

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**



**ІГНАТЕНКО ДМИТРО ЮРІЙОВИЧ**

**УДК 624.131.3**

**ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ҐРУНТОЦЕМЕНТНИХ ПАЛЬОВИХ  
ПІДПІРНИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ЗСУВОНЕБЕЗПЕЧНИХ СХИЛАХ**

**Спеціальність 05.15.09 – «Геотехнічна і гірничча механіка»**

**Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук**

**Дніпро – 2021**

**Дисертацією є рукопис.**

Робота виконана на кафедрі «Транспортна інфраструктура» Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**ПЕТРЕНКО Володимир Дмитрович,**  
професор кафедри «Транспортна інфраструктура»  
Дніпровського національного університету  
залізничного транспорту імені академіка  
В. Лазаряна Міністерства освіти і науки України.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, доцент  
**КОВРОВ Олександр Станіславович,**  
професор кафедри екології та технологій захисту  
навколишнього середовища Національного  
технічного університету «Дніпровська політехніка»  
Міністерства освіти і науки України.

кандидат технічних наук, доцент  
**КОВАЛЬОВ Вячеслав Вікторович,**  
доцент кафедри інженерної геології і геотехніки  
Державного вищого навчального закладу  
«Придніпровська державна академія будівництва та  
архітектури» Міністерства освіти і науки України  
(м. Дніпро).

Захист відбудеться «29» квітня 2021 р. о 12.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.080.04 при Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України (49005, м. Дніпро, пр. Дмитра Яворницького, 19).

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України (49005, м. Дніпро, пр. Дмитра Яворницького, 19).

Автореферат розісланий «29» березня 2021 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



О.В. Солодянкін

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Інженерно-геологічні умови для будівництва багатоповерхових житлових комплексів не завжди сприятливі для забудови деяких районів м. Дніпра. У певних випадках таке будівництво потребує додаткових інженерних вишукувань та розрахунків, особливо коли мова йде про розробку інженерно-геологічного захисту зсувонебезпечних ділянок схилів, біля яких планується зводити будівлі. В такому разі для запобігання загрози зсувних процесів ці заходи є необхідними та обов'язковими. Інакше кажучи, перед проектувальниками постає задача розробки підпірних конструкцій, які стримуватимуть схил, можливий рух та сповзання якого можуть призвести до катастрофи.

Разом з тим, особливу увагу з боку проектувальників потребують проекти будівництва і об'єкти господарювання, що розташовані в гірській місцевості на території України, в зоні підвищеної зсувонебезпечності.

Передумови виникнення зсувів інколи можуть бути взагалі відсутні чи приховані на перший погляд, наприклад, через раптове підвищення рівня ґрунтових вод змінюються фізичні характеристики ґрунтів, що може нести загрозу катастрофічного зсуву. Досвід минулих років демонструє ситуації, коли вже після зведення висотних будівель виникала потреба евакуювати людей під час реальної загрози руйнування внаслідок активізації зсувних процесів порід, вірогідність виникнення яких не була врахована на стадії проектування.

Сучасні методи розрахунку стійкості схилів у поєднанні з передовими розробками у сфері технології будівництва та зведення багатоповерхових будівель дають можливість проектувати і вести будівництво на зсувонебезпечних ділянках місцевості за умов проведення спеціальних заходів щодо укріплення таких схилів. Одним з найефективніших способів протизсувного захисту є влаштування ґрунтоцементних утримуючих конструкцій.

У зв'язку з цим з'являється необхідність вирішення проблеми надійності та безпечного виконання таких проектів будівництва, а також питань щодо подальшої експлуатації будівель та споруд, які зведені в зоні розташування зсувонебезпечних схилів.

Таким чином, встановлення закономірностей формування міцності ґрунтового масиву з обґрунтуванням параметрів ґрунтоцементної підпірної конструкції для укріплення зсувонебезпечних схилів з можливістю прогнозування їх геомеханічної стійкості є актуальним науково-практичним завданням.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертація відповідає Закону України від 11.07.2001, №2623-III «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» та змінам до цього закону від 09.09.2010, №2519-IV «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки на період до 2020 року», Постанові Кабінету Міністрів України від 23.05.2011, №547 «Про затвердження Порядку застосування будівельних норм, розроблених на основі національних технологічних традицій, та будівельних норм, гармонізованих з нормативними документами Європейського Союзу», а також тематиці науково-дослідної роботи «Наукове обґрунтування інноваційних технологій відновлення об'єктів транспортної інфраструктури України» (№ державної реєстрації 0119U001139).

**Мета роботи** – обґрунтування параметрів ґрунтоцементної пальової підпірної конструкції на основі встановлення закономірностей зміни стійкості зсувонебезпечного шаруватого схилу, а також визначення раціональних параметрів цієї конструкції шляхом вирішення контактної задачі взаємодії ґрунтового масиву та підпірних елементів.

Для досягнення поставленої мети в дисертації сформульовані та вирішені наступні **задачі досліджень**.

1) Виконати аналіз поточного стану яружно-балочних мереж м. Дніпра із виявленням зсувонебезпечних схилів.

2) Обґрунтувати ефективність способу підвищення стійкості зсувонебезпечного схилу, що полягає у використанні ґрунтоцементної пальової підпірної конструкції, порівняно з іншими способами укріплення.

3) Розробити схему підсилення схилу за допомогою ґрунтоцементних паль.

4) Провести відцентрове моделювання ґрунтового схилу з використанням масштабної моделі ґрунтоцементної пальової підпірної конструкції для порівняння характеру залягання поверхні ковзання із аналітичними методами та оцінки позитивного впливу підсилення.

5) Встановити закономірності зміни напружено-деформованого стану ґрунтоцементних підпірних конструкцій для укріплення зсувонебезпечного шаруватого схилу з використанням чисельного моделювання.

6) Визначити очікуваний економічний ефект від застосування нових технічних рішень.

**Об'єктом досліджень** є стійкість зсувонебезпечних ґрунтових схилів.

**Предметом досліджень** є технологічні параметри ґрунтоцементної пальової підпірної конструкції.

**Основна ідея роботи** полягає у використанні встановлених закономірностей зміни напружено-деформованого стану ґрунтоцементних підпірних конструкцій для укріплення зсувонебезпечного шаруватого схилу.

**Методи дослідження.** Методичну основу досліджень складає комплексний підхід, що включає в себе аналіз і узагальнення літературних даних за темою роботи, аналітичні та експериментальні дослідження, виконані з метою обґрунтування параметрів ґрунтоцементних підпірних пальових конструкцій на зсувонебезпечних схилах.

**Наукові положення, що захищаються в дисертації:**

**1.** Коефіцієнт запасу міцності підпірної конструкції з ґрунтоцементних паль діаметром 1,2 м, що об'єднані бетонним ростверком, має мінімум, при цьому відстань між палями дорівнює 0,6 м, що дозволяє проектувати надійні підпірні конструкції такого типу.

**2.** Коефіцієнт запасу стійкості ґрунтового схилу, який підсилено ґрунтоцементними палями, що розташовані ортогонально до поверхні ковзання тіла зсуву, знаходиться в ступеневій залежності від відстані між палями, і становить 1,7, що забезпечує достатню стабільність зсувонебезпечного схилу.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в отриманні нових за-

кономірностей щодо формування міцності та стійкості ґрунтоцементної підпірної конструкції для укріплення зсувонебезпечних схилів, що дає можливість прогнозування їх геомеханічної стійкості в залежності від можливого розташування кривої поверхні ковзання.

