

М.В. Гаркуша

Національний транспортний університет, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ БЕРЕГОУКРІПЛЮЮЧИХ СПОРУД З ВИКОРИСТАННЯМ ГЕОСИНТЕТИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ В ТРАНСПОРТНОМУ ТА ГІДРОТЕХНІЧНОМУ БУДІВНИЦТВІ

Застосування берегоукріплюючих споруд з використанням геосинтетичних матеріалів набуває широкого застосування під час захисту ґрунтових насипів від розмиву. Геосинтетичні матеріали використовують у вигляді полотен, мішків, труб та контейнерів, що відіграє активну роль у транспортних, гідротехнічних, берегових, морських інженерних роботах та роботах із захисту річок як екологічно чисті, зручні для будівництва та дешевші альтернативи звичайних методів захисту та інженерних робіт, що останніми роками стали умовно дуже дорогими для будівництва та обслуговування. Геосинтетика різко змінила практику геотехнічної інженерії в усьому світі. Геосинтетика може виконувати одну або декілька функцій для покращення механічної та/або гідравлічної поведінки конструкції, в яку вона включена - зміцнення ґрунту та стабілізація схилу, розділення/фільтрація, дренаж, контроль ерозії та захист від вологи (геомембрани).

Ключові слова: берегозахисні споруди, гідротехнічна споруда, геосинтетичний матеріал, захист, транспортна споруда.

Постановка проблеми

Стабілізація ґрунту є одним з основних методів тимчасового контролю ерозії, доки придорожня рослинність не зможе захистити цілісність схилу. Методи стабілізації використовуються для будівництва насипів, ремонту ярів та каналів як у природних зонах, так і на ділянках, покритих гранітною мульчою. Ерозія та інші пошкодження, що призводять до необхідності стабілізації ґрунту, можуть бути спричинені паводками, концентрованим потоком води, розірваними водопроводами чи пошкодженням водопропускних споруд або випадковими транспортними засобами.

Руйнування на ділянці зазвичай пояснюється надмірними гідравлічними силами, що діють на ґрунтовий насип або берег і викликають зміщення ґрунту [1].

Найпоширенішими методами захисту транспортних та гідротехнічних споруд від небезпек, пов'язаних з потоком, включають заходів з армування, що передбачає покриття русла або берегів каналу, або схилу насипу; заходи з уповільнення, що передбачає відхилення потоку з проникної або непроникної структури; влаштування додаткових лінійних елементів, що виступають у каналі для стимулювання відкладень вздовж берега.

Ефективний захист ґрунтових насипів транспортних та гідротехнічних споруд від розмиву можна досягнути за рахунок застосування

різноманітних геосинтетичних матеріалів, що виконують берегозахисну функцію.

Геосинтетичних матеріалів визначається як продукт, який має принаймні один компонент, виготовлений із синтетичного або природного полімеру, у формі листа, смуги або тривимірної структури, що використовується в контакті з ґрунтом та/або іншими матеріалами як невід'ємна частина конструкції, проекту або системи [2].

Для проектування нових, економічно ефективних берегозахисних споруд, а також для посилення існуючих берегових бар'єрів та споруд, що знаходяться під загрозою розмиву потрібні більш універсальні матеріали та інноваційні рішення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Концепція армованого ґрунту виникла щонайменше 6000 – 7000 років тому [3]. Природні матеріали, такі як очерет, гілочки, бавовна, джут, солома, дерево тощо, вперше використовувалися як розтягувальні добавки в ґрунті для будівництва на вершині гір, житл, доріг і навіть Великої Китайської стіни [3]. Поширеною проблемою використання природних матеріалів як арматури в земляному будівництві є біорозкладання цих матеріалів через мікроорганізми.

З появою полімерів на початку 20 століття став доступний більш стабільний і довговічний інженерний матеріал як розтягувальна добавка для

земляного будівництва.

За умови правильного формулювання полімери з періодом напіврозпаду в сотні років і більше можуть бути стабільними навіть у суворих умовах.

Сучасні методи механічної стабілізації ґрунту були впроваджені в 1960-х роках. Вперше застосований у Франції метод, відомий як «зміцнена земля», використовував вбудовані вузькі металеві стрічки для зміцнення ґрунту [4]. У 1972 році ця методика була прийнята в США Каліфорнійським відділом автомобільних доріг для будівництва підпирних стін [4]. Однак, одним з найефективніших матеріалів для захисту ґрунтових насипів, схилів стає геосинтетичний матеріал (геотекстиль).

Перша спроба використання тканин для армування доріг була здійснена Департаментом автомобільних доріг Південної Кароліни у 1926 році [5]. Полімери, що складають основну частину геосинтетики, почали комерційне виробництво лише через тридцять років, починаючи з полівінілхлориду (PVC) у 1933 році, поліетилену низької щільності (LDPE) та поліаміду (PA) (також відомого як нейлон) у 1939 році, пінополістиролу (EPS) у 1950 році, поліестеру (PET) у 1953 році та поліетилену високої щільності (HDPE) та поліпропілену (PP) у 1955 році [5]. Бюро меліорації США використовує геомембрани у водопровідних каналах з 1950-х років [5]. Пізніше. У 1950-х роках було виготовлено низку тканин для використання як розділові та фільтруючі шари між зернистими заповнювачами та слабкими підґрунтям. Ткані тканини (тепер вони називаються геотекстилем) відігравали вирішальні фільтруючі функції в прибережних проєктах у Нідерландах та США.

У 1960-х роках компанія Rhone-Poulenc Textiles у Франції почала працювати з нетканним голкопробивним геотекстилем для зовсім різних застосувань. Геотекстиль знайшов своє застосування як основа для систем опори автомобільних та залізничних колій. Хлорсульфований поліетилен (CSPE) був розроблений приблизно у 1965 році [5].

1970-х роках перший геотекстиль, використаний у дамбі, у 1970 році, був голкопробивним нетканним геотекстилем, який використовувався як фільтр для дренажу заповнювача нижче за течією в дамбі Валькросс (висотою 17 м) у Франції [5]. Геопіна вперше була застосована як легкий заповнювач у Норвегії в 1972 році.

Геотекстиль використовувався як арматура у підпирних стінах, крутих схилах тощо. Початок постійного процесу розробки стандартів розпочався зі створення спільного комітету ASTM D1318 [6] з геосинтетики та формування галузевих робочих груп. Перші зразки сітки Tensar були виготовлені в

лабораторіях Блекберна компанії Netlon Ltd, Велика Британія, у липні 1978 року.

Термін «геотекстиль» вперше ввели Жиру і Перфетті в 1977 році. До 1988 року геотекстиль називали пластиковою наповнюваною тканиною або фільтруючу тканину. Геотекстиль вперше був використаний у цивільних будівельних проєктах у США та Європі в 1960-х роках для будівництва доріг завдяки своїм ефективним дренажним і розділним функціям. З цього моменту технологія розвивалася настільки швидко, що виникла потреба організувати першу Міжнародну конференцію з геотекстилю в Парижі в 1977 році. Міжнародне геосинтетичне товариство (IGS) було засновано в 1982 році через потребу в більш глибоких знаннях і розумінні матеріал [7].

У 1980-ті роках початок використання геосинтетики припав на будівництво безпечних систем зберігання екологічно небезпечних відходів. Системи утримання ґрунту на основі стільникових геотекстильних сіток були вперше розроблені та оцінені у Франції в 1980 році. Netlon розробила подібну концепцію, але в більшому масштабі, з впровадженням матраца Tensar Geocell у 1982 році. Перше відоме застосування геосітки в доквіллі відбулося в 1984 році для виявлення витоків у подвійному водосховищі небезпечних рідких відходів у Хоупвеллі, штат Вірджинія. Кернер і Велш написали першу книгу про геосинтетику в 1980 році.

Міжнародне товариство геосинтетики було засновано в 1983 році. Перший том міжнародного журналу під назвою «Геотекстиль та геомембрани» був опублікований у 1984 році [5].

У 1990-ті роках багато стандартів щодо геосинтетики були опубліковані Американським товариством випробувальних матеріалів (ASTM), США; Міжнародною організацією зі стандартизації (ISO), Швейцарія; Британським інститутом стандартів (BSI), Велика Британія; Бюро індійських стандартів (BIS), Індія тощо. Другий міжнародний журнал під назвою «Geosynthetics International» був вперше опублікований у 1995 році [5].

Американське товариство випробувань та матеріалів (ASTM) D4439 [8] визначає геосинтетику як «плоский продукт, виготовлений з полімерного матеріалу, що використовується з ґрунтом, гірськими породами, землею або іншими геотехнічними інженерними матеріалами як невід'ємна частина штучного проєкту, споруди або системи».

Застосування геотекстилю було розпочато в галузі прибережного та гідротехнічного будівництва, інші застосування геосинтетики в цивільному будівництві виникли з цих початків [9].

З кінця 1970-х років застосування геосинтетики

в будівництві земляних споруд зросло в кілька сотень разів [3]. Наприклад, у 2003 році повідомлялося про щорічне світове використання 1400 мільйонів квадратних метрів геосинтетички [3].

Важливо, що геосинтетика була додана до списку традиційних будівельних матеріалів, таких як камінь, ґрунт, цемент, бітум, сталь та цегла. Глобальний ринок геосинтетички у 2022 році оцінювався в 11,5 мільярда доларів США, а до 2030 року прогнозується, що він досягне 37,9 мільярда доларів США [2].

Сьогодні світовий ринок геосинтетички становить понад 5000 мільйонів квадратних метрів на рік [3].

Сьогодні геотекстильні матеріали знаходять своє застосування як будівельні елементи для контролю ерозії, захисту дна від розмиву та розмивного заповнення, штучних рифів, бункерів, дамб, морських стін, облицювання та зміцнення дюн.

Програма досліджень Сполучених Штатів [10] оцінює, що щороку понад 150 000 людей гине через стихійні лиха, а вартість збитків зростає до понад 100 мільярдів доларів (25 % цих цифр відповідають катастрофам, пов'язаним з узбережжям). Це ілюструє, чому все частіше розробляються нові берегозахисні споруди. Крім того, в останні роки зросла важливість візуальної гармонії, а також оборотності інженерних заходів у пошуку сталих рішень для захисту [11].

