



УДК 624.137.2; 24.131



БІЛЕУШ А.І.

Д-р технічних наук, проф.,
Інститут гідромеханіки
НАН України,
м. Київ, Україна,
e-mail: Igmgs@ukr.net,
тел.: + 38 (066) 794-37-84,
ORCID: 0000-0002-7292-999X



ФРІДРІХСОН В.Л.

Канд. технічних наук, ст.
науковий співробітник, Інститут
гідромеханіки НАН України,
м. Київ, Україна,
e-mail: Igmgs@ukr.net,
тел.: + 38 (067) 450-22-95,
ORCID: 0000-0003-4001-8646



КРИВОНОГ О.І.

Канд. технічних наук, ст.
науковий співробітник,
Інститут гідромеханіки
НАН України,
м. Київ, Україна,
e-mail: Igmgs@ukr.net,
тел.: + 38 (097) 674-80-47,
ORCID: 0000-0002-8435-3393



КРИВОНОГ В.В.

Канд. технічних наук, науковий
співробітник, Інститут
гідромеханіки НАН України,
м. Київ, Україна,
e-mail: Igmgs@ukr.net,
тел.: + 38 (096) 869-26-53,
ORCID: 0000-0002-3788-6947

АРМОВАНІ ГЕОСИНТЕТИЧНИМИ МАТЕРІАЛАМИ ГРУНТОВІ КОНСТРУКЦІЇ, ЩО СПРИЙМАЮТЬ ЗУСИЛЛЯ НА ЗГИН

АНОТАЦІЯ

Дослідження роботи ґрунтових конструкцій, армованих геосинтетичними матеріалами, виконували експериментально на малорозмірних моделях і чисельним моделюванням з використанням програмного комплексу PLAXIS. Досліджували моделі конструкцій фундаментних подушок для зміцнення слабких основ і протизсувних споруд з метою підвищення стійкості схилів. Конструкції являють собою об'ємно замкнуті системи, міцність яких визначається їх геометрією, міцністю геосинтетичних матеріалів на розтяг і міцністю їх з'єднання, видом і щільністю заповнювача. Вони можуть розподіляти напруги по площі, сприймати зсувні навантаження ґрунту на схилі, виконувати функцію дренажу. Армована сітка розподіляє напруги по всій площі армування, що забезпечує збільшення несучої здатності основи фундаменту і зменшує його деформації. У свою чергу, геотекстиль виконує функцію розділяючого шару між ґрунтом основи і заповнювачем. З огляду на те, що геосітка працює на розтяг, а ущільнений заповнювач – на стиск, наближено можна вважати, що під дією зовнішнього навантаження армовані ґрунтові конструкції працюють як плита на пружній ґрунтовій основі.

Конструкції з оболонкою з міцних геосинтетичних матеріалів, що щільно заповнені щебе-

нем, гравієм або відсівом, працюють на згин, розподіляючи вертикальні або горизонтальні навантаження по площі. В протизсувних спорудах такі конструкції передають зсувний тиск на стійкі ґрунти та виконують функції дренажу.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: армовані конструкції, геосинтетичні матеріали, фундаментна подушка, стійкість схилів, утримуюча споруда.

АРМИРОВАННЫЕ ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИМИ МАТЕРИАЛАМИ ГРУНТОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ВОСПРИНИМАЮЩИЕ УСИЛИЯ НА ИЗГИБ

БІЛЕУШ А.І. Д-р технических наук, проф.,
Інститут гидромеханики НАН Украины,
г. Киев, Украина,
e-mail: igmgs@ukr.net,
тел.: + 38 (066) 794-37-84,
ORCID: 0000-0002-7292-999X

ФРІДРІХСОН В.Л. Канд. технических наук,
ст. научный сотрудник, Институт гидромеханики
НАН Украины,
г. Киев, Украина,
e-mail: igmgs@ukr.net,
тел.: + 38 (067) 450-22-95,
ORCID: 0000-0003-4001-8646

КРИВОНОГ А.І. Канд. технических наук, ст.
научный сотрудник, Институт гидромеханики



НАН Украины,
г. Киев, Украина,
e-mail: igmggs@ukr.net,
тел.: + 38 (097) 674-80-47,
ORCID: 0000-0002-8435-3393