1. Вперше встановлено залежності зміни абсолютних зміщень, відносних деформацій, коефіцієнтів запасу міцності та стійкості, а також напружень за Мізесом в елементах підпірних конструкцій з ґрунтоцементних паль від кута їх нахилу, відстані між палями та наявності бетонного ростверку, що їх об'єднує.

2. Набули подальшого розвитку методи оцінки та прогнозування зсувонебезпечності ґрунтових схилів, що дозволило обґрунтувати спосіб підвищення стійкості в залежності від варіації параметрів ґрунтоцементної підпірної конструкції.

3. Вперше обґрунтовано параметри способу підвищення стійкості зсувонебезпечного схилу з пальовими підпірними конструкціями на основі комплексного математичного та відцентрового моделювання з використанням ґрунтів зсувонебезпечного схилу.

#### **Практичне значення результатів роботи:**

1. Розроблено методика розрахунку коефіцієнта стійкості зсувонебезпечного схилу, що підсилений ґрунтоцементними палями.

2. Розроблено методика визначення параметрів стійкості і способу закріплення земляного полотна шляхом скінченно-елементного моделювання стійкості схилу.

3. Обґрунтований спосіб укріплення земляного полотна автодороги, новизна якого підтверджується деклараційним патентом на корисну модель.

#### **Реалізація результатів роботи.**

Результати дисертаційної роботи були впроваджені для інженерного захисту зсувонебезпечного схилу при капітальному ремонті автомобільної дороги місцевого значення С141017 (Львів-Шегині) – Судова Вишня на ділянці км 1+500 – км 2+500, Мостиського району Львівської області.

**Обґрунтованість і достовірність** наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджується розрахунками скінченно-елементних моделей, результати яких отримані за допомогою відомих програмних комплексів, які реалізують метод скінченних елементів; задовільною збіжністю результатів скінченно-елементного і відцентрового моделювання – переміщень моделей (в межах від 80 до 90%).

**Особистий внесок здобувача** полягає у формулюванні наукової задачі, мети, наукових положень і методик досліджень; отриманні та аналізі результатів експериментальних і теоретичних досліджень, обґрунтуванні технологічних параметрів підпірних конструкцій з ґрунтоцементних паль для укріплення зсувонебезпечних схилів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертації доповідалися, обговорювалися, були схвалені на конференціях: «Нариси гірничої науки і практики» (ІГТМ ім. М.С. Полякова, Дніпро, 2019), міжнародній науково-прак-

тичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна, Дніпро, 2017-2019), науково-практичній конференції «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика» (ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна, Дніпро, 2018).

**Публікації.** Результати дисертації опубліковано у 11 наукових працях, з них: 4 в наукових фахових виданнях України, 3 статтях в зарубіжних виданнях, 3 – в тезах доповідей, 1 – патент України на корисну модель.

**Структура і обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку літературних джерел із 115 найменувань на 10 сторінках і 4 додатків на 22 сторінках. Містить 108 машинописних сторінок, 86 рисунків і 8 таблиць. Загальний обсяг дисертації складає 182 сторінки.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і задачі дослідження, викладено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів.

**Перший розділ** присвячено аналізу стану проблеми стійкості зсувонебезпечних природних схилів. Значний внесок у розвиток цього напрямку досліджень зробили такі відомі вчені, як О.М. Адаменко, О.М. Бондар, В.І. Бондаренко, С.Ф. Власов, А.М. Гальперін, Л.К. Гінзбург, М.М. Гольдштейн, Ф. Гузетті, К.А. Гулакян, Є.П. Ємельянова, К.К. Кіріяк, В.В. Ковальов, О.С. Ковров, П.Н. Науменко, Н.О. Максимова-Гуляєва, М.М. Маслов, В.Д. Петренко, І.В. Попов, К.С. Причина, І.О. Садовенко, О.О. Скрипник, Д.В. Тейлор, К. Терцагі, І.О. Тихвинський, Г.Л. Фісенко, М.С. Четверик, Р.Р. Чугаєв, В.Г. Шаповал, Г.М. Шахунянц та інші.

В роботі проведено моніторинг поточного стану балок правобережної частини м. Дніпра – Аптекарьської, Мальовничої, Рибальської, Тунельної, Зустрічної, Євпаторійської, Верхоянської та балки Довгий байрак. Виявлено існуючі проблеми, які сприяють зсувоутворенню – несанкціоновані викиди сміття на схилах балок, занедбаний стан дренажних систем водовідведення та інженерних мереж, відсутність захисних об'єктів та підпірних конструкцій на зсувонебезпечних ділянках схилів.

Проведено огляд існуючих методів укріплення схилів та проаналізовано їх ефективність. Найбільш поширеними є методи укріплення за допомогою геоматів, геотекстилю, геосіток, об'ємних георешіток, габіонів і біоматів. Окремо також розглянуто метод укріплення за допомогою кутикових підпірних стін різних типів. Одним із різновидів підземних споруд для укріплення відкосів є також «стіна в ґрунті».

Наявність великої кількості переваг для застосування методу укріплення зсувонебезпечних схилів за допомогою ґрунтоцементних паль у порівнянні з підпірними стінами та іншими методами укріплення обумовлена високою технологічністю виконання та надійністю таких типів конструкцій інженерного захисту, що стало основою для постановки мети та задач досліджень дисертації.

Формування паль відбувається на місці, після буріння лідерної свердловини. Після тужавіння розчину у свердловині утворюється колона з ґрунтоцементу, який має високі характеристики міцності і стійкості до деформування.

Технологія влаштування ґрунтоцементних паль не нова, але теоретичні дослідження ефективності застосування ґрунтоцементних паль, як підпірних конструкцій на зсувонебезпечних схилах потребують додаткових досліджень з урахуванням конкретних умов їх створення на місцевості. Відсутні методи розрахунку несучої здатності ґрунтоцементних палювих підпірних конструкцій на зсувонебезпечних схилах у нормативних будівельних нормах України. Тому, задача виконання розрахунків ґрунтоцементних палювих підпірних конструкцій на зсувонебезпечних схилах є досить актуальною.

У **другому розділі** наведені методи дослідження стійкості природних схилів. Розглянуто схеми зсувних деформацій за механізмами стиснення, зсуву, розрідження та за механізмом розтягування з відривом частини масиву порід. Велику увагу при практичному проектуванні необхідно приділяти визначенню положення поверхні ковзання, яке слід уточнювати зворотними розрахунками, виходячи зі значення коефіцієнта стійкості схилу, приблизно відповідного його значенням при фактичному стані схилу (при нестійкому положенні схилу  $K_{ст} \approx 1$ ).

Нерідко поверхня ковзання визначена самою геологічною будовою схилу, наприклад, коли покривні ґрунти (яр) сповзають по корінних породах. Однак у таких випадках до аналізу слід підходити з обережністю. Якщо корінними породами є скельні породи (аргіліти, алевроліти, вапняки, і т.д.), то поверхня ковзання може проходити і вище, і нижче покрівлі таких порід. В остаточному вигляді для спрощення розрахунків поверхню ковзання необхідно приймати у вигляді найпростіших форм – з ламаних ліній, з дуг кола і т.д.

Для практичних розрахунків можна використовувати метод круглоциліндричної поверхні ковзання.

Оцінка стійкості схилу – це оцінка можливості утворення і поширення зсувів при інженерно-геологічних умовах, а також навантаженнях, що існують на момент проведення досліджень на зсувних схилах.

