delta}. \quad (13)$$

$L_{\text{пр.обв.1}}=1,61679201$ м; $L_{\text{пр.обв.2}}=1,41269203$ м; $L_{\text{пр.обв.3}}=1,20859205$ м;
 $L_{\text{пр.обв.4}}=1,00449207$ м; $L_{\text{пр.обв.5}}=0,80039209$ м; $L_{\text{пр.обв.6}}=0,60029406$ м;
 $L_{\text{пр.обв.7}}=0,40019604$ м; $L_{\text{пр.обв.8}}=0,20009802$ м

12. Розраховують загальну довжину армування для кожного геосинтетичного прошарку:

$$L_{\text{арм}} = L_{\text{анк}} + L_{\text{пр.обв}} + L_{\text{об}}, \quad (14)$$

де $L_{\text{анк}}$ – довжина анкерування геосинтетичного прошарку;

$L_{\text{пр.обв}}$ – довжина геосинтетичного прошарку у призмі обвалення на рівні його закладання;

$L_{\text{об}}$ – довжина геосинтетичного прошарку, яка передбачається на влаштування обойми (коли за проектом не передбачено влаштування обойм, то $L_{\text{об}} = 0$).

$L_{\text{заг.1}}=3,36$ м; $L_{\text{заг.2}}=2,90$ м; $L_{\text{заг.3}}=2,57$ м; $L_{\text{заг.4}}=2,29$ м; $L_{\text{заг.5}}=2,04$ м; $L_{\text{заг.6}}=1,81$ м; $L_{\text{заг.7}}=1,58$ м; $L_{\text{заг.8}}=1,36$ м.

13. Перевіряють необхідну кількість армуючих прошарків за умови виключення проковзування ґрунту над (під) або між армуючими елементами в активній зоні насипу:

$$T_{\text{зсув}} > k'_{\text{акт}} d_a \sigma_z^*, \quad (15)$$

де $T_{\text{зсув}}$ – сила опору армуючих прошарків із умови проковзування ґрунту над або між ними;

$k'_{\text{акт}}$ – коефіцієнт активного бокового тиску для насипу з кутом закладання укосу δ ;

σ_z^* – тут нормальне напруження на рівні армування.

$$T_{\text{зсув}} = L_{\text{пр.обв}} \cdot B_{\text{пр.обв}} \cdot \tau_{\text{зсув}}, \quad (16)$$

де $B_{\text{пр.обв}}$ – ширина геосинтетичного прошарку у призмі обвалення;

$\tau_{\text{зсув}}$ – опір зсуваючим зусиллям.

$$\tau_{зсув} = \sigma_z^* f_{ds} \operatorname{tg} \phi. \quad (17)$$

$$k'_{акт} = \frac{[\operatorname{tg}(90 - \theta) - \operatorname{tg}(90 - \delta)] \cdot \sin(\theta - \phi)}{\sin(\delta - \theta + \phi)}. \quad (18)$$

$$k'_{акт} = \frac{[\operatorname{tg}(90 - 48,01) - \operatorname{tg}(90 - 63,34)] \cdot \sin(48,01 - 35)}{\sin(63,34 - 48,01 + 35)} = 0,1168.$$

$T_{зсув1} = 12,29806$ МПа; $T_{зсув2} = 16,45417$ МПа; $T_{зсув3} = 18,96077$ МПа;
 $T_{зсув4} = 19,81787$ МПа; $T_{зсув5} = 19,02546$ МПа;
 $T_{зсув6} = 16,64728$ МПа; $T_{зсув7} = 12,68364$ МПа; $T_{зсув8} = 7,134547$ МПа.
 $\tau_{зсув1} = 0,91562$ МПа; $\tau_{зсув2} = 1,402042$ МПа; $\tau_{зсув3} = 1,888465$ МПа; $\tau_{зсув4} =$
 $2,374888$ МПа; $\tau_{зсув5} = 2,861311$ МПа; $\tau_{зсув6} = 3,338196$ МПа;
 $\tau_{зсув7} = 3,815081$ МПа; $\tau_{зсув8} = 4,291967$ МПа.

Так як $T_{зсув} > \tau_{зсув}$ для всіх обріїв армування, робимо висновок, що кількість армуючих прошарків достатня за умови виключення проковзування ґрунту над (під) або між армуючими елементами в активній зоні насипу.