У роботах Кляйна Бретелера М. [12, 13], Стаут'есдейка Т. [14], Піларчика К. В. [15], Безуена А. та Піларчика К. В. [16], Лещинського Д. [17], Лю Г. С. [18], Кобаяші Н. і Джейкобса Б. [19], Гутмана Л. [20], Ресіо-Моліна Дж. і Ясухара К. [21], Лоусона К. Р. [22], Чу Дж., Го В. та Ян С.В. [23] та інших висвітлюється проблема застосування берегоукріплюючих споруд з використанням геосинтетичних матеріалів.

В роботі [24] було проведено дослідження зі спорудження штучних споруд у вигляді труб з металевих гофрованих конструкцій на дамбі із застосуванням берегоукріплення.

Маркевичем А. та іншими [25] було розглянуто багатьох способів використання геосинтетичних матеріалів для боротьби з ерозією (внутрішньою та зовнішньою), в роботі представлено приклади гідротехнічного та цивільного застосування геосинтетичних матеріалів.

Формулювання мети статті

Метою дослідження є аналіз застосування геосинтетичних матеріалів під час захисту ґрунтових насипів транспортних та гідротехнічних споруд від розмиву у вигляді берегозахисних споруд.

Для досягнення поставленої мети необхідно

виконати наступні завдання:

- визначити основні функції геосинтетичних матеріалів, що застосовуються під час захисту транспортних та гідротехнічних споруд від розмиву;
- запропонувати конструктивні заходи берегозахисних споруд в транспортному та гідротехнічному будівництві.

Виклад основного матеріалу

Загальні підходи. Геосинтетика походить з природного газу, який вступає в реакцію з утворенням смоли у формі пластівців та змішується з добавками в різні утворення для отримання різних типів полімерних матеріалів, відомих як геосинтетика [28].

Конструювання протиерозійного захисту укосів із застосуванням геосинтетичних матеріалів виконується згідно з ГБН В.2.3-37641918-544 [26], однак існуючі норми не в повній мірі задовольняють сучасні вимоги до проектування та конструювання.

Схеми закладання геосинтетичних матеріалів для протиерозійного захисту розрізняють для систем постійної дії та тимчасової.

Конструктивні рішення, які застосовують для протиерозійного захисту постійної дії з жорстким укріпленням, поділяють на [27]:

- захист укосів потоконаправляючих дамб;
- захист укосів від дії набігаючих хвиль;
- захист каналів поверхневого водовідводу;
- захист основ фундаментів від розмивання.

Протиерозійний захист постійної дії з використанням об'ємних геоматів, геосот застосовують у водовідвідних каналах, на крутонахилених водовипусках і при захисті укосів насипів (виїмок) від ерозії інтенсивними атмосферними опадами. Тримірні протиерозійні геомати є ефективними для захисту в умовах (коротко строків опадів), і швидкості потоку води до (5 – 6) м/с. В умовах довготривалого потоку більш ефективними є жорстко армуючі протиерозійні системи.

При перевищенні крутизни укосів насипів або виїмок більше за нормативну, необхідно передбачати заходи укріплення укосів з використанням протиерозійних геоматів або сіток. Необхідність застосування протиерозійного захисту оцінюють по швидкості потоку і гранулометричному складу ґрунту основи згідно з ГБН В.2.3-37641918-544 [26].

В той час, геомати слід застосовувати як протиерозійні матеріали для захисту ґрунтових поверхонь та створення стійкого рослинного покриву, у тому числі для запобігання ерозійним процесам поверхні укосів насипів та виїмок при будівництві, реконструкції та ремонті

автомобільних доріг, залізничних колій, мостових конусів, водопропускних споруд, армогрунт, непідтоплованих берегових ліній та урізів води.

Геосинтетичні матеріали, залежно від свого різновиду та конструкції, у якій вони використовуються, можуть виконувати різні функції та їх комбінації.

Різні геосинтетичні продукти були розроблені для виконання п'яти різних функцій, включаючи [3, 15, 27]:

- розділення, відокремлення – для розділення різнорідних матеріалів, щоб зберегти функціональність кожного матеріалу, наприклад, геотекстиль, що використовується під баластом залізничної колії для відділення земляного полотна від баласту;

- ізоляція, утримання рідини або ґрунту (для утримання частинок рідини або ґрунту);

- захист, запобігання розмиву ґрунту через споруду, дренаж – для забезпечення достатнього потоку рідини в площині геосинтетики;

- контроль ерозії, зміцнення земляного полотна проти ковзання, армування – для покращення жорсткості та міцності ґрунту шляхом формування композиту ґрунт-геосинтетичний матеріал або для використання як зв'язки/анкери для стабілізації потенційних клинів руйнування земляної конструкції;

- фільтрацію (проникність) – для забезпечення достатнього потоку рідини по площині геосинтетики, зберігаючи при цьому цілісність ґрунту без помітної втрати частинок ґрунту.

Для виконання різних функцій, зазначених вище, були виготовлені різні типи геосинтетиків, включаючи [28]:

- геотекстиль;
- геосітки;
- геомембрани;
- геомембрани;
- геоеlementи;
- геосинтетичні глиняні облицювання;
- геокомпозити.

Детальні описи та застосування геосинтетиків були наведені в роботі Кернера Р.М. [29], Ван Сантвортта [30], Інгольда Т.С. та Міллера К.С. [31], Гольца Р.Д., та ін. [32].

Наразі в Північній Америці доступно понад 600 геосинтетичних продуктів [28]. Серед різних типів геосинтетиків геотекстиль, геосітки, геоеlementи та геокомпозити використовуються як арматура в армуючих застосуваннях, функція армування іноді є результатом синергетичного покращення продуктивності системи. Іншими словами, функції розділення, фільтрації, дренажу та стримування зерен ґрунту можуть працювати синергетично разом

із функцією армування для покращення продуктивності земляної споруди. Різні функції геосинтетики часто поводяться таким чином, що загальний ефект перевищує суму окремих ефектів.

Основні функції геосинтетичних матеріалів полягають в захисті схилу від гідравлічних (та інших) навантажень, таких як хвилі і течії. Для оцінки стабільності потрібна інформація про гідравлічні розрахункові умови, структурні властивості та можливі механізми руйнування. Геотекстиль в першу чергу сприяє критеріям фільтрації та розділення.

Проектування берегоукріплюючих споруд необхідно конувати на основі надійних вихідних даних, одержуваних під час комплексних інженерних вишукувань, тривалих спостереженнях та спеціальних дослідженнях. Вихідні матеріали для розробки проекту берегоукріплюючих споруд повинні включати [27]:

- відомості про межі ділянки, що захищається;
- відомості про досліджувану ділянку її поточний технічний стан;
- відомості про перспективи розвитку досліджуваної ділянки дороги;

- матеріали регіональних досліджень та інженерних вишукувань, включаючи картографічні матеріали, поздовжні та поперечні профілі, суміщені з геологічними розрізами та нанесеними розрахунковими рівнями підземних, паводкових та межених вод;

- дані щодо прогнозу наслідків та втрат (соціальних, економічних та екологічних) від впливу небезпечних гідрологічних та геологічних процесів на досліджувану ділянку.

Вихідні дані для проектування берегоукріплюючих споруд повинні бути засновані на узагальненій інформації, що охоплює всі види розвідувальних робіт (інженерно-геодезичних, інженерно-гідрометеорологічних, інженерно-геологічних, інженерно-геотехнічних, інженерно-екологічних), виконаних на досліджувану ділянку.

Під час підбору найбільш ефективного типу берегоукріплюючої споруди для конкретної ділянки та правильного призначення її параметрів необхідно виконувати докладні гідрологічні дослідження режиму річки, результати яких мають містити дані:

- довжина та джерела живлення річки, площа її водозбірного басейну;

- ширина та глибина руслового потоку, його ухил;

- характер берегів та тип руслового процесу на досліджуваній ділянці річки, оцінка характеру глибинних та планових деформацій русла та заплави;

- швидкості течії, витрата та позначки рівня

річки в межень та в паводки, їх повторюваність та забезпеченість;

- характеристика паводків, їх інтенсивність та тривалість, межі затоплення території;

- дані про висоту, довжину, період та забезпеченість вітрових хвиль;

- тривалість льодоходів, а також дані про товщину та густини крижаного покриття;

- наявність і характер донних наносів (щодо окремих дерев, їх довжині та діаметру).

Типи берегоукріплюючих споруд, їх параметри та компонування слід вибирати на підставі порівняння техніко-економічних показників різних варіантів з урахуванням:

- категорії та перспективи подальшого розвитку ділянки, що захищається;

- поточного технічного стану земляного полотна;

- функціонального призначення, класу та необхідного терміну експлуатації проєктованої берегоукріплюючої споруди;

- досвід експлуатації берегоукріплюючих споруд у подібних інженерно-геологічних та гідрологічних умовах;

- існуючих споруд та заходів інженерного захисту, розташованих на досліджуваній ділянці або прилеглих до неї територіях;

- топографії дна та берега, наявності перешкод на підходах до схилу або укосу, що захищається;

- місцевих кліматичних умов (інтенсивності та тривалості злив, кількості опадів і розподілу їх по місяцях, максимальних швидкостях вітру тощо);

- типу руслового процесу річки та її змін під впливом споруджуваних або інших довколишніх споруд, систематичних та нерегульованих заборів ґрунту з русла та тощо;

- місцевих гідрологічних умов (амплітуди коливань та повторюваності рівнів води в річці, висоти та тривалості затоплення, швидкості течії, висоти хвилі, льодового режиму, тощо);

- місцевих викривлень водної поверхні на крутих схилах, під час змінно-нагінних та інших явищах, а також при різному плановому становищі об'єкту будівництва на заплавно-руслових масивах річкових долин;

- умов зливу заплавної та поверхневих вод та обумовленої цим можливості утворення лінійної ерозії на схилах та укосах;

- геологічної будови надводної та підводної частин берегової схилу або укосу (типу ґрунтів, їх властивостей, стану тощо);

- існуючих та прогнозованих небезпечних інженерно-геологічних процесів на ділянці (зсувів, обвалів тощо);

- умов та методів виконання будівельних робіт;

- заданих термінів початку сталого функціонування ділянки, що захищається, і сезонів виконання робіт;

- виду та кількості наявних місцевих будівельних матеріалів, можливі умови їх розробки;

- вплив проєктованої берегозахисної споруди на навколишнє середовище;

- вимог судноплавства, лісосплаву та водокористування;

- забезпечення естетичних та архітектурних вимог.

