

УДК 624.131; 624.137.2

ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ СПОРУД ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТІЙКОСТІ ЗСУВОНЕБЕЗПЕЧНИХ СХИЛІВ, АРМОВАНИХ ГЕОСИНТЕТИЧНИМИ МАТЕРІАЛАМИ

А. І. Білеуш[†], В. Л. Фрідріхсон, О. І. Кривоног,
В. В. Кривоног, П. Ю. Романенко

*Інститут гідромеханіки НАН України
вул. Марії Капніст, 8/4, 03057, Київ, Україна*

[†]*E-mail: igmggs@ukr.net*

Отримано 03.12.2018

Зсуви ґрунтів належать до класу найбільш небезпечних явищ у зонах забудови природних схилів. Вони можуть призводити до руйнування споруд і людських жертв. Тому обґрунтування захисних заходів з метою підвищення стійкості схилів має велике практичне значення. У статті наведено результати досліджень нових конструкцій протизсувних споруд для закріплення зсувонебезпечних схилів, армованих геосинтетичними матеріалами. Вони можуть виконувати декілька функцій, а саме: сприймати зсувне навантаження ґрунту схилу як підтримуюча споруда, виконувати функцію відведення води як дренажна споруда. За допомогою експериментального стенду проведено фізичне моделювання роботи запропонованих конструкцій у вигляді свердловин або виїмок. Паралельно розроблено математичну модель та промодельовано в двовимірній постановці роботу ґрунтоармованих конструкцій у схилах з урахуванням змінних властивостей ґрунтів. Виконано розрахунки в програмних середовищах Mathcad 15 і PLAXIS 2D. Отримано прийнятний для інженерних потреб ступінь збігу експериментальних і числових даних, а також розрахунків за обома методиками. Встановлено, що розроблені конструкції зменшують деформації в два–чотири рази в порівнянні з незакріпленим схилом, залежно від товщини ґрунтоармуючого елемента. Отже, проведення таких заходів значно підвищує стійкість схилів, у тому числі, ослаблених пластичними глинистими прошарками. Показано, що ґрунтозахисні конструкції у формі розташованих в ряд армованих геотекстилем виїмок здатні ефективно протидіяти зсувам. Це дозволяє скоротити витрати на будівництво, в порівнянні з традиційними інженерними рішеннями, не знижуючи вимог до безпеки споруд. Таким чином, продемонстровано доцільність використання геосинтетичних матеріалів у практиці закріплення зсувонебезпечних схилів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: *конструкції протизсувних споруд, геосинтетичні матеріали, зсувонебезпечні схили, математична модель*

1. ВСТУП

Схили та прилеглі до них території розподіляють на зсувні та зсувонебезпечні. На складених глинистими чи суглинистими ґрунтами схилах з середнім ухилом понад 5° за певних умов можуть розвиватись зсувні явища [1]. Такі території вважають зсувонебезпечними. У їхніх межах зсувні деформації на момент обстеження відсутні, але можуть проявитись у результаті геологічних та інженерно-геологічних процесів під дією природних чи техногенних факторів. Зсувними вважають такі території, де зсувні деформації розвиваються в активній фазі, або вони мали місце в недалекому минулому [2, 3].

Інтенсивне будівництво на зсувонебезпечних територіях у межах міст України без урахування факторів, які змінюють інженерно-геологічні особливості та гідрогеологічний режим ділянок забудови, може призвести до порушення стійкості та розвитку зсувних процесів на зсувонебезпечних схилах. Забудова підземного простору зсувонебезпечних схилів практично завжди викликає підйом рівнів ґрунтових вод перед огорожувальними конструкціями котлованів і фундаментами з паль, що значно впливає на стійкість схилів [2, 4, 5].

Серед багатьох факторів, які можуть вплинути на стійкість зсувонебезпечного схилу, можна виділити два основних:

- зміна напруженого стану в товщі ґрунтів схилів за рахунок ваги споруд при їх забудові, що призводить до збільшення дотичних зсувних напружень;
- зниження характеристик міцності ґрунтів і збільшення гідродинамічного тиску під впливом підняття рівня підземних вод.

Проблему забезпечення стійкості зсувонебезпечних схилів в залежності від діючих природних та техногенних факторів вирішують за допомогою інженерних заходів, зокрема з рахунок різного типу протизсувних споруд. Зазвичай їх улаштовують у комплексі, де кожна з них виконує свою роль. Наприклад, утримуючі та підтримуючі споруди сприймають на себе зсувне навантаження ґрунту схилу. Дренажні споруди стабілізують або понижують рівні ґрунтових вод, зменшують або повністю знімають гідростатичний і гідродинамічний тиск на ґрунти схилу та протизсувні споруди, а також запобігають механічній суфозії на ділянках виходу підземних горизонтів на схил. В інженерних розрахунках при оцінці ступеня підвищення стійкості зсувонебезпечних схилів дія дренажної споруди підлягає урахуванню, якщо вона підвищує коефіцієнт стійкості схилу не менш, ніж на 15% від необхідного значення [2].

На основі детального аналізу сучасних споруд для закріплення зсувонебезпечних схилів авторами було розроблено й досліджено нові конструкції протизсувних споруд, армованих геосинтетичним матеріалом. Вони можуть виконувати декілька функцій – сприймати зсувне навантаження ґрунту схилу як підтримуюча споруда й виконувати функцію відведення води як дренажна споруда.

При виконанні робіт використовувались методи фізичного та математичного моделювання. Дослідження, оцінка та аналіз пружно-деформованого стану системи «ґрунт схилу – протизсувна споруда» було проведено в лабораторних умовах з використанням методу наближеного моделювання на малорозмірних моделях у ґрунтовому лотку. Оцінку ефективності конструкцій та вибір їхніх оптимальних конфігурацій для зада-

ного типу інженерно-геологічних умов виконано на персональному комп'ютері з використанням програмних комплексів PLAXIS і Mathcad 15.

2. ПРОТИЗСУВНІ СПОРУДИ І МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ЇХ РОЗРАХУНКУ

2.1. Розробка конструкцій протизсувних споруд для закріплення схилів

Споруди для закріплення схилів улаштовують перпендикулярно до напрямку можливого зсуву у вигляді виїмок або декількох розташованих у ряд свердловин. Їхні конструктивні параметри залежать від гідрогеологічних умов території, висоти схилу та характеру забудови.