Для перевірки відповідності розрахункової схеми та армування, використовуємо програму SCAD. За допомогою якої перевіримо стійкість системи армований насип – основа по деформаціям та напруженням.

Прийняті жорсткості:

Основа

Ґрунт – супісок не пилюватий: модуль пружності $E = 180$ МПа ($18348,62$ т/м²), коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,3$, питома вага $\gamma = 1,7$ т/м³.

Насип

Ґрунт – супісок пилюватий: модуль пружності $E = 42$ МПа ($4281,35$ т/м²), коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,33$, питома вага $\gamma = 2,0$ т/м³.

Геотекстиль

Polyfelt TS50: модуль пружності $E = 27,5 \cdot 10^2$ МПа ($2803261,97757$ т/м²), коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,33$, питома вага $\gamma = 0,1$ т/м³, товщина $0,002$ м.

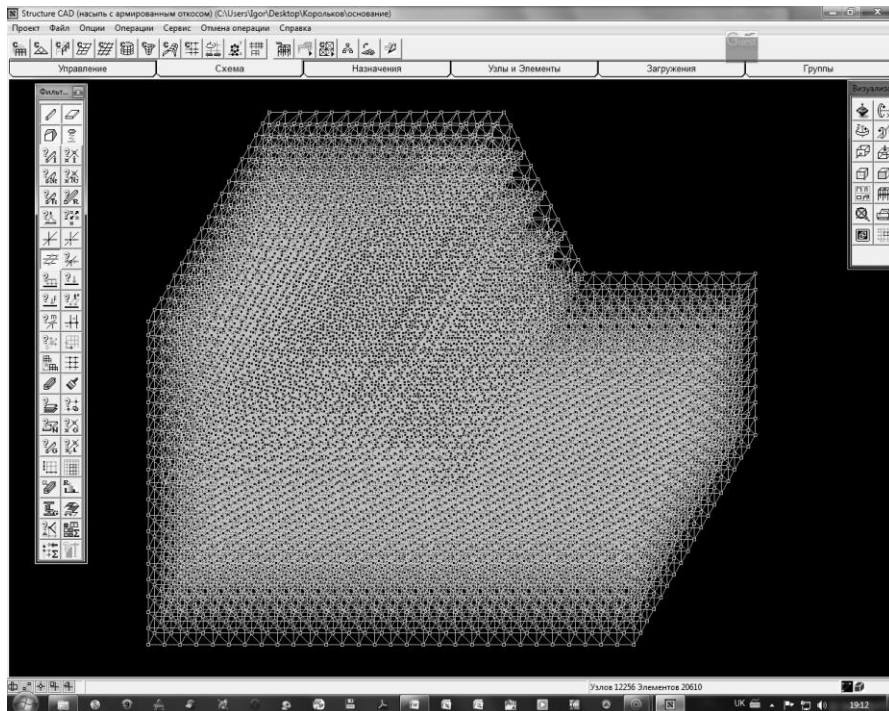


Рисунок 4 – Розрахункова схема

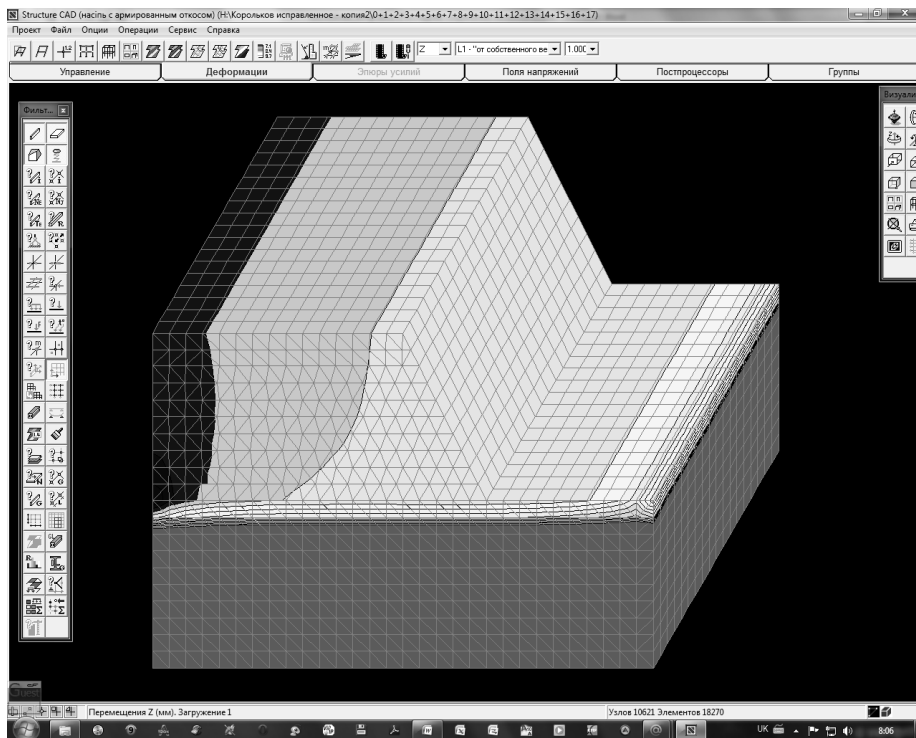


