

Міністерство освіти і науки України  
Київський національний університет будівництва і архітектури

Гараханлу Мохаммад Махді

УДК 624.131.53; 624.131.54

**ВПЛИВ ТЕХНОГЕННИХ ФАКТОРІВ НА АКТИВНІСТЬ  
ПОВЕРХНЕВИХ ТА ГЛИБИННИХ ЗСУВНИХ ПРОЦЕСІВ**

05.23.02 – основи і фундаменти

Автореферат дисертації  
на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі основ і фундаментів Київського національного університету будівництва і архітектури Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент  
Петренко Едуард Юрійович,  
Київський національний університет  
будівництва і архітектури  
доцент кафедри основ і фундаментів

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
Самедов Ахмед Меджід огли,  
Національний технічний університет України  
“Київський політехнічний інститут”,  
професор кафедри геобудівництва  
та гірничих технологій

кандидат технічних наук, доцент  
Кічаєва Оксана Володимирівна  
Харківський національний університет міського  
господарства імені О.М. Бекетова,  
завідувач кафедри механіки ґрунтів,  
фундаментів та інженерної геології

Захист відбудеться 30 листопада 2016 р. о 13-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.056.05 Київського національного університету будівництва і архітектури за адресою: 03037, м. Київ, Повітрофлотський проспект, 31, ауд. 466

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Київського національного університету будівництва і архітектури за адресою: 03037, м. Київ, Повітрофлотський проспект, 31

Автореферат розісланий " " жовтня 2016 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради

М.В. Суханевич

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Будівельна галузь постійно потребує залучення все більшої кількості потенційних майданчиків для проектування і зведення споруд різноманітного призначення. Така необхідність вимагає використання територій, які в недалекому минулому або не розглядалися взагалі як майданчики будівництва, або розглядалися частково. До таких сильно еродованих територій відносяться зсувні та зсувонебезпечні ділянки. При проектуванні на зазначених ділянках необхідно враховувати не тільки такі природні зсувонебезпечні процеси, що впливають апріорі, але й оцінювати існуючі техногенні фактори, які виникли при будівництві та експлуатації будинків і споруд. Навіть незначне локальне збільшення техногенного навантаження може стати причиною зсувних деформацій. Тому визначення можливості виникнення і оцінка ступеня впливу того або іншого техногенного фактора або їх комбінації на таких територіях є актуальним і потребує ретельного вивчення.

Взаємодія техногенних факторів з існуючими природними умовами на схилі створюють нову картину його напружено-деформованого стану. Розв'язання такого класу задач можливо лише в рамках нелінійних моделей ґрунтових середовищ із використанням чисельних методів. Це дає можливість моделювати роботу системи “основа-схил-споруда” в умовах експериментальної дії визначеного техногенного фактора та оцінити його вплив у загальній системі сил, що діють на схилі. Значна вартість натурних експериментів і, у деяких випадках, неможливість їх проведення через складність моделювання реальних процесів визначили широке поширення математичних аналітичних і чисельних методів, особливе місце серед яких займає метод скінченних елементів (МСЕ). У той же час в межах МСЕ при розрахунках схилів недостатньо висвітлені питання створення ефективних скінченно-елементних баз для побудови дискретних моделей процесів поверхневого змиву ґрунтів, нестационарної фільтрації у двовимірній постановці. Таким чином, розробка і реалізація об'єктно-орієнтованих ефективних підходів розв'язання задач нелінійного деформування ґрунтового середовища з урахуванням водної ерозії в умовах нестационарної двовимірної фільтрації є актуальною проблемою інженерного захисту територій і становить практичний інтерес.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана у відповідності до планів держбюджетних робіт Міністерства освіти і науки України в період 2008 - 2015 рр. та є продовженням досліджень, які проводились в рамках науково-дослідної теми 3-ДБ-2007 «Теоретичні основи чисельного моделювання процесів на схилах зсувонебезпечних територій від дії природних і техногенних факторів». Номер державної реєстрації теми: 0107U000449. Наказ МОНУ № 732 від 27.10.2006 р., наказ КНУБА № 306 від 8.11.2006 р. Тема 8-ДБ-2010 «Розробка теорії моделювання напружено-деформованого стану ґрунтової основи зсувонебезпечних територій при динамічних навантаженнях». Номер державної реєстрації теми: 0110U002286.

Наказ МОНУ № 686 від 22.07.2009 р., наказ КНУБА № 457 від 14.12.2009 р.

**Мета роботи і задачі дослідження.** Мета дисертаційної роботи полягає в розробці комплексної моделі стійкості зсувонебезпечних територій і методики розрахунку поверхневих і глибоких зсувів в залежності від дії техногенних факторів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні *задачі*:

- проаналізувати існуючі методики визначення стійкості схилів з урахуванням лінійного і нелінійного деформування ґрунтів та дії техногенних факторів;

- виділити техногенні фактори або їх комбінації, що найбільш суттєво впливають на стійкість поверхневих і глибоких зсувів;

- розробити комплексну модель та методику розрахунків пружно-пластичного деформування схилів при нелінійному деформуванні ґрунтів, нестационарній фільтрації і площинному змиві;

- отримати проблемно-орієнтовані скінченні елементи для комплексної моделі пружно-пластичного деформування схилів, нестационарній фільтрації і площинному змиві;

- розробити алгоритм розрахунків схилів з урахуванням нелінійного деформування ґрунтів, нестационарної фільтрації і площинному змиві;

- виконати експериментальні дослідження площинного змиву ґрунту на лабораторному стенді та у польових умовах;

- провести натурні спостереження за зсувними деформаціями на схилах з активним проявом техногенних факторів;

- дати порівняльну оцінку результатів лабораторних, натурних і чисельних результатів роботи системи “основа-схил-споруда”;

- показати характер зміни напружено-деформованого стану системи “основа-схил-споруда” залежно від виду і активності техногенних факторів;

- впровадити розроблену методику при проектуванні та будівництві будинків і споруд на зсувонебезпечних територіях.

*Об’єкт дослідження* - поверхневі та глибокі зсуви при дії техногенних факторів.

*Предмет дослідження* - напружено-деформований стан системи “основа-схил-споруда” при техногенних впливах.

*Методи дослідження.* Порівняння отриманих результатів тестових задач в рамках прийнятої моделі з рішеннями інших авторів; виконання лабораторних, польових на стоковому майданчику досліджень і зіставлення отриманих результатів із чисельними рішеннями методом скінченних елементів; проведення інженерно-геодезичних і геофізичних спостережень за схилами на експериментальних майданчиках; порівняння отриманих натурних експериментальних даних із чисельними рішеннями у відповідності до прийнятої моделі.

**Наукова новизна одержаних результатів:**

- вперше розроблено комплексну модель стійкості зсувонебезпечних територій, що враховує пружно-пластичне деформування схилів при нелінійному

деформуванні ґрунтів, нестационарну фільтрацію і площинний змив;

- набула подальшого розвитку методика чисельного моделювання стійкості ґрунтового середовища, що базується на модифікованій дилатансійній моделі пружно-пластичного деформування;

- розроблено проблемно-орієнтовані скінченні елементи для комплексної моделі стійкості зсувонебезпечних територій при дії техногенних факторів, а також отримані розрахункові співвідношення метода скінченних елементів для площинного змиву ґрунтів. Рішення проводиться на базі єдиної топологічної структури скінченно-елементної сіткової дискретизації;

- створено алгоритми послідовних переходів від одного завдання до іншого шляхом постановки початкових і граничних умов різної фізичної природи, оцінки змін і відповідної корекції вільної поверхні ґрунтового середовища, а також обчислення додаткової системи гідродинамічних сил;

- розроблено методика лабораторних випробувань площинного змиву ґрунту та проведено аналіз збіжності та достовірності отриманих результатів на основі тестування контрольних прикладів;

- вперше показана роль і дана кількісна оцінка площинного змиву при формуванні поверхневого зсуву на схилі в межах залягання насипних ґрунтів;

- визначено внесок гідродинамічної сили в загальній системі сил, що діють на схилі;

- отримано рішення прикладних задач, в яких проаналізовані зміни в напружено-деформованому стані системи "основа-схил-споруда" при комплексній дії техногенних факторів.

#### **Практичне значення одержаних результатів.**

- запропонована методика комплексної оцінки пружно-пластичного деформування схилів при нелінійному деформуванні ґрунтів, нестационарної фільтрації і площинного змиву, що дозволяє аналізувати напружено-деформований стан схилів на всіх етапах проектно-будівельних робіт і в період експлуатації з урахуванням активізації техногенних факторів;

- показано вплив техногенних факторів на формування та зміну напружено-деформованого стану системи "основа-схил-споруда", що дозволяє виробити раціональний та ефективний інженерний захист зсувонебезпечних територій;

- розроблена методика і алгоритми реалізовані у вигляді пакету прикладних програм SATER.SOIL і можуть використовуватися в проектній практиці, наукових дослідженнях;

- результати наукових досліджень впроваджені при виборі конструкцій інженерного захисту на експериментальному майданчику в м. Києві по вул. Мічуріна;

- окремі результати дисертаційної роботи використані в навчальному процесі на кафедрі основ і фундаментів Київського національного університету будівництва і архітектури.