Прогноз стійкості схилу – це оцінка можливості утворення активних зсувів на розглянутих схилах, з урахуванням змін природних умов і навантажень на схил з плином часу, або оцінка ступеня поширеності зсувів на територіях з відомою характеристикою інженерно-геологічних умов, для яких раніше не виконувалася зсувна зйомка.

До натурних методів дослідження стійкості схилів можна віднести метод відцентрового моделювання.

Теоретичною основою методу відцентрового моделювання є динамічна подібність Ньютона. Для дотримання умов подібності необхідно, щоб об'ємна вага матеріалу моделі була у стільки разів більшою об'ємної ваги порід ґрунтового масиву, що моделюється, у стільки разів розміри досліджуваної області масиву ґрунту більші за розміри моделі. З цього випливає, що під час відцентрового моделювання статичних процесів необхідно, щоб на модель діяли об'ємні сили, що

перевищують сили тяжіння у стільки разів, у скільки разів розміри моделі менші за натуральні розміри схилу.

Ця обставина ставить ряд технічних перешкод для здійснення методу відцентрового моделювання під час вирішення задачі геомеханіки, тому даний метод частіш усього застосовується в комплексі з іншими методами моделювання, наприклад, з методом еквівалентних матеріалів. Масштаб відцентрового моделювання  $K$  пов'язаний з кутовою швидкістю обертання центрифуги  $\omega$  та радіусом обертання моделі  $R$  наступним співвідношенням:

$$K = \sqrt{\frac{\omega^4 \cdot R^2}{g^2} + 1}, \quad (1)$$

де  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – прискорення сили тяжіння;  $R$  – радіус обертання центрифуги.

У лабораторній практиці звичайно використовується приблизна залежність між числом обертів центрифуги за хвилину  $n$  та масштабом відцентрового моделювання  $K$ :

$$n = 30 \cdot \sqrt{\frac{K}{R}}, \quad (2)$$

Особливо варто звернути увагу на те, що умови подібності, які дотримуються для моделей з розташуванням окремих областей моделювання на різних відстанях від центра обертання практично не здійсненні, так як неможливо забезпечити обертання цих областей моделювання з різною за величиною кутовою швидкістю. Це вказує на некоректність отриманих під час відцентрового моделювання результатів.

Точність та достовірність отриманих результатів відцентрового моделювання цілком залежить від точності відтворення моделі ґрунтового схилу, а саме – геометричних параметрів моделі, необхідної щільності втрамбованих шарів ґрунту та їх вологості.



Рис. 1. Центрифуга, на якій проводились дослідження стійкості моделі схилу балки Довгий байрак (ДНУЗТ ім. академіка В. Лазаряна)



### Вихідні дані експерименту:

Вага контейнера з моделлю ґрунтового схилу - 154,4 кг;

Масштаб моделювання - 1:10000 (1 час роботи дорівнює 10000 годин часу);

Частота обертання двигуна - 5,2 Гц;

Час обертання - 82 хв (1 год. 22 хв. дорівнює 570 днів);

Перехідний коефіцієнт центрального редуктора - 1,576;

(1 оберт центрифуги = 1,576 оберта двигуна);

$R$  – ефективний радіус центрифуги ( $R = 2,28$  м);

$a_{ц}$  – відцентрове прискорення ( $a_{ц} = 100 g$ );

Число ґрунтоцементних паль в експериментальній моделі – 14 на ширину 220 мм касети.



Рис. 2. Модель у масштабі 1:100 після підрізання зайвого ґрунту



Рис. 3. Модель схилу з ґрунтоцементними паллями після обертання на центрифугі. Передня частина ґрунту знята для обстеження стану паль

Також був проведений розрахунок скінченно-елементної моделі зсувонебезпечного схилу в програмному комплексі «ЛІРА САПР 2016» в процесорі «Монтаж». Програмний комплекс «ЛІРА САПР 2016» дозволяє провести розрахунок нелінійної задачі геомеханіки з використанням спеціальних скінченних елементів (СЕ), що моделюють роботу ґрунту.

Шари ґрунту змодельовані об'ємними елементами типу СЕ 271-276 з відповідними фізико-механічними характеристиками, що були отримані в результаті інженерно-геологічних вишукувань, зображені різними кольорами на рис. 4.

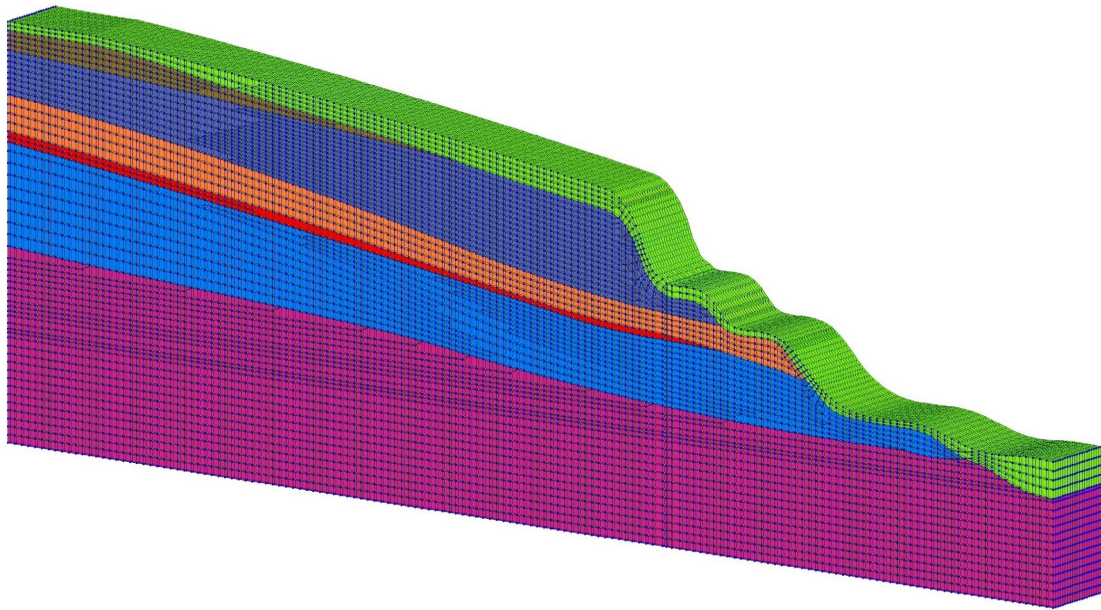


Рис. 4. Скінченно-елементна модель зсувонебезпечного схилу

Ґрунтоцементні палі – СЕ10 – універсальні просторові стрижньові СЕ; СЕ271 – фізично нелінійні об'ємні СЕ ґрунту у формі паралелепіпеда; СЕ276 – фізично нелінійні об'ємні 8-ми вузлові СЕ ґрунту (довільні гексаедри).

Було створено 3 завантаження для розрахунку в процесорі «Монтаж», сформовано відповідно 3 стадії та одну групу елементів:

- 1) Ґрунт;
- 2) Монтаж палі;
- 3) Робота палі.

Кожна стадія розрахунку відображає умови певної ситуації, які мають свої особливості. Результати, отримані в кожній стадії, впливають на результати наступної стадії. На етапі моделювання роботи палі не треба повторно задавати навантаження від власної ваги всього ґрунту, яке вже було прикладене в першій стадії, але переміщення необхідно враховувати як такі, що накопичені на всіх етапах. В цьому і полягає сутність поетапного розрахунку в процесорі «Монтаж». Після розрахунку першої стадії, ґрунти, з яких складається схил, знаходяться в стані рівноваги, та вже на другій стадії не мають осадки від власної ваги, тобто переміщення ґрунтів від власної ваги, що була прикладена в першій стадії, вже не відбуваються на наступних стадіях розрахунку. За цих умов розрахунок можна цілком вважати достовірним.