Рисунок 5 – Деформації по осі Z

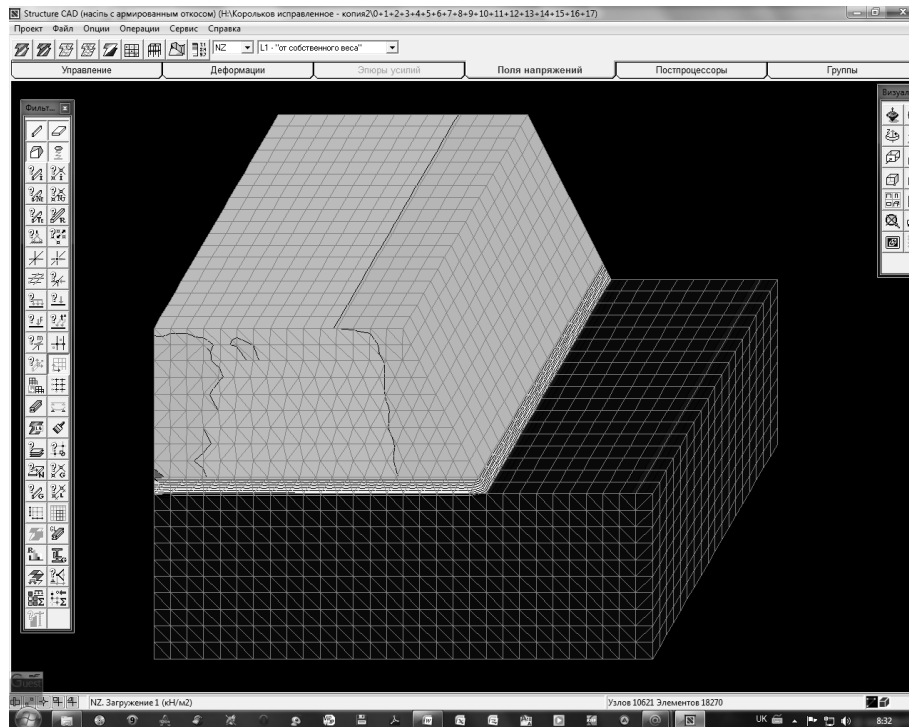


Рисунок 6 – Поля напряжень по NZ

Наведені епюри свідчать про те, що стійкість насипу забезпечена, деформації що виникають, не ведуть до руйнування насипу.

Висновок

Отримані результати свідчать про те, що запропонована методика дозволяє обґрунтувати інженерні рішення з армування укосів насипів автомобільних доріг. За допомогою числового моделювання із застосуванням метода скінченних елементів підтверджено достовірність розробленої методики.

Література

1. Корольков Р.О. Методика розрахунку необхідного армування для стабілізації укосів насипів з урахуванням зміни напруженого стану при їх спорудженні / Р.О. Корольков // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – 2010. – Вип. 78. – С. 23–30.
2. Споруди транспорту. Матеріали геосинтетичні в дорожньому будівництві: ВБН В.2.3-218-544:2008. – К.: Укравтодор, 2008. – 126 с.