Інженерний захист територій та споруд від зсувів, обвалів, підтоплення та затоплення здійснюють з урахуванням ДБН В.1.1-25 [33], ДБН В.1.1-46 [34].

Функція розділення геосинтетичними матеріалами. Використання геотекстилю зберігає і покращує однорідність і функціональність різних матеріалів.

Геотекстиль запобігає проникненню фракції в ґрунт слабкої основи. Геотекстиль обмежує шар фракційного матеріалу, і завдяки цьому можливо досягти вищого ступеню ущільнення шару і, як наслідок, вищої несучої здатності.

Вдається уникнути забруднення фракційного матеріалу підстилаючими ґрунтами і в такий спосіб можливо попередити зниження несучої здатності.

Проникнення тонкозернистих ґрунтових частинок у чистий крупнофракційний шар особливо проявляється під динамічним навантаженням і має назву «ефект закачування». Такі тонкозернисті фракції проявляють себе як шар змащування між крупними фракціями й можуть суттєво знизити зчеплення, і, як наслідок, знижується міцність при зсуві матеріалу крупнозернистого шару. Крім того, незабруднений матеріал краще виконує дренажні функції та краще протистоїть ефекту морозного спучування.

Для виконання функції розділення найбільш розповсюдженим та доцільним є використання нетканого термічно скріпленого геотекстилю та термічно зміцненого геотекстилю [27].

Під час розділення геотекстиль в конструкції також виконують функції стабілізації та укріплення. Під час стабілізації на геотекстиль передаються напруження розтягу від зернистого матеріалу насипу і, таким чином, це покращує умови роботи підстилаючого ґрунту (матеріалу) основи, який у звичайних умовах має малу міцність при розтягу при прикладанні вертикальних зусиль.

Геотекстилі з високим початковим модулем (термічно скріплені) дозволяють розподілити навантаження, зменшити напруження й забезпечити опір переміщенню. Оптимальне видовження (45 – 55) % запобігає місцевому пробиванню геотекстилю, оскільки це дозволяє геотекстилю

розтягуватися навколо каменю, який його пронизує.

Функція ізоляції геосинтетичними матеріалами. Функція ізоляції геосинтетичними матеріалами ефективна при влаштуванні протифільтраційних екранів полігонів відходів, резервуарів-накопичувачів, водоймищ, екрануванні дамб тощо [27]. До таких матеріалів можна віднести геомембрани та бентонітові мати.

Функція захисту геосинтетичними матеріалами. Термічно зміцнений геотекстиль застосовується під час захисту гідроізоляційних екранів від пробивання та механічного пошкодження. При цьому геотекстиль знижує точкове контактне напруження від суміжного шару кам'яного шару та забезпечує захист екрану від тертя об бетонні поверхні під час температурного розширення як під час будівництва, так і впродовж експлуатації. Найбільш важливими характеристиками геотекстилів для виконання функції захисту є показники опору пробиванню (показник поверхневої щільності не відображає повною мірою всіх захисних функцій геосинтетичного матеріалу), ефективність захисту, рейферна міцність та однорідність матеріалу [27].

Широко застосовуються геосинтетичні матеріали під час виробництва матраців [35]. Найпоширеніші геосинтетичні матраци (рис. 1):

- тканий матрац, що включає в себе два геотекстилі, сплетені один над одним;
- матрац трубчастий, геотекстильні шари зшиваються вздовж так, щоб утворилися паралельні трубки, які можуть бути засипані піском;
- сферичний матрац, що дозволяє трубкам після наповнення набувати напівциліндричну форму.

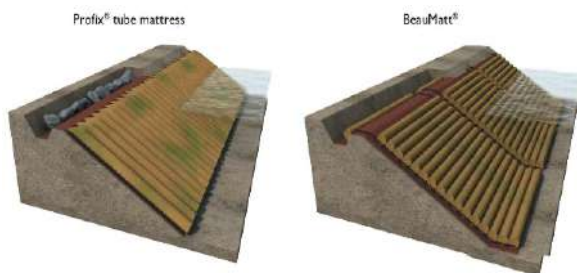


Рис.1. Матрац-труба Profix® і матрац BeauMatt®

Крім того, ефективно використовується під час захисту нижнього б'єфу водопропускних споруд, рис. 2 [36].

Функція контролю ерозії геосинтетичними матеріалами. Геосинтетик використовується для зниження ерозії ґрунту дощовими опадами і водами поверхневого стоку.

Геосинтетичні полотна тимчасової дії та легкі поліамідні протиерозійні геомати постійної дії укладаються на поверхню укосу, що сприяє проростанню рослинності та створенню композиту з геомату та кореневої системи рослинності, що запобігає вітровій та водній ерозії укосу.

Геомати є багатошаровим просторовим геосинтетичним матеріалом:

– верхній профільований шар якого утворений довільно переплетеними полімерними мононитками, скріпленими термічним способом (екструдований геомат);

– як нижній шар використовується проникна дискретно-зміцнена просторова конструкція із синтетичних, сумішових або натуральних волокон, що містить у своїй структурі насіння багаторічних трав, підібраних з урахуванням природно-кліматичних умов району застосування матеріалу (біомат).



Рис.2. Захисту нижнього б'єфу водопропускних споруд матрацами

Як армуючі елементи конструкції при виготовленні окремих марок геомату можуть застосовуватися георешітки (ткана, неткана, в'язана, пластмасова екструдована), геосітки (в'язана, плетена, пластмасова екструдована), геополотно ткане і неткане, геотекстиль тканий і нетканий, а також орієнтовані.

Армуючі елементи можуть застосовуватися в конструкції матеріалу як у складі його верхнього або нижнього шарів, так і як додатковий проміжний шар між ними. Окремі шари матеріалу з'єднуються між собою механічним способом (ниткопробивним або голкопробивним способами, термоскріпленням або склеюванням).

За погодженням із споживачем до структури нижнього шару геоматів «можуть бути включені органо-мінеральні добрива, вологоутримуючі добавки та біологічні стимулятори росту, підібрані з урахуванням складу ґрунтів та природно-кліматичних умов району застосування матеріалу.

Приклад застосування геомату із відкритою структурою, попередньо заповнений мінеральним

фільтром із бітумної крихти наведено на рис. 3 [37].



Рис.3. Влаштування EnkaMat A20 на схилі берега

Функція фільтрації геосинтетичними матеріалами. Геосинтетичний матеріал працює подібно до зернистого (піщаного) фільтра, пропускаючи воду й затримуючи захоплені фільтраційним потоком ґрунтові частинки від виносу.

Геотекстиль використовується для запобігання попаданню ґрунтів у дренажні крупнозернисті шари чи геотуби, не перешкоджаючи при цьому водному потоку потрапляти в дренажний шар/систему. Геотекстилі також використовуються під кам'яною засипкою та армуючими матеріалами в конструкціях укріплення укосів дамб, берегів річок і водойм для запобігання ерозії ґрунтів.

При фільтрації звертається увага на такі процеси, як: суфозія, ерозія і кальматація (забивання) самого геосинтетика. Розмір пор ефективного геотекстилю повинен бути достатньо малим, щоб затримувати великі ґрунтові частинки для запобігання ерозії ґрунту. Малі ґрунтові частинки спочатку повинні проходити через геотекстиль для того, щоб підтримувати вибудову перехідної сітки з більших частинок, які працюють як природний ґрунтовий фільтр, суміжний до геотекстилю.

Якщо розмір пор в геотекстилі є дуже малим, то малі частинки не можуть вимитися назовні й створюється перехідна сітка малого діаметру. Це створює природний ґрунтовий бар'єр з низькою водопроникністю.

Обмеження при використанні геосинтетиків для протиерозійного захисту укосів та схилів виконують згідно з ГБН В.2.3-37641918-544 [26].

Для протиерозійного захисту укосів та схилів не використовують геосинтетика, які виготовлені зі смужок, бо відбувається вимивання дрібнозернистих часток під окремими смужками матеріалу та вони не забезпечують арочного ефекту.

Якщо на будівельному об'єкті наявні ґрунти пілуваті, ґрунти з переривчастим гранулометричним складом, шаруваті піщано-пілуваті товщі, дисперсні глини, кам'яна мука тощо, то необхідно виконувати випробування протиерозійних матеріалів в умовах будівництва.

Інші обмеження визначають згідно з 8.4 ГБН В.2.3-37641918-544 [26].

На рис. 4 наведено застосування фільтрів із використанням геосинтетичного матеріалу [38].

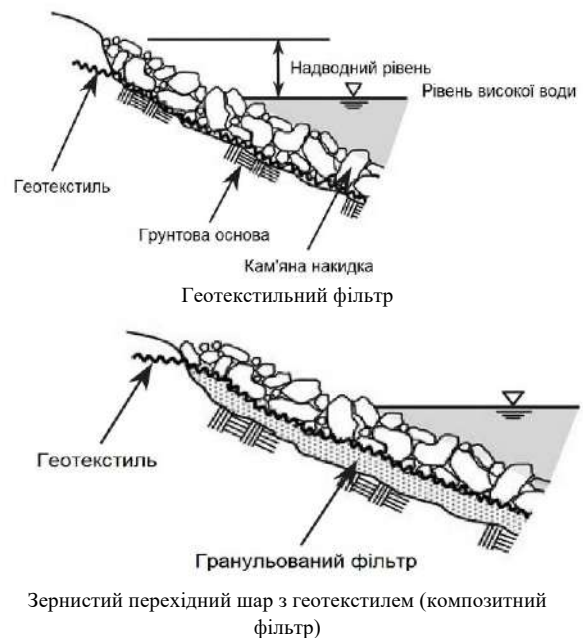


Рис.4. Застосування фільтрів із використанням геосинтетичного матеріалу

Вимоги до армуючих матеріалів.