Реальне напруження зрушення, що отримується розрахунком, співставляється з граничним опором зсуву, і результат цього порівняння виражається у вигляді коефіцієнта запасу стійкості  $K$ . Коефіцієнт запасу стійкості схилу (укоосу) - це мінімальний з коефіцієнтів запасу стійкості по всіх можливих поверхнях ковзання, що задовольняє заданим обмеженням, закладеним в методі розрахунку.

На другому етапі відбувається влаштування ґрунтоцементних паль в тілі схилу. Додаються в роботу стержньові елементи круглого перерізу з характеристиками матеріалу паль - ґрунтоцементу. Для розрахунку паль на даному етапі, переміщення, які відбулися в результаті дії власної ваги ґрунту дорівнюють нулю, що відповідає дійсності.

Третій етап – робота паль – відображає ситуацію, за якої відбувається вплив зсувних процесів на палі, які починають включатися в роботу за умови водонасичення ґрунтів, що складають схил.

Тобто, коли напруження зростають і фізико-механічні характеристики ґрунтів змінюються внаслідок дії води, палі стримують схил від зсуву та руйнування. Як механізм втрати стійкості приймається механізм ковзання сповзаючого масиву відносно нерухомої частини укоосу. Опір зрушенню по поверхні ковзання розраховується як для статичних умов. Уздовж усієї поверхні витримується критерій руйнування ґрунту, що приймається у вигляді закону Кулона.

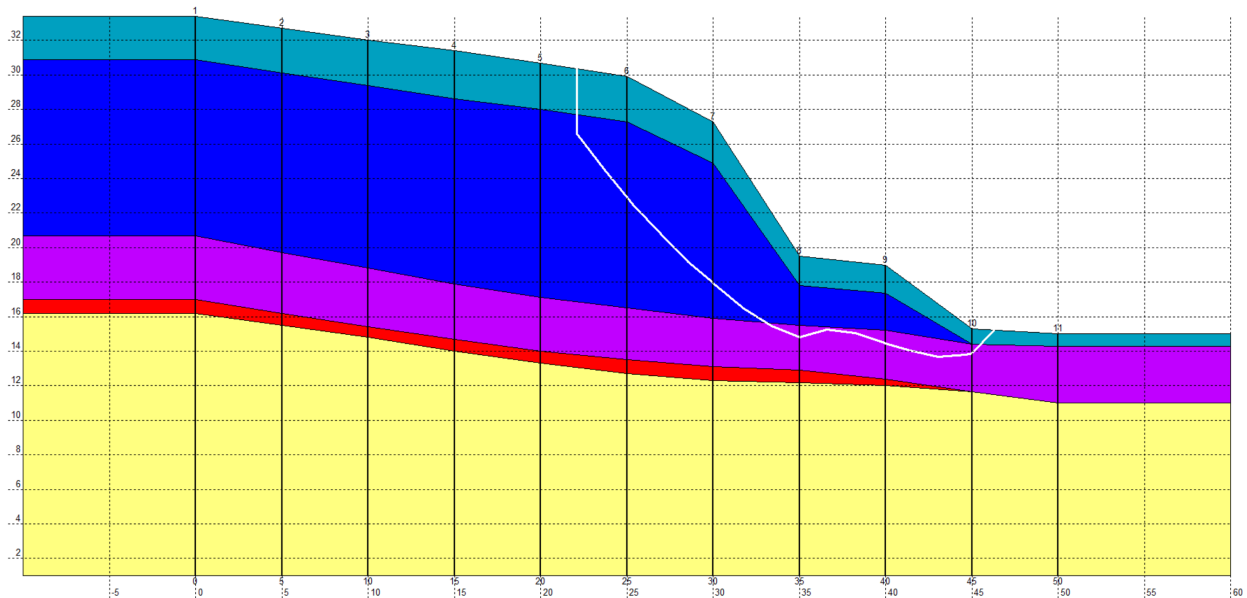


Рис.5. Результати розрахунку стійкості схилу за методом Лоува і Карафайта в програмному комплексі «ОТКОС» ( $K=1,147$ )

У **третьому розділі** наведена методика розрахунку підпірної конструкції з ґрунтоцементних паль, яка складається з визначення напрямку дії та величини сил і моментів, які сприйматимуть палі, тобто, визначення всіх навантажень і впливів, а також визначення умов ґрунтового середовища.

Ґрунтоцементні підпірні пальові конструкції, як елементи, що працюють на зрізання від поперечної сили та на згинання від дії моменту сил, що намагаються зсунути масив ґрунту разом з частиною палі, необхідно розраховувати

комплексно, за допомогою чисельних методів. Вихідними даними для підбору параметрів ґрунтоцементних паль є навантаження, які сприйматиме паля, як елемент у середовищі ґрунтового масиву. Тобто, розрахунок ґрунтоцементних підпірних паль зводиться до визначення ґрунтового тиску, який діятиме на їх поверхню. Для розрахунку ґрунтового тиску, тобто, навантаження на палі, необхідно визначити об'єм ґрунту, який зсувається, а також підрахувати горизонтальну складову зсувної сили, яка діятиме перпендикулярно осі паль. Але перш за все, необхідно визначитися з місцем найбільш вдалого розташування підпірних паль, оскільки завжди є як сприятливі, так і несприятливі умови роботи конструкції. Найбільш вдалим за розташуванням місцем для підпірної системи паль можна вважати таку вісь-перпендикуляр відносно горизонтальної поверхні, яка буде знаходитись відносно центру обертання сповзаючої маси ґрунту вертикально (Рис. 6). Таким чином, частина масиву ґрунту, яка буде знаходитись за палями, насправді буде зберігати стійкість, оскільки зсуватиметься вона лише у разі дії тиску від тіла зсуву, що знаходиться під захистом пальової підпірної конструкції.