До складу конструкції входять армуюча геосинтетична сітка, нетканий захисно-фільтруючий синтетичний матеріал і заповнювач. При улаштуванні конструкції для закріплення схилів у вигляді виїмок сітку й нетканий матеріал розміщують по підшві та бічних стінках виїмки – ними обгортають заповнювач зверху, міцно з'єднуючи кінці нашаровані один на один. Заповнювачем можуть стати будь-які незв'язні ґрунти, окрім дрібнозернистих. При улаштуванні конструкцій для закріплення схилів у вигляді свердловин, кожна з них має закритий знизу трубчастий кожух. Останній складається із зовнішнього шару з тканого ізотропного синтетичного матеріалу і внутрішнього шару з нетканого синтетичного матеріалу, який заповнюють гравієм або щебенем. Верхній край кожуха має виступати над заповнювачем не менш, ніж на величину свого діаметра, і закріплюватись з нашаруванням.

Описані конструкції є об'ємно замкнутими системами, міцність яких визначається їхніми конструктивними параметрами, міцністю геосинтетичних матеріалів на розтяг і міцністю їх з'єднання. Окрім цього, на несучу здатність конструкцій впливає ґрунт заповнювача та щільність його укладання. Загальну схему конструкцій для закріплення наведено на [Рис. 1](#).

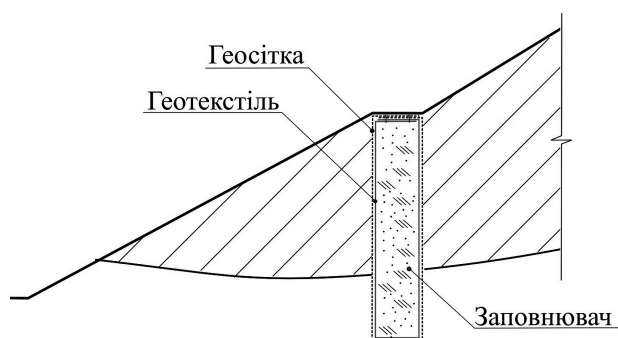


Рис. 1. Схема конструкцій для закріплення схилів

2.2. Математична модель протизсувних споруд для закріплення схилів

Розрахунок стабільності та міцності армованих геосинтетичними матеріалами протизсувних споруд складається з визначення величини їх заглиблення, діючих напружень, розмірів перерізу конструкцій, а також міцності геосітки. Приймається, що під дією зсувного тиску конструкція споруди з вільним верхнім кінцем повертається відносно нерухомої точки, розташованої нижче поверхні ковзання.

Розрахункові рівняння для визначення шуканих зусиль можуть бути отримані на основі розробок, деталі яких наведено в монографії [2]. Під дією зсувного ґрунту вертикальний ґрунтоармуючий елемент деформується. Диференціальні рівняння, які опи-

сують його деформований стан, мають вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{d^2}{dx^2} \left(D(x) \frac{d^2 y_1}{dx^2} \right) + m_c b_c \varphi_1(x) y_1 &= b_c \varphi_1(x) \delta(t), \\ \frac{d^2}{dx^2} \left(D(x) \frac{d^2 y_2}{dx^2} \right) + b_c \varphi_2(x) y_2 &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Тут y_1 і y_2 – загальні переміщення осі вертикального ґрунтоармуючого елемента на ділянці вище та нижче поверхні ковзання відповідно; b_c – ширина ґрунтоармуючого елемента; $D(x)$ – жорсткість ґрунтоармуючого елемента, що змінюється по глибині; $\delta(t)$ – переміщення зсуву в часі; $\varphi_1(x)$ – реакція ґрунту на переміщення ґрунтоармуючого елемента в зсувному ґрунті; $\varphi_2(x)$ – реакція ґрунту на переміщення ґрунтоармуючого елемента в стійких ґрунтах нижче поверхні ковзання. Коефіцієнт m_c враховує стійкість ґрунтів, які межують з ґрунтоармуючою спорудою нижче по схилу. Якщо його величина перевищує 1.5, приймається $m_c = 2$. Якщо коефіцієнт стійкості ґрунтів не перевищує одиниці, то $m_c = 1$. При значеннях коефіцієнта стійкості ґрунтів у межах від 1 до 1.5 величина m_c приймається за інтерполяцією;

Залежність реакції ґрунту на переміщення ґрунтоармуючого елемента в зсувних та стійких ґрунтах, як правило, задають у вигляді

$$\begin{aligned} \varphi_1(x) &= \frac{k_o}{(1 + a_1 x)^4}, \\ \varphi_2(x) &= \frac{k_h}{(1 + a_2 x)^4}. \end{aligned} \quad (2)$$

Підставивши залежності (2) в систему рівнянь (1), отримаємо систему рівнянь для постійної по глибині ґрунту жорсткості ґрунтоармуючого елемента $D(x)$:

$$\begin{aligned} \frac{d^4 y_1}{dx^4} + \frac{m_c k_o b_c y_1}{D(1 + g_1 x)^4} &= \frac{\delta k_o b_c}{D(1 + g_1 x)^4}, \\ \frac{d^4 y_2}{dx^4} + \frac{a_h b_c y_2}{D(1 + g_2 x)^4} &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Розв'язки рівнянь (3) отримаємо в аналітичному вигляді:

$$\begin{aligned} y_1 &= \frac{\delta}{m_c} + (1 + g_1 x)^{\alpha_1} [A_1 \cos \beta_1 \ln(1 + g_1 x) + A_2 \sin \beta_1 \ln(1 + g_1 x)] + \\ &\quad + (1 + g_1 x)^{\alpha_2} [A_3 \cos \beta_2 \ln(1 + g_1 x) + A_4 \sin \beta_2 \ln(1 + g_1 x)], \\ y_2 &= (1 + g_2 x)^{\alpha_3} [B_1 \cos \beta_3 \ln(1 + g_2 x) + B_2 \sin \beta_3 \ln(1 + g_2 x)] + \\ &\quad + (1 + g_2 x)^{\alpha_4} [B_3 \cos \beta_4 \ln(1 + g_2 x) + B_4 \sin \beta_4 \ln(1 + g_2 x)], \end{aligned} \quad (4)$$