Геосинтетичні матеріали повинні відповідати вимогам ГБН В.2.3-37641918-544 [26] з урахуванням вимог ДСТУ EN 13249 [39], ДСТУ EN 13253 [40], ДСТУ EN 13255 [41], ДСТУ EN 13257 [42], ДСТУ 13719 [43]. Критеріями вибору марки геомембрани приймаються згідно з ДСТУ EN 13361 [44], ДСТУ EN 13362 [45].

Порядок проведення розрахунку конструкцій. На сьогоднішній день активно застосовуються підходи розрахунків розроблених в США, розповсюджені підходи включають Єврокод і інші методи проектування, такі як EBGEO (Empfehlungen für den Entwurf und die Berechnung

von Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen) [46] і британський стандарт BS 8006 [47].

Низка виробників геосинтетичних матеріалів розробили власні посібники з проектування [5]. Однак, для перевірки реальної цінності процедури проектування конкретного продукту перед його використанням у польових умовах необхідно мати належні базові знання з методології проектування. Повномасштабні випробування прототипу є хорошим методом перевірки проектів, але витрати можуть обмежувати застосування лише великими проектами. У менших проектах може бути проведено фізичне моделювання покривного шару під гідравлічним впливом для перевірки проекту або уточнення результатів математичного моделювання.

У методі часткового коефіцієнта безпеки розрізняють такі граничні стани [48]:

– граничний стан за межами допустимої здатності – це стан конструкції, перевищення якого негайно призводить до числового руйнування або іншої форми руйнування. Він відомий як граничний стан за межами допустимої здатності (ULS) згідно з DIN 1054 [49]. Розрізняють три випадки граничного стану.

– граничний стан експлуатаційної придатності (SLS) – це стан конструкції, перевищення якого більше не відповідає умовам, визначеним для її використання. Він відомий як граничний стан експлуатаційної придатності (SLS) згідно з DIN 1054 [49].

Граничний стан EQU описує втрату статичної рівноваги. Він включає:

- аналіз безпеки від перекидання,
- аналіз безпеки від підйому або підйому,
- аналіз безпеки від гідравлічного підйому.

Граничний стан EQU включає лише сприятливі та несприятливі дії, але не опір.

Визначальна гранична умова:

$$F_d = F_k \cdot \gamma_{dst} \leq G_k \cdot \gamma_{stb} = G_d, \quad (1)$$

тобто дестабілізуюча дія F_k , помножена на коефіцієнт часткової безпеки $dst > 1,0$, може бути лише такою ж великою, як стабілізуюча дія G_k , помножена на коефіцієнт часткової безпеки $stb < 1,0$. Граничний стан STR описує руйнування конструкцій та конструктивних елементів або руйнування ґрунту. Він включає:

– аналіз несної здатності конструкцій та конструктивних елементів, що піддаються навантаженням від ґрунту або спираються на ґрунт;

– аналіз несної здатності ґрунту, наприклад, забезпеченої пасивним тиском ґрунту або опором несної здатності, щоб переконатися, що вона не перевищена.

Аналіз несної здатності ґрунту, щоб

переконатися, що вона не перевищена, виконується точно так само, як і для будь-якого іншого будівельного матеріалу. Граничний стан завжди є визначальною умовою:

$$E_d = E_k \cdot \gamma_F \leq R_d, \quad (2)$$

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_R}, \quad (3)$$

тобто характерна дія або вплив E_k , помножена на частковий коефіцієнт запасу міцності F , може бути лише таким самим, як характерний опір R_k , поділений на частковий коефіцієнт запасу міцності R . Характеристикою граничного стану STR є те, що впливи та опорності визначаються за допомогою характерних значень. Часткові коефіцієнти запасу міцності не вступають у дію, доки не застосовується рівняння граничного стану.

Граничний стан GEO є специфічним для геотехнічної інженерії. Він описує втрату загальної стійкості. Він включає:

- аналіз стійкості схилу,
- аналіз глобальної стійкості.

Визначальна умова граничного стану:

$$E_d = R_d, \quad (4)$$

тобто розрахункове значення E_d впливів може бути лише таким самим, як розрахункове значення опорів R_d . Геотехнічні дії та опори визначаються з використанням розрахункових значень міцності на зсув.

Основними гідрологічними факторами, що визначають надійність берегоукріплюючих споруд, земляного полотна дороги (транспортного та гідротехнічного будівництва), є:

- режимні (річні та добові) коливання рівня води, що визначаються роботою гідротехнічних споруд, паводкові підвищення рівня, згинно-нагінні явища та сейші;
- розмивний вплив течій: стокових, хвилевих, сейшевих;
- вітрові та суднові хвилі;
- льодові впливи у всьому їх різноманітті;
- режим руху зважених та донних наносів, у поєднанні з його впливом на динаміку берегів;
- нестационарний процес переформування русла та берегів;
- зниження міцнісних властивостей глинистих ґрунтів з утворенням повзучості;
- режим підземних вод у бортах водойми.

Системи облицювання дуже ефективні для контролю ерозії схилів, включаючи прибережні берегові лінії, береги струмків, береги каналів, схили пагорбів та схили насипів. У звичайних

системах градієнтні зернисті шари використовуються як фільтри під насипом та іншими системами облицювання.

За останні чотири десятиліття геотекстильні шари використовувалися як заміна градієнтним зернистим фільтрам у системах контролю ерозії насипом. Для оцінки стійкості облицювання (покровного шару та підшарів) потрібна інформація про гідравлічні умови, структурні властивості та можливі механізми руйнування. Під час проектування облицювання проектувальник повинен враховувати, що геотекстильний фільтр є лише одним із задіяних структурних компонентів, і є ще кілька компонентів, які необхідно спроектувати (рис. 5) [46].

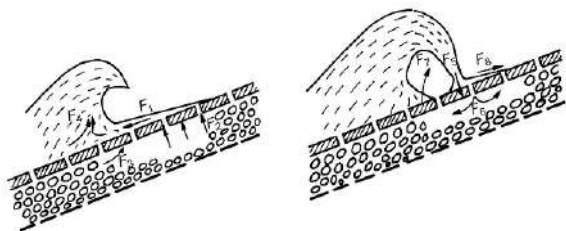


Рис.5. Різні сили, що виникають внаслідок водних хвиль, які можуть діяти на систему облицювання:

F_1 – сили, що виникають внаслідок низхідного потоку; F_2 – сили підняття через воду у фільтрі; F_3 – сили підняття через наближення фронту хвилі; F_4 – сили, що виникають внаслідок зміни поля швидкості; F_5 – удар хвилі; F_6 – сили підняття через масу води, що падає на схил; F_7 – сила, що виникає внаслідок низького тиску на схил через захоплення повітря; F_8 – сили, що виникають внаслідок висхідного потоку.

Відмова будь-якого одного компонента може призвести до руйнування всієї конструкції облицювання. Щоб досягти ідеальної системи контролю ерозії схилу, необхідно враховувати такі аспекти:

- стійкість покривного шару, підшарів, підґрунтя, враховуючи всю систему, а також окремий елемент;
- гнучкість, тобто здатність слідувати осіданням;
- довговічність покривного шару та геотекстильного фільтра;
- можливість перевірки на пошкодження;
- легкість розміщення та ремонту;
- низька вартість будівництва та обслуговування;
- загальна продуктивність.

Проектування облицювань, як і інших гідротехнічних споруд, має базуватися на

комплексному підході до взаємодії між спорудою та ґрунтом. Основними геотехнічними обмеженнями, які слід оцінювати при проектуванні облицювань на похилій місцевості, є:

- загальна стійкість схилів;
- осідання та горизонтальні деформації через вагу споруди;
- просочування ґрунтових вод;
- ерозія трубопроводів або внутрішня ерозія через просочування;
- розрідження, спричинене циклічним навантаженням води внаслідок хвильової дії або землетрусів.

Підняття геотекстилю не буде (рис. 6), якщо сила F_R від насипу, перпендикулярного до схилу, перевищує силу F_w від тиску води під геотекстилем [5].

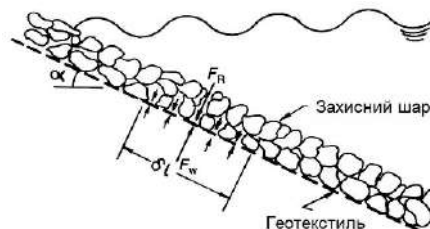


Рис.6. Система облицювання із застосуванням геотекстилю:

α – кут ухилу в градусах; γ_w – питома вага води в kH/m^3 ; $W'c$ – занурена вага на одиницю площі захисного покривного матеріалу в kH/m^2 ; Δh – втрати напору через геотекстиль у м.

В даному випадку можна скористатися визначенням [50], за умови відсутності підняття геотекстилю ($F_R > F_w$), оцінити за допомогою аналітичного підходу, заснованого на численні стійкості, S_N , яке визначається нижче:

$$S_N = \frac{H}{\gamma'_R D}, \quad (5)$$

де H – висота хвилі в метрах,
 D – глибина захисного покривного матеріалу в метрах;
 γ'_R – занурена відносна питома вага покривного матеріалу (безрозмірна).

Відмітки окремих частин берегоукріплюючих споруд, типи та конструкції їх проектують з урахуванням позначок річних та добових режимних коливань рівнів, максимальних рівнів води при паводках, а також короткострокових підвищення та пониження рівнів при нагонах, згонах та сейшах.