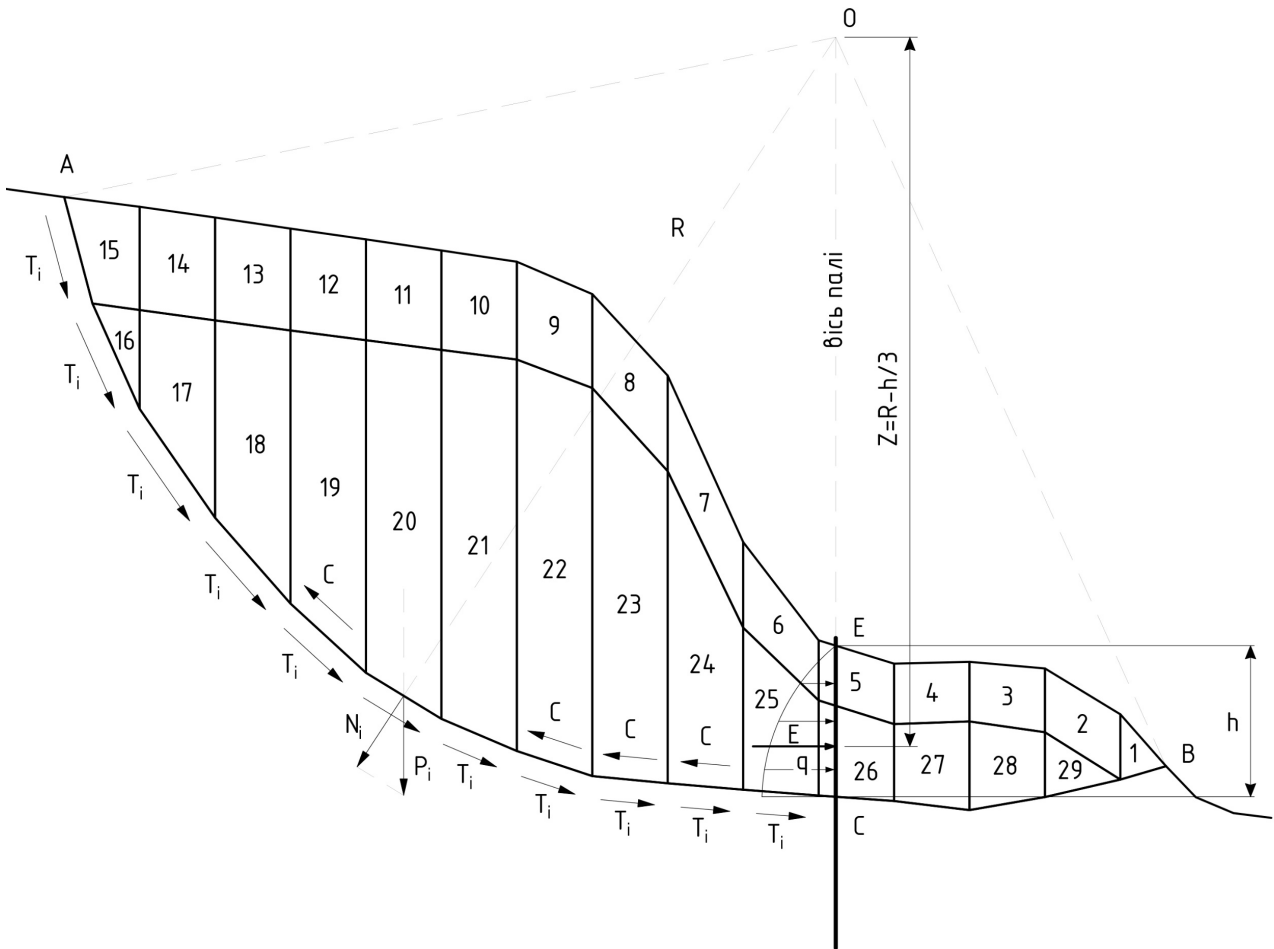


Рис. 6. Визначення навантажень, що діють на підпірну конструкцію з ґрунтоцементних паль

Рівнодіюча сил тиску на утримання палі з боку масиву, що сповзає:

$$E_1 = \frac{M}{R - \frac{h}{3}}, \quad (3)$$

Рівнодіюча сил відпору з боку утримання конструкції:

$$E_2 = \frac{qh}{2}, \quad (4)$$

$$E_1 = E_2, \quad (5)$$

$$q = \frac{6M}{h(3R - h)}. \quad (6)$$

В роботі виконано порівняльний аналіз результатів розрахунку підпірних конструкцій з ґрунтоцементних паль на прикладі розрахунку стійкості зсувонебезпечного схилу ділянки автомобільної дороги загального користування місцевого значення С141017 (Львів-Шегині) – Судова Вишня на ділянці км 1+500 – км 2+500.

Також у третьому розділі наведені результати порівняння напружено-деформованого стану моделей підпірної конструкції з ґрунтоцементних паль на зсувонебезпечному схилі – похилі палі з ростверком, без ростверка, вертикальні палі з ростверком, та вертикальні палі без ростверка. В даному дослідженні порівнюється зміна розподілу напружень і переміщень в елементах моделі підпірної конструкції з ґрунтоцементних паль в залежності від параметрів конструкції і способу розташування паль в тілі ґрунтового масиву. Проведені порівняння моделей підпірних конструкцій з ґрунтоцементних паль на зсувонебезпечному схилі дозволили отримати:

- аналіз якісної роботи окремих елементів підпірної конструкції на міцність і деформування в просторовому поданні;
- оцінку ефективності роботи підпірної конструкції з ґрунтоцементних паль на зсувонебезпечному схилі;
- графіки залежностей зміни кута нахилу паль до вертикальної осі до їх утримуючої сили, міцності і деформацій схилу.

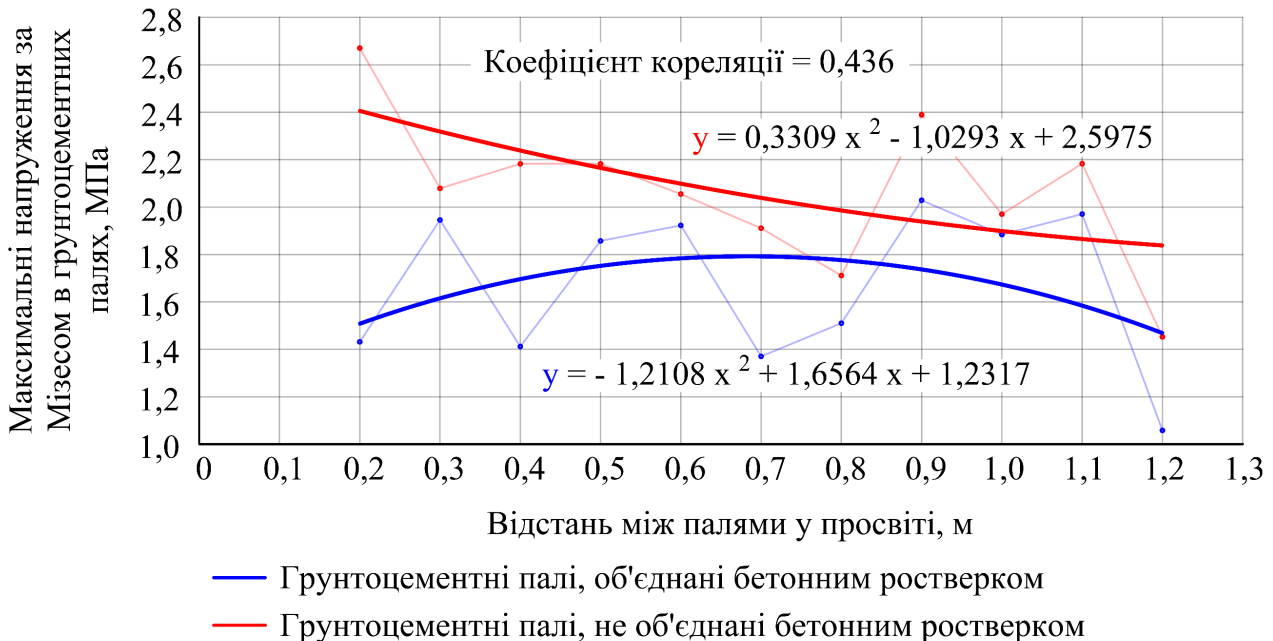


Рис. 7. Залежність максимальних напружень за Мізесом в ґрунтоцементних палях від відстані між палями у проясненні (діаметр ґрунтоцементних паль 1,2 м)