КРИВОНОГ В.В. Канд. технических наук, ст. научный сотрудник, Институт гидромеханики НАН Украины,
г. Киев, Украина,
e-mail: igmggs@ukr.net,
тел.: + 38 (097) 674-80-47,
ORCID: 0000-0002-3788-6947

АННОТАЦИЯ

Исследование работы грунтовых конструкций, армированных геосинтетическими материалами, выполняли экспериментально на малоразмерных моделях и численным моделированием с использованием программного комплекса PLAXIS. Исследовали модели конструкций фундаментных подушек для укрепления слабых оснований и противооползневых сооружений с целью повышения устойчивости склонов. Конструкции представляют собой объемно замкнутые системы, прочность которых определяется их геометрией, прочностью геосинтетических материалов на растяжение и прочностью их соединения, видом и плотностью заполнителя. Они могут распределять напряжения по площади, воспринимать сдвижные нагрузки грунта на склоне, выполнять функцию дренажа. Армирующая сетка распределяет напряжения по всей площади армирования, что обеспечивает увеличение несущей способности основания фундамента и уменьшает его деформации. В свою очередь, геотекстиль выполняет функцию разделяющего слоя между грунтом основания и заполнителем. Учитывая то, что геосетка работает на растяжение, а уплотненный наполнитель – на сжатие, приближенно можно считать, что под действием внешней нагрузки армированные грунтовые конструкции работают как плита на упругой грунтовой основе.

Конструкции с оболочкой из прочных геосинтетических материалов, которые плотно заполнены щебнем, гравием или отсевом, работают на изгиб, распределяя вертикальные или горизонтальные нагрузки по площади. В противооползневых сооружениях такие конструкции передают сдвижное давление на устойчивые грунты и выполняют функции дренажа.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: армированные конструкции, геосинтетические материалы, фундаментная подушка, устойчивость склонов, удерживающее сооружение.

GEOSYNTHETICS REINFORCED SOIL STRUCTURES THAT TAKE BENDING

BILEUSH A.I. Dr., Prof., Institute of Hydromechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine,

e-mail: igmggs@ukr.net,
tel.: +38 (066) 794-37-84,
ORCID: 0000-0002-7292-999X

FRIDRIHSON V.L. PhD, Senior Scientist, Institute of Hydromechanics, National Academy of Sciences of Ukraine,
Kyiv, Ukraine,
e-mail: igmggs@ukr.net,
tel.: + 38 (067) 450-22-95,
ORCID: 0000-0003-4001-8646

KRYVONOG A.I. PhD, Senior Scientist, Institute of Hydromechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Kyiv, Ukraine,
e-mail: igmggs@ukr.net,
tel.: + 38 (097) 674-80-47,
ORCID: 0000-0002-8435-3393

KRYVONOG V.V. PhD, Senior Scientist, Institute of Hydromechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Kyiv, Ukraine,
e-mail: igmggs@ukr.net,
tel.: + 38 (097) 674-80-47,
ORCID: 0000-0002-3788-6947

ABSTRACT

The behavior of geosynthetics reinforced soil structures was examined experimentally on small size models using numerical modeling at PLAXIS. The construction models of foundation footing for strengthening weak foundations and landslide protection structures were researched with the purpose of increasing stability of slopes. The constructions are three-dimensional closed systems, which strength is determined by their geometry, by the tensile strength of geosynthetics and by the strength of their joints, type and density of filler. Those can distribute stresses over the area, take the soil landslide forces on the slope, act as a drainage. Reinforced net distributes stress over the entire area of reinforcement, what leads to increasing bearing capacity of the foundation and reduces the deformation of that. Again, geotextile acts as a separating layer between the foundation and the filler. Given the fact that the geogrid is in tension and the compacted filler is in compression, it can be assumed that, under the influence of external load, the reinforced soil structures work as a plate on an elastic soil foundation.

Structures with coating made from durable geosynthetics, which are tightly filled with crushed stone, gravel or stone screening dust, work in bending, distributing vertical or horizontal loads over the area. These structures transmit the sliding pressure on stable soils and act as a drainage in antilandslide constructions.

KEY WORDS: reinforced structures, geosynthetics, foundation footing, stability of slopes, retaining structure.