**Особистий внесок здобувача.** Представлені в дисертаційній роботі результати отримані здобувачем самостійно. У статтях опублікованих у співавторстві здобувачеві належать наступні результати:

- визначення впливу гідродинамічної сили на стійкість зсувонебезпечного схилу [1];
- оцінка напружено-деформованого стану схилу при статичному навантаженні [6];
- показана роль утримуючих споруд на схилі при демонтажі існуючих і будівництві нових будинків [4];
- визначення параметрів комплексної моделі ґрунту [5];
- вивчення ерозійного змиву ґрунту при лабораторних дослідженнях [7];
- проведено аналіз впливу техногенного навантаження на стійкість схилу [3];
- виконано чисельне моделювання напружено-деформованого стану системи "основа-підпірна стінка-будинок" з урахуванням впливу техногенних факторів [8,9,10,11];
- виконано розрахунки конструкцій утримуючих споруд при інженерному захисті зсувонебезпечної території [2].

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертації доповідались на шостій всеукраїнській науково-технічній конференції "Механіка ґрунтів, геотехніка та фундаментобудування" м. Полтава, листопад 2008 р.; 68-й, 69-й, 70-й, 71-й, 73-й, 74-й, 75-й щорічних науково-практичних конференціях Київського національного університету будівництва і архітектури; науковій конференції молодих учених, аспірантів і студентів КНУБА в 2007, 2008, 2011, 2013 роках; Proceeding of the 2-nd European Conference of International Association for Engineering Geology, Madrid, Spain, 2008; перша міжнародна конференція: Проблеми геомеханіки – 2015 в КНУБіА 9-12 листопада 2015 року.

**Публікації.** Результати досліджень опубліковані в 11 друкованих виданнях, у тому числі 7 – у наукових фахових виданнях України (одна з яких – у виданні, яке включено в міжнародну науково-метричну базу), 1– у періодичному науковому виданні іноземної держави, 3 – у тезах доповідей вітчизняних конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота викладена на 154 сторінках друкованого тексту основної частини, яка складається із вступу, п'яти розділів і висновків. Повний обсяг дисертації становить 199 сторінок і включає 25 таблиць (із них 3 на окремих сторінках), 77 рисунків (із них 11 на окремих сторінках), список використаної літератури зі 162 найменувань на 17 сторінках та 3 додатків на 14 сторінках.

## ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, визначені мета і задачі досліджень, наведена загальна характеристика роботи.

У **першому розділі** розглянуто підходи та здійснено аналіз сучасних проблем будівництва у зсувонебезпечних та зсувних районах.

Вагомий внесок у розробку методів оцінки стійкості територій внесли такі вчені як О.О. Арешкович, В.В. Аристовский, М.Л. Березанцев, А.І. Білеуш, С.В. Біда, І.П. Бойко, Ю.Й. Великодний, Ю.Л. Винников, М.Н. Гольдштейн, А.М. Дранников, М.В. Демчишин, М.П. Дубровський, А.Г. Дорфман, Ю.К. Зарецкий, М.Л. Зоценко, Ю.О. Кірічек, О.В. Кічаєва, С.Ф. Клованич, В.С. Кремез, М.М. Кризький, М.В. Корнієнко, В.Н. Ломбардо, Н.Н. Маслов, Ц.Є. Мирцхулава, А.С. Моргун, В.М. Ніколаєвський, О.В. Новський, О.О. Петраков, Е.Ю. Петренко, А.М. Рижов, А.М. Самедов, О.С. Сахаров, А.А. Светличний, В.Л. Сєдін, Ю.П. Сухановский., З.Г. Тер-Мартиросян, О.М. Трофимчук, Ю.Ф. Тугаєнко, В.І. Хазин, Г.І. Швебс, О.В. Школа, В.С. Шокарев, П.І. Яковлев, A.W. Bishop, V.E. Price, D.Taylor та інші.

Аналізуючи існуючі розрахункові методи видно, що успішне розв'язання розглянутої проблеми можливо тільки при спільному використанні аналітичних, чисельних і лабораторних методів, а також натурних спостережень. Утворення ярів, зсувів, підйом поверхневих і підземних вод пов'язані не тільки із природними процесами (атмосферні опади, повені і т.п.), але і з техногенними факторами (нераціональне орання, вирубка лісів, зволоження, бараж і т. ін.). Оцінити в природних умовах всю різноманітність факторів, які впливають на ерозію схилів досить складно, а іноді і неможливо. Однак, встановлення принципу дії окремих факторів на ерозійні процеси схилів можливе на основі моделювання реальних умов у лабораторному середовищі, або на стокових майданчиках в межах природних водозборів. Особливий інтерес представляють аналітичні та чисельні методи, тому що вони дозволяють одержати кількісну оцінку інженерно-геологічних явищ, і як наслідок, дають можливість їх прогнозування. Найбільш універсальним чисельним методом, що дозволяє виконувати розрахунки стійкості зсувонебезпечних територій, будівельних конструкцій є метод скінченних елементів (МСЕ), який задовольняє всім вимогам, що висуваються сучасним рівнем розвитку галузі до моделей ґрунтових середовищ (в тому числі і схилів), детальної дискретизації інженерно-геологічних умов.

Як відомо, стійкість схилів залежить як від природних факторів (висота, крутість, форма, природні джерела води, абразія), так і від техногенних (планування схилів, їх підрізання, довантаження, зміна гідрогеологічного режиму і т.д.). Чимало територій, де зсувні процеси стабілізовані і немає природних причин для їх зміни, можуть знову активізуватись саме при дії техногенних факторів. Тому були виділені визначальні техногенні причини, що впливають на стійкість таких територій – це деформація ґрунтової основи від навантаження, площинний змив ґрунту (іноді використовують термін делювіальний змив), фільтраційні процеси. Саме ці фактори визначили параметри комплексної моделі стійкості територій при техногенному навантаженні.

Розгляд літературних джерел показав недостатність вивчення проблеми нелінійного деформування ґрунтового середовища з урахуванням площинного змиву в умовах нестационарної двовимірної фільтрації на основі метода скінченних елементів.

У другому розділі запропоновано на основі аналізу і узагальнення наявного досвіду вирішення окремих проблем стійкості зсувонебезпечних ділянок ефективну комплексну модель чисельного моделювання стійкості таких територій (рис. 1), що враховує вплив взаємопов'язаних природних і техногенних процесів: нелінійне деформування, площинний змив ґрунту на схилі, який еродує, і нестационарна фільтрація. Як відомо, ґрунтова основа відноситься до дисперсних суттєво нелінійних середовищ, деформація  $\mathcal{E}$  яких включає пружну  $\mathcal{E}^e$  і пластичну  $\mathcal{E}^p$  складові:

$$d\mathcal{E} = d\mathcal{E}^e + d\mathcal{E}^p \quad (1)$$

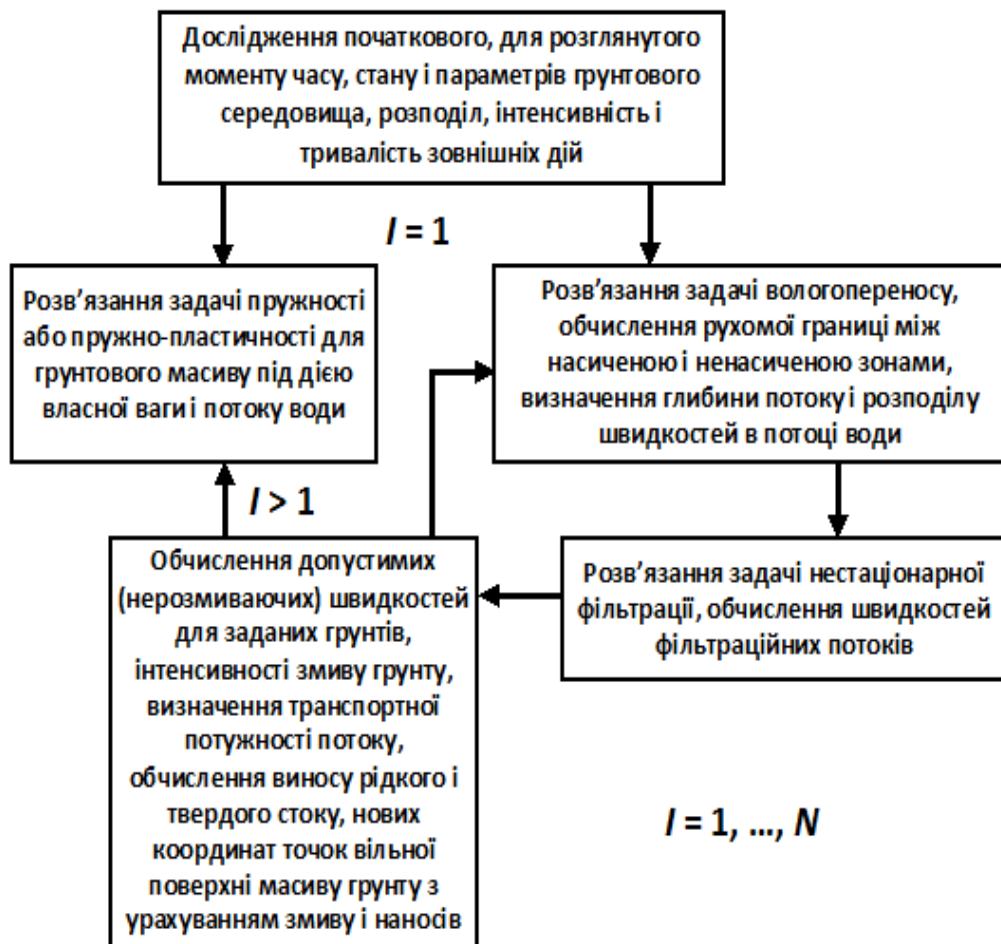


Рис. 1. Комплексна модель стійкості територій

Пружний додаток підпорядковується закону Гука. Пластична деформація представляється у вигляді пластичного потенціалу, при цьому область пружних деформацій обмежена поверхнею навантаження (рис. 2):



$$d\varepsilon^p = d\lambda \frac{\partial F}{\partial \sigma}, \quad F \neq f, \quad (2)$$

де  $F$  – функція пластичного потенціалу,  $f$  – функція, що визначає умову пластичності ( $f = 0$ ),  $d\sigma$  – приріст напружень,  $d\lambda$  – малий скалярний множник, що визначає абсолютну величину приростів пластичних деформацій  $d\varepsilon^p$ ,  $H_R$  – граничний опір всебічному розтягу.