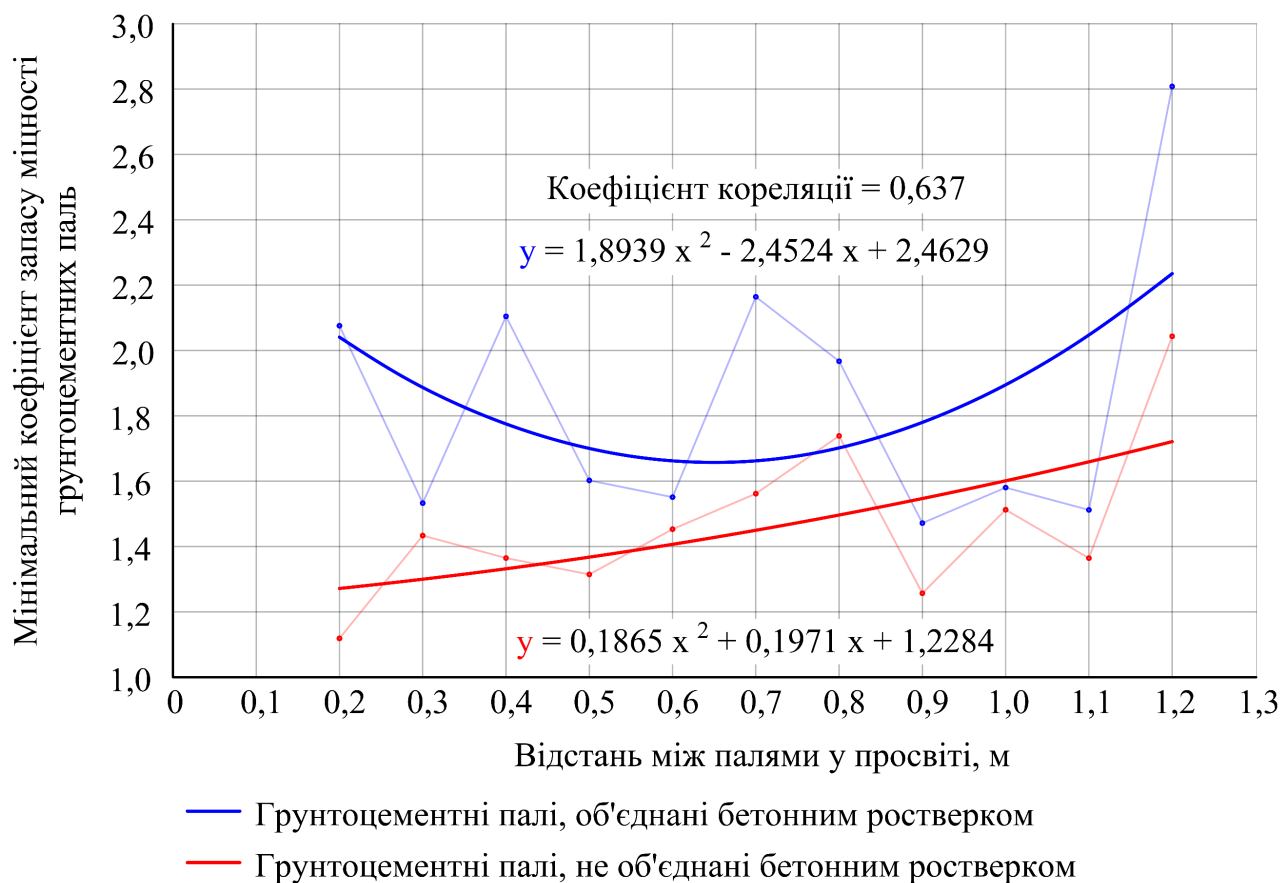


Рис. 8. Залежність мінімального коефіцієнта запасу міцності ґрунтоцементних паль від відстані між палями у просвіті (діаметр ґрунтоцементних паль 1,2 м)

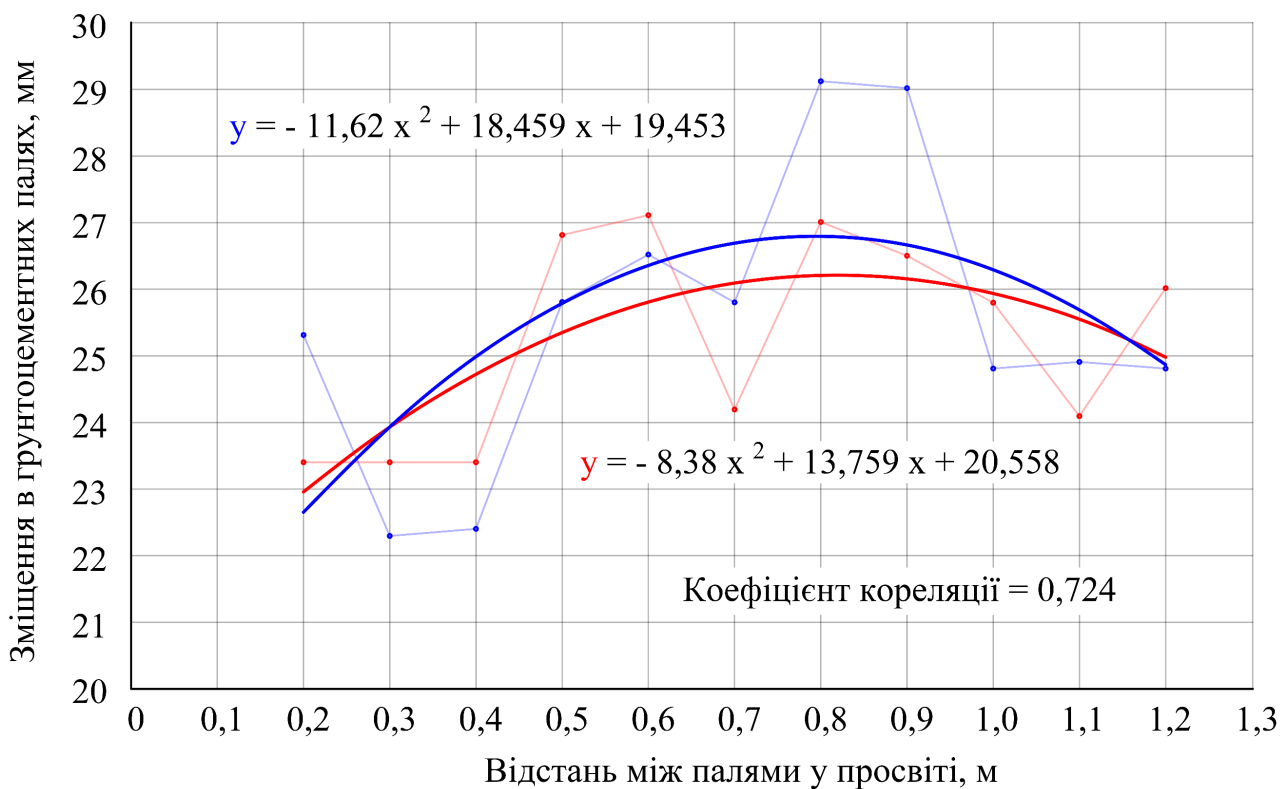


Рис. 9. Залежність зміщень в ґрунтоцементних палях від відстані між палями у просвіті (діаметр ґрунтоцементних паль 1,2 м)

У **четвертому розділі** розроблена методика розрахунку та виконана дослідно-промислова перевірка ефективності підпірної пальової конструкції на зсувонебезпечному схилі.

Зроблено висновок, що найгірший сценарій розвитку зсуву відбувається у випадку, коли за розрахунком коефіцієнт стійкості мінімальний, тобто, за методом Лоува і Карафайта (табл. 1).

Таблиця 1

## Отримані значення коефіцієнтів стійкості схилу

Назва методу	Отриманий коефіцієнт стійкості
Бішопа (спрощений)	1,449
Корпуса інженерів №1	1,203
Лоув і Карафайт	1,134
Спенсера	1,452
Федоровського-Курило	1,369
Фелленіуса	1,449
Янбу (скоректований)	1,193
Янбу (спрощений)	1,146

Як було визначено на основі розрахунків, палі є ґрунтоцементними конструкціями зі складом на 100 л цементного розчину 180 л ґрунту, що у відсотковому відношенні можна записати як 35,5 % і 64,5 % відповідно. Раціональна відстань між палями в просвіті при діаметрі паль 120 см згідно з розрахунком складає 0,6 м, а довжина паль – 8,3 м.