АНАЛІЗ ПУБЛІКАЦІЙ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

За результатами аналізу літературних джерел можна констатувати, що ефективність армованої ґрунтової конструкції залежить від фізико-механічних показників матеріалу геосинтетиків, характеристик ґрунту та механізму зчеплення з ним [1–5]. Для збільшення зчеплення застосовують напівзамкнені і замкнені обойми (рис. 1). В таких конструкціях геотекстиль являє собою гнучку конструкцію і не сприймає зусиль на згин.

Для розрахунку ґрунтових конструкцій з застосуванням геосинтетичних матеріалів в світі використовують наступні методики.

1. Німецькі рекомендації щодо армування геосинтетиками (EBGEO) регламентують застосування матеріалів з міцністю > 30 кН/м. Вони дозволяють розрахувати зусилля в геосинтетичних матеріалах в повздовжньому та поперечному напрямках і описують виникнення аروحного ефекту [6].
2. Британський стандарт не зв'язує форму арки і розподіл напружень з параметрами ґрунту і міцністю геосинтетичного матеріалу.
3. Російська методика не має обґрунтування появи аروحного ефекту і розрахунків по міцності геосинтетичного матеріалу.

Робота ґрунтових конструкцій з геосинтетичними матеріалами може моделюватись у двовимірній чи тривимірній постановці, використовуючи програмні комплекси PLAXIS.

ОСНОВНІ ЦІЛІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1. Дослідження роботи ґрунтових конструкцій з геосинтетичними матеріалами, що можуть сприймати зусилля на згин, за допомогою експериментальних та чисельних досліджень моделей конструкцій фундаментних подушок та протизсувних споруд для укріплення слабких основ та схилів.
2. Розробка розрахункових схем та залежностей для розрахунку на міцність запропонованих конструкцій.

РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ТА ЇХ ОБґРУНТУВАННЯ

Запропонована авторами конструкція фундаментної подушки містить армуючу геосинтетичну сітку, нетканий захисно-фільтруючий синтетичний матеріал та заповнювач з щебеню, гравію або відсіву. Сітку і нетканий матеріал розміщено по підшві та бічним стінкам приямка під фундамент, вони обгортають заповнювач зверху з нашаруванням їх кінців один на один, що міцно скріплюються. Протизсувна споруда для закріплення зсувонебезпечних схилів траншейного типу має подібну конструкцію, але влаштована вертикально. Конструкції являють собою об'ємно замкнуті системи, міцність яких визначається їх геометрією, міцністю геосинтетичних матеріалів

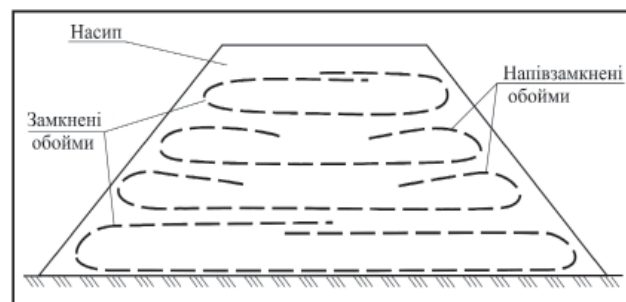


Рис. 1. Схема укладання геотекстилю

на розтяг і міцністю їх з'єднання, видом та щільністю заповнювача. Вони можуть виконувати декілька функцій, а саме: розподіляти напруги по площі, сприймати зсувне навантаження ґрунту в схилі, як підтримуюча споруда, виконувати функцію дренажу.

Для проведення досліджень розроблено експериментальну установку – лоток з жорсткими бічними стінками з розмірами $100 \times 20 \times 60$ см, що облаштовано пристроєм для передачі навантажень до 1000 кг на штамп. Величину та зміну зусиль у часі в зовнішньому елементі (сітці) під дією навантажень фіксували за допомогою двох датчиків зусиль. Отримані дані передавались у блок обробки і виведення інформації та записувались в окремий файл. Деформування конструкції і ґрунту основи контролювали за допомогою дев'яти датчиків переміщення з точністю виміру 0,01 мм.

З врахуванням визначених характеристик ґрунтів моделей, їх геометричних параметрів та фізико-механічних показників геосинтетиків проводилось моделювання роботи досліджених конструкцій на ПК з використанням програмного комплексу PLAXIS (рис. 2).