Глибина розмиву підшви укосів насипів течією визначається відповідно до [51] за формулою:

$$h_{розм} = 0,93 \cdot \left(\frac{V_p \cdot h_n}{\sqrt{g \cdot d^{0,2}}} \right)^{0,77} - h_n, \quad (6)$$

де V_p – розрахункова швидкість потоку у підшови відкосу (берегового схилу), що захищається, м/с;

h_n – глибина потоку у підшови відкосу (берегового схилу), що захищається, м;

g – прискорення сили тяжіння (9,8 м/с²);

d – середній діаметр фракцій ґрунту, глибину розмиву якого прогнозують, м, можливо застосування для зв'язних ґрунтів розрахункового підходу – $d = 4,5 \cdot (0,15 + C_p)$;

C_p – розрахункове зчеплення зв'язних ґрунтів, МПа, що встановлюється випробуванням.

Оцінку льодового впливу на можливість зміщення осідаючого масиву виконують згідно рекомендацій [4].

Згідно з ГБН В.2.3-37641918-544 [26] розрахункові напруження зсуву визначають за формулою:

$$\tau_p = \gamma_w \times d \times i_f, \quad (7)$$

де τ_p – розрахункові напруження зсуву, Па;

γ_w – густина води, кг/м³;

d – глибина потоку, м;

i_f – уклон поверхні стоку (уклон укосу).

Вибраний геосинтетик для протиерозійного захисту задовольняє критерію критичних напружень зсуву, якщо виконується умова:

$$\tau_{доп} \geq \tau_p \times \gamma_m \times \gamma_n, \quad (8)$$

де $\tau_{доп}$ – допустимі напруження зсуву, Па;

γ_m – частковий коефіцієнт запасу стійкості;

γ_n – частковий коефіцієнт запасу на наслідки від втрати внутрішньої стійкості конструкції.

Стійкість конструкції зміцнення на поверхні укосу оцінюють на основі теорії граничної рівноваги. Сума утримуючих сил має перевищувати зусилля перекидання:

$$K_{зан} = \frac{\sum T_{ym}}{T_e} \geq 1,25, \quad (9)$$

де $\sum T_{ут}$ – сума сил, що утримують конструкцію зміцнення на укосі;

T_b – зсув зусилля від ваги конструкції зміцнення на укосі.

$$\sum T_{ут} = T_{mp} + T_{осн} + T_{анк}, \quad (10)$$

де $T_{тр}$ – утримуюче зусилля, що створюється тертям і зчепленням по поверхні ковзання;

$T_{осн}$ – величина пасивної відсічі при упорі конструкції зміцнення в основі земляного полотна біля його підшови;

$T_{анк}$ – утримуюче зусилля за рахунок кріплення конструкції за допомогою несучих анкерів.

Розрахункові характеристики ґрунту укосу – зчеплення та кут внутрішнього тертя у разі, якщо у конструкції зміцнення використовується геотекстильний прошарок, слід приймати 60 % від вихідних показників ґрунту. У процесі формування захисного шару під дією власної ваги конструкція частково занурюється в ґрунт укосу. Структура та форма полотна створює додаткове зчеплення. Зсув може відбутися по площині, що проходить через основу виступів, тобто частково по ґрунту, однак задля забезпечення запасу міцності вводиться понижувальний коефіцієнт $k_n = 0,6$. Оскільки в проекті зсувні характеристики ґрунту укосу відсутні, приймаємо їх згідно з табл. 1 при $\sum N_p = 1$ [27].

Таблиця 1
Розрахункові значення зсувних характеристик пісків та піщаних шарів залежно від розрахункової кількості прикладеного розрахункового навантаження

Пісок із вмістом пилувато-глинистої фракції, %	Кут внутрішнього тертя, град. / зчеплення, МПа, при сумарному прикладанні навантаження $\sum N_p$, одиниць транспортних засобів				
	1	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	≥10 ⁶
Крупний					
0	<u>35</u> 0,004	<u>33</u> 0,003	<u>32</u> 0,003	<u>31</u> 0,003	<u>29</u> 0,003
5	<u>34</u> 0,005	<u>31</u> 0,004	<u>30</u> 0,004	<u>29</u> 0,003	<u>28</u> 0,003
Середньої крупності					
0	<u>32</u> 0,004	<u>30</u> 0,004	<u>30</u> 0,003	<u>28</u> 0,003	<u>27</u> 0,002
5	<u>33</u> 0,005	<u>30</u> 0,004	<u>29</u> 0,003	<u>28</u> 0,003	<u>26</u> 0,002
Дрібний					
0	<u>31</u> 0,003	<u>28</u> 0,003	<u>27</u> 0,002	<u>26</u> 0,002	<u>25</u> 0,002
5	<u>31</u> 0,005	<u>27</u> 0,004	<u>26</u> 0,004	<u>25</u> 0,003	<u>24</u> 0,003
8	<u>31</u> 0,006	<u>27</u> 0,005	<u>26</u> 0,004	<u>25</u> 0,003	<u>23</u> 0,003

Для розрахунків стійкості геосинтетичних матраців можливе застосувати співвідношення (під час заповнення від 90 % до 95 %):

$$\frac{D_k}{D_d} = 0,6 \dots 0,8 \quad (11)$$

де D_k – ефективна товщина геотекстильного матраца, м;

D_d – максимальний діаметр труб матраца, м.

Часто використовувана (середня) товщина матраца становить 0,20 м.

Протягом понад двох десятиліть геотекстильні мішки, заповнені піском (геомішки), використовуються як засіб довгострокового захисту берегів річок, однак, незважаючи на їх використання у значній кількості, принципів проектування таких споруд ще не є чітко розробленими. Активні дослідження проводяться в Німеччині та Австралії, німецькі рекомендації «EAG-CON» від Німецького геотехнічного товариства (DGGT) мають описати принципи застосування геомішків, параметри матеріалів та вимоги до системи, проектування, забезпечення якості, можливості будівництва та монтажу, а також технології [52].

Можна застосувати просту модель, яка апроксимує гідродинамічні сили та крутні моменти, що діють на несферичну частинку в неоднорідному полі потоку. Модель дискретизує частинку на секції з еквівалентним розміром за допомогою простих геометричних розрахунків. Таким чином, геомішки для гідродинамічних цілей апроксимуються як низка взаємопов'язаних простих прямокутних плоских пластин. Опір та підйомна сила розраховуються для кожної пластини на основі напівемпіричних моделей, такими як модель опору для несферичних частинок [53] та модель підйомної сили [54].

Рівняння опору має вигляд:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_f C_D A_{sect} V_{rel} |V_{rel}| \quad (12)$$

де, ρ_f – густина рідини;

C_D – коефіцієнт опору;

V_{rel} – відносна швидкість;

A_{sect} – площа поперечного перерізу, розрахована за діаметром еквівалентної сфери об'єму дискретизованого перерізу.

Рівняння підйомної сили [54]:

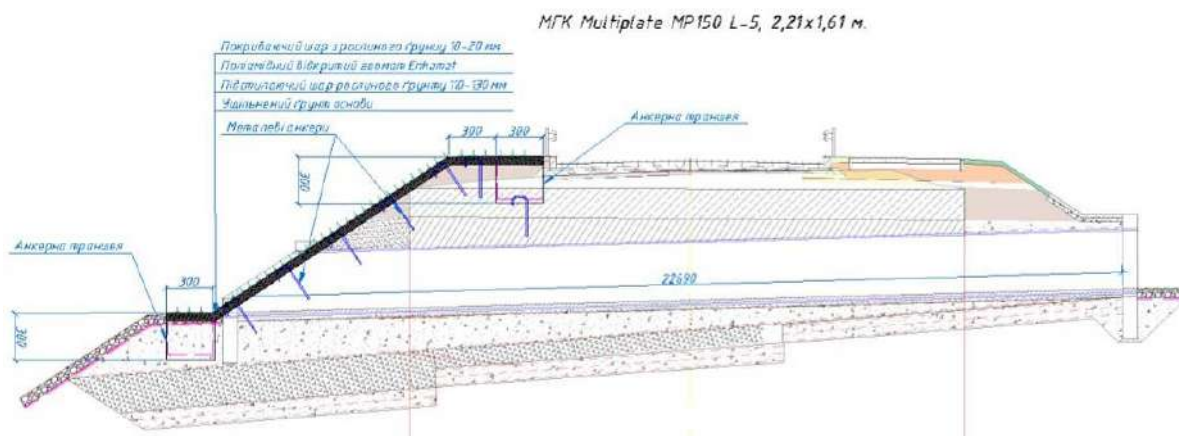
$$F_L = \frac{1}{2} \rho_f C_D A_{sect} \frac{\vec{z} \cdot \vec{V}_{rel}}{|V_{rel}|} [\vec{z} \times \vec{V}_{rel}] \times V_{rel} \quad (13)$$

де, \vec{z} – напрямок головної осі частинки.

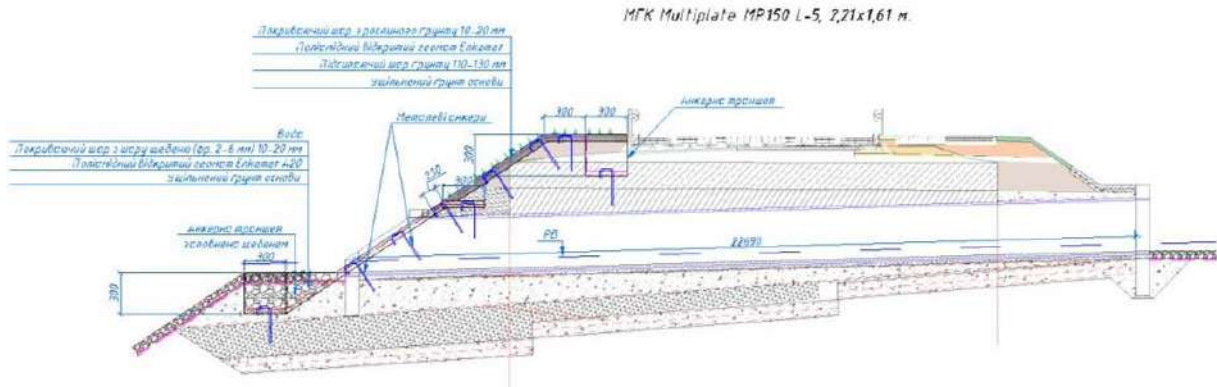
На основі розрахунку загальна сила підсумовується для всіх плоских пластин. Загальний крутний момент, що діє на частинку, розраховується шляхом підсумовування крутного моменту, що генерується загальною кількістю гідродинамічних сил кожної з дискретизованих плоских пластин відносно центру ваги частинки в цілому.