На основі виконаних розрахунків розроблено нову підпірну конструкцію для захисту від зсуву на ділянці автомобільної дороги місцевого значення С141017 (Львів-Шегині) – Судова Вишня на ділянці км 1+500 – км 2+500 зі складними інженерно-геологічними та рельєфними умовами в Прикарпатському регіоні.

Необхідно зазначити, що прийняття спорудження ростверків невеликих розмірів також збільшує жорсткість підпірної пальової конструкції. Рекомендації щодо параметрів ростверків, що об'єднує три палі: довжина між осями 3,2 м, ширина – 0,6 м, а висота – 0,5 м. Матеріал ростверків – залізобетон. Клас бетону – В15, клас арматури – АІ. З'єднання паль і ростверків жорстке, забезпечується випусками арматурних стрижнів з паль на довжину анкерування 1,0 м.

## ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій на основі вперше встановлених закономірностей зміни напружено-деформованого стану ґрунтоцементних паль та стійкості зсувонебезпечного схилу від конструктивно-технологічних параметрів елементів захисної системи, вирішено актуальне науково-технічне завдання обґрунтування параметрів ґрунтоцементних

пальових підпірних конструкцій для захисту зсувонебезпечних схилів, що дозволяє вирішувати технічні, економічні та екологічні проблеми зсувонебезпечних регіонів.

Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному.

1. Обґрунтовано ефективність способу підвищення стійкості зсувонебезпечного схилу, що полягає у використанні ґрунтоцементної пальової підпірної конструкції, порівняно з іншими способами укріплення.

2. Визначено форми кривої поверхні ковзання, що призводять до потенційної втрати стійкості ґрунтового схилу балки. Розроблено схему підсилення схилу за допомогою ґрунтоцементних паль, параметри яких обґрунтовано.

3. Проведено відцентрове моделювання ґрунтового схилу з використанням масштабної моделі ґрунтоцементної пальової підпірної конструкції для порівняння характеру залягання поверхні ковзання з аналітичними методами та оцінки позитивного впливу підсилення. Встановлено, що при діаметрі ґрунтоцементних паль 120 см і відстані між палями 0,6 м укріплена модель схилу має найменші абсолютні деформації.

4. Отримано нові залежності щодо параметрів міцності та стійкості вказаної конструкції для укріплення зсувонебезпечного шаруватого схилу, складеного суглинистими ґрунтами.

5. Виконано порівняльний аналіз результатів розрахунку підпірних конструкцій з ґрунтоцементних паль на прикладі розрахунку стійкості зсувонебезпечного схилу ділянки автомобільної дороги загального користування місцевого значення С141017 (Львів-Шегині) – Судова Вишня.

6. Розраховано економічний ефект від впровадження ґрунтоцементної пальової підпірної конструкції, який складає 36,71 млн. грн на 1000 м укріпленого земляного полотна зсувонебезпечної ділянки автомобільної дороги.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Тютюкін О.Л., Ігнатенко Д.Ю. – Визначення раціональних параметрів підпірних конструкцій із ґрунтоцементних паль на зсувонебезпечних схилах - Наука та прогрес транспорту. 2020. № 6 (90). С. 97–105.
2. V.D. Petrenko, A.M. Alkhdour, D. Ignatenko, O.L. Tiutkin – Application of Centrifugal Modeling for the Study of Landscape Structure Stability – International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET), Volume 10 (1), Tamilnadu, India – 2019. – P. 2179-2187.
3. O.I. Dubinchyk, V.D. Petrenko, D.Y. Ihnatenko, V.R. Kildieiev – Comprehensive analysis of the retaining pile structure with the determining the stability factor by numerical methods – E3S Web of Conferences, Essays of Mining Science and Practice 2019. Volume 109, 00020. – 2019. – P. 8.
4. R.V. Markul, O.M. Pshinko, V.D. Petrenko, O.L. Tiutkin, V.S. Andreev, O.V. Hubar, D.Y. Ihnatenko – Comparative analysis of calculation results of supporting structure of soil-cement piles – Transport Means 2019, Sustainability: Research and solutions. Kaunas University of Technology, Palanga, Lithuania. – 2019/10. – P. 820-828.



5. V.D. Petrenko, O.L. Tiutkin, D.Y. Ihnatenko – Analysis of the differences of the results of calculations of the stability coefficient of the landslide slope – Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. Збірник наукових праць Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна № 15. – 2019. – С. 86-95.
6. D.Y. Ihnatenko, V.D. Petrenko, O.L. Tiutkin – Interaction of soil-cement pile supporting structures with the body of a landslide – Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2017. № 5 (71). – С. 115-123.
7. V.D. Petrenko, O.L. Tiutkin, D.Y. Ihnatenko, V.V. Kovalchuk – Comparative Calculation of the Stability of the Landslide Slope in the Software Complexes «Otkos» and «Lira-Cad 2017» – Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. Збірник наукових праць Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2018. – № 14. - С. 101-109.
8. Петренко В.Д., Ігнатенко Д.Ю., Алхдур Ахмад – Аналіз відновлення стійкості зсувонебезпечного схилу за допомогою підпірної конструкції // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту (16.05-17.05.2019) : тези 79 Міжнар. науково-практ. конф./ДНУЗТ. – Дніпро, 2019. – С. 267-268.
9. Петренко В.Д., Ігнатенко Д.Ю. – Досвід відцентрового моделювання при визначенні стійкості зсувонебезпечного схилу // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту (17.05-18.05.2018) : тези 78 Міжнар. науково-практ. конф. / ДНУЗТ. – Дніпро, 2018. – С. 224-225.
10. Ігнатенко Д.Ю., Петренко В.Д. – Аналіз взаємодії ґрунтоцементних паль з тілом зсуву // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту (11.05-12.05.2017) : тези 77 Міжнар. науково-практ. конф. / ДНУЗТ. – Дніпро, 2017. – С. 233-234.
11. Д.Ю. Ігнатенко, В.Д. Петренко, О.Л. Тютюкін, В.В. Ковальчук – Патент України на корисну модель UA 133008 U, МПК E02D 17/20 (2006.01). Спосіб укріплення зсувонебезпечних схилів – № u201808974; заявл. 28.08.2018; опубл. 25.03.2019. – Бюл. № 6/2019. – С. 4.

## АНОТАЦІЯ

Ігнатенко Д.Ю. Обґрунтування параметрів ґрунтоцементних пальових підпірних конструкцій на зсувонебезпечних схилах. – Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.15.09 – «Геотехнічна і гірнича механіка». Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, 2021.

Дисертація присвячена дослідженню параметрів ґрунтоцементних паль у якості підпірних конструкцій на зсувонебезпечних схилах.

В роботі проведені обстеження та аналіз поточного стану зсувонебезпечних схилів яружно-балкової мережі у м. Дніпрі.