Було досліджено моделі фундаментної подушки з розмірами 30×10 , 19×10 і 24×5 см. В якості заповнювача фундаментної подушки використовували

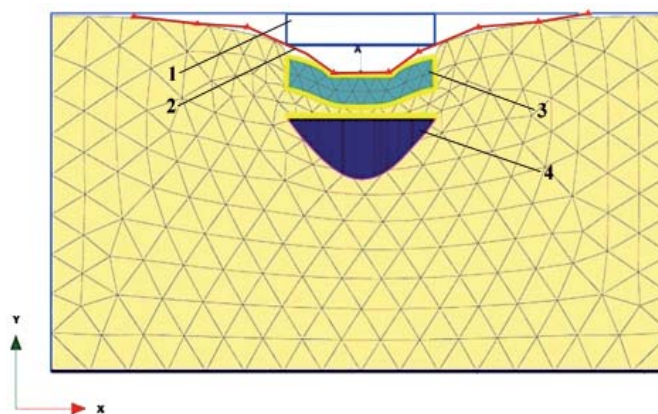


Рис. 2. Характер зусиль та деформації моделі:

- 1 – початкове положення фундаментної подушки,
- 2 – дослідні значення деформацій подушки,
- 3 – деформації подушки та сітки основи, визначені PLAXIS 2D,
- 4 – епіюра зусиль на розтяг в нижньому полотні геосинтетика



щебінь фракції 10-20 мм або відсів. Навантаження на модель задавали ступенями від 300 до 1600 кН/м². Показники датчиків переміщень та зусиль фіксували після стабілізації деформацій.

Вважаючи на те, що геосітка працює на розтяг, а ущільнений заповнювач – на стиснення, наближено можна вважати, що під дією зовнішнього навантаження фундаментна подушка працює як плита на пружній основі. Армуюча сітка розподіляє напруги по всій площі армування, що забезпечує збільшення несучої здатності підвалин фундаменту і зменшує його деформації. В свою чергу, геотестиль виконує функцію розділяючого шару між ґрунтом основи і заповнювачем фундаментної подушки.

Для рішення задачі для умов дослідів використовували рівняння для плити на пружній основі [7]. Співставлення переміщень умовної плити, що визначено за даними розрахунків з експериментальними даними, наведено на графіку (рис. 3).

Також були досліджені моделі конструкцій протизсувних споруд двох типів. Перша – модель у вигляді виїмки траншейного типу. Під час випробувань було досліджено роботу моделей, товщина яких складала 7 і 10 см. Друга модель конструкції для закріплення схилів – у виді розташованих в один або два ряди вертикальних свердловин, що примикають одна до одної і заповнені щебенем фракції 5-10 мм в оболонках з тканого полімерного матеріалу високої міцності. Нижній кінець оболонки був заштитий, а верхній, після заповнення її ущільненим щебенем, міцно з'єднаний. На рис. 4 представлено схему протизсувної споруди.

Для аналізу напружено-деформованого стану запропонованих ґрунтоармованих конструкцій було записано наступні рівняння:

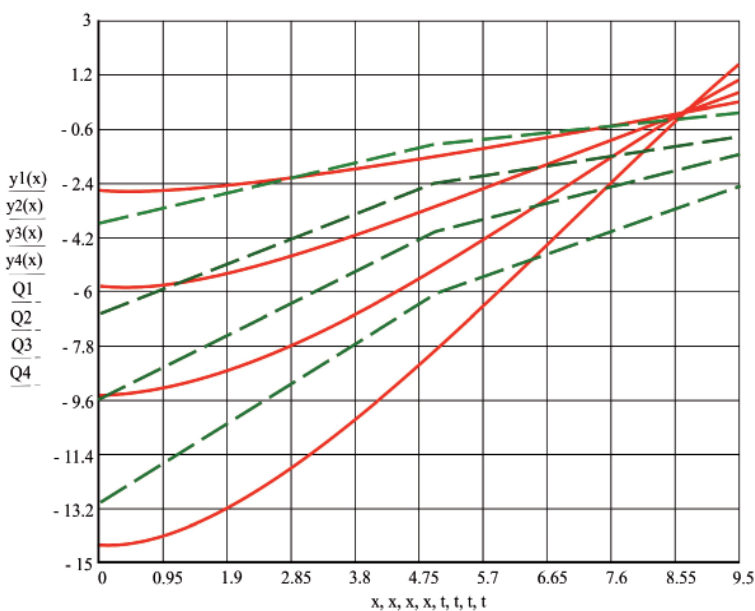


Рис. 3. Співставлення переміщень умовної плити (— — —) – визначено по формулі, (—) експериментальні величини

$$\frac{d^2}{dx^2} \left(D(x) \frac{d^2 y_1}{dx^2} \right) + m_c b_c \varphi_1(x) y_1 = b_c \varphi_1(x) \delta(t),$$

$$\frac{d^2}{dx^2} \left(D(x) \frac{d^2 y_2}{dx^2} \right) + b_c \varphi_2(x) y_2 = 0, \quad (1)$$

де y_1 і y_2 – загальне переміщення осі вертикальної ґрунтоармуючої конструкції на ділянці вище та нижче поверхні ковзання; m_c – коефіцієнт, що враховує стійкість ґрунтів, що межують з ґрунтоармуючою спорудою нижче по схилу, $m_c = 2,0$, коли коефіцієнт стійкості ґрунтів $> 1,5$. Коли коефіцієнт стійкості ґрунтів близько 1,0, $m_c = 1,0$. При коефіцієнті стійкості ґрунтів в межах 1,0-1,5 величина m_c приймається за інтерполяцією; b_c – ширина ґрунтоармуючої конструкції; $D(x)$ – жорсткість ґрунтоармуючої конструкції, що змінюється по глибині; $\delta(t)$ – переміщення зсуву в часі; $\varphi_1(x)$ – реакція ґрунту на переміщення ґрунтоармуючої конструкції в зсувному ґрунті; $\varphi_2(x)$ – реакція ґрунту на переміщення ґрунтоармуючої конструкції в стійких ґрунтах нижче поверхні ковзання.

Залежність реакції ґрунту на переміщення ґрунтоармуючої конструкції в зсувних та стійких ґрунтах, як правило, задають у вигляді:

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

Підставивши в систему рівнянь (1) залежності (2), для постійної по глибині ґрунту жорсткості ґрунтоармуючої конструкції $D(x)$ отримаємо систему рівнянь у вигляді:

$$\frac{d^4 y_1}{dx^4} + \frac{m_c k_o b_c y_1}{D(1 + g_1 x)^4} = \frac{\delta k_o b_c}{D(1 + g_1 x)^4}. \quad (3)$$

$$\frac{d^4 y_2}{dx^4} + \frac{a_h b_c y_2}{D(1 + g_2 x)^4} = 0. \quad (4)$$

Рішення (3) та (4) отримаємо в аналітичному вигляді:

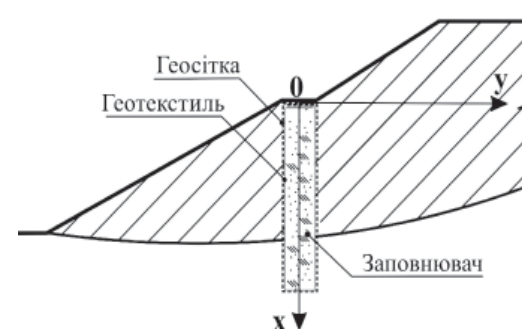


Рис. 4. Схема конструкцій для закріплення схилів



$$y_1 = \frac{\delta}{m_c} + (1 + g_1 x)^{\alpha_1} \left[A_1 \cos \beta_1 \ln((1 + g_1 x)) + A_2 \sin \beta_1 \ln((1 + g_1 x)) \right] + (1 + g_1 x)^{\alpha_2} \left[A_3 \cos \beta_2 \ln((1 + g_1 x)) + A_4 \sin \beta_2 \ln((1 + g_1 x)) \right], \quad (5)$$

$$y_2 = (1 + g_2 x)^{\alpha_3} \left[B_1 \cos \beta_3 \ln((1 + g_2 x)) + B_2 \sin \beta_3 \ln((1 + g_2 x)) \right] + (1 + g_2 x)^{\alpha_4} \left[B_3 \cos \beta_4 \ln((1 + g_2 x)) + B_4 \sin \beta_4 \ln((1 + g_2 x)) \right], \quad (6)$$