Традиційно, берегозахисні споруди проектуються методом граничної рівноваги [50]. Цей метод також застосовується для визначення товщини бетонного матраца, необхідного для витримування певної висоти хвиль.

Конструктивні рішення. Запропоновано конструктивні рішення на основі розроблених типових рішень [27] з вкладання геосинтетичних полотен під час спорудження берегозахисних споруд. На рис. 7 наведено приклад застосування берегоукріплюючих споруд під час будівництва дорожніх водопропускних труб з металевих гофрованих конструкцій (МГК Multiplate MP 150 L-5 м, 2,21x1,61 м) на автомобільних дорогах.

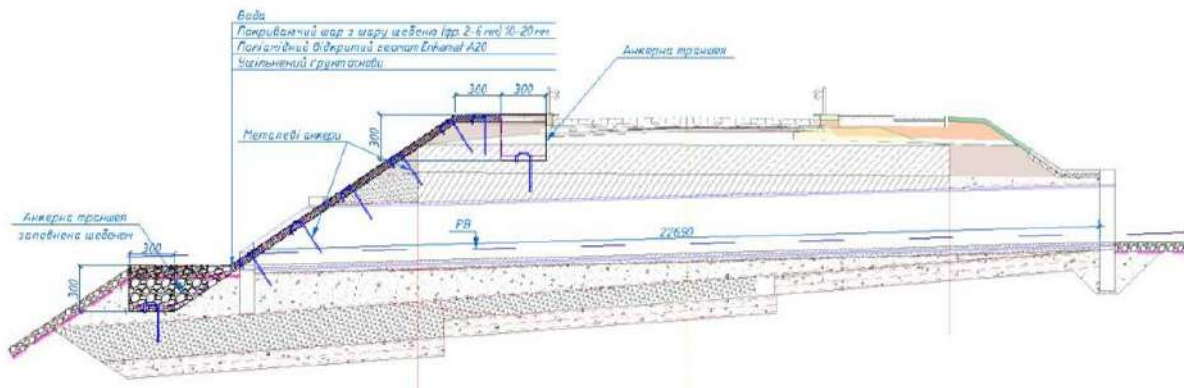


застосування поліамідного відкритого геомата Enkamat



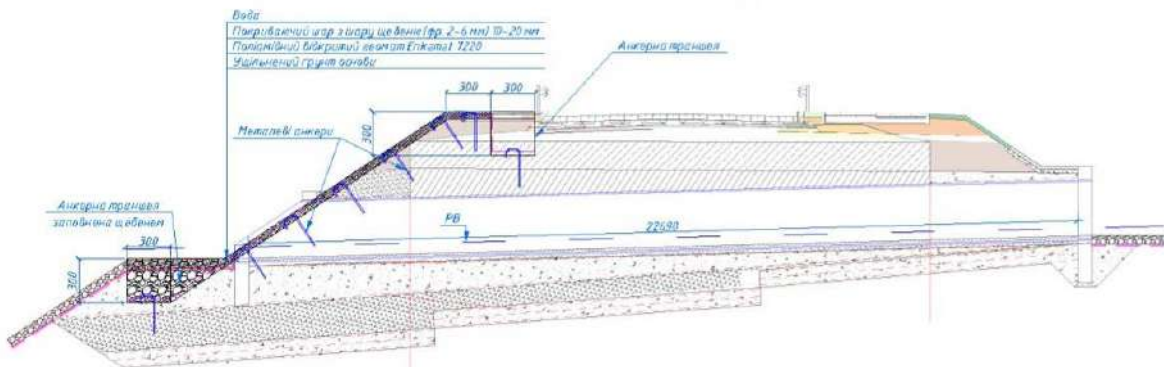
застосування поліамідного відкритого геомата Enkamat та Enkamat A20

МГК Multiplate MP150 L-5, 2,21x1,61 м.



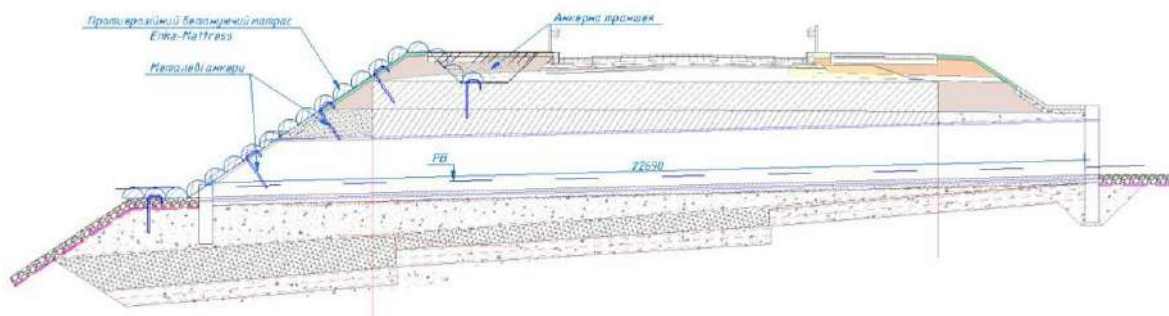
застосування поліамідного відкритого геомата Enkamat A20

МГК Multiplate MP150 L-5, 2,21x1,61 м.



застосування поліамідного відкритого геомата Enkamat 7220

МГК Multiplate MP150 L-5, 2,21x1,61 м.



застосування противерозійного бетонуючого матраца Enka-Mattress

Рис.7. Застосування берегоукріплюючих споруд з використанням геосинтетичних матеріалів

Геомати Enkammat являють собою, поліамідні тривимірні синтетичні геомати із хаотично розміщених ниток, термічно скріплених між собою у місцях перетинів. Завдяки своїй структурі Enkammat ефективно утримує частинки ґрунту з насінням та створює сприятливі умови для росту рослин, забезпечуючи захист схилів від водної та вітрової ерозії. Enkammat запобігає ерозії на набережних, схилах та берегах річок, каналах та водосховищах. та функціонує як захисний армуючий та інтегрований проміжний шар між природною рослинністю та ґрунтом. Він забезпечує захист вище і нижче ватерлінії, створюючи тим самим постійне ефективне рішення.

Enkammat (стандартний матеріал, структура якого має 95 % порожнечі), як правило застосовується на непідтоплених схилах, а Enkammat A20 (заповнений гравієм та бігумною сумішшю) на підтоплених. В той час застосування геомата Enkammat 7220 має більш широке застосування та складніші гідрологічні умови в порівнянні з Enkammat A20 (глибина води; швидкість води; хвилі, штормові умови).

Протиерозійний композитний геосинтетичний матрац для тривалого захисту від водної ерозії Enka-Mattress ткане геотекстильне полотно, яке виконує роль опалубки при виконанні бетонування укосів та являє собою довговічний матеріал в складних гідрологічних умовах.

Запропоновані конструктивні рішення є орієнтованими, довільними та можуть бути змінені в залежності від параметрів та умов експлуатації дорожньої водопропускної труби.

Висновки

В роботі визначено основні функції геосинтетичних матеріалів, що застосовуються під час захисту транспортних та гідротехнічних споруд від розмиву.

На основі проведеного аналізу запропоновано конструктивні заходи берегозахисних споруд в транспортному та гідротехнічному будівництві на прикладі водопропускних труб.

Основними перевагами геотекстилю під час захисту ґрунтових насипів від розмиву:

- зменшення кількості шарів і об'єму зернистих фільтрувальних матеріалів;
- забезпечення постійної якості фільтраційних характеристик;
- ефективні фільтри для дрібних мулистих ґрунтів, що піддаються турбулентним змінним умовам течії;
- зниження витрат на обслуговування систем боротьби з ерозією;
- збереження та підвищення стійкості захисних споруд;

– полегшення монтажу, ніж звичайні шари фільтрів, особливо для підводного монтажу.

Література

1. Онищенко А.М., Гаркуша М.В. Проектування берегоукріплюючих споруд з використанням геосинтетичних матеріалів // Сучасні технології та досягнення інженерних наук в галузі гідротехнічного будівництва та водної інженерії: збірник наукових праць. ХДАЕУ, 2024. № 6. С. 136 - 142.
2. Markiewicz A., Koda E., Kawalec J. Geosynthetics for Filtration and Stabilisation: A Review. *Polymers*. 2022. 14(24), 5492; DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14245492> (дата звернення 25.04.2025)
3. Wu Jonathan. Geosynthetic Reinforced Soil (GRS) Walls. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119375876.ch3> (дата звернення 25.04.2025)
4. Kim Y., Kotwal A., Cho B., Wilde J., You B. Geosynthetic Reinforced Steep Slopes: Current Technology in the United States. *Applied Sciences*. 2019. 9(10), 2008; DOI: <https://doi.org/10.3390/app9102008> (дата звернення 25.04.2025)
5. Sanjay K. S., Jian-Hua Y. *Fundamentals of Geosynthetic Engineering*. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781482288445> (дата звернення 25.04.2025)
6. Standard Test Method for Sodium in Residual Fuel Oil (Flame Photometric Method). ASTM D1318-23. West Conshohocken, PA, 2023
7. Компанія GEOFABRICS. URL: <https://www.geofabrics.co/> (дата звернення: 05.08.2024).
8. Standard Terminology for Geosynthetics. ASTM D4439-23. West Conshohocken, PA, 2023.
9. Saathoff F., Oumeraci H., Restall S. Australian and German experiences on the use of geotextile containers. *Geotextiles and Geomembranes*. 2007, 25. 251-263. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2007.02.009> (дата звернення 25.04.2025)
10. IPCC. *Climate Change 1995, Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Changes*, Cambridge University Press, 1996. 365-398.
11. Oumeraci H., Hinz, M. Geotextile Sand-filled Container as Innovative Measures for Shore Protection, *Technical paper, Proc. EuroGeo 2004, 2004, Vol 1, 175-180.*
12. Klein Breteler M. *Open taludbekledingen: stabiliteit van zand- en betonmatrassen (Stability of sand and concrete mattresses)*, draft report, in Dutch, Delft Hydraulics, 1995.
13. Klein Breteler M. *Alternatieve open taludbekledingen (Alternative open slope revetments, draft report, in Dutch)*, Delft Hydraulics, H1930. 1996.
14. Stoutjesdijk T. *Geotechnical aspects of alternative systems (draft report, in Dutch)*, Delft Geotechnics, H1930. 1996.
15. Pilarczyk K. *Critical review of geosystems in hydraulic and coastal engineering applications*. 2000. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4352.9121> (дата звернення 25.04.2025)
16. Bezuijen A., Pilarczyk K. W. *Geosynthetics in hydraulic and coastal engineering: filters, revetments and sand filled structures. In Proceedings of EuroGeo 2012. 5, 65-80.*
17. Leshchinsky D., Leshchinsky O. *Geosynthetic confined pressurized slurry (GeoCoPS): Supplemental notes for version 1.0". Report TR CPAR-GL-96-1, US Army Engineer Waterways Experiment Station. 1996.*
18. Liu G. S. *Design criteria of sand sausages for beach defenses. XIX IAHR. Congress, New Delhi, India, 1987. 95-97.*