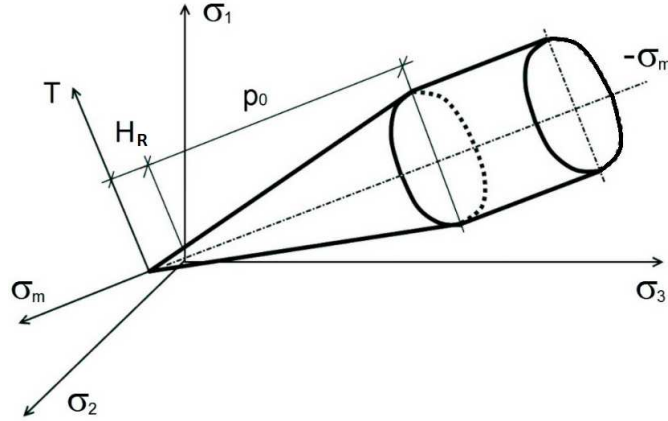


Рис. 2. Поверхня навантаження

Критерієм граничного стану є модифікована умова Мізеса-Шлейхера-Боткіна, запропонована І.П.Бойком:

$$\begin{cases} f = T + \sigma_m \operatorname{tg} \psi - \tau_s & \text{при } \sigma_m \leq p_o, \\ f = T + p_o \operatorname{tg} \psi - \tau_s & \text{при } \sigma_m > p_o, \end{cases} \quad \begin{cases} \tau_s = \frac{6\sqrt{3}C \cos \varphi}{9 - \sin^2 \varphi}; \\ \operatorname{tg} \psi = \frac{6\sqrt{3} \sin \varphi}{9 - \sin^2 \varphi}; \end{cases} \quad (3)$$

де  $T$  – інтенсивність дотичних напружень,  $\sigma_m$  – гідростатичний тиск,  $\psi$  – кут тертя на октаедричній площадці,  $p_o$  – параметр ґрунтового середовища,  $\tau_s$  – граничне значення інтенсивності дотичних напружень при відсутності гідростатичного тиску,  $C$  – коефіцієнт зчеплення,  $\varphi$  – кут внутрішнього тертя.

Корекція напружень на кожній ітерації кроку по параметру здійснюється згідно з неасоційованим законом і дилатансійною умовою В.М. Ніколаєвського:

$$\varphi = \varphi_0 + \arcsin \lambda, \quad (4)$$

$$\text{де } \lambda = -\sqrt{1 - \left(\frac{\rho}{\rho^{kp}}\right)^2} \text{ при } \rho < \rho^{kp}, \quad \lambda = \sqrt{1 - \left(\frac{\rho^{kp}}{\rho}\right)^2} \text{ при } \rho > \rho^{kp}, \quad \lambda = 0 \text{ при } \rho = \rho^{kp},$$

де  $\varphi_0$  – кут внутрішнього тертя при досягненні критичної щільності,  $\rho$  – щільність,  $\rho^{kp} = \rho^{kp}(\sigma_m)$  – критична щільність при даному гідростатичному тиску.

Запропонована концепція моделі будується на основі взаємодії фізичних і феноменологічних аспектів водоміцності і змиву ґрунтів (рис. 3). У більшості випадків на схилі формуються площинні та струминні потоки, які призводять до площинного змиву (у більшому масштабі до делювіального змиву) і далі до утворення поверхневих зсувів. Змив з деякої ділянки схилу  $k$  дорівнює

сумарному змиву пластовими і струминними потоками з урахуванням вище розташованих шарів ґрунту:

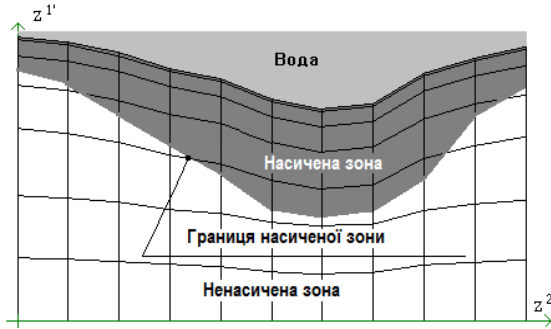


Рис. 3. Дискретна модель площинного змиву

$$W_k = \frac{\gamma_s \pi d^3}{6g_p} \cdot R v_k^3 \left[ B_k l_k - \frac{3}{2d} \sum_{i=1}^{k-1} W_i \left( 1 - \psi_a \sum_{j=i-1}^k l_j \right) \right], \quad (5)$$

де  $\gamma_s$  – питома вага твердих частинок ґрунту,  $d$  – діаметр часток,  $v_k$  – середня швидкість потоку на  $k$ -й ділянці схилу,  $g_p$  – прискорення вільного падіння,  $B_k$  – ширина водного потоку,  $R$  – кількість частинок, що відірвані потоком з одиниці площі ложа потоку за одиницю часу на одиницю куба швидкості,  $l$  – довжина ділянки схилу,  $W_i$  – змив з вище розташованих ділянок схилу,  $\psi_a$  – стерта частина часток, що переміщуються потоком.

Далі одержано кількісну оцінку характеристик змиву ґрунту з урахуванням швидкості потоку та інтенсивності відриву ґрунтових часток, тобто визначений загальний винос твердого стоку.

Співвідношення для епюри розподілення швидкостей по глибині потоку з урахуванням ударної дії дощових крапель  $u$  та інтенсивність відриву ґрунтових часток потоком води  $q$  мають вигляд:

$$u = \frac{7(x^1)^{1/6} \sqrt{h \sin \beta}}{6n_\Delta \left( 1 + \frac{1.767 \cdot 10^{-2} \sqrt{q_r}}{\Delta} \right)}, \quad U = \frac{h^{1/6} \sqrt{h \sin \beta}}{n_\Delta \left( 1 + \frac{1.767 \cdot 10^{-2} \sqrt{q_r}}{\Delta} \right)}, \quad q = 1.1 \cdot 10^{-5} \gamma_s \omega d \left( \frac{(u_\Delta)^2}{(U_\Delta^N)^2} - 1 \right), \quad (6)$$

де  $u$  – ударна дія дощових крапель,  $q$  – інтенсивність відриву ґрунтових часток потоком води,  $U$  – середня швидкість струмка по глибині,  $h$  – глибина потоку,  $\sin \beta$  – ухил ділянки,  $\Delta$  – висота виступів шорсткості ложа потоку,  $n_\Delta$  – коефіцієнт шорсткості,  $u_\Delta$  – швидкість потоку на рівні виступів шорсткості,  $\omega$  – частота пульсацій донної швидкості, яка при відсутності спеціальних досліджень приймається рівною  $10 \text{ с}^{-1}$ ,  $q_r$  – інтенсивність дощування,  $U_\Delta^N$  – допустима для ґрунту швидкість потоку води.

Крім того, одним із основних напрямків вивчення поверхневих і глибинних зсувних процесів є аналіз гідрогеологічних умов. Математична модель, що описує фільтрацію вологи в ґрунті, у випадку повного і неповного насичення, справджується при наступних припущеннях: рух води в ґрунті відбувається під дією капілярних і гравітаційних сил; закон Дарсі справедливий

при повному і неповному насиченні ґрунту. Задача інтегрування рівняння нестационарної фільтрації з початковими і граничними умовами еквівалентна задачі визначення функції напору  $H$ , що забезпечує стаціонарність відповідного функціоналу  $\delta\chi(H)$ :

$$\delta\chi(H) = \int_V \left[ k \frac{\partial H}{\partial x^i} \frac{\partial(\delta H)}{\partial x^j} g^{ij} + \lambda_f \frac{\partial H}{\partial t} \delta H \right] dV + \int_S q \delta H dS = 0; \quad i, j = 1, 2, \quad (7)$$

де  $H = H_0(z^i, t)$  – невідома функція п'езометричного напору,  $H_0$  – початковий напір,  $k$  – коефіцієнт фільтрації,  $t$  – час,  $\lambda_f = \gamma_s(m_0\beta_0 + \beta_1)$ ,  $m_0$  – початкова пористість,  $\beta_0$  – коефіцієнт стискання рідини,  $\beta_1$  – коефіцієнт стискання шару ґрунту,  $g^{ij}$  – компоненти метричного тензора,  $q$  – витрати потоку,  $V$  – об'єм,  $S$  – поверхня,  $x^i$  – місцева система координат.

На граничних поверхнях середовища  $S_i$  задані граничні умови першого, другого і третього роду:

$$H = H_0(z^i, t) \text{ на } S_1; \quad k \frac{\partial H}{\partial n} = -q(x^i, t) \text{ на } S_2; \quad k \frac{\partial H}{\partial n} = k_0(H - H_0) \text{ на } S_3, \quad (8)$$

де  $n$  – нормаль до граничної поверхні,  $z^i$  – координати точок середовища в базисній системі координат.