де $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ та $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ – дійсні алгебраїчні компоненти комплексних коренів

μ_{1i} і μ_{2i} :

$$\mu_{1i} = \pm \sqrt{1.25 \pm \sqrt{1 - \frac{m_c k_o b_c}{D g_1^4}} + 1.5},$$

$$\mu_{2i} = \pm \sqrt{1.25 \pm \sqrt{1 - \frac{a_h b_c}{D g_2^4}} + 1.5};$$
(5)

$$\mu_{1(1,2)} = \alpha_1 \mp i\beta_1, \quad \mu_{1(3,4)} = \alpha_2 \mp i\beta_2, \quad \mu_{2(1,2)} = \alpha_3 \mp i\beta_3, \quad \mu_{2(3,4)} = \alpha_4 \mp \beta_4.$$

Виходячи з фізичних властивостей деформування ґрунтоармуючого елемента, сформулюємо такі граничні умови задачі:

$$y_1''' = y_1''' \quad \text{при} \quad x = 0;$$

$$y_1 = y_2, \quad y_1' = y_2', \quad y_1'' = y_2'', \quad y_1''' = y_2''' \quad \text{при} \quad x = h;$$

$$y_2''' = y_2''' \quad \text{при} \quad x = l.$$
(6)

Взявши похідні від розв'язків рівнянь (4) і підставивши їх у граничні умови задачі (6), отримуємо вісім алгебраїчних рівнянь для визначення сталих A_i і B_i .

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРУЖНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КОНСТРУКЦІЙ МОДЕЛЕЙ ПРОТИЗСУВНИХ СПОРУД

Дослідження проводили на експериментальній установці, яка складається з металевого лотка з жорсткими бічними стінками розміром $1000 \times 600 \times 200$ мм, обладнаного важливим пристроєм для передачі на модель досліджуваної конструкції навантажень до 1000 кг. Навантаження на модель передавалось через жорстку плиту розміром 180×300 мм. Загальний вигляд експериментальної установки представлено на Рис. 2.

В ролі заповнювача використовувався щебінь фракцій (5 ... 10) мм і (10 ... 20) мм. У всіх проведених досліднях для моделювання ґрунту схилу використовувався неущільнений середньозернистий пісок природної вологості с модулем деформації $E = 30$ МПа.

Навантаження на модель задавали ступенями від мінімальних до максимальних величин. Показання датчиків переміщень і зусиль фіксували після стабілізації деформацій. Деформування ґрунту схилу моделі контролювали за допомогою семи датчиків



Рис. 2. Дослідна установка під час дослідження моделей конструкції для закріплення укосів і схилів

переміщення, три з яких розташовували на схилі, а чотири – зверху і знизу плити поблизу обох стінок лотка. Переміщення верху й низу плити визначали як середнє від показань цих датчиків. Точність вимірювань становила 0.01 мм.

Після завершення кожного досліду модель конструкції повністю розбирали, а при улаштуванні наступної моделі пісок засипали без ущільнення. Тому в кожному експерименті характеристики ґрунту моделі були однаковими.



Рис. 3. Вид моделей в один (а) та два (б) ряди

штованих в один або два ряди вертикальних свердловин, які примикають одна до одної і заповнені щебенем фракції (5...10) мм в оболонках з тканого полімерного матеріалу високої міцності. Нижній кінець оболонки був зашитий, а верхній, після заповнення її ущільненим щебенем, – міцно зав'язаний. Фотографії моделей обох конструкцій представлено на Рис. 3.

На Рис. 4 зображено схему протизсувної конструкції. Для порівняння було проведено дослідження стійкості піщаного схилу аналогічної геометрії, але без застосування ґрунтозахисту (Рис. 5).

З моделями конструкцій у вигляді виїмок всіх розмірів було проведено не менше ніж по три досліди, причому для подальшої обробки брали середні значення деформацій схилу по них. На Рис. 6 наведено порівняння осереднених результатів, які свідчать про те, що розроблена нами конструкція при навантаженні 20 кН/м² зменшує деформації в два-чотири рази в порівнянні з незакріпленим схилом, залежно від товщини ґрунтоармуючого елемента.

Експерименти були проведені для незакріпленого схилу, а також на моделях конструкцій для закріплення схилів обох типів, де в товщі піску на рівні низу штампу від моделі і до підшви схилу влаштовували прошарок з пластичної глини товщиною 3 см. Таким чином імітувався схил, в якому більш міцні ґрунти розташовані над шаром пластичних глин. При цьому проводились дослідження конструкцій для закріплення схилів другого типу з одним або двома рядами вертикальних свердловин. Моделі конструкцій обох типів в один ряд представлено на Рис. 7, а на Рис. 8 – модель ослабленого прошарком глини схилу без ґрунтоармуючої конструкції. Рис. 9, на якому показано отримані результати, свідчить, що найбільш ефективно працює конструкція, яка складається з двох рядів вертикальних свердловин. При цьому деформації схилу виявились у два-три рази меншими, ніж для схилу без кріплення.

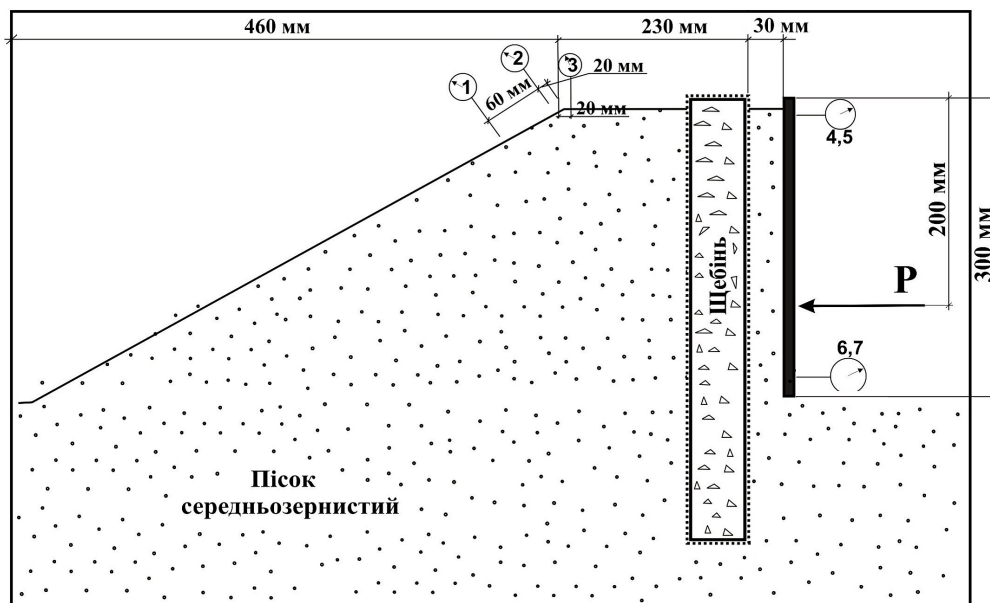


Рис. 4. Схема моделей для закріплення схилів з ґрунтоармуючими конструкціями (1–7 – датчики деформацій)

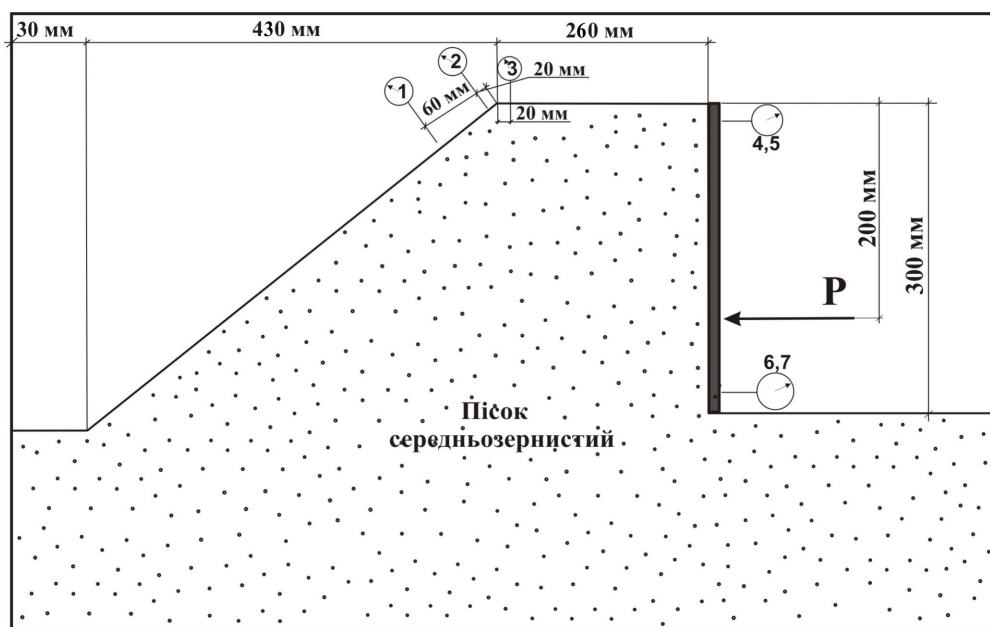


Рис. 5. Схема моделі незакріпленого схилу

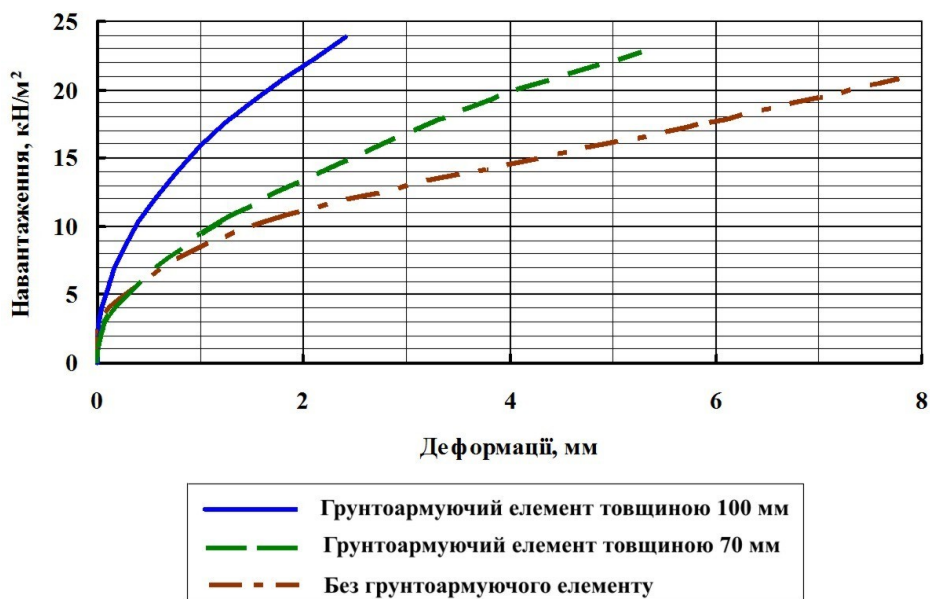


Рис. 6. Порівняння результатів досліджень моделей конструкцій для закріплення схилів у вигляді виїмок та без них (деформації – датчик 1, Рис. 4)

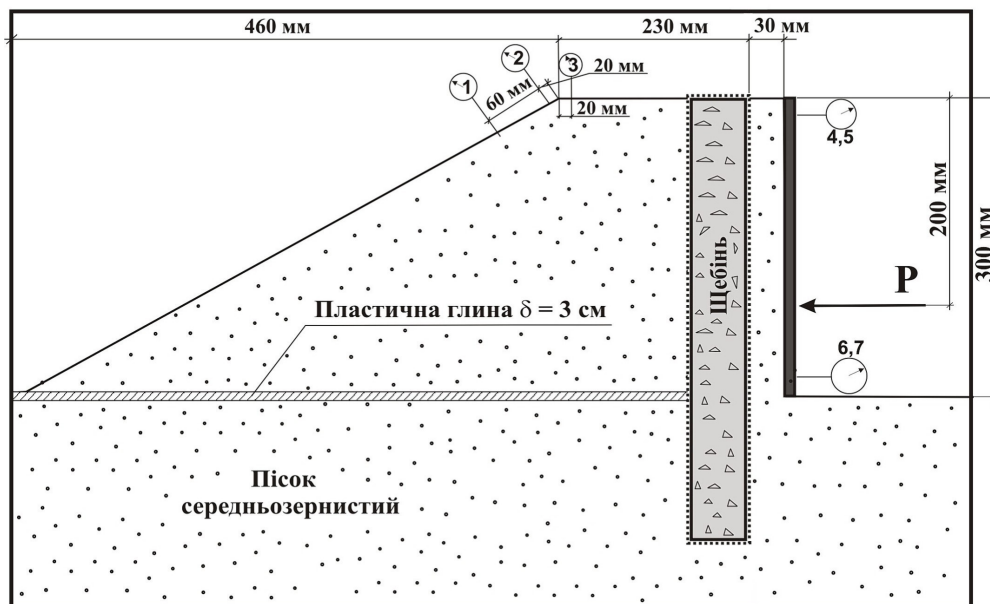


Рис. 7. Схема моделей для закріплення схилів з грунтоармуючими конструкціями і прошарком з глини (деформації – датчик 1, Рис. 4)

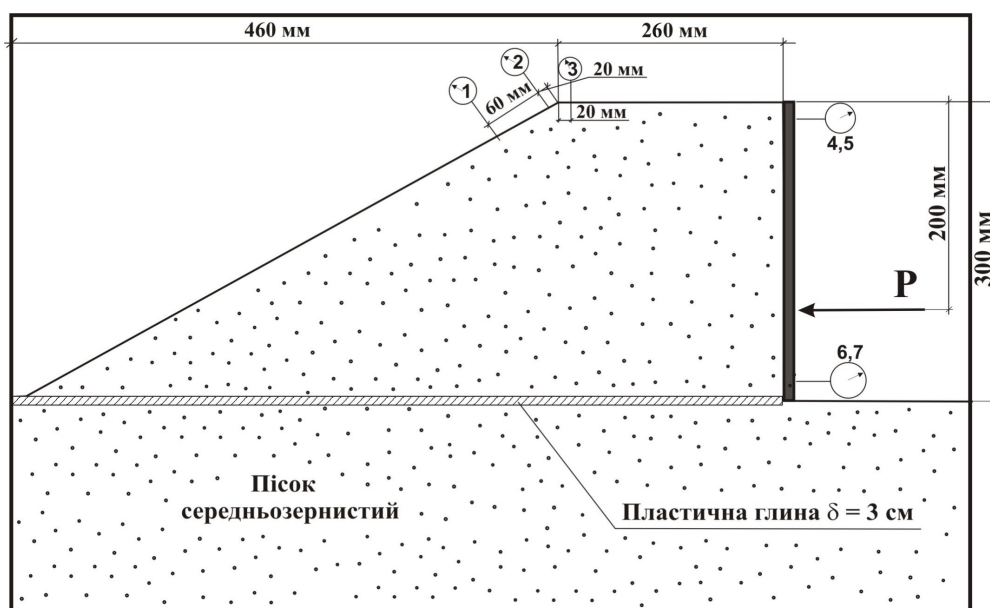


Рис. 8. Схема моделі без ґрунтоармуючої конструкції з прошарком з глини

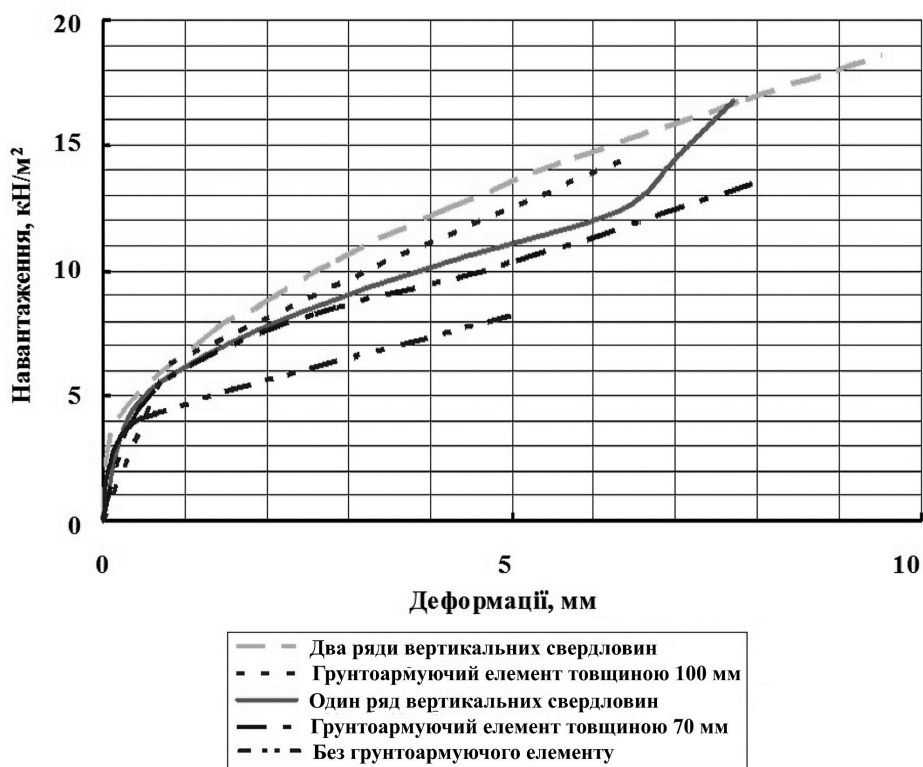


Рис. 9. Результати дослідження моделей схилу з ґрунтоармуючими конструкціями, а також без них, з прошарком з глини (деформації -- датчик 1, Рис. 7)

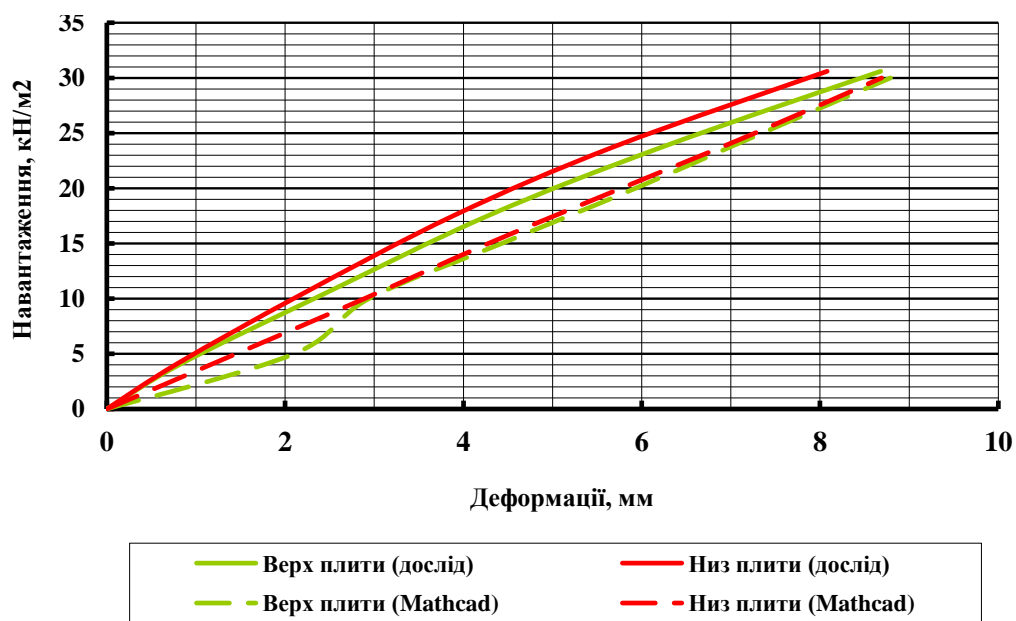


Рис. 10. Співставлення результатів дослідження моделі конструкції для закріплення схилів зі щеленою товщиною $\delta = 10$ см з розв’язками рівнянь (4) у середовищі Mathcad 15

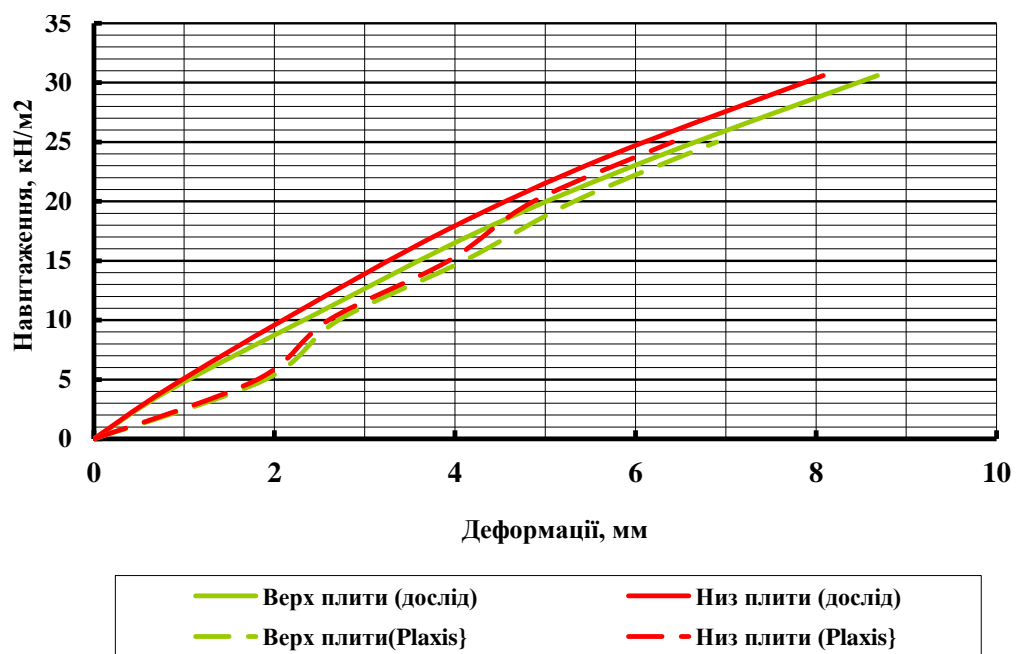


Рис. 11. Співставлення результатів дослідження моделі конструкції для закріплення схилів зі щеленою товщиною $\delta = 10$ см з розв’язками рівнянь (4) програмним комплексом PLAXIS

Співставлення даних вимірювань переміщень верху та низу плити на експериментальній установці та розрахунків за рівняннями (4), виконаних у програмному середовищі Mathcad 15, наведено на Рис. 10. Розбіжність між експериментальними та розрахунковими даними склала від 2% до 16%, в залежності від навантаження. На Рис. 11 виконано співставлення даних вимірювань переміщення верху та низу плити на експериментальній установці з результатами розрахунків, виконаних на персональному комп'ютері за допомогою програмного комплексу PLAXIS. У цьому випадку розбіжність між експериментальними та розрахунковими даними становила від 3% до 15% .

4. ПРИКЛАДИ ЗАСТОСУВАННЯ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО РОЗРАХУНКУ РОЗРОБЛЕНИХ ПРОТИЗСУВНИХ СПОРУД

4.1. Приклади застосування

На підставі проведених досліджень запропоновано кілька варіантів конструкцій протизсувних споруд для закріплення зсувонебезпечних схилів. На одну з них, а саме, на конструкцію у вигляді вертикальних свердловин, отримано позитивне рішення на вимогу декларативного патенту.

На Рис. 12 показано схему закріплення зсувонебезпечного схилу вертикальними свердловинами 1, які влаштовано на схилі перпендикулярно напрямку току ґрунтових вод 2 в один ряд. При цьому вони повинні перетинати поверхню ковзання зсуву 3 на позначках її мінімальних похилів. Свердловини з'єднано з відкритим дренажем 4 за допомогою дренажних труб 5.

Кожна свердловина має закритий знизу трубчастий кожух, який містить зовнішній шар 6 з тканого ізотропного синтетичного матеріалу і внутрішній шар 7 з нетканого

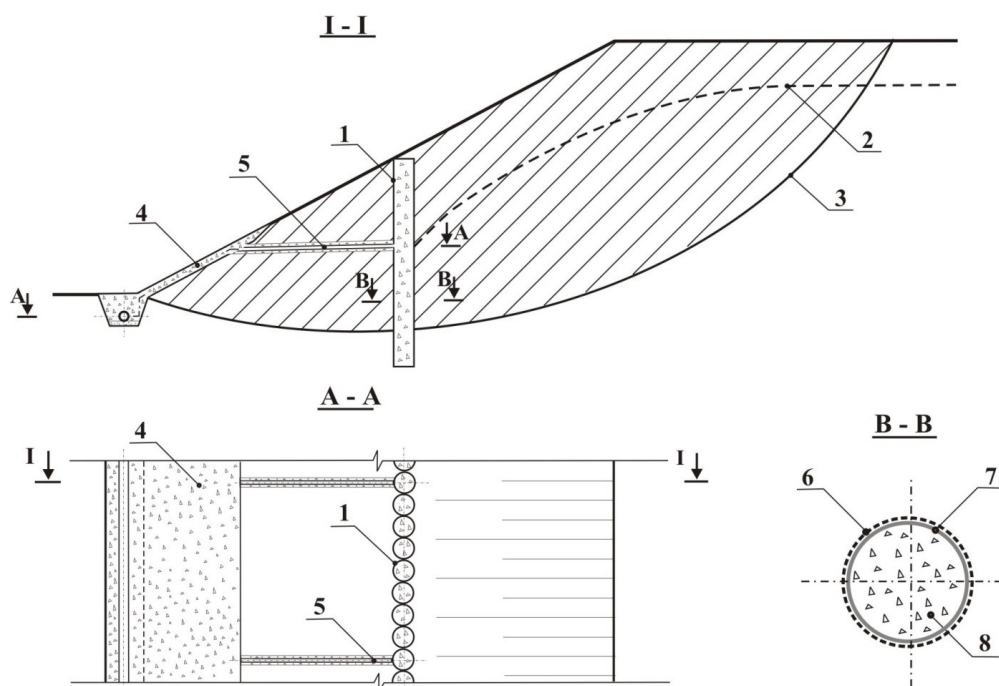


Рис. 12. Схема розташування протизсувної споруди з свердловин в один ряд

синтетичного матеріалу, який заповнюється гравієм або щебенем 8.

Верхній край кожуха повинен виступати над верхом заповнювача не менше, ніж на величину свого діаметра і закріплюватись з нашаруванням. Це дає змогу зовнішньому шару сприймати на себе розтягуючі зусилля, які діють на свердловину, а внутрішньому шару – надійно захищати фільтруючу засипку від замулення.

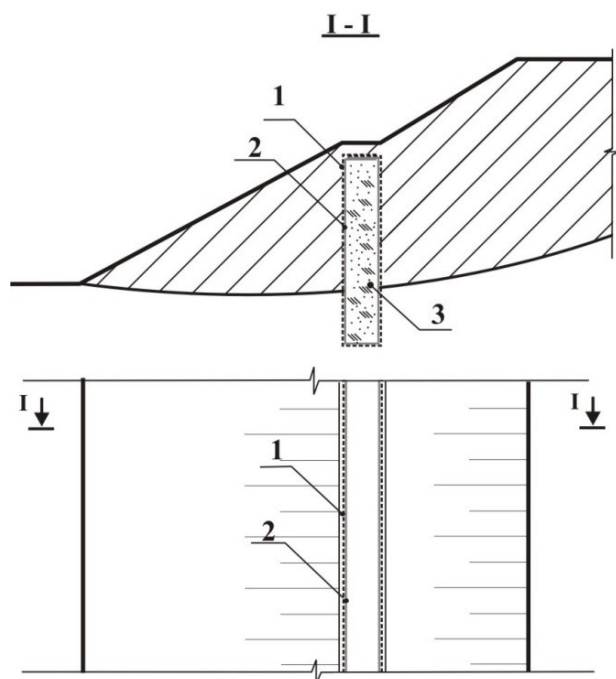


Рис. 13. Схема розташування протизсувної споруди у вигляді виїмки

ну сітку 1 та геотекстиль 2. Виїмку до верху засипають піском або щебенем 3, який пошарово ущільнюють. Після цього кінці армуючої сітки та геотекстилю фіксують з нашаруванням один на другий і привантажують.

4.2. Рекомендації щодо розрахунку

На основі проведених лабораторних і числових експериментів встановлено, що найбільша величина зусилля на розтяг в ґрунтоармуючих конструкціях виникає в геосітці з боку схилу на рівні поверхні ковзання. Виходячи з цього, будемо співставляти зусилля, яке виникає в ґрунтоармуючій конструкції під дією зсувного тиску, з сумарною міцністю на розтяг сітки та геотекстилю. Діюче зусилля не має перевищувати величину міцності на розтяг сітки і геотекстилю. Розрахунки проводять на основі виразу

$$F_3 \leq \frac{\gamma_c}{\psi \gamma_n} R_3, \quad (7)$$

Тут R_3 – сумарна міцність на розтяг сітки і геотекстилю, яку визначають по технічним характеристикам чи за експериментальними даними;

$$F_3 = B_1 e^{\alpha_2 h} \sin \alpha_2 h - B_2 e^{\alpha_2 h} \cos \alpha_2 h - B_3 e^{-\alpha_2 h} \sin \alpha_2 h - B_4 e^{-\alpha_2 h} \cos \alpha_2 h, \quad (8)$$

де B_1, B_2, B_3, B_4 – коефіцієнти, величини яких визначають на основі рішення системи з восьми алгебраїчних рівнянь (6); h – глибина до поверхні ковзання, m на ділянці будівництва протизсувної споруди; γ_c, γ_n, ψ – коефіцієнти, значення величин яких наведено в [1].

5. ВИСНОВКИ

1. З урахуванням різновидів ґрунтів схилу розроблено конструкції для закріплення схилів, які дозволяють підвищити його стійкість, виконуючи одночасно функції утримуючої споруди та дренажу. Ці конструкції зменшують деформації у два-чотири рази, у порівнянні зі схилом без кріплення.
2. Розроблено математичну модель та промодельовано в двовимірній постановці роботу ґрунтоармованих конструкцій у схилах з урахуванням змінних властивостей ґрунтів і динаміки рівнів ґрунтових вод із застосуванням програмного комплексу PLAXIS 2D.
3. На експериментальній установці проведено серію дослідів для кількісного оцінювання пружно-деформованого стану малорозмірних моделей розроблених ґрунтоармованих конструкцій під дією статичних навантажень.
4. З використанням програмних комплексів PLAXIS 2D і Mathcad 15 проведено серію розрахунків для оцінки пружно-деформованого стану ґрунтоармованих конструкцій у схилах на основі розроблених математичних залежностей. Співставлення цих результатів з експериментальними даними показало ступінь збігу, прийнятний для інженерних потреб.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Державні Будівельні Норми України В.1.1-46:2017 «Інженерний захист територій, будівель та споруд від зсувів та обвалів». — Київ : Мінрегіонбуд, 2017. — 47 с.
- [2] Билеуш А. И. Оползни и противооползневые мероприятия. — Киев : Наукова думка, 2009.
- [3] Schuster R. L., Krizek R. J. Landslides, analysis and control. — Washington, DC : National Academy of Sciences, 1978. — 244 p.
- [4] Маслов Н. Н. Проблемы устойчивости и деформации грунтов. — Москва / Ленинград : Госэнергоиздат, 1961. — 113 с.
- [5] Білеуш та ін. А. І. Інженерний захист та освоєння територій. Довідник / під ред. Ніщук В. С. — Київ : Основа, 2000. — 344 с.
- [6] Олейник А. Я. Фильтрационные расчеты вертикального дренажа. — Киев : Наукова думка, 1978. — 202 с.

REFERENCES

- [1] *State Building Standards of Ukraine B.1.1-46:2017 «Engineering protection of territories, buildings and structures against landslides and collapses»*. Kyiv: Minregionbud, 2017.
- [2] A. I. Bileush, *Landslides and landslide prevention measures*. Ryiv: Naukova Dumka, 2009.
- [3] R. L. Schuster and R. J. Krizek, *Landslides, analysis and control*. Washington, DC: National Academy of Sciences, 1978.
- [4] N. N. Maslov, *Problems of soil stability and deformation*. Moscow / Leningrad: Gosenergoizdat, 1961.
- [5] A. I. Bileush et al., *Engineering protection and development of territories. A reference book*. Kyiv: Osnova, 2000.
- [6] A. Y. Oleinik, *Filtration calculations of vertical drainage*. Kyiv: Naukova Dumka, 1978.

**А. И. Билеуш, В. Л. Фридрихсон, А. И. Кривоног,
В. В. Кривоног, П. Ю. Романенко**

**Исследование конструкций сооружений для обеспечения устойчивости
оползнеопасных склонов, армированных геосинтетическими
материалами**

Оползни относятся к классу наиболее опасных явлений в зонах застройки природных склонов. Они могут приводить к разрушению построек и человеческим жертвам. Поэтому обоснование защитных мер с целью повышения устойчивости склонов имеет большое практическое значение. В статье приведены результаты исследований новых конструкций противооползневых сооружений для закрепления оползнеопасных склонов, армированных геосинтетическими материалами. Они могут выполнять несколько функций, а именно: воспринимать оползневые нагрузки грунта склона как поддерживающее сооружение и выполнять функцию отвода воды как дренажное сооружение. С помощью экспериментального стенда проведено физическое моделирование работы предложенных конструкций в виде скважин или выемок. Параллельно разработана математическая модель и промоделирована в двумерной постановке работа грунтоармированных конструкций в склонах с учетом переменных свойств грунтов. Выполнены расчеты в программных средах Mathcad 15 и PLAXIS 2D. Получена приемлемая для инженерных нужд степень совпадения экспериментальных и числовых данных, а также расчетов по обоим методикам. Установлено, что разработанные конструкции уменьшают деформации в два–четыре раза по сравнению с незакрепленным склоном, в зависимости от толщины грунтоармирующего элемента. Следовательно, проведение таких мероприятий значительно повышает устойчивость склонов, в том числе ослабленных пластическими глинистыми прослойками. Показано, что грунтозащитные конструкции в форме расположенных в ряд армированных геотекстилем выемок способны эффективно противодействовать оползням. Это позволяет сократить затраты на строительство по сравнению с традиционными инженерными решениями, не снижая требований к безопасности сооружений. Таким образом, продемонстрирована

целесообразность использования геосинтетических материалов в практике закрепления оползнеопасных склонов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: конструкции противооползневых сооружений, геосинтетические материалы, математическая модель

**A. I. Bileush, V. L. Fridrihson, O. I. Kryvonog,
V. V. Kryvonog, P. Yu. Romanenko**
**Research of construction structures to ensure the stability of
landslide-prone slopes reinforced with geosynthetic materials**

Landslides belong to the class of the most dangerous phenomena in the built-up areas of natural slopes. They can lead to the destruction of buildings and human casualties. Therefore, the justification of protective measures to increase the stability of slopes is of great practical importance. The article presents the results of studies of new designs of anti-landslide structures for securing landslide-prone slopes reinforced with geosynthetic materials. They can perform several functions, namely, to perceive landslide loads of the soil slope as a supporting structure and to drain water as a drainage structure. With the help of an experimental stand, physical modeling of the operation of the proposed structures in the form of wells or excavations was carried out. At the same time, a mathematical model was developed, and the work of soil-reinforced structures in slopes was simulated in a two-dimensional formulation, taking into account the variable properties of soils. Computations were made in the software environments Mathcad 15 and PLAXIS 2D. A degree of agreement between experimental and numerical data and correlation of the calculations by both methods are acceptable for engineering needs. The developed structures reduce deformations by two to four times compared with an unfixed slope, depending on the thickness of the soil-reinforcing element. Therefore, carrying out such measures essentially increases the stability of slopes, including those weakened by plastic clay interlayers. The soil-protective structures in the form of grooves reinforced with geotextile arranged in a row can effectively resist landslides. It allows for reducing construction costs compared to traditional engineering solutions without reducing the requirements for the safety of structures. Thus, the expediency of using geosynthetic materials in fixing landslide-prone slopes has been demonstrated.

KEY WORDS: constructions of landslide prevention structures, geosynthetic materials, mathematical model