19. Kobayashi N., Jacobs B. Stability of Armor Units on Composite Slopes. *Journal Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.*, 1985. 111(5), 880-894.
20. Gutman L. Low-cost shoreline protection in Massachusetts, ASCE, Coastal Structures. 1979.
21. Recio-Molina J., Yasuhara K. Stability of modified geotextile wrap-around revetments (GWR) for coastal protection. *Geosynthetics International*, 2005, 12(5).
22. Lawson C. R. Geotextile containment for hydraulic and environmental engineering. *Geosynthetic International*, 2008, 15(6), 384-427.
23. Chu J., Guo W., Yan S. W. Geosynthetics tubes and geosynthetic mats: analysis and applications. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 2011, 42(1).
24. Irtawan M., Yudoprasetyo K., Refani A.N., Indrasurya K., Parwita D.N.P.A. The Evaluation of Pipeline Protection Influenced by Causeway Embankment Using the Finite Element Method (FEM). *Appl. Sci.* 2024, 14, 4382. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14114382> (дата звернення 25.04.2025)
25. Markiewicz A., Koda E. Kiraga, M., Wrzesinski G., Kozanka K., Naliwajko M., Vaverková M.D. Polymeric Products in Erosion Control Applications: A Review. *Polymers* 2024, 16, 2490. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym16172490> (дата звернення 25.04.2025)
26. Автомобільні дороги. Застосування геосинтетичних матеріалів у дорожніх конструкціях. Основні вимоги: нац. стандарт України. ГБН В.2.3-37641918-544:2014. Київ, 2014
27. Методичні рекомендації з проектування берегоукріплюючих споруд з використанням геосинтетичних матеріалів. МР 2.3-247292568-001:2022. Київ, 2022
28. Shukla S. An Introduction to Geosynthetic Engineering. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1201/b21582> (дата звернення 25.04.2025)
29. Koerner R.M. *Designing with Geosynthetics*, 5th edition. Prentice Hall Publisher, Upper Saddle River, New Jersey, 2005.
30. Van Santvoort, G.P.T.M. *Geotextiles and Geomembranes in Civil Engineering*. A.A. Balkema, Rotterdam, 1994
31. Ingold T.S., Miller K.S. *Geotextiles Handbook*, Thomas Telford Publishing, 1998.
32. Holtz R.D., Christopher B.R., Berg, R.R. *Geosynthetic Engineering*. Bitech Publisher, 1997.
33. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Інженерний захист території та споруд від підтоплення та затоплення: нац. стандарт України. ДБН В.1.1-25-2009. Київ, 2009
34. Інженерний захист території, будівель і споруд від зсувів та обвалів. Основні положення : нац. стандарт України. ДБН В.1.1-46:2017. Київ, 2017.
35. Bezuijen A., Vastenburg, E. *Geosystems: Design Rules and Applications*. 2012.
36. Компанія Stormwater. URL: <https://www.stormwater.com/stormwater-management/pipes/article/53096524/what-is-a-culvert> (дата звернення: 05.08.2024).
37. Компанія FREUDENBERG. URL: <https://enkasolutions.com/> (дата звернення: 05.08.2024).
38. TRB's National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Report 568: Riprap Design Criteria, Recommended Specifications, and Quality Control. Transportation Research Board, 2006.
39. Геотекстиль та віднесені до геотекстилю виробу. Необхідні характеристики для застосування в дорожньому будівництві (за винятком залізничних колій та асфальтових покриттів): нац. стандарт України. ДСТУ EN 13249:2005 (EN 13249:2000, IDT). Київ, 2005.
40. Геотекстиль та виробу, що належать до геотекстилю. Характеристики, потрібні для використання під час виконання робіт з ерозійного контролювання (зміцнення берегів, зміцнення берегових укосів): нац. стандарт України. ДСТУ EN 13253:2017 (EN 13253:2016, IDT). Київ, 2017.
41. Геотекстиль та виробу, що належать до геотекстилю. Характеристики, потрібні для використання під час будівництва ровів : нац. стандарт України. ДСТУ EN 13255:2017 (EN 13255:2016, IDT). Київ, 2017.
42. Геотекстиль та виробу, що належать до геотекстилю. Характеристики, потрібні для використання під час утилізації твердих відходів: нац. стандарт України. ДСТУ EN 13257:2017 (EN 13257:2016, IDT). Київ, 2017.
43. Геотекстиль та віднесені до геотекстилю виробу. Метод визначення ефективності довгострокового захисту геотекстилем у разі контакту з геосинтетичними бар'єрами : нац. стандарт України. ДСТУ EN 13719:2005 (EN 13719:2002, IDT). Київ, 2005.
44. Геосинтетичні бар'єри. Характеристики, потрібні для використання під час будівництва водосховищ та гребель : нац. стандарт України. ДСТУ EN 13361:2019 (EN 13361:2018, IDT). Київ, 2019.
45. Геосинтетичні бар'єри. Характеристики, необхідні під час будівництва каналів : нац. стандарт України. ДСТУ EN 13362:2022 (EN 13362:2018, IDT). Київ, 2022.
46. Kim Y., Kotwal A., Cho B., Wild J., You B. Geosynthetic Reinforced Steep Slopes: Current Technology in the United States. *Applied Sciences*. 2019. 9(10), 2008; DOI: <https://doi.org/10.3390/app9102008> (дата звернення 25.04.2025)
47. Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills (+A1:2016) BS 8006-1:2010
48. Braeu G. Recommendations for Design and Analysis of Earth Structures using Geosynthetic Reinforcements - EBGeo, Second Edition. 2012. DOI: 10.1002/9783433600931 (дата звернення 25.04.2025)
49. Subsoil - Verification of the safety of earthworks and foundations - Supplementary rules to DIN EN 1997-1. DIN 1054-2021
50. Pilarzyk K.W. Discussion on revetment design. *Proceedings of the International Conference on Flexible Armoured Revetments Incorporating Geotextiles*, 1984. 209–215.
51. Рекомендації щодо застосування підпірно-осідаючих стін при будівництві доріг в умовах підмиву земляного полотна. Київ. Міністерство транспорту та зв'язку України 1983.
52. Saathoff F, Oumeraci H, Restall S. Australian and German experiences on the use of geotextile containers. *Geotextiles and Geomembranes* 2007. 25 (4-5):251-263. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2007.02.009> (дата звернення 25.04.2025)
53. Hölzer A., Sommerfeld M. New simple correlation formula for the drag coefficient of nonspherical particles. *Powder Technology* 2008. 184 (3):361-365. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2007.08.021> (дата звернення 25.04.2025)
54. Yin C., Rosendahl L., Knudsen Kær S., Sørensen H. Modelling the motion of cylindrical particles in a nonuniform flow. *Chemical Engineering Science* 2003. 58 (15):3489-3498. [https://doi.org/10.1016/s0009-2509\(03\)00214-8](https://doi.org/10.1016/s0009-2509(03)00214-8). (дата звернення 25.04.2025)