Одним із важливих результатів розв'язання нестационарної задачі фільтрації є можливість визначення положення депресійної кривої і відповідного розподілу напорів  $H$  для подальшого обчислення системи гідродинамічних сил, що діють на зсувний схил. Гідродинамічна сила є об'ємною силою і визначається з виразу:

$$P_w = -\gamma_w \text{grad } \vec{H}, \quad P_w^1 = -\gamma_w \frac{\partial H}{\partial x^1} \sqrt{g}, \quad P_w^2 = -\gamma_w \frac{\partial H}{\partial x^2} \sqrt{g}, \quad (9)$$

де  $\gamma_w$  – питома вага води,  $g$  – визначник метричного тензора.

У подальшому гідродинамічна сила використовується при розв'язанні задачі нелінійного деформування ґрунтового середовища як зовнішнє навантаження.

У **третьому розділі** розроблено в рамках методу скінченних елементів розроблені ефективні проблемно-орієнтовані скінченні елементи та розрахункові співвідношення для комплексного аналізу стійкості територій під дією техногенних факторів. Необхідність детальної дискретизації інженерно-геологічних розрізів, і в той же час збереження досить регулярної структури сіткової області, спонукає до створення скінченних елементів з високою точністю опису напружено-деформованого стану об'єктів складної форми та структури, забезпеченням високої швидкості збіжності до точного розв'язку задач при мінімальних чисельних витратах (рис. 4).

Приймається, що щільність матеріалу, компоненти тензора пружних постійних і визначник метричного тензора незначним чином змінюються в області поперечного перерізу елемента і вважаються рівними відповідним значенням в його центрі. За невідомі при розв'язанні задачі приймаються компоненти переміщень вузлів СЕ в базисній системі координат. У площині елемента прийнято білінійний закон розподілу переміщень. Опис напружено-

деформованого стану виконано згідно з основними положеннями моментної схеми скінченного елемента в величинах компонент тензора фізичних деформацій.

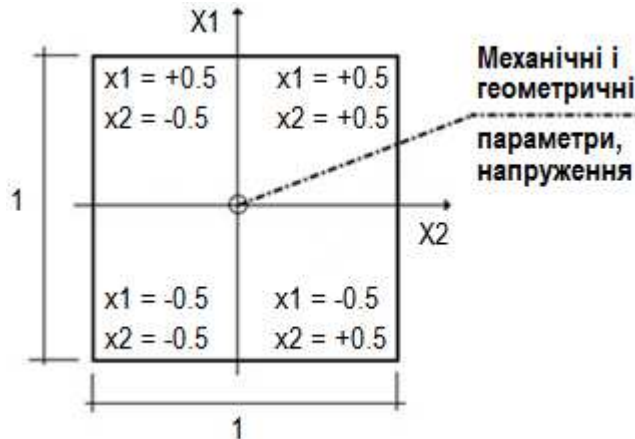


Рис. 4. Скінченний елемент нелінійного деформування ґрунтового середовища

Розроблені нові модифікації чисельних процедур розв'язання систем лінійних і нелінійних рівнянь в задачах площинного змиву і двовимірної нестационарної фільтрації (рис. 5).

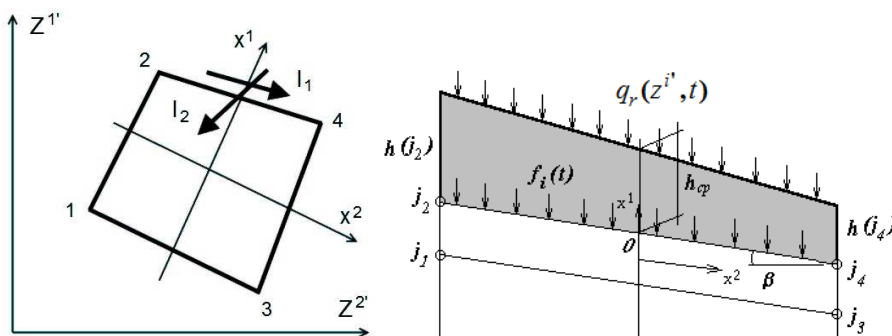


Рис. 5. Скінченний елемент на границі ґрунта і потоку

Для задач площинного змиву на основі обчислених на кожному кроці значень відриву частинок і об'єму наносів визначається сумарний винос твердого стоку по кожній з попередньо визначених фракцій, а також перерозподіл наносів на поверхні ґрунту. Крім того, обчислюються нові значення координат вузлів скінченного елемента на вільній поверхні дискретної моделі. Вибір базисних функцій задачі нестационарної фільтрації відповідає полілінійному закону апроксимації напорів.

Отримані значення напорів на кожному кроці інтегрування за часом дозволяють побудувати депресійну криву в площині розглянутого майданчика, а також визначити гідродинамічні сили, які є вхідними даними при побудові додаткової системи сил для визначення НДС схилу. Важливою перевагою запропонованих об'єктно-орієнтованих СЕ є те, що розв'язання задачі проводиться на базі єдиної топологічної структури скінченно-елементної дискретизації.

У четвертому розділі проведено всебічний аналіз збіжності і вірогідності запропонованих підходів на основі тестування контрольних прикладів, які охоплюють усі процеси і об'єкти, розглянуті в дисертації. У рамках багатofакторного експерименту встановлені принципи дії окремих найбільш значущих факторів на ерозійні процеси схилів. Розглянуто задачу чисельного моделювання нестационарної фільтрації та отримано положення депресійної кривої в залежності від розподілу напору по розрахунковій області (рис. 6).

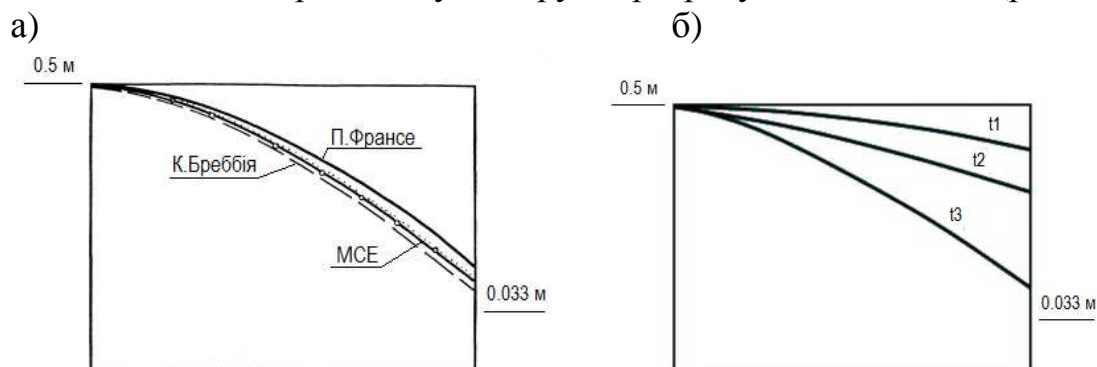


Рис. 6. Чисельне моделювання нестационарної фільтрації: (а) – порівняння положення депресійної кривої за даними експерименту та числовими розрахунками; (б) – розподіл напору  $H$  для різних моментів часу

В якості контрольної задачі використовувався відомий чисельний розв'язок Бреббія по експериментальних дослідженнях Франсе. Відносна похибка результатів зміни напору у порівнянні із експериментальними даними не перевищувала 3%.

Для лабораторних досліджень процесу площинного змиву розроблено спеціальний стенд для моделювання таких факторів, як кут нахилу схилу, кількість опадів та наявність підпірної стінки. Основними елементами установки є лійка для забезпечення дощування та спеціально сконструйований скляний лоток із ґрунтом (рис. 7). В експериментах змінювали кут нахилу схилу на трьох рівновіддалених рівнях від  $15^\circ$  до  $45^\circ$ ; кількість опадів при дощуванні на трьох рівновіддалених рівнях від 222 мм до 492 мм; наявність або відсутність підпірної стінки. До показників, які встановлювали в експериментах, відносились: початок змиву часток ґрунту, об'єм змитого ґрунту, його гранулометричний склад. Аналіз отриманих результатів свідчить про те, що збільшення кута нахилу схилу і кількості опадів дощування при відсутності підпірної стінки, як сукупно так і роздільно, призводить до росту кількості змитого із схилу ґрунту (рис. 8). Наприклад, при зміні кількості опадів дощування з 222 мм до 492 мм кількість змитого ґрунту збільшується в 2,4 рази, за умови, що кут нахилу схилу становить  $15^\circ$ . При зміні кута нахилу схилу до  $30^\circ$  або  $45^\circ$ , кількість змитого ґрунту при зміні кількості опадів з 222 до 492 мм веде до зростання кількості змитого ґрунту в 8,3 і 11,7 рази відповідно. В усіх дослідженнях спостерігається найменша кількість змитого ґрунту для фракцій 1-0.5 мм і  $<0.1$  мм. При цьому найбільша кількість змитого ґрунту відповідає фракції 0.25-0.1 мм. Збільшення кількості опадів при

дощуванні веде до відриву більшої кількості часток ґрунту від ложа і виносу їх за межі схилу (рис. 9). Так, при дощуванні схилу, який мав ухил в  $15^\circ$ , 222 мм опадів лише 4.2% ґрунту від загальної маси була переміщена потоком води за межі схилу. При цьому дощування 360 мм і 492 мм опадів призвело до змивання 5.6 і 10.3% ґрунту від загальної маси відповідно. Кількість змитого ґрунту зі схилів з наявною підпірною стінкою була менше у порівнянні із схилами, де вона була відсутня.

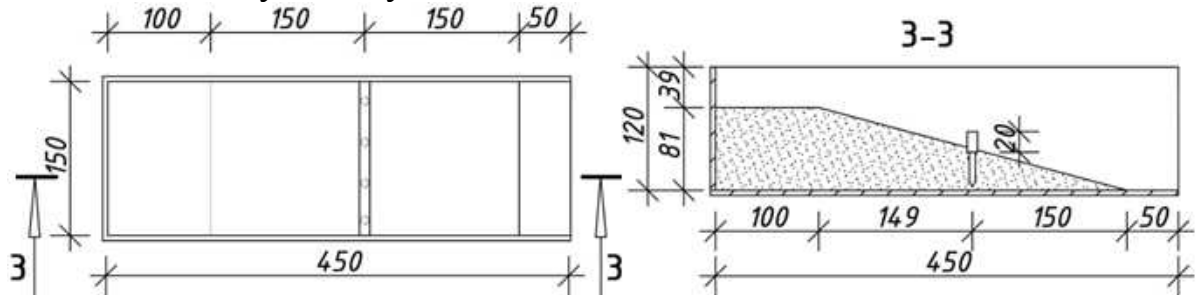


Рис. 7. Стенд для лабораторних випробувань

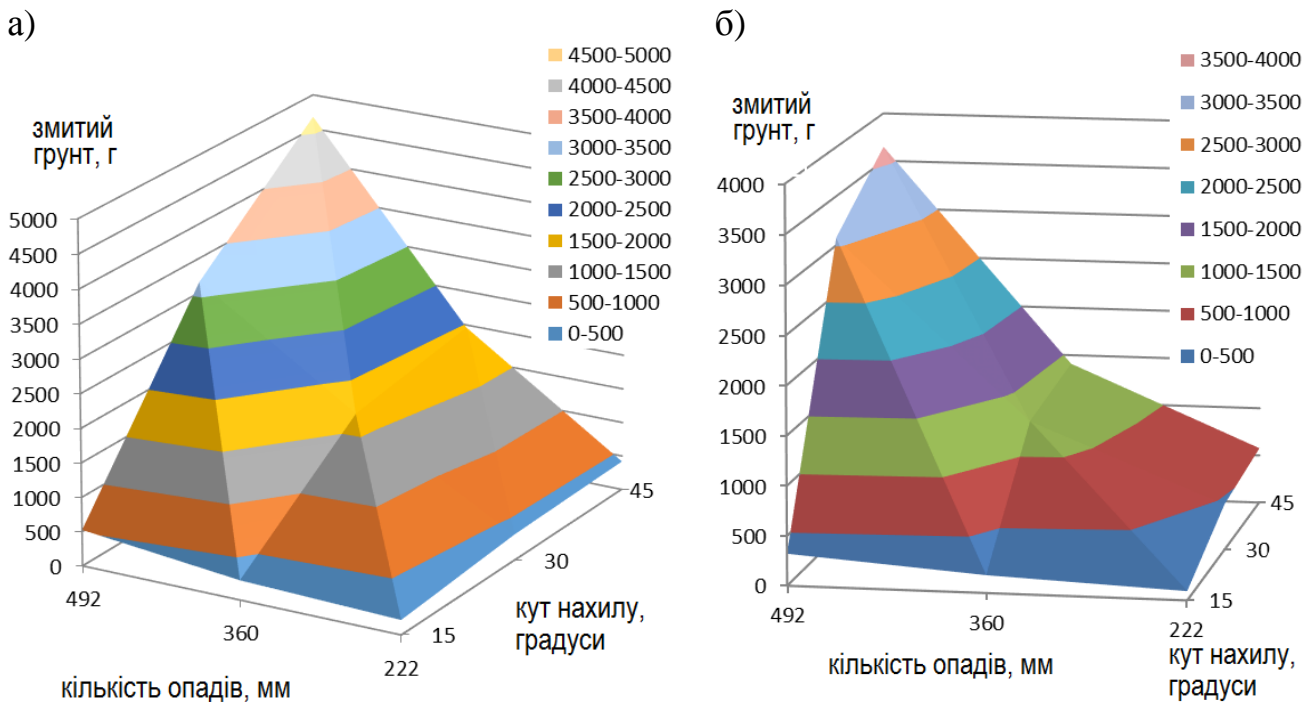


Рис. 8. Результати багатofакторного лабораторного експерименту: а – вільний схил, б – схил зі стінкою

Наприклад, дощування 365 мм опадів схилу, який мав ухил  $15^\circ$ , призвело до змиву 178.6 г ґрунту, що на 37.4% менше у порівнянні з такими ж дослідженнями без підпірної стінки. А дощування такою ж кількістю опадів схилу, який мав нахил в  $45^\circ$ , призвело до змиву 1408.4 г, що на 28.1% менше у порівнянні з аналогічними дослідженнями, але без підпірної стінки.

Складові розробленої комплексної моделі апробовані на модельних задачах шляхом порівняння з даними польових експериментів, проведених на стоковому майданчику в урочище "Гори" (спільно КНУБА і ІГН АН України). Експериментальний майданчик на стадії проведення робіт зі спостереження за



ерозійними процесами при штучному дощуванні мав площу 20x20 м. Ухил схилу  $6^\circ$ , має однорідний ґрунтовий покрив. Відмінність загального виносу твердого стоку між натурним експериментом та чисельним розрахунком склав 12.9%. Отримані епюри швидкостей потоку при різних значеннях глибини потоку  $h$  і висоти виступів шорсткуватості  $\Delta$  (рис. 10).

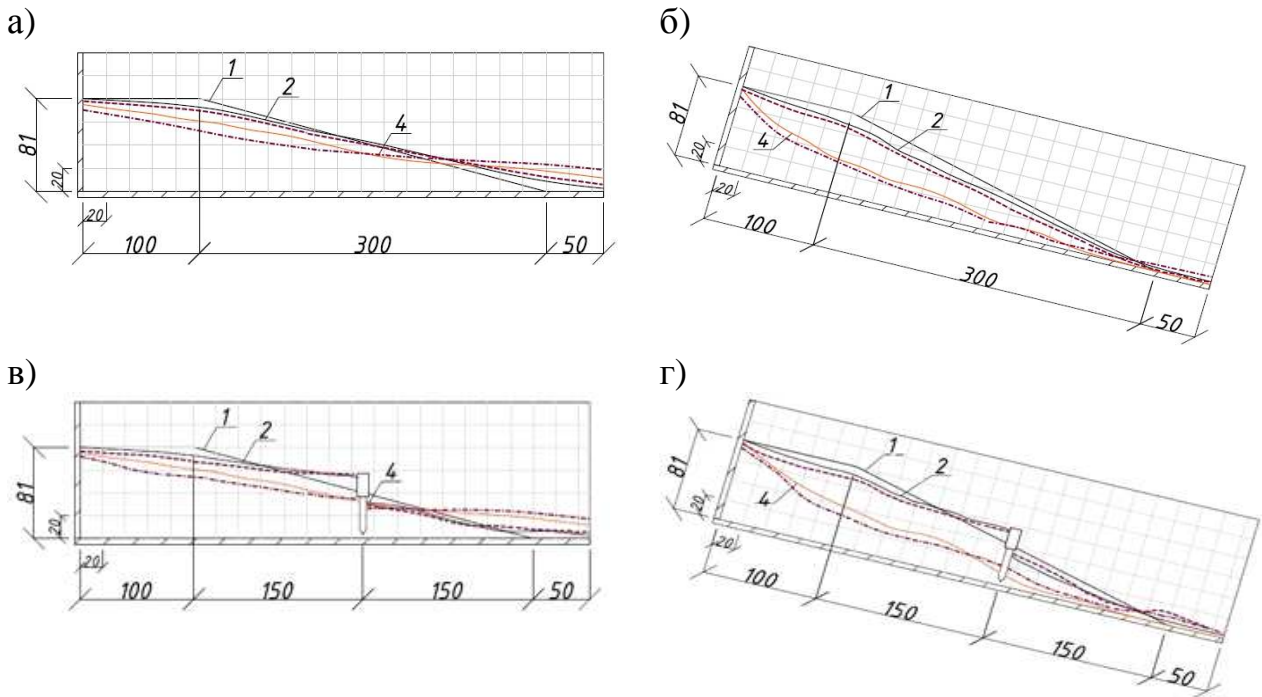


Рис. 9. Зміна топології схилу в залежності від кута нахилу та умов дощування: (а) – без підпірної стінки, кут нахилу  $15^\circ$ ; (б) – без підпірної стінки, кут нахилу  $30^\circ$ ; (в) – з підпірною стінкою кут нахилу  $15^\circ$ ; (г) - з підпірною стінкою кут нахилу  $30^\circ$ ; 1 – до дощування; 2 – кількість опадів 222 мм; 4 – кількість опадів 492 мм)

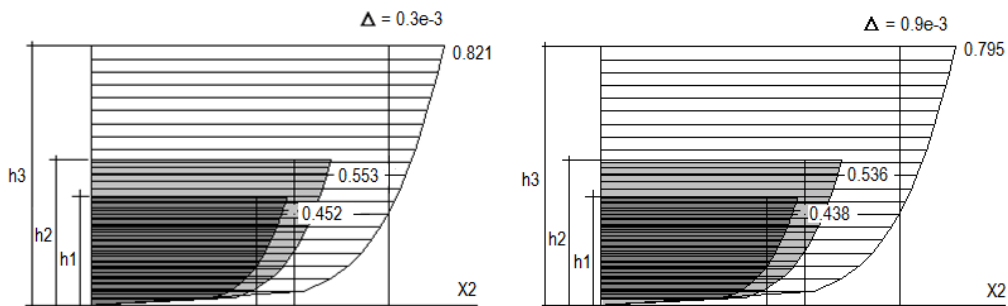


Рис. 10. Розподілення швидкості по глибині потоку (кут нахилу  $5^\circ$ , інтенсивність дощування  $0,0625$  мм/с,  $h_1=0,2$  мм,  $h_2=0,3$  мм,  $h_3=0,6$  мм)

Результати показують, що величина виступів шорсткуватості несуттєво впливає на величини і розподіл швидкості потоку, тоді як із збільшенням глибини потоку істотно зростають не тільки максимальні, але і придонні швидкості в межах потоку.

**П'ятий розділ** присвячено відображенню результатів натурних спостережень активності поверхневих і глибинних зсувних процесів на схилах експериментальних майданчиків по вул. Радченка в м. Києві та біля м. Ржищів Кагарлицького району. На зазначених ділянках проводилися візуально-інструментальні спостереження за зсувними процесами поверхневого характеру (схил по вул. Радченка), а також поверхневого і глибинного характеру (в районі м. Ржищів). Порівняння натурних спостережень з результатами чисельних розрахунків підтверджують ефективність розробленої методики. Розбіжність за результатами чисельних і експериментальних досліджень з різних кількісних показників не перевищує 6-19%.

У результаті спостережень за схилом по вул. Радченка (рис. 11) було встановлено, що за період з 2009 по 2011 рік найбільше зміщення мав 20 репер, який знаходився на відстані 7 м вище від підпірної стінки ПС2. Цей репер перемістився на 492 мм вниз по схилу і на 434 мм піднявся вгору. Цей факт пояснюється тим, що ґрунт при дії площинного змиву переміщався вниз по схилу, затримувався і накопичувався перед ПС2. Під час проведення досліджень на майданчику було встановлено ряд техногенних факторів, які привели до утворення поверхневого зсуву. Відсутність поверхневого водовідведення в межах між підпірними стінками ПС і ПС2, що призвело до різкого підйому рівня ґрунтових вод; планування поверхні схилу і майданчики під будівництво житлового масиву недоущільненими насипними ґрунтами та інші. Наслідком цих техногенних факторів став активний прояв площинного змиву ґрунту.

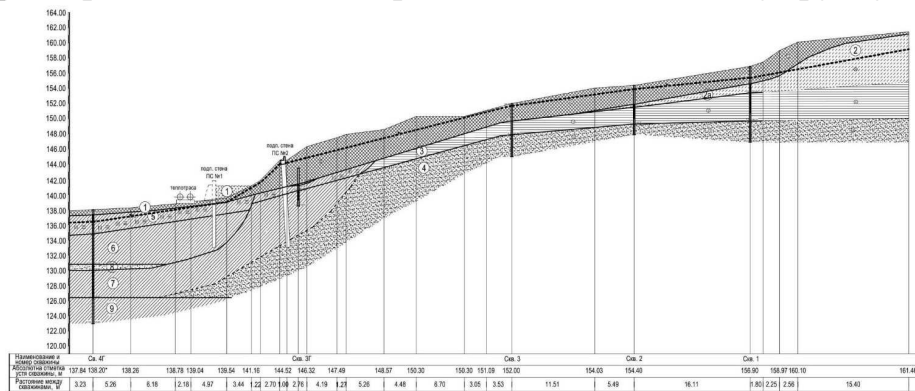


Рис. 11. Схил по вул. Радченка, профіль I-I

Чисельне моделювання стану схилу виконано за допомогою розробленого програмного комплексу SATER.SOIL на основі запропонованої комплексної моделі.

На першому етапі був розроблений розрахунковий профіль I-I, який характеризує інженерно-геологічні, гідрогеологічні та геоморфологічні особливості ділянки в межах прилеглої території на 2009 рік. Наступним етапом розрахунків було рішення комплексної задачі стійкості території з урахуванням процесів площинного змиву ґрунту. Розрахунки показали, що 2009-2010 роки характеризуються стійкою роботою підпірних стінок ПС1 і ПС2 (рис. 12), переміщення яких вздовж схилу практично відсутні (до 20 мм). Пунктирною лінією позначена конфігурація вільної поверхні схилу на 2009 рік,



суцільна - відповідає стану ділянки на кінець 2014 року. При цьому накопичення змитого ґрунту відбувається перед стінкою ПС2, що в кінцевому підсумку формує нову конфігурацію вільної поверхні схилу, поступово перерозподіляє систему сил і тим самим збільшує тиск на підпірні споруди. Після 2010 року спостерігається значна активізація зсувних процесів в основному за рахунок зростання рівня ґрунтових вод (рис. 13). Загальна кількість переміщеного ґрунту склала  $26 \text{ м}^3$  до 2011 року і остаточно на 2014 рік -  $48.4 \text{ м}^3$ . Зсувний тиск на стінку ПС2 при цьому підвищився більш ніж на 70%. Так, за розрахунковим показником він дорівнював  $9.04 \text{ т/м}$  і в процесі деформування схилу максимально досяг  $15.73 \text{ т/м}$ . За даними останнього кроку розрахунків на 2014 рік стіна ПС2 фактично зруйнована, голови паль відчувають значні горизонтальні зміщення (рис. 13), стіна ПС1 також знаходиться під впливом горизонтального тиску ґрунту. Її верхня частина має переміщення, які досягають майже  $16 \text{ см}$ .

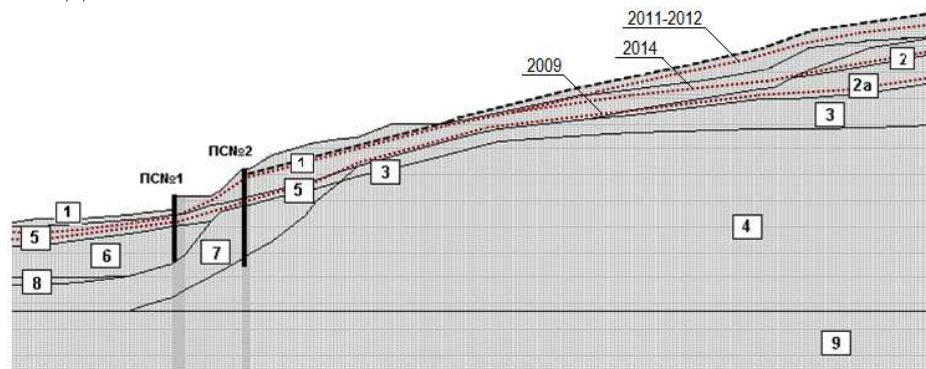


Рис. 12. Динаміка зміни конфігурації поверхні схилу та рівня ґрунтових вод

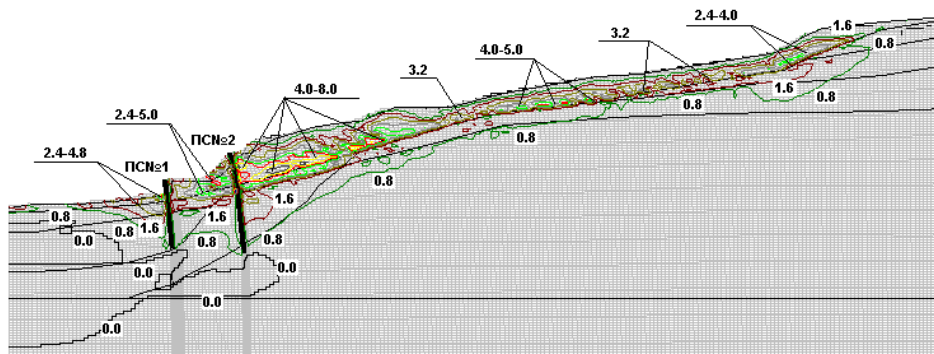


Рис. 13. Ізолнії інтенсивностей пластичних деформацій (%)

Особливості виникнення, закономірності активізації поверхневих і глибинних зсувних деформацій при техногенному впливі, а також чисельне моделювання поведінки схилу були проаналізовані на схилі в районі м. Ржищів (рис. 14). За час освоєння і будівництва в межах майданчика був допущений цілий ряд помилок, які стали техногенними причинами активізації зсувних деформацій. Це значно збільшило гідродинамічний тиск, призвело до підвищення рівня підземних вод (до  $1.0 \dots 1.5 \text{ м}$  від поверхні), зниження міцності ґрунтів в масиві і, як наслідок, зменшило рівновагу загальної системи зсувних та утримуючих

сил, які діють на схилі. Крім інженерно-геологічних, геодезичних спостережень радіохвильовими методами були проведені геофізичні дослідження ґрунтів. У період спостережень з 2008 по 2010 рр. було встановлено, що переміщення ґрунту значно збільшилися з самої верхньої точки схилу і далі вниз по всьому схилу, розміщеному нижче фундаменту будівлі, де горизонтальні переміщення досягали 5208 мм, а вертикальні 3342 мм.

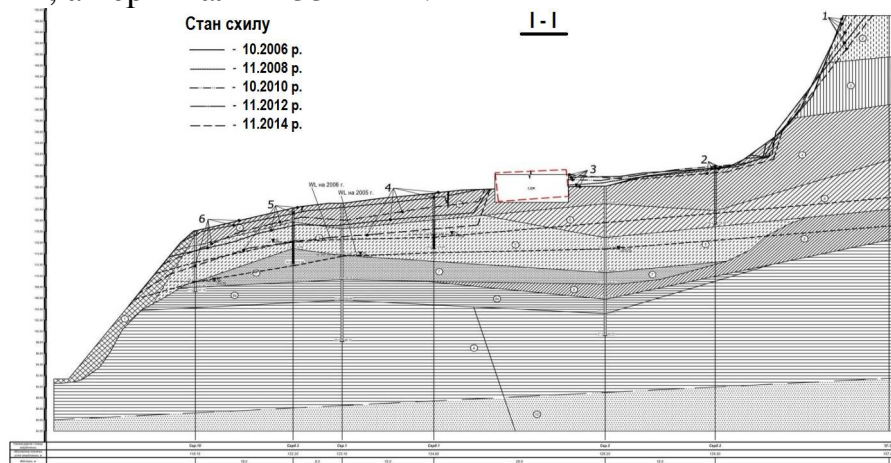


Рис. 14. Майданчик на схилі в м. Ржищів

При цьому безпосередньо перед будівлею спостерігався випирання ґрунту, який з кожним роком збільшувався. З 2010 р по 2014 р тенденція по переміщенню ґрунту уздовж схилу залишалася аналогічної попереднього періоду спостережень.

При чисельному розрахунку схил був представлений як скінченно-елементна дискретна модель із сіткою з 11 фрагментів, кожен з яких є окремим інженерно-геологічним елементом. На першому етапі вирішувалося завдання визначення НДС схилу від власної ваги ґрунту (базовий для подальших розрахунків). Видно, що пластичні деформації ґрунту зосереджені у верхній і середній частині схилу (рис. 15). Їх локалізація спостерігається тільки на покрівлі спондилової глини. Крім того, для водоносного горизонту, який розвантажується в р. Дніпро, глини є водотривким шаром. З'ясовано, що за цим розрахунковим профілем формується два зсуви - у верхній і нижній частинах, що характерно для правобережжя р. Дніпро. Про це свідчить і потенційна поверхня ковзання А-А, яка проходить через весь схил і об'єднує два зсуви, утворюючи одну потужну зсувну систему, яку можна розглядатись як зсув-потік фронтального виду. Розрахунковий коефіцієнт запасу  $K_{st}$  для цього зсуву при природної вологості становить 1,27. Таким чином, ще до початку активного освоєння та техногенного завантаження схил знаходився практично в стадії граничної рівноваги. Розрахунки показали, що при подальшому водонасиченні ґрунтів утворюються зони додаткових пластичних деформацій біля будинку №1 в нижній, середній і верхній частинах схилу. Ці зони практично збігаються з місцями фіксації утворених тріщин-заколов. При цьому горизонтальні переміщення будинку складають 70 мм, а його осідання досягає 140мм, що спонукало формування тріщини в несучих конструкціях

будівлі, що підтверджується даними обстеження. У таких ґрунтових умовах, враховуючи появу активних зсувних деформацій, інженерний захист території можна здійснити використовуючи тільки радикальні заходи, які будуть носити комплексний характер.

Чисельні розрахунки різних варіантів інженерного захисту даної території по профілю І-І показало, що найбільш надійною утримуючою спорудою буде влаштування дворядної системи підпірних стін ПС1 і ПС2 з додатковою підпірною стінкою у вигляді П-подібної рами (рис.16).

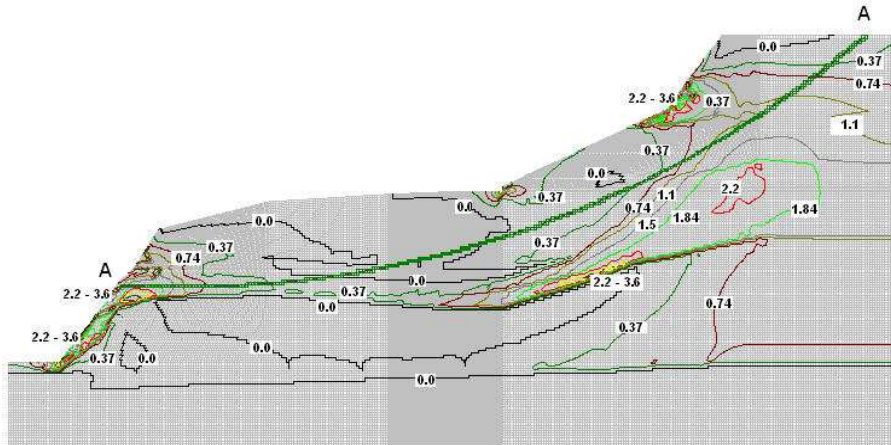


Рис. 15. Поверхня зсуву А–А, ізолінії інтенсивностей пластичних деформацій (%)

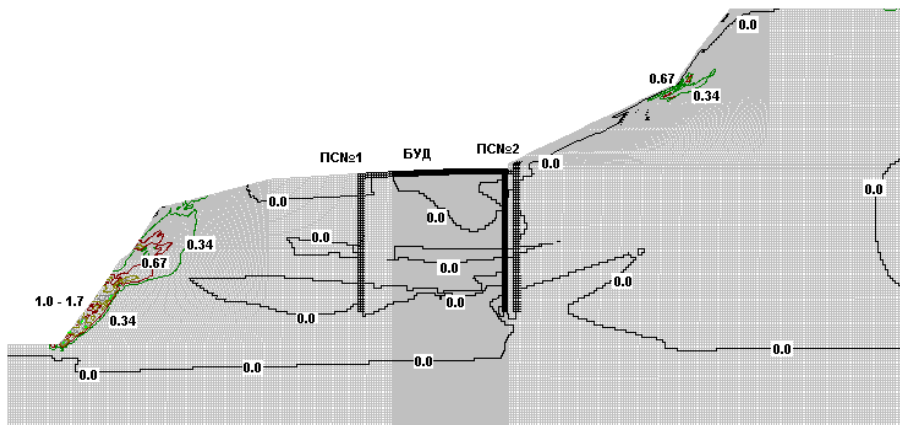


Рис. 16. Ізолінії інтенсивностей додаткових пластичних деформацій (%) при водонасиченні ґрунтів та урахуванні блоку захисних споруд ПС1, ПС2

Ця постановка враховувала НДС схилу від власної ваги і навантаження від будинку, водонасичення і спільну дію захисних споруд ПС1 і ПС2. Максимальні горизонтальні переміщення будинку і утримуючих споруд склали 10.2 мм.

## ВИСНОВКИ

1. Розглянуто вплив ряду техногенних факторів на формування і активізацію зсувних процесів. Доведено, що вивчення формування напружено-деформованого стану схилів з урахуванням статичного навантаження, площинного змиву, фільтрації, які обумовлені техногенними причинами, дає

можливість прогнозувати зміну стану схилів на всіх етапах навантаження і як, наслідок, більш раціонально використовувати методи інженерного захисту територій.

2. Запропоновано комплексну модель стійкості зсувонебезпечних територій, що включає три взаємопов'язані процеси: нелінійна деформація ґрунтового середовища, площинного змиву ґрунту і нестационарної фільтрації, які дозволили значно розширити сферу застосування математичного моделювання для даного класу геотехнічних задач.

3. Розроблено методику чисельного моделювання напружено-деформованого стану стійкості зсувонебезпечних і зсувних територій з урахуванням фільтрації та площинного змиву.

4. Розроблено проблемно-орієнтовані скінченні елементи і отримані дозвільні співвідношення метода скінченних елементів для чисельної реалізації комплексної моделі, застосування якої дозволить на взаємопов'язаних дискретних моделях суцільного середовища (реалізація єдиної топологічної структури звичайно-елементної сіткової дискретизації) виконувати дослідження процесів деформування, фільтрації і площинного змиву ґрунту з урахуванням взаємовпливу різних природних і техногенних факторів.

5. Отримано співвідношення МСЕ, що дозволять в рамках комплексної моделі визначати розподіл тисків в ґрунті під дією власної ваги і різних техногенних впливів з урахуванням неоднорідності ґрунтового середовища, зміни рельєфу і фізико-механічних характеристик в процесі деформування.

6. Запропоновано методику лабораторних випробувань площинного змиву ґрунту. В рамках багатофакторного експерименту встановлено функціональні залежності між різними показниками ерозійного процесу на схилі.

7. Показано, що розбіжність за результатами чисельних і експериментальних досліджень з різних кількісних показників комплексної моделі стійкості зсувонебезпечних територій не перевищує 6-19 %.

8. Визначено положення депресійної кривої і відповідний розподіл напорів для подальшого обчислення повної системи гідродинамічних сил, що діють на зсувній схил. Встановлено, що внесок гідродинамічної складової в загальну систему сил діючих на схилі може перебувати в межах 25...30%.

9. Розроблено алгоритми послідовних переходів, в рамках комплексної моделі, від однієї задачі до іншої шляхом постановки початкових і граничних умов, оцінки зміни напружено-деформованого стану і відповідної корекції границь залягання ґрунтових основ, а також обчислення додаткової системи гідродинамічних сил.

10. Отримано комплексну модель стійкості території реалізована у вигляді пакету прикладних програм SATER.SOIL, орієнтованого на використання персональних ЕОМ.

11. Проаналізовано, на підставі запропонованої моделі напружено-деформований стан схилів, дано прогноз поведінки системи "основа-схил-споруда" в залежності від техногенних факторів на декількох

експериментальних майданчиках, що дозволило визначити стан схилу і утримуючих споруд, оцінити ефективність заходів щодо інженерного захисту таких територій.

### **ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ДИСЕРТАЦІЇ ВИКЛАДЕНО У ПРАЦЯХ:**

1. Петренко Е. Ю. Вплив гідродинамічної сили на стійкість зсувонебезпечного схилу [Текст]/ Петренко Е.Ю., Солодей І.І., Гараханлу М. Махді // Основи і фундаменти. – Вип. 31. – К.: Міжвідомчий наук.-техн. збірник КНУБА, 2007/2008. – С. 80-87.

2. Петренко Е. Ю. Інженерний захист території при забудові зсувонебезпечного схилу [Текст]/ Петренко Е.Ю., Солодей І.І., Гараханлу М. Махді // Будівельні конструкції.– Вип. 71, Книга 2. – К.:Міжвідомчий наук.-техн. збірник «Механіка ґрунтів фундаментобудування», НДІБК, 2008. – С. 242-249.

3. Петренко Е. Ю. Техногенні причини формування зсувних деформацій [Текст] / Петренко Е. Ю., Солодей І.І., Гараханлу М. Махді // Основи і фундаменти. – Вип. 32. – К.: Міжвідомчий наук.-техн. збірник КНУБА, 2011. – С. 186-197.

4. Петренко Е. Ю. Зміна напружено-деформованого стану схилу в умовах забудови [Текст] / Петренко Е.Ю., Солодей І.І., Гараханлу М. Махді // Основи і фундаменти. – Вип. 33. – К.: Міжвідомчий наук.-техн. збірник КНУБА, 2012/2013. – С. 96-106.

5. Петренко Е. Ю. Математична модель ерозії ґрунтів в зоні глобальної техногенної дії [Текст] / Петренко Е.Ю., Солодей І.І., Гараханлу М. Махді // Основи і фундаменти – Вип. 35. – К.: Міжвідомчий наук.-техн. збірник КНУБА, 2014. – С. 125-139.

6. Petrenko E. Y. Analysis of slope at increase of the static load / E. Y. Petrenko, M. M. Garahanly // News of Azerbaijan high technical educational institutions. – 2015. – №. 6. – P. 37-41. (*іноземне періодичне видання, Азербайджан*)

7. Гараханлу М. Махді. Экспериментальное изучение эрозионного смыва грунта в лабораторных условиях [Текст] / Махді М. Гараханлу // Основи і фундаменти. – Вип. 36. – К.: Міжвідомчий наук.-техн. збірник КНУБА, 2015. – С. 131-138.

8. Петренко Е. Ю. Дослідження активізації деформацій основи на зсувонебезпечних схилах при техногенній дії [Текст] / Петренко Е.Ю., Гараханлу М. Махді // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – № 3/7 (75). – Харьков: Технологический центр, 2015. – С. 14-22. (*входить до наукометричних баз: Ulrich's Periodicals Directory, Index Copernicus, WorldCat та ін.*)

9. Гараханлу М. Махді. Напружено-деформований стан схилу при техногенному навантаженні / Гараханлу М. Махді // Основи і фундаменти: матеріали наукової конференції молодих вчених, аспірантів і студентів. Київ, 6-9



листопада 2007 р.– К.: КНУБА, 2007. – С. 57.

10. Гараханлу М. Махді. Інженерний захист території при забудові зсувонебезпечного схилу / Гараханлу М. Махді // Основи і фундаменти: матеріали наукової конференції молодих вчених, аспірантів і студентів. Київ, 4-6 листопада 2008 р. – К.: КНУБА, 2008. – С. 69.

11. Гараханлу М. Махді. Вплив будівництва на зсувонебезпечних територіях на формування глибинних зсувів / Гараханлу М. Махді // Основи і фундаменти: матеріали наукової конференції молодих вчених, аспірантів і студентів. Київ, 1-3 листопада 2011 р.– К.: КНУБА, 2011. – Ч. 1, С. 68.

## АНОТАЦІЯ

Гараханлу Мохаммад Махді. Вплив техногенних факторів на активність поверхневих та глибинних зсувних процесів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.02 – основи і фундаменти. – Київський національний університет будівництва і архітектури Міністерства освіти і науки України, Київ, 2016.

Запропоновано комплексну модель водної ерозії ґрунтів для чисельного моделювання, яка включає три взаємопов'язані складові: нелінійну деформацію ґрунтового середовища, площинний змив ґрунту та нестационарну фільтрацію. Це дозволяє значно розширити область застосування математичного моделювання в геотехнічних задачах. Розроблені проблемно-орієнтовані скінченні елементи для комплексного аналізу стійкості територій під дією техногенних факторів. На цій основі вперше побудовані розрахункові співвідношення методу скінченних елементів для комплексної моделі стійкості зсувонебезпечних територій. Розроблена методика лабораторних випробувань площинного змиву ґрунту. В рамках багатофакторного експерименту встановлені принципи дії окремих найбільш значимих факторів на площинний змив ґрунтів схилів. Розроблено алгоритми послідовних переходів від однієї задачі до іншої шляхом постановки початкових і граничних умов, оцінки змін і відповідної корекції границь залягання ґрунтових основ, а також обчислення додаткової системи гідродинамічних сил. Здійснено програмну реалізація і апробація на тестових прикладах. Отримані нові розв'язки прикладних задач. Проаналізовано напружено-деформований стан схилу, гідрогеологічні умови, дана оцінка внеску гідродинамічних сил у загальну систему сил, що діють на схилі, спрогнозовано поведінку системи “основа-схил-споруда” на декількох експериментальних майданчиках, що в комплексі дозволило запропонувати ряд ефективних заходів щодо інженерного захисту цих територій.

Ключові слова: комплексна модель, техногенний фактор, зсув, площинний змив ґрунту, нестационарна фільтрація, пружно-пластичність ґрунта, напружено-деформований стан, гідродинамічна сила, метод скінченних елементів, лабораторні випробування.

## АННОТАЦИЯ

Гараханлу Мохаммад Махди. Влияние техногенных факторов на активность поверхностных и глубинных оползневых процессов. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.02 – основы и фундаменты. – Киевский национальный университет строительства и архитектуры Министерства образования и науки Украины, Киев, 2016.

Предложена комплексная модель плоскостного смыва грунтов для численного моделирования, которая включает три взаимосвязанных составляющих: нелинейную деформацию грунтовой среды, плоскостной смыв грунта и нестационарную фильтрацию. Это позволяет значительно расширить область применения математического моделирования в геотехнических задачах. Разработаны проблемно-ориентированные конечные элементы для комплексного анализа устойчивости территорий под действием техногенных факторов. На этой основе впервые построены разрешающие соотношения метода конечных элементов для обобщенной модели плоскостного смыва грунтов. Концепция модели плоскостного смыва строится на основе сочетания взаимодействия физических и феноменологических аспектов водопрочности и смываемости грунтов. Разработана методика лабораторных испытаний плоскостного смыва грунта, включая фильтрацию. Результатом решения нестационарной задачи фильтрации является определение положения депрессионной кривой и соответствующее распределение напоров для вычисления полной системы гидродинамических сил, действующих на склоне. В рамках МКЭ разработана библиотека эффективных проблемно-ориентированных КЭ, на основе которых впервые построены разрешающие соотношения МКЭ для комплексной модели устойчивости территорий. При этом все решения задач проводятся на базе единой топологической структуры конечно-элементной сеточной дискретизации. В результате многофакторного эксперимента установлены принципы действия отдельных наиболее значимых факторов на плоскостной смыв грунтов склонов. Разработаны алгоритмы последовательных переходов от одной задачи к другой путем постановки начальных и граничных условий, оценки изменений и соответствующей коррекции границ залегания грунтовых оснований, а также вычисления дополнительной системы гидродинамических сил. Осуществлена программная реализация и апробация на тестовых примерах. В диссертации приведены результаты полевых экспериментальных исследований. Наряду с геодезическими радиоволновыми методами использовались геофизические исследования. Дифференциация состояния грунтов проводилась по уровню напряжений вертикальной составляющей вторичного магнитного поля. Получены новые решения прикладных задач. Проанализировано напряженно-деформированное состояние склона, гидрогеологические условия, дан прогноз поведения системы “основание-склон-сооружение” на нескольких

экспериментальных площадках, что позволило предложить ряд эффективных мероприятий по инженерной защите этих территорий.

Ключевые слова: комплексная модель, техногенный фактор, смещение, плоскостной смыв почвы, нестационарная фильтрация, упруго-пластичность грунта, напряженно-деформированное состояние, гидродинамическая сила, метод конечных элементов, лабораторные испытания.

## ANNOTATION

Gharakhanlou Mohammad Mahdi. Impact of anthropogenic factors on the surface and underground land sliding activity - On rights for a manuscript.

Dissertation on the receipt of scientific degree of PhD (Engineering) of science, specialty 05.23.02 - bases and foundations. - Kyiv National University of Construction and Architecture, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2016.

Suggested an integrated model of water erosion for numerical simulation, which includes three interrelated components: a non-linear deformation of the soil environment, planar ground ablation and nonsteady filtration.

This allows significantly extend the range of applications of mathematical modeling in geotechnical problems. Developed problem-oriented finite elements for a comprehensive stability analysis of the territories under the influence of technogenic factors.

Based on this, the designed ratio of finite element method for an integrated stability model of landslide-prone areas was built for the first time. There was developed a method of laboratory testing for planar soil ablation. As a part of a multifactorial experiment principles of selected highly significant factors in the planar slope soil ablation were established.

There were developed algorithms of successive transitions from one task to another by setting initial and boundary conditions, estimating changes and corresponding correction of ground bases' bedding boundaries and computing an additional system of hydrodynamic forces. There was also executed program implementation and testing on examples.

There were obtained new solutions of applied problems, analyzed stress-strain state of the slope, hydrogeological conditions, given estimation of the hydrodynamic forces' contribution to the general system of forces acting on a slope, predicted behavior of the "foundation-slope-construction" system at the example of several experimental sites. All the above listed in complex allowed providing a series of effective activities on the engineering protection of territories.

Keywords: complex model, technogenic factor, shift planar ground ablation, nonsteady filtration, elastic-plasticity of soil, stress-strain state, hydrodynamic force, finite element method, laboratory testing.