Виконано порівняльні розрахунки скінченно-елементних моделей зсувонебезпечного шаруватого схилу з влаштуванням підпірних конструкцій з ґрунтоцементних паль: вертикальних, розташованих під кутом до вертикальної осі, об'єднаних бетонним ростверком, без ростверка, різного діаметру, з різною відстанню між палями, але однакової довжини, що обумовлена розташуванням визначеної за попередніми розрахунками поверхні ковзання. За результатами розрахунків контактної задачі взаємодії ґрунтового масиву та підпірної конструкції було отримано закономірності формування міцності та стійкості зсувонебезпечного укріпленого схилу, що дає можливість прогнозування його геомеханічної стійкості в залежності від можливого розташування кривої поверхні ковзання. Обґрунтовано спосіб підвищення коефіцієнта стійкості ґрунтового схилу в залежності від варіації параметрів ґрунтоцементної підпірної пальової конструкції.

**Ключові слова:** ґрунтоцементні палі, зсувонебезпечний схил, скінченно-елементне моделювання, відцентрове моделювання, коефіцієнт стійкості схилу.

## АННОТАЦІЯ

Игнатенко Д.Ю. Обоснование параметров ґрунтоцементных свайных подпорных конструкций на оползнеопасных склонах. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.15.09 – «Геотехническая и горная механика». Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Национальный технический университет «Днепропетровская политехника», Днепр, 2021.

Диссертация посвящена исследованию параметров ґрунтоцементных свай в качестве подпорных конструкций на оползнеопасных склонах. В работе проведены обследование и анализ текущего состояния оползнеопасных склонов овражно-балочной сети в г. Днепре.

Инженерно-геологические условия для строительства многоэтажных жилых комплексов не всегда достаточно благоприятные для застройки некоторых районов г. Днепра. В некоторых случаях такое строительство требует дополнительных инженерных изысканий и расчетов, особенно когда речь идет о разработке инженерно-геологической защиты оползнеопасного участка склона, у которого планируется возвести здание. В таком случае для предотвращения угрозы оползней эти мероприятия необходимы и обязательны. Иначе говоря, перед проектировщиками стоит задача разработки подпорных конструкций, сдерживающих склон, возможное движение и сползание которого могут привести к катастрофе.

Вместе с тем, в особом внимании со стороны проектировщиков нуждаются проекты строительства и объекты хозяйствования, расположенные в горной местности на территории Украины, в зоне повышенной оползнеопасности.

Предпосылки возникновения оползней иногда могут быть скрыты на первый взгляд, когда вообще вроде бы все в порядке и нет никакой угрозы оползня рядом со строительной площадкой, но впоследствии при других обстоятельствах появляются изменения, способствующие развитию некоторых условий и факторов, действие которых в дальнейшем может привести к трагическим последствиям.

Для решения этой проблемы нужен системный анализ в более широком смысле. Не учет или непредусмотрение опасной ситуации заранее может быть главной ошибкой при проектировании. Из-за внезапного повышения уровня грунтовых вод, и это нужно всегда учитывать, меняются физические характеристики некоторых грунтов, что может нести угрозу катастрофического оползня. Особенно такая угроза возникает весной во время таяния снега или осенью во время длительных дождей, когда система отвода воды и инженерные коммуникации работают в усиленном режиме.

Современные методы расчета устойчивости склонов в сочетании с передовыми разработками в области технологии строительства и возведения многоэтажных зданий дают возможность проектировать и вести строительство на оползнеопасных участках местности в условиях проведения специальных мероприятий по укреплению таких склонов.

В связи с этим появляется необходимость решения проблемы надежности и безопасного выполнения таких проектов строительства, а также вопросов дальнейшей эксплуатации зданий и сооружений, которые возведены в зоне расположения оползнеопасных склонов. Опыт прошлых лет наглядно демонстрирует ситуацию на примере ошибок проектировщиков, когда после возведения высотных зданий и их заселения, возникала потребность эвакуировать людей во время реальной угрозы разрушения в результате активизации оползневых процессов рядом, вероятность возникновения которых не была учтена на стадии проектирования.

Таким образом, исследование современных методов борьбы с оползнями в настоящее время является актуальной темой и научно-практической задачей.

Выполнены сравнительные расчеты конечно-элементных моделей оползнеопасного слоистого склона с устройством подпорных конструкций из грунтоцементных свай: вертикальных, расположенных под углом к вертикальной оси, объединенных бетонным ростверком, без ростверка, различного диаметра, с разным расстоянием между сваями, но одинаковой длины, которая обусловлена расположением определенной по предварительным расчетам поверхности скольжения. По результатам расчётов контактной задачи взаимодействия грунтового массива и подпорной конструкции были получены закономерности формирования прочности и устойчивости оползнеопасного укрепленного склона, что дает возможность прогнозирования его геомеханической устойчивости в зависимости от возможного расположения кривой поверхности скольжения. Обоснованно способ повышения коэффициента устойчивости почвенного склона в зависимости от вариации параметров грунтоцементной подпорной свайной конструкции.

Численными расчетами обоснованно параметры грунтоцементных свайных подпорных конструкций – длину свай, диаметр свай, расстояние между сваями, угол их наклона и целесообразность объединения свай бетонным ростверком.

Разработан и запатентован метод укрепления оползневых склонов с помощью грунтоцементных свай, объединенных бетонным ростверком, которые располагаются перпендикулярно вектору движения тела оползня.

Экспериментальные исследования устойчивости оползнеопасных склонов с помощью центробежного моделирования были выполнены по инженерно-геологическому разрезу склона балки Долгий овраг.

Рассчитан экономический эффект от внедрения грунтоцементной свайной подпорной конструкции, который составляет на 1000 м укрепленного земляного полотна оползнеопасного участка автомобильной дороги 36 710 000 грн.

**Ключевые слова:** грунтоцементные сваи, оползнеопасный склон, конечно-элементное моделирование, центробежное моделирование, коэффициент устойчивости склона.

## ANNOTATION

Ihnatenko D.Yu. Substantiation of parameters of soil-cement pile supporting structures on landslide slopes. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for obtaining scientific degree of the Candidate of Technical Sciences in specialty 05.15.09 – "Geotechnical and mining mechanics". Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, National Technical University "Dnipro Polytechnic", Dnipro, 2021.

The dissertation is devoted to the research of parameters of soil-cement piles as supporting structures on landslide-prone slopes.

The paper conducts surveys and analysis of the current state of landslide-prone slopes in the city of Dnipro.

Comparative calculations of finite-element models of landslide-layered sloping slope with arrangement of supporting structures of soil-cement piles: vertical, located at an angle to the vertical axis, connected by a concrete grillage, without a grillage, with different diameters, with different distance between piles, but with the location determined by preliminary calculations of the location of sliding surface. According to the results of calculations of the contact task of interaction of soil mass and supporting structure, the regularities of formation of strength and stability of landslide-reinforced slope were obtained, which allows to predict its geomechanical stability depending on the possible location of the sliding surface curve. The method of increasing the coefficient of stability of the soil slope depending on the variation of the parameters of the soil-cement supporting pile structure is substantiated.

**Keywords:** soil-cement piles, landslide slope, finite element modeling, centrifugal modeling, slope stability coefficient.

ІГНАТЕНКО ДМИТРО ЮРІЙОВИЧ

ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ҐРУНТОЦЕМЕНТНИХ ПАЛЬОВИХ  
ПІДПІРНИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ЗСУВОНЕБЕЗПЕЧНИХ СХИЛАХ

Автореферат

Підписано до друку 26.03.2021 р. Папір офсетний.  
Друк цифровий. Умов. друк. арк. 0,9. Формат 60x90/16  
Наклад 150 прим. Зам № 242.

Надруковано ФОП Сова Д.І.  
Дніпропетровська обл., Дніпропетровський р-н, с. Дослідне, 42/102  
Свідоцтво ДК №4129 від 29.07.2011 р.  
тел: (099) 411-40-91  
e-mail: eprint000@gmail.com