References

1. Onyshchenko A.M., Harkusha M.V. (2024). Design of bank-reinforcing structures using geosynthetic materials // *Modern technologies and achievements of engineering sciences in the field of hydraulic construction and water engineering: collection of scientific papers. KhDAEU*, 6. 136 - 142.
2. Markiewicz A., Koda E., Kawalec J. (2022). Geosynthetics for Filtration and Stabilisation: A Review. *Polymers*. 14(24), 5492; DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14245492> (date of access 25.04.2025)
3. Wu Jonathan (2019). Geosynthetic Reinforced Soil (GRS) Walls. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119375876.ch3> (date of access 25.04.2025)
4. Kim Y., Kotwal A., Cho B., Wilde J., You B. (2019). Geosynthetic Reinforced Steep Slopes: Current Technology in the United States. *Applied Sciences*. 9(10), 2008; DOI: <https://doi.org/10.3390/app9102008> (date of access 25.04.2025)
5. Sanjay K. S., Jian-Hua Y. (2006). *Fundamentals of Geosynthetic Engineering*. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781482288445> (date of access 25.04.2025)
6. Standard Test Method for Sodium in Residual Fuel Oil (Flame Photometric Method). ASTM D1318-23. West Conshohocken, PA, 2023
7. Company GEOFABRICS. URL: <https://www.geofabrics.co/> (date of access: 05.08.2024).
8. Standard Terminology for Geosynthetics. ASTM D4439-23. West Conshohocken, PA, 2023.
9. Saathoff F., Oumeraci H., Restall S. (2007). Australian and German experiences on the use of geotextile containers. *Geotextiles and Geomembranes*. 25. 251-263. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2007.02.009> (date of access 25.04.2025)
10. IPCC (1996). *Climate Change 1995, Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Changes*, Cambridge University Press, 365-398.
11. Oumeraci H., Hinz M. (2004). Geotextile Sand-filled Container as Innovative Measures for Shore Protection, Technical paper, Proc. EuroGeo 2004, Vol 1, 175-180.
12. Klein Breteler M. (1995). Open taludbekleding: stabiliteit van zand- en betonmatrassen (Stability of sand and concrete mattresses), draft report, in Dutch, Delft Hydraulics.
13. Klein Breteler M. (1996). Alternatieve open taludbekleding (Alternative open slope revetments, draft report, in Dutch), Delft Hydraulics, H1930.
14. Stoutjesdijk T. (1996). Geotechnical aspects of alternative systems (draft report, in Dutch), Delft Geotechnics, H1930.
15. Pilarczyk K. (2000). Critical review of geosystems in hydraulic and coastal engineering applications. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4352.9121> (date of access: 25.04.2025)
16. Bezuijen A., Pilarczyk K. W. (2012). Geosynthetics in hydraulic and coastal engineering: filters, revetments and sand filled structures. In *Proceedings of EuroGeo*. 5, 65-80.
17. Leshchinsky D., Leshchinsky O. (1996). Geosynthetic confined pressurized slurry (GeoCoPS): Supplemental notes for version 1.0". Report TR CPAR-GL-96-1, US Army Engineer Waterways Experiment Station.
18. Liu G. S. (1987). Design criteria of sand sausages for beach defenses. XIX IAHR. Congress, New Delhi, India, 95-97.
19. Kobayashi N., Jacobs B. (1985). Stability of Armor Units on Composite Slopes. *Journal Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.*, 111(5), 880-894.
20. Gutman L. (1979). Low-cost shoreline protection in Massachusetts, ASCE, Coastal Structures
21. Recio-Molina J., Yasuhara K. (2005). Stability of modified geotextile wrap-around revetments (GWR) for coastal protection. *Geosynthetics International*, 12(5).
22. Lawson C. R. (2008). Geotextile containment for hydraulic and environmental engineering. *Geosynthetic International*, 15(6), 384-427.
23. Chu J., Guo W., Yan S. W. (2011). Geosynthetics tubes and geosynthetic mats: analysis and applications. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 42(1).
24. Irmawan M., Yudoprasetyo K., Refani A.N., Indrasurya K., Parwita D.N.P.A. (2024). The Evaluation of Pipeline Protection Influenced by Causeway Embankment Using the Finite Element Method (FEM). 14, 4382. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14114382> (date of access: 25.04.2025)
25. Markiewicz A., Koda E., Kiraga, M., Wrzesinski G., Kozanka K., Naliwajko M., Vaverková M.D. (2024). Polymeric Products in Erosion Control Applications: A Review. *Polymers*. 16, 2490. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym16172490> (date of access: 25.04.2025)
26. Roads. Application of geosynthetic materials in road structures. Basic requirements: national standard of Ukraine. GBN V.2.3-37641918-544:2014. Kyiv, 2014
27. Methodological recommendations for the design of shore protection structures using geosynthetic materials. MP 2.3-247292568-001:2022. Kyiv, 2022
28. Shukla S. (2016). *An Introduction to Geosynthetic Engineering*. DOI: <https://doi.org/10.1201/b21582> (date of access: 25.04.2025)
29. Koerner R.M. (2005). *Designing with Geosynthetics*, 5th edition. Prentice Hall Publisher, Upper Saddle River, New Jersey
30. Van Santvoort, G.P.T.M. (1994). *Geotextiles and Geomembranes in Civil Engineering*. A.A. Balkema, Rotterdam
31. Ingold T.S., Miller K.S. (1998). *Geotextiles Handbook*, Thomas Telford Publishing
32. Holtz R.D., Christopher B.R., Berg, R.R. (1997). *Geosynthetic Engineering*. Bitech Publisher
33. Protection against dangerous geological processes, harmful operational influences, and fire. Engineering protection of territories and structures against flooding and submergence: national standard of Ukraine. DBN V.1.1-25-2009. Kyiv, 2009
34. Engineering protection of territories, buildings and structures from landslides and collapses. Basic provisions: national standard of Ukraine. DBN V.1.1-46:2017. Kyiv, 2017.
35. Bezuijen A., Vastenburger, E. (2012). *Geosystems: Design Rules and Applications*.
36. Company Stormwater. URL: <https://www.stormwater.com/stormwater-management/pipes/article/53096524/what-is-a-culvert> (date of access: 05.08.2024).
37. Company FREUDENBERG. URL: <https://enkasolutions.com/> (date of access: 05.08.2024).
38. TRB's (2006). National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Report 568: Riprap Design Criteria, Recommended Specifications, and Quality Control. Transportation Research Board.
39. Geotextiles and geotextile-related products. Required characteristics for use in road construction (except railway tracks and asphalt pavements): National Standard of Ukraine. DSTU EN 13249:2005 (EN 13249:2000, IDT). Kyiv, 2005.
40. Geotextiles and geotextile-related products. Characteristics required for use in erosion control works (bank reinforcement, bank slope reinforcement): National

Standard of Ukraine. DSTU EN 13253:2017 (EN 13253:2016, IDT). Kyiv, 2017.

41. Geotextiles and geotextile-related products. Characteristics required for use in the construction of ditches: national standard of Ukraine. DSTU EN 13255:2017 (EN 13255:2016, IDT). Kyiv, 2017.

42. Geotextiles and geotextile-related products. Characteristics required for use in solid waste management: national standard of Ukraine. DSTU EN 13257:2017 (EN 13257:2016, IDT). Kyiv, 2017.

43. Geotextiles and geotextile-related products. Method for determining the effectiveness of long-term protection by geotextiles in case of contact with geosynthetic barriers: national standard of Ukraine. DSTU EN 13719:2005 (EN 13719:2002, IDT). Kyiv, 2005

44. Geosynthetic barriers. Characteristics required for use in the construction of reservoirs and dams: National Standard of Ukraine. DSTU EN 13361:2019 (EN 13361:2018, IDT). Kyiv, 2019.

45. Geosynthetic barriers. Characteristics required during the construction of canals: national standard of Ukraine. DSTU EN 13362:2022 (EN 13362:2018, IDT). Kyiv, 2022.

46. Kim Y., Kotwal A., Cho B., Wild J., You B. (2019). Geosynthetic Reinforced Steep Slopes: Current Technology in the United States. *Applied Sciences*. 2019. 9(10), 2008; DOI: <https://doi.org/10.3390/app9102008> (date of access: 25.04.2025)

47. Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills (+A1:2016) BS 8006-1:2010

48. Braeu G. (2012). *Recommendations for Design and Analysis of Earth Structures using Geosynthetic Reinforcements* - EBGEO, Second Edition. DOI: 10.1002/9783433600931 (date of access: 25.04.2025)

49. Subsoil - Verification of the safety of earthworks and foundations - Supplementary rules to DIN EN 1997-1. DIN 1054-2021

50. Pilarzyk K.W. (1984). Discussion on revetment design. *Proceedings of the International Conference on Flexible Armoured Revetments Incorporating Geotextiles*, 209–215.

51. Recommendations on the use of retaining and settling walls in road construction in conditions of subgrade washout. Kyiv. Ministry of Transport and Communications of Ukraine 1983.

52. Saathoff F, Oumeraci H, Restall S. (2007). Australian and German experiences on the use of geotextile containers. *Geotextiles and Geomembranes* 2007. 25 (4-5):251-263. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2007.02.009> (date of access: 25.04.2025)

53. Hölzer A., Sommerfeld M. (2008). New simple correlation formula for the drag coefficient of nonspherical particles. *Powder Technology* 2008. 184 (3):361-365. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2007.08.021> (date of access: 25.04.2025)

54. Yin C., Rosendahl L., Knudsen Kær S., Sørensen H. (2003). Modelling the motion of cylindrical particles in a nonuniform flow. *Chemical Engineering Science* 2003. 58 (15):3489-3498. [https://doi.org/10.1016/s0009-2509\(03\)00214-8](https://doi.org/10.1016/s0009-2509(03)00214-8). (date of access: 25.04.2025)

Автор: ГАРКУША Микола Васильович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд, Національний транспортний університет Mykola HARKUSHA, PhD (Tech), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Bridges, Tunnels and Hydraulic Structures, National Transport University E-mail – mykola.harkusha@ntu.edu.ua, ID ORCID: 0000-0002-5388-0561

APPLICATION OF COASTAL REINFORCEMENT STRUCTURES USING GEOSYNTHETIC MATERIALS IN TRANSPORT AND HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

M. Harkusha

National Transport University

The use of geosynthetic materials in embankment protection structures is gaining wide application in the protection of soil embankments from erosion. Geosynthetic materials are used in the form of sheets, bags, pipes and containers, which play an active role in transport, hydraulic, coastal, marine and river protection engineering works as environmentally friendly, easy to construct and cheaper alternatives to conventional protection methods and engineering works, which in recent years have become relatively very expensive to construct and maintain. Geosynthetics have dramatically changed the practice of geotechnical engineering worldwide. Geosynthetics can perform one or more functions to improve the mechanical and/or hydraulic behavior of the structure in which they are incorporated - soil reinforcement and slope stabilization, separation/filtration, drainage, erosion control and moisture protection (geomembranes).

The most common methods of protecting transportation and hydraulic structures from flow-related hazards include reinforcement measures, which involve covering the channel or banks of the channel, or the slope of the embankment; deceleration measures, which involve diverting the flow from a permeable or impermeable surfaces; and the installation of additional linear elements protruding into the channel to stimulate sedimentation along the bank. Effective protection of soil embankments of transportation and hydraulic structures from erosion can be achieved through the use of a variety of geosynthetic materials that perform a bank protection function.

Geosynthetic materials are defined as a product that has at least one component made of synthetic or natural polymer, in the form of a sheet, strip or three-dimensional structure, used in contact with soil and/or other materials as an integral part of a structure, project or system.

More versatile materials and innovative solutions are needed to design new, cost-effective coastal protection structures, as well as to strengthen existing coastal barriers and structures at risk of erosion.

Keywords: hydraulic structure, geosynthetic material, soil embankment, protection, transport structure.