

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД  
«ПРИДНІПРОВСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ БУДІВНИЦТВА ТА  
АРХІТЕКТУРИ»



**САВЕНКО ВОЛОДИМИР ОЛЕГОВИЧ**

УДК 624.137.5:624.131.543

**РОБОТА КОНСТРУКЦІЙ ПІДПІРНОЇ СТІНИ ЗІ СТРУКТУРНОЮ  
ПОВЕРХНЕЮ НА ОСНОВІ, ЩО НЕРІВНОМІРНО ДЕФОРМУЄТЬСЯ**

05.23.02 – основи і фундаменти

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Дніпро – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Криворізькому національному університеті Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Тімченко Радомир Олексійович**,  
Криворізький національний університет,  
професор кафедри промислового, цивільного і міського  
будівництва.

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор **Шаповал Володимир Григорович**,  
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», професор  
кафедри будівництва, геотехніки та геомеханіки;

кандидат технічних наук, доцент **Харченко Максим Олександрович**,  
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»,  
завідувач кафедри буріння і геології.

Захист відбудеться 29 вересня 2021 р. о 11<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої  
вченої ради Д 08.085.01 при Державному вищому навчальному закладі  
«Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» за адресою:  
49600, м. Дніпро, вул. Чернишевського, 24а, ауд. 202.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Державного вищого  
навчального закладу «Придніпровська державна академія будівництва та  
архітектури» (м. Дніпро, вул. Чернишевського, 24а) та на сайті:  
<https://pgasa.dp.ua/dissertation/>.

Автореферат розісланий 27 серпня 2021 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Т. С. Кравчуновська

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** У зв'язку зі значним зростанням капіталовкладень у будівельну галузь і, відповідно, обсягів виробництва в умовах дефіциту міських територій, особливо в останні десятиліття розвитку економіки України, різко збільшилося використання ділянок зі складним рельєфом і гідрогеологічною ситуацією. Проектування в таких умовах вимагає від інженера комплексного підходу для розв'язання завдань надійної експлуатації будівель і споруд та збереження довкілля, а будівництво на непридатних територіях пов'язане з розв'язанням соціальних, економічних і екологічних питань.

Підпірні стіни – один із найпоширеніших видів інженерних споруд, які знайшли застосування в промисловому, цивільному, міському, автодорожньому та залізничному будівництві. До облаштування підпірних стін висувається низка вимог, більшість із яких засновані на вивченні інженерно-геологічних умов території, яка потребує захисту.

На підроблюваних територіях і ґрунтах, що просідають, при складних деформаціях основи не завжди можна використовувати відомі технічні рішення, оскільки вони непридатні до цих умов роботи. Сучасні конструкції підпірних стін не розраховані на додаткові зусилля від горизонтального зсуву або вертикального переміщення ґрунту, що викликає концентрацію напружень у нижній частині лицьової плити і звичайно призводить до руйнування конструкції. Викладене вище є актуальним науково-прикладним завданням, спрямованим на вивчення сумісної роботи підпірних стін із основою, що нерівномірно деформується, і вдосконалення конструкцій підпірних стін такого типу.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Наукові дослідження, викладені в дисертації, виконані згідно з напрямом наукової діяльності кафедри промислового, цивільного і міського будівництва Криворізького національного університету та відповідно до програми науково-дослідної роботи «Дослідження, розрахунок і проектування будівель і споруд у складних інженерно-геологічних умовах, зокрема з реалізацією числових методів; інженерна підготовка та проектування урбанізованих та порушених територій» (№ держреєстрації 0117U001842, 2017-2019 рр., рівень участі здобувача – відповідальний виконавець).

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розроблення наукових положень та практичних рекомендацій щодо розрахунку підпірних стін зі структурною поверхнею (ПССП), які взаємодіють з основою, що нерівномірно деформується.

Для досягнення цієї мети поставлено такі завдання:

- проаналізувати конструктивні рішення підпірних стін та умови їх експлуатації з урахуванням зарубіжного досвіду (Єврокод 7: Геотехнічне проектування);
- розробити нове конструктивне рішення підпірної стіни, яке відповідає умовам роботи на підроблюваних територіях;
- визначити оптимальні параметри конструктивного рішення підпірної стіни зі структурною поверхнею з використанням теорії планування

експерименту;

- розробити методику проведення експериментальних досліджень у лабораторних умовах;
- провести експериментальні дослідження взаємодії підпірної стіни зі структурною поверхнею з деформованою основою;
- виконати математичне моделювання контактної взаємодії підпірної стіни зі структурною поверхнею з основою, що нерівномірно деформується;
- провести порівняння результатів математичного моделювання підпірних стін зі структурною поверхнею з даними експериментальних досліджень;
- розробити методику проєктування підпірних стін зі структурною поверхнею при нерівномірних деформаціях основи.

**Об'єкт дослідження** – процес взаємодії підпірних стін зі структурною поверхнею з основою, що нерівномірно деформується.

**Предмет дослідження** – напружено-деформований стан основи, що нерівномірно деформується, та конструкцій підпірних стін зі структурною поверхнею.

**Методи дослідження:**

- аналіз, синтез та порівняння сучасних технічних рішень підпірних стін;
- пошукова оптимізація, необхідна для планування експерименту та оброблення його результатів, що включає дисперсійний та кореляційно-регресійний аналіз;
- фізичного моделювання підпірних стін, виготовлених методом 3D друкування, з деформованою основою для визначення характеру контактної взаємодії;
- експериментальні дослідження підпірних стін зі структурною поверхнею в лабораторних умовах;
- статистичні методи – для математичного моделювання впливу різних чинників на роботу підпірної стіни зі структурною поверхнею з основою, що нерівномірно деформується;
- метод скінченних елементів – для моделювання контактної взаємодії підпірних стін зі структурною поверхнею з основою, що нерівномірно деформується;
- аналітичні методи – для порівняння результатів експериментальних досліджень із даними результатів розрахунків програмних комплексів і нормативних документів.

**Наукова новизна отриманих результатів:**

- уперше експериментально отримано залежність несучої здатності основи від параметрів структурної поверхні стіни при дії постійного навантаження, пов'язаного з формуванням «арочного» ефекту;
- уточнено напружено-деформований стан ґрунту, що впливає на формування контактної поверхні підпірних стін зі структурною поверхнею;
- розширено класифікацію сучасних типів підпірних стін за рахунок нового конструктивного рішення підпірних стін зі структурною поверхнею;

- дістала подальшого розвитку теорія формування граничного напружено-деформованого стану ґрунту основи та засипки при контактній взаємодії з підпірною стіною зі структурною поверхнею;

- дістало подальшого розвитку моделювання нерівномірного деформування ґрунтового середовища залежно від структурної поверхні підпірної стіни, що полягає у виникненні «арочного» ефекту.

**Практичне значення отриманих результатів:**

- використання Товариством з обмеженою відповідальністю «Будконструкція» запропонованих конструктивних рішень підпірних стін зі структурною поверхнею дозволило збільшити їх термін експлуатації у складних інженерно-геологічних умовах;

- застосовані Криворізькою філією Державного підприємства Дніпропетровський державний проектний інститут житлового і цивільного будівництва «Дніпроцивільпроект» при проектуванні підпірних стін на ділянках траси швидкісного трамваю;

- розроблено методичні рекомендації з проектування підпірних стін зі структурною поверхнею на територіях із складними інженерно-геологічними умовами.

**Особистий внесок здобувача** у наукових працях, опублікованих у співавторстві, полягає в:

- визначенні мети та завдання дослідження, здійсненні пошуку їх рішень [1, 2, 5, 6, 8, 9];

- розробленні нових конструктивних рішень підпірних стін для експлуатації в особливих умовах [2, 5, 11, 12, 13, 14, 15];

- виконанні експериментально-теоретичних досліджень напружено-деформованого стану основи і підпірних стін зі структурною поверхнею при їх контактній взаємодії [5, 6, 14];

- розробленні положень методики розрахунку підпірних стін з певними геометричними параметрами [7, 15];

- математичному моделюванні та аналізі його результатів [3, 4, 7, 10];

- удосконаленні методики розрахунку конструкцій підпірних стін [7, 15].

**Апробація матеріалів дисертації.** Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися й отримали позитивні оцінки на науково-технічних конференціях: Всеукраїнських науково-технічних конференціях з питань механіки ґрунтів, геотехніки, фундаментобудування (м. Полтава, 2016-2019 рр.), науково-практичній конференції «Розвиток національної економіки: теорія і практика» (м. Івано-Франківськ, 2015 р.), на Міжнародних науково-технічних конференціях «Розвиток промисловості та суспільства» (м. Кривий Ріг, 2016-2019 рр.), Міжнародних науково-практичних конференціях «Комп'ютерні системи та інформаційні технології в освіті, науці та управлінні» (м. Дніпро, 2016-2019 рр.), Міжнародній конференції з питань сталого майбутнього: екологічні, технологічні, соціальні та економічні питання (м. Кривий Ріг, 2020 р.).

**Публікації.** Основні положення, результати та висновки дисертаційної

роботи відображено у 15 публікаціях, у тому числі 9 статтях, з яких 7 – у наукових фахових виданнях України, в тому числі 3 – у виданнях, включених до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus, 1 – у виданні, включеному до міжнародної наукометричної бази Scopus, 3 тезах доповідей та 3 патентах України на корисну модель.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел зі 135 найменувань та 2 додатків. Загальний обсяг дисертації – 179 сторінок, у тому числі обсяг основного тексту – 5,375 авт. арк. Дисертація містить 43 рисунки, 19 таблиць та 2 додатки на 6 сторінках.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми роботи, сформульовано мету та завдання дослідження, визначено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, зазначено особистий внесок здобувача в наукових працях, опублікованих у співавторстві, наведено відомості про апробацію результатів, структуру та обсяг дисертації.

В **першому розділі** проаналізовано теоретичні дослідження за темою дисертації й розглянуто роботи та публікації авторів, які зробили істотний внесок у розроблення, вдосконалення конструкцій підпірних стін і методи їх розрахунку: І. П. Бойка, А. Я. Будіна, Б. Ф. Горюнова, В. Б. Гуревича, М. П. Дубровського, В. С. Зеленського, М. Л. Зоценка, Ю. О. Кірічека, В. Д. Костюкова, О. О. Петракова, М. Б. Пойзнера, В. Г. Таранова, Р. О. Тімченка, В. Г. Шаповала, В. Б. Швеця, П. І. Яковлева та інших.

Установлено, що за конструктивним рішенням підпірні стіни поділяються на масивні й тонкостінні. Зазвичай, масивні підпірні стіни більш матеріаломісткі та більш трудомісткі при спорудженні, ніж тонкостінні, і можуть застосовуватися при відповідному техніко-економічному обґрунтуванні (наприклад, при спорудженні їх із місцевих матеріалів, через відсутність збірного залізобетону тощо), тому в роботі було досліджено тонкостінні підпірні стіни кутникового типу.

Вивчалася робота підпірних стін у різних ґрунтових умовах і режимах роботи – силового завантаження й деформаційних впливів основи. Виявлено, що для складного навантаження немає розв'язку контактної задачі з урахуванням зниження міцнісних і деформаційних характеристик основи. Наявні методи розрахунку не дозволяють повністю використовувати потенціал підпірних стін, що мають конструктивні особливості.

Досліджувався характер напружено-деформованого стану основи й підпірних стін, геометричні параметри конструкцій, міцності та деформативні характеристики матеріалів, що впливають на контактну взаємодію.

При проведенні порівняльного аналізу сучасних норм проектування ДСТУ-Н Б В.2.1-31:2014 «Настанова з проектування підпірних стін» та EN 1997-1-2014 Єврокоду 7: Геотехнічне проектування виявлено, що вітчизняні норми не враховують підходи за граничним експлуатаційним станом.

На підставі проведеного аналізу конструктивного рішення підпірних стін і умов їх експлуатації встановлено, що при складних інженерно-геологічних умовах при нерівномірній деформації основи наявні типи підпірних стін не розраховані на додаткові зусилля, що виникають від горизонтальних і вертикальних переміщень ґрунту. Попит на конструкції для складних інженерно-геологічних умов вимагає нових конструктивних рішень для тривалої експлуатації.

У **другому розділі** запропоновано нове конструктивне рішення підпірної стіни зі структурною поверхнею та отримано патент на корисну модель.

Підпірна стіна зі структурною поверхнею може бути використана для стабілізації нестійких схилів і укосів, а також на підроблюваних територіях із горизонтальним і вертикальним переміщенням ґрунту.

Монолітну підпірну стіну кутникового типу виконано з опорними частинами й порожнинами у вигляді зрізаних пірамід однакового розміру й спрямованими меншою основою всередину вертикального й фундаментного елементів за рахунок установа двох листів пружно-піддатливого матеріалу, що дозволить запобігти передчасному заповненню порожнин і призведе до рівномірного ущільнення ґрунту (рис. 1).

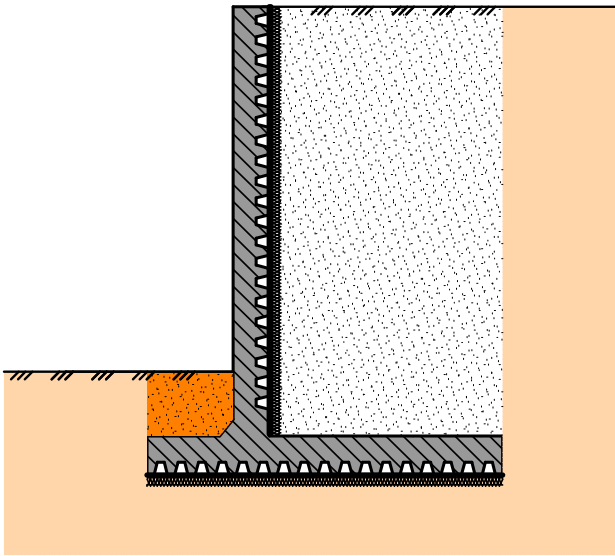


Рисунок 1 – Підпірна стіна зі структурною поверхнею

Експериментальні дослідження показали, що напружено-деформований стан основи під підпірною стіною зі структурною поверхнею багато в чому визначають характеристики самої конструкції. У зв'язку з цим виникла необхідність у розробленні методики оцінювання впливу вказаних характеристик залежно від ґрунтових умов і параметрів конструкції. Для реалізації цього завдання було використано методи планування експерименту, метою яких є вибір числа й умов проведення дослідів, необхідних і достатніх для вирішення поставленого завдання з необхідною точністю. Оскільки мета й предмет

дослідження вважалися визначеними – напружено-деформований стан основи під ПССП, було розглянуто чинники, що впливають на нього, із суворим дотриманням вимог, які висуваються до них та їх сукупності. Для вибору експериментальної області чинникового простору (планування експерименту) було проведено ретельний аналіз апріорної інформації.

У результаті було виділено п'ять чинників: розрахунковий опір ґрунту основи, вид ґрунту (у вигляді питомого зчеплення), контактна площа опорних призматичних ділянок, об'єм порожнин, кут різання.

Після визначення чинників, що впливають на напружено-деформований

стан основи під ПССП, здійснювався вибір умов проведення дослідів, який включає: вибір області визначення чинників, основний рівень чинників, інтервали варіації. Залежність між найбільш значущими чинниками,

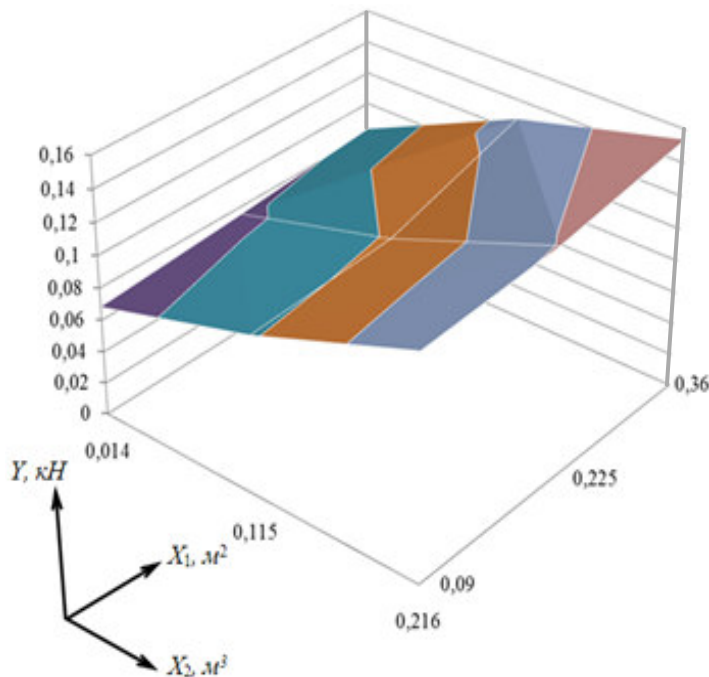


Рисунок 2 – Поверхня залежності найбільш значимих чинників

на основі проведених досліджень і отримано залежність напружено-деформованого стану основи від розглянутих факторів. Отже, модель багатовимірної лінійної регресії має вигляд:

$$\bar{Y}_x = 0,0004 + 0,14 x_1 + 0,13 x_2 + 0,0005 x_3 - 0,04 x_4 + 0,001 x_5, \quad (1)$$

де  $x_1$  – контактна площа опорних призматичних ділянок,  $m^2$ ;

$x_2$  – об'єм порожнин,  $m^3$ ;

$x_3$  – кут різання, град.;

$x_4$  – вид ґрунту (у вигляді питомого зчеплення  $s$ , кПа);

$x_5$  – розрахунковий опір ґрунту, МПа.

Після завершення дослідів було виконано кореляційний і регресійний аналізи багатовимірної вибірки, у яких замість відгуку має бути його середнє значення, отримано модель регресії і зроблено оцінку її якості, тобто встановлено статистичну значущість моделі регресії.

Аналіз якості отриманої моделі регресії:

–  $R^2 = 0,933$ , отже, 93,3 % дисперсії значень напружено-деформованого стану основи під ПССП пояснюється впливом чинників (контактною площею опорних призматичних ділянок, питомим зчепленням);

– розрахункове значення критерію Фішера  $F = 940$ ;

– критичне значення критерію Фішера при  $m_1 = 6$ ;  $m_2 = 1$ ;  $\alpha = 0,05$ :  $F_{кр} = 3,46$ . Отже, рівняння регресії загалом є статистично значущим, тобто є

контактною площею опорних призматичних ділянок і об'ємом порожнин показано на рис. 2.

Метою проведення експерименту є створення адекватної, статистично значущої моделі регресії, а при плануванні експерименту виникають три основні завдання: кількість дослідів, що проводяться; які значення надавати чинникам; у якому поєднанні різним чинникам надавати різних значень.

Обробку результатів експерименту проведено за схемою з рівномірним дублюванням випробувань



задовільна відповідність даним експерименту;

– критичне значення  $t$  - статистики при рівні значущості  $\alpha = 0,05$ ;  $m_1 = 6$ ;  $m_2 = 1$ :  $t_{кр} = 2,12$ . Для всіх параметрів моделі регресії розрахункове значення  $t$ -статистики більше від критичного значення, тобто всі параметри моделі регресії статистично значущі;

– коефіцієнт множинної кореляції дорівнює 0,966. Він є критерієм оцінювання точності функції регресії.

При моделюванні застосовувався метод розширеної подібності, у якому витримуються геометричні, механічні та силові аналоги з реальним об'єктом. Три теореми теорії подібності дозволяють проаналізувати рівняння, що описують натурний і модельний процес, вивести умови моделювання у вигляді критеріїв подібності й вибрати масштабні коефіцієнти.

У роботі моделювалися суглинки з такими характеристиками:  $E=13,5$  МПа,  $c=19,5$  кПа,  $\gamma=1,82$  т/м<sup>3</sup>,  $\varphi=22^\circ$ . Визначення фізико-механічних властивостей моделі основи проводилося за допомогою польової лабораторії ПЛЛ-9. Результати випробувань наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Результати випробувань проб

№ точки	Глибина відбору проби від верху масиву, м	Об'ємна вага, $\gamma$ , т/м <sup>3</sup>	Модуль деформації, $E$ , МПа	Параметри зсуву		
				$tg \varphi$	$\varphi^\circ$	$c$ , МПа
1	0,15	1,826	9,3	0,38	21	0,014
2	0,15	1,812	9,5	0,32	18	0,019
3	0,15	1,818	9,4	0,34	20	0,015
4	0,15	1,815	9,4	0,33	19	0,017
5	0,3	1,831	8,9	0,36	20	0,016
6	0,3	1,822	9,1	0,46	25	0,012
7	0,3	1,828	9,0	0,41	23	0,014
8	0,3	1,825	9,0	0,42	24	0,013
9	0,45	1,816	8,5	0,48	26	0,010
10	0,45	1,819	8,6	0,49	27	0,012

Порівняльну характеристику натурального й модельного ґрунту наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Порівняльна характеристика ґрунтів

Найменування ґрунту	Фізико-механічні характеристики основи			
	$E$ , МПа	$c$ , кПа	$\gamma$ , т/м <sup>3</sup>	$\varphi$ , град.
Натурний ґрунт	13,5	19,5	1,82	22
Модельна основа	5,62	6,8	1,71	22
Коефіцієнт переходу	1/1,5	1/1,5	1	1

На підставі даних матриці планування експерименту з урахуванням конструктивних особливостей для експериментальних досліджень було

виготовлено моделі підпірних стін.

Лоткові випробування проводилися в металевому лотку. Робочий простір для встановлення підпірної стіни відгороджений перегородкою.

Як основа застосовувалася ґрунтова паста, отримана із суглинку, відібраного в котловані. Паста укладалася в лотік шарово та ущільнювалася, після чого шарами з відстанню по глибині  $l=100$  мм було взято проби й отримано такі характеристики: модуль деформації  $E=9,06$  МПа, кут внутрішнього тертя  $\varphi=22^\circ$ , питоме зчеплення  $c = 0,013$  МПа.

Перед вільною поверхнею підпірної стіни було встановлено планку з двома індикаторами годинникового типу для вимірювання горизонтальних деформацій (переміщень) стінки у двох рівнях. Над підпірною стінкою, на спеціально підготовленій консолі, було встановлено прогиноміри для вимірювання вертикальних деформацій (переміщень) (рис. 3).

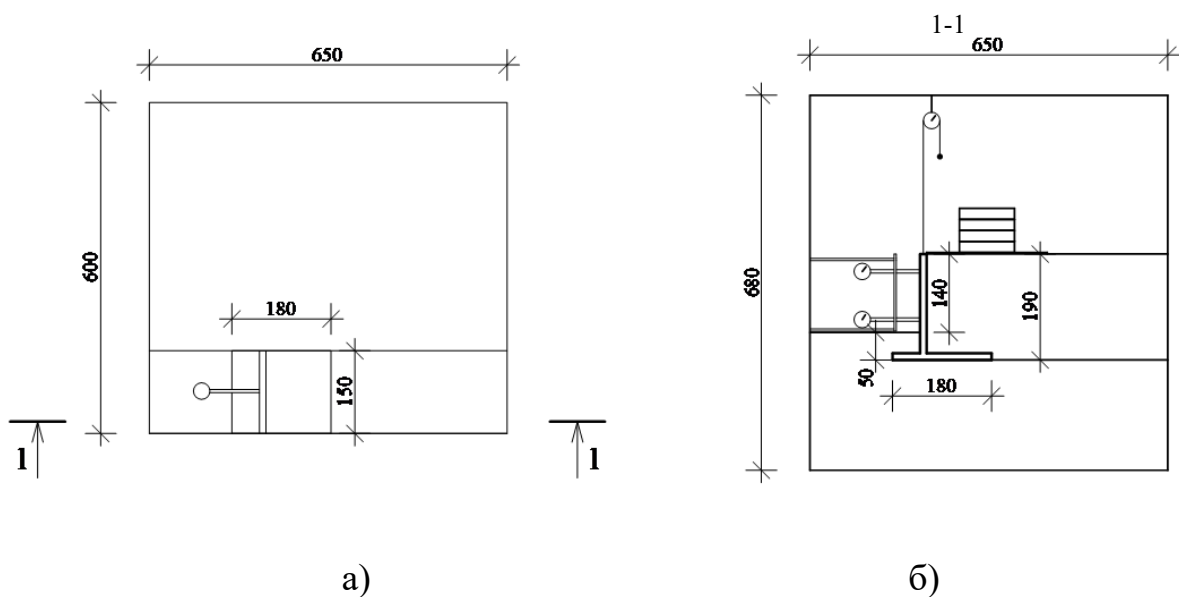


Рисунок 3 – Схема встановлення підпірної стіни в лотку:

а) план лотку;

б) розріз 1-1.

Після закінчення кожного експерименту ґрунт із лотка виймали, висушували в сушильній шафі й подрібнювали. Для проведення наступного експерименту повторно за вищевикладеною технологією готували ґрунтову пасту й повторно укладали в лотік.

Проведені дослідження показали, що при однаковій ґрунтовій основі (геометрія шарів і фізико-механічні характеристики), навантаженні та граничних умовах очевидним для підпірної стінки зі структурною поверхнею є залучення до роботи всього масиву ґрунту й рівномірне перерозподілення напружень по лицьовій і фундаментній плитах; рівномірність загальних деформацій конструкцій і ґрунтової основи, які, своєю чергою, забезпечують більшу стійкість підпірної стіни зі структурною поверхнею.

Визначено, що застосування підпірної стіни зі структурною поверхнею доцільне для глинистих та суглинистих ґрунтів з характеристиками, що лежать

у межах: кут внутрішнього тертя  $\varphi=20\div 26^\circ$ , питомого зчеплення  $c=15\div 45$  кПа.

Проведено аналіз результатів експерименту й установлено, що осідання ПССП проходить поетапно, при навантаженні ґрунт заходить у порожнини й осідання збільшується та з часом стабілізується. Різниця осідань ПССП та звичайної підпірної стіни зменшувалась із кожним етапом навантаження й на фінальній стадії становила 5 %. У межах можливостей проведеного експерименту зафіксовано більшість кренів (у різних напрямках) для звичайної підпірної стіни в різних серіях досліджень. Середнє значення крену в площині зрушування ґрунту для звичайної підпірної стіни порівнянно із ПССП більше на 4 %.

**Третій розділ** присвячено розробленню методики розрахунку підпірної стіни зі структурною поверхнею на основі, що нерівномірно деформується.

Найбільш несприятливі варіанти реалізації реактивних тисків можливі за таких поєднань деформаційних і силових впливів: кривизна опуклості поверхні основи й зовнішній момент, спрямований перпендикулярно площині кривизни; кривизна увігнутості поверхні основи й зовнішній момент, спрямований паралельно площині кривизни; уступ або провал біля торця фундаментного елемента підпірної стіни й зовнішній момент, спрямований перпендикулярно лінії уступу.

Граничний напружено-деформований стан ґрунту основи під фундаментним елементом зі структурною поверхнею відрізняється від плоскої моделі як за якісними відмінностями в умовах формування, так і за характером напружено-деформованого стану.

Особливістю формування напружено-деформованого стану основи на контакті з ПССП є поява пружних ядер і розвантажувальних склепінь по лицьовій і фундаментній плитах, що забезпечує максимальне залучення ґрунту до роботи, що утворює об'ємний напружено-деформований стан основи.

Внесено доповнення у формулу для конструювання ПССП шляхом введення емпіричного коефіцієнта:

$$R = \frac{C \cdot P \cdot \gamma_{c1} \cdot \gamma_{c2}}{k \cdot S \cdot [1 + (\cos \alpha + f \cdot \sin \alpha)]} \quad (2)$$

де  $R$  – гранична несуча здатність основи, при якій установлюється й зберігається статична рівновага підпірної стіни;

$C$  – емпіричний коефіцієнт, який ураховує об'ємно-напружений деформований стан для різних видів ґрунтів, знаходиться в межах від 2,15-2,5;

$P$  – нормальне навантаження, прикладене до підпірної стіни;

$\gamma_{c1}$  і  $\gamma_{c2}$  – коефіцієнти умов роботи, прийняті за нормами;

$k$  – коефіцієнт, що залежить від міцності ґрунту ( $\varphi$  і  $c$ );

$S$  – фактична контактна площа опорних призматичних ділянок;

$\alpha$  – кут різання, утворений обвідною поверхнею опорних елементів і дотичною площиною, проведеною до поверхні призматичних ділянок;

$f$  – коефіцієнт тертя між ґрунтом і опорними призматичними ділянками.

Під час експериментальних досліджень ПССП було отримано такі залежності, які відображені на рис. 4.

Для опису діаграми деформування ґрунту на різних ділянках використано формули із застосуванням коефіцієнта жорсткості основи й розрахункового опору для тривало навантаженої основи.

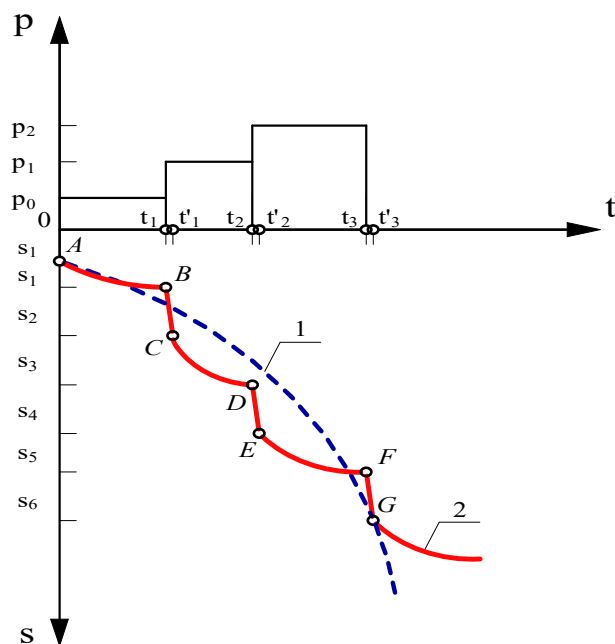


Рисунок 4 – Діаграма деформування ґрунту (залежність осідання від навантаження і часу):

- 1 – для кутникової підпірної стіни;
- 2 – для підпірної стіни зі структурною поверхнею.

дотичних напружень. Відбувається подальше формування напружено-деформованого стану масиву, при цьому конструкція ПССП постійно прагне до стану статичної стійкої рівноваги;

- «арочний» ефект працює для всього масиву ґрунту, тому йде виположування графіка, що свідчить про стійкий статичний стан.

Зміна фізико-механічних властивостей ґрунту під ПССП унаслідок багаторазової прояви «арочного» ефекту має прямий вплив на експлуатаційні характеристики ПССП і полягає у тому, що після зміни кривої графіку осідання і переходу до стадії виположування розрахунковий опір ґрунту визначаємо за формулою:

$$R_d = R_0 + (R_t - R_0) \cdot \frac{E_t}{E_0}, \quad (3)$$

де  $R_0$  – розрахунковий опір ґрунту основи кПа, згідно з нормативом при значеннях кута внутрішнього тертя  $\varphi_{II} = \varphi_0$ , град., і питомого зчеплення  $c_{II} = c_0$ , кПа, що відповідають ненавантаженої основи;

$E_0$  – модуль деформації ґрунту ненавантаженої основи, МПа;

$E_t$  – модуль деформації ґрунту тривало навантаженої основи, МПа, при середньому тиску під подошвою  $P_0$ , кПа;

$R_t$  – розрахунковий опір ґрунту основи згідно з нормативом при характеристиках міцності ґрунту  $\varphi_{II} = \varphi_t$ , град., і питомого зчеплення  $c_{II} = c_{10}$ ,

Аналізуючи отримані графіки, можна дійти висновку, що:

- при первинному завантаженні ПССП відбувається проникнення ґрунту в порожнини конструкції та збільшується осідання. Зі збільшенням осідання відбувається перерозподілення контактних напружень і формування нових пружних ядер і розвантажувальних склепінь із залученням усього масиву як для лицьової плити, так і для фундаментної плити, що подовжує термін експлуатації конструкції;

- при подальшій деформації основи відбувається подальше заповнення порожнин. Ґрунт зрізається в порожнини при збільшенні максимальних

кПа, що відповідають ненавантаженій основі, кПа.

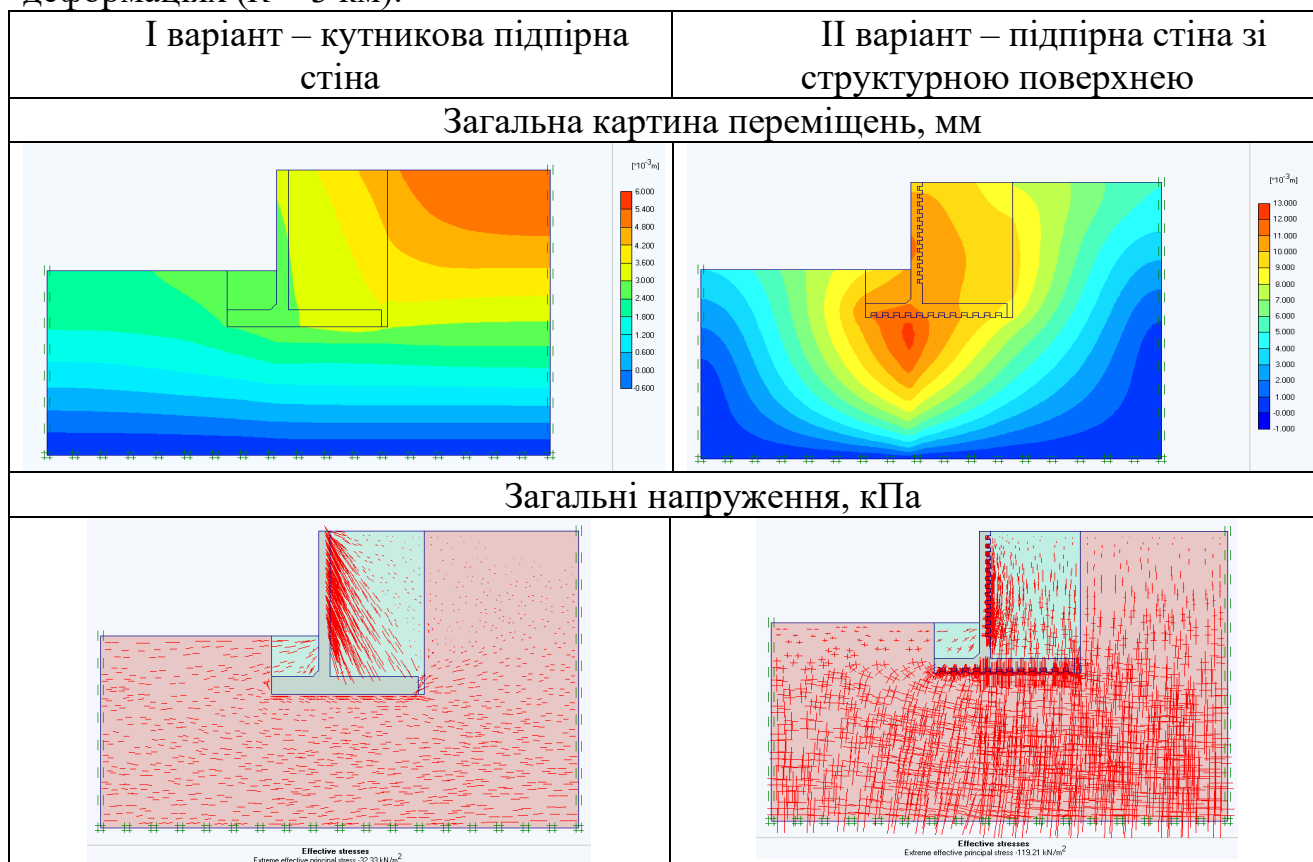
Розроблено методику розрахунку, яка враховує конструктивні особливості підпірної стіни зі структурною поверхнею при контактній взаємодії з основою, що нерівномірно деформується.

**Четвертий розділ** присвячено математичному моделюванню, за допомогою програмних комплексів PLAXIS, ЛІРА, контактної взаємодії підпірних стін із основою, що нерівномірно деформується.

Аналіз напружено-деформованого стану основ будівель і споруд може бути виконаний тільки з використанням програм, у яких реалізовано моделі нелінійної механіки ґрунтів, що дозволяють комплексно врахувати всі можливі чинники на етапах будівництва та експлуатації.

Моделювання за допомогою програмного комплексу PLAXIS дозволило провести аналіз напружено-деформованого стану підпірних стін, які взаємодіють з основою, що нерівномірно деформується (радіус кривизни – 1-3 км), відповідно до розрахункових схем для двох варіантів: 1 варіант – кутникова підпірна стіна; 2 варіант – підпірна стіна зі структурною поверхнею (табл. 3).

Таблиця 3 – Порівняння роботи підпірних стін при радіусоподібних деформаціях ( $R = 3$  км).



Розрахунок стійкості та міцності підпірної стіни було виконано методом скінченних елементів за допомогою програмного комплексу ЛІРА.

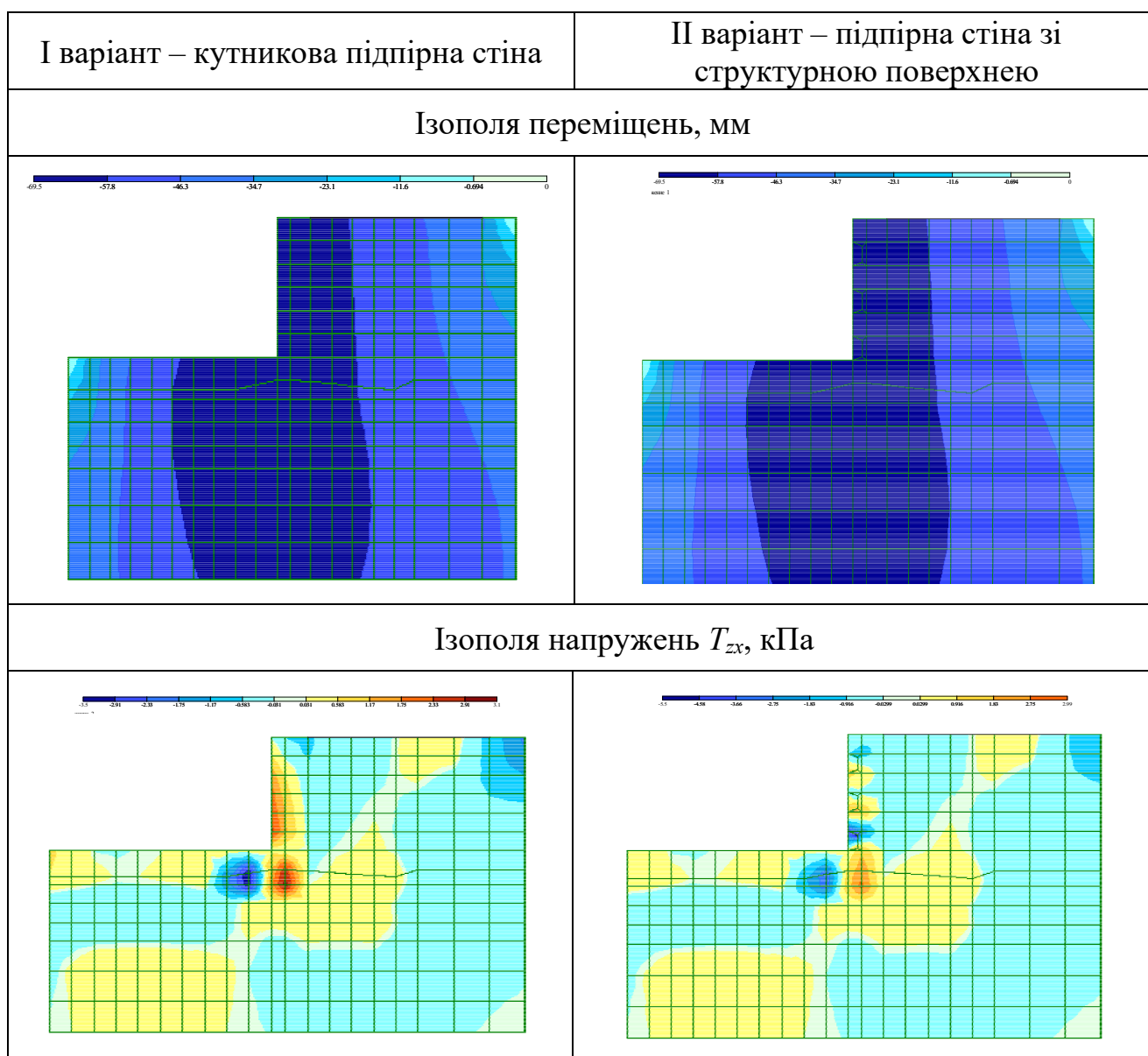
Для створення розрахункової скінченно-елементної моделі, що враховує

спільну роботу конструкцій з ґрунтовим масивом, використовувалися скінченні елементи (СЕ): СЕ 284 – фізично нелінійний універсальний прямокутний для плоскої задачі (ґрунт); СЕ 10 – універсальний просторовий стрижневий; СЕ 21 – прямокутний СЕ для плоскої задачі (балка-стінка); СЕ 22 – трикутний СЕ для плоскої задачі (балка-стінка); СЕ 30 – чотирикутний СЕ для плоскої задачі (балка-стінка).

СЕ-моделі надаються деформаційні характеристики – модуль пружності  $E$  і коефіцієнт Пуассона  $\nu$ , питома вага матеріалу  $R_0$ . Після завдання жорсткостей СЕ-моделі слід задати значення навантажень у завантаженні.

Напружено-деформований стан скінченно-елементних моделей підпірних стін представлено в табл. 4.

Таблиця 4 – Порівняння роботи підпірних стін



Моделювання для об'ємної задачі проводилося поетапно: створення розрахункової скінченно-елементної моделі підпірної стіни та ґрунтового

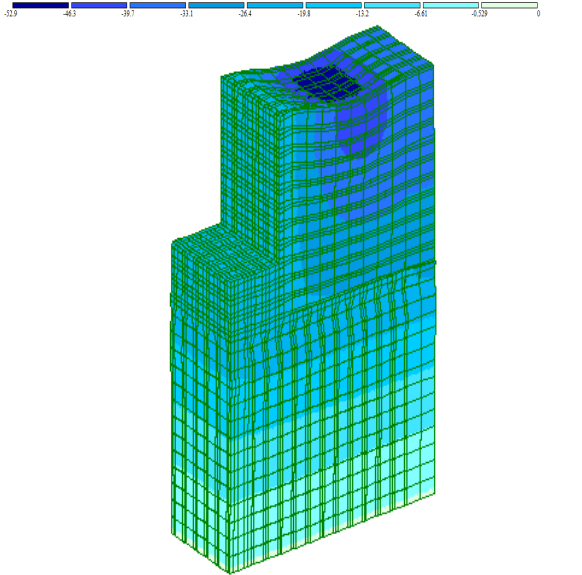
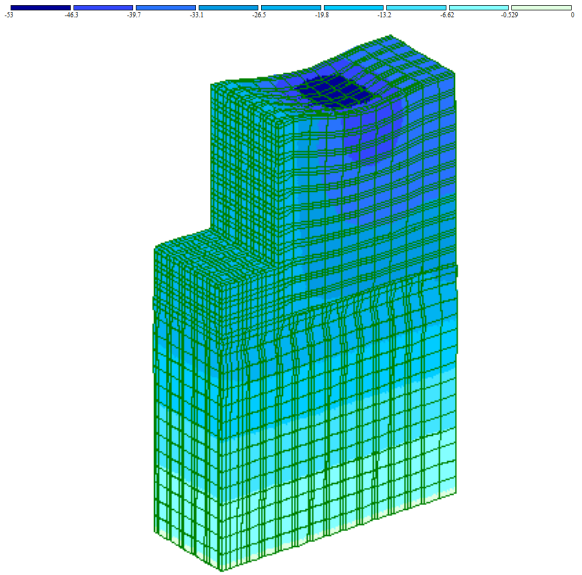
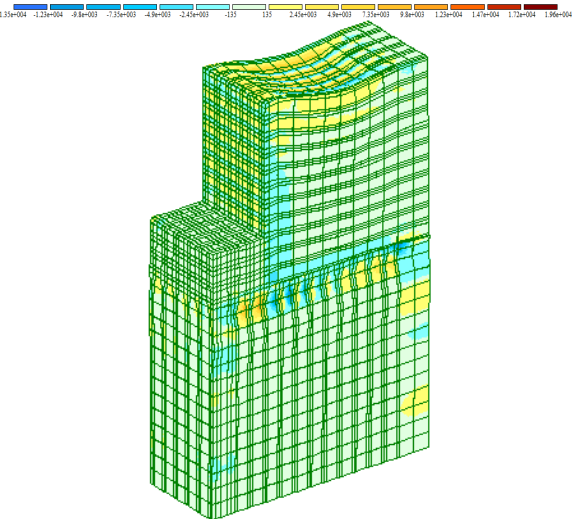
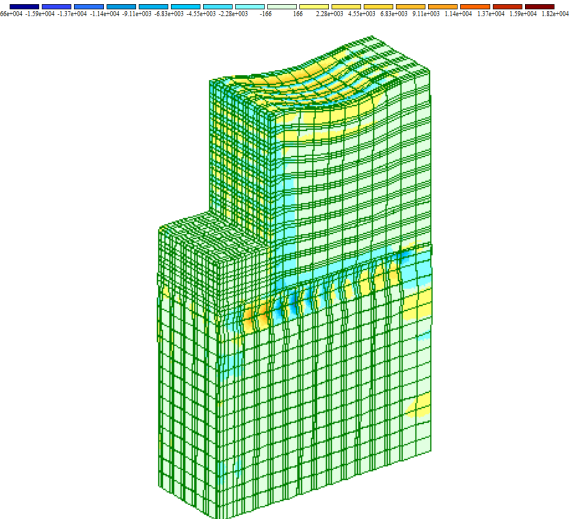


масиву; моделювання поверхні контакту «заглиблена конструкція - ґрунтовий масив».

Для створення розрахункової скінченно-елементної моделі, що враховує спільну роботу конструкцій із ґрунтовим масивом, використовувалися скінченні елементи: СЕ 271-276 – фізично нелінійний об’ємний скінченний елемент ґрунту (моделювання ґрунту); СЕ 344 – геометрично-нелінійний універсальний чотирикутний скінченний елемент оболонки (моделювання пружно-піддатливого матеріалу); СЕ 31 – паралелепіпед (табл. 5).

Інформація про розрахункову схему суперелемента типу 2000: порядок системи рівнянь – 65713; ширина стрічки – 48552; кількість елементів – 20244; кількість вузлів – 22797.

Таблиця 5 – Порівняння роботи підпірних стін (об’ємна задача)

І варіант – кутникова підпірна стіна	ІІ варіант – підпірна стіна зі структурною поверхнею
Ізополя переміщень, мм	
	
Ізополя напружень $T_{xy}$ , кПа	
	

За виконаними розрахунками у програмному комплексі PLAXIS отримано такі результати:

– для статичного завантаження підпірної стіни зі структурною поверхнею  $S=15,53$  мм,  $\sigma=61,31$  кН/м<sup>2</sup>, для звичайної підпірної стіни вони склали  $S=6,78$  мм,  $\sigma=24,60$  кН/м<sup>2</sup>;

– для радіусоподібної деформації основи  $R=1-3$  км підпірної стіни зі структурною поверхнею  $S=12,34$  мм,  $\sigma=119,21$  кН/м<sup>2</sup>, для звичайної підпірної стіни вони склали  $S = 5,55$  мм,  $\sigma= 32,33$  кН/м<sup>2</sup>.

Аналізуючи отримані результати, можна дійти висновку, що переміщення для підпірної стіни зі структурною поверхнею більші, але при цьому ефективні напруження  $\sigma_{ef}$  знижені та більш рівномірно розподілені в ґрунтовому масиві.

Встановлено підвищення несучої здатності основи для підпірних стін із структурною поверхнею до 32 % і прояв властивості саморегулювання в робочому діапазоні навантажень.

На основі проведених чисельних досліджень встановлено раціональну область застосування підпірних стін зі структурною поверхнею при нерівномірних осіданнях земної поверхні для радіусів менше 3 км, що забезпечує зменшення зусиль на 35-55 %. Розширення меж застосування ПССП вимагає проведення подальших досліджень.

За виконаними розрахунками у програмному комплексі ЛПА отримано такі результати:

– для плоскої задачі підпірної стіни зі структурною поверхнею  $N_x=0,78$  кПа,  $N_z=1,57$  кПа,  $T_{xz}=4,70$  кПа, для звичайної підпірної стіни вони склали  $N_x=1,96$  кПа,  $N_z=4,9$  кПа,  $T_{xz}=11,76$  кПа;

– для об'ємної задачі підпірної стіни зі структурною поверхнею  $S=53$  мм,  $T_{xy}=5,50$  кПа, для звичайної підпірної стіни вони склали  $S=45,6$  мм,  $T_{xy}=6,53$  кПа.

Виходячи із отриманих результатів, для підпірних стін зі структурною поверхнею зниження контактних напружень становить 18 % (об'ємна задача). Результати показали, що різниця між деформаціями підпірних стін на останньому етапі навантажень при використанні просторової та плоскої постановки склала близько 7 %. На рис. 5 і рис. 6 видно, що в просторовій і плоскій постановці отримано кількісно близькі значення деформацій, але в окремих зонах графіки відрізняються кривизною.

У процесі дослідження роботи підпірних стін зі структурною поверхнею й нерівномірно-деформованою основою показана доцільність математичного моделювання з урахуванням усіх особливостей контактної взаємодії за допомогою програмного комплексу ЛПА, який реалізує метод скінченних елементів. Отримано дані в результаті численних досліджень: виникнення і розвиток областей граничної рівноваги ґрунту; формування ущільненого ядра, які відповідають результатам теоретичних і експериментальних досліджень із задовільною збіжністю для навантажень 3-5 %, для осідання фундаментів – 5-10 %, що підтверджує правильний вибір фізичної моделі основи.