де $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ та $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ – дійсні алгебраїчні форми комплексного кореня μ_{1i} і μ_{2i} :

$$\mu_{1i} = \pm \sqrt{1.25 \pm \sqrt{1 - \frac{m_c k_o b_c}{D g_1^4}}} + 1.5, \quad (7)$$

$$\mu_{2i} = \pm \sqrt{1.25 \pm \sqrt{1 - \frac{a_n b_c}{D g_2^4}}} + 1.5. \quad (8)$$

$$\mu_{11,2} = \alpha_1 \mp \beta_1 i; \quad \mu_{13,4} = \alpha_2 \mp \beta_2 i;$$

$$\mu_{21,2} = \alpha_3 \mp \beta_3 i; \quad \mu_{23,4} = \alpha_4 \mp \beta_4 i.$$

З фізичних властивостей деформування ґрунтоармуючої конструкції маємо наступні граничні умови задачі:

$$\begin{aligned} x=0; & \quad y_1'' = y_1''' = 0, \\ x=h; & \quad y_1 = y_2, \quad y_1' = y_2', \\ & \quad y_1'' = y_2'', \quad y_1''' = y_2''', \\ x=l; & \quad y_2'' = y_2''' = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Взявши похідні з рішень (5) та (6) і підставивши їх в граничні умови задачі (9), отримаємо вісім алгебраїчних рівнянь для визначення постійних A_i та B_i . Рішення алгебраїчних рівнянь проводилось на ПК з використанням програмного комплексу «Mathcad».

Рішення (5) та (6) з визначеними постійними A_i та B_i дозволяють визначити зусилля в геосітці.

Співставлення результатів експериментальних досліджень моделі протизсувної споруди для закріплення схилів першого типу з рішенням, отриманим з рівнянь (5) та (6), показано на рис. 5.

На рис. 6 показано одну з можливих схем закріплення зсувонебезпечного схилу вертикальними свердловинами 1, що улаштовано на схилі перпендикулярно напрямку току ґрунтових вод 2 в один ряд. При цьому вони перетинають поверхню ковзання зсуву 3 на позначках її

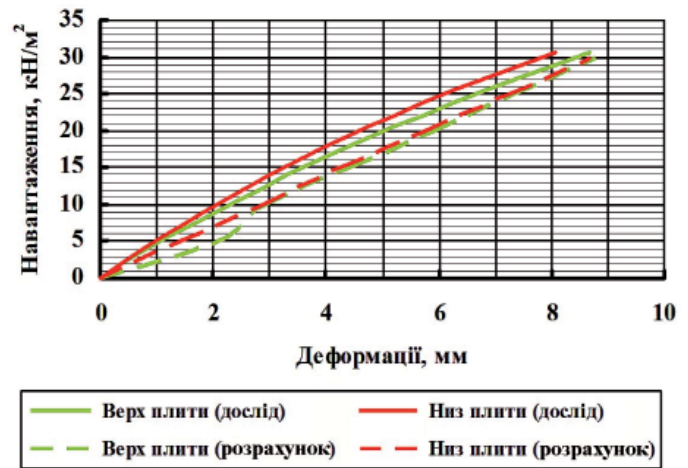


Рис. 5. Співставлення результатів дослідження моделі конструкції для закріплення схилів з щеленю товщиною $\delta = 10$ см з рішеннями з рівнянь (5) та (6)

мінімальних похилів. Свердловини з'єднано з дренажем на укосі 4 за допомогою дренажних труб 5. Свердловини містять геосітку 6, геотекстиль 7, заповнювач 8.

Відстань між свердловинами, з яких відводиться ґрунтова вода у дренаж на укосі і положення позначки під'єднання до них дренажних водовідвідних труб, визначають на підставі фільтраційних розрахунків [8].

РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО РОЗРАХУНКУ РОЗРОБЛЕНИХ ПРОТИЗСУВНИХ СПОРУД

На основі проведених лабораторних і чисельних експериментів встановлено, що найбільша величина зусилля на розтяг в ґрунтоармуючих конструкціях виникає в геосітці зі сторони схилу на рівні, близькому до поверхні ковзання. Діюче зусилля повинно бути не більше величини міцності на розтяг сітки і геотекстилю. Розрахунки проводять на основі виразу:

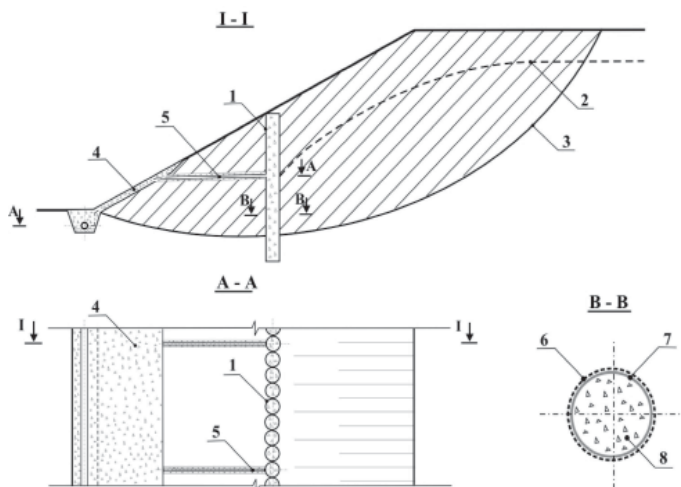


Рис. 6. Схема розташування протизсувної споруди на схилі



$$F_3 \leq \frac{\gamma_c}{\psi \gamma_n} R_3, \quad (10)$$

де R_3 – сумарна міцність на розтяг сітки і геотекстилю, що визначають за технічними характеристиками чи за експериментальними даними; F_3 – зусилля на розтяг, що визначається на основі рішень (5) та (6); γ_c , γ_n , ψ – коефіцієнти, значення величин яких наведено в [9].

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. На основі проведених досліджень встановлено, що конструкції з оболонкою із міцного геосинтетичного матеріалу, що щільно заповнені щебенем, гравієм або відсівом, сприймають вертикальні чи горизонтальні навантаження і розподіляють їх по площі чи передають зсувний тиск ґрунтів на стійкі ґрунти.
2. Проведено серію дослідів для кількісного оцінювання малорозмірних моделей ґрунтоармованих конструкцій під дією статичних вертикальних чи горизонтальних навантажень. Встановлено залежності характеру пружно-деформованого стану конструкцій від геометричних розмірів, модулів пружності геосинтетиків та схеми з'єднання матеріалу.
3. Запропоновано математичну модель роботи ґрунтоармованих конструкцій під дією статичних вертикальних чи горизонтальних навантажень та виконано моделювання роботи ґрунтоармованих конструкцій в основах споруд в двовимірній постановці із застосуванням програмного комплексу PLAXIS 2D.
4. Проведено серію розрахунків для оцінки пружно-деформованого стану ґрунтоармованих конструкцій на основі запропонованої математичної моделі та виконано співставлення їх з експериментальними даними.
5. Для підтвердження отриманих результатів доцільно провести дослідно-виробничу перевірку роботи запропонованих конструкцій в натурних умовах.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Армовані основи будівель та споруд / [М.Ф. Друкований, С.В. Матвеев та ін.]. – Вінниця: УНІВЕРСУМ, 2006. – 235 с.
2. Корчевський Б.Б. Горизонтальні армовані основи під фундаменти будівель / Б.Б. Корчевський. – Вінниця: УНІВЕРСУМ, 2004. – 120 с.
3. Приходько А.П. Экспериментальные исследования ґрунто-армированной конструкции / А.П. Приходько // Мат-лы научно-

технической конф. с междунар. участием Палеотип. – М., 2013. – С. 68–72.

4. Мирсаяпов Н.Т. Оценка прочности и деформативности армированных ґрунтовых оснований / Н.Т. Мирсаяпов. – М.: Геотехника, 2010. – №4. – С. 58–67.
5. Матеріали геосинтетичні в дорожньому будівництві: ВБН В.2.3-2-544:2008. – [Введ. в дію 2008-10-14]. – Київ: Укравтодор, 2008. – 106 с.
6. Empfehlungen für Bewehrungen aus Geokunststoffen – EBGEO / Нем. общество по геотекстилю. – 1997.
7. Флорин В.А. Основы механики ґрунтов / В.А. Флорин. – Л.–М.: Стройиздат, 1959. – Т.1. – 358 с.
8. Олейник А.Я. Фильтрационные расчеты вертикального дренажа / А.Я. Олейник. – Киев: Наукова думка, 1978. – 202 с.
9. Інженерний захист територій, будівель і споруд від зсувів та обвалів. Основні положення: ДБН В.1.1-46:2017. – [Чинний від 2017-11-01]. – Київ: ДП «Укравхбудін-форм», 2017. – IV, – 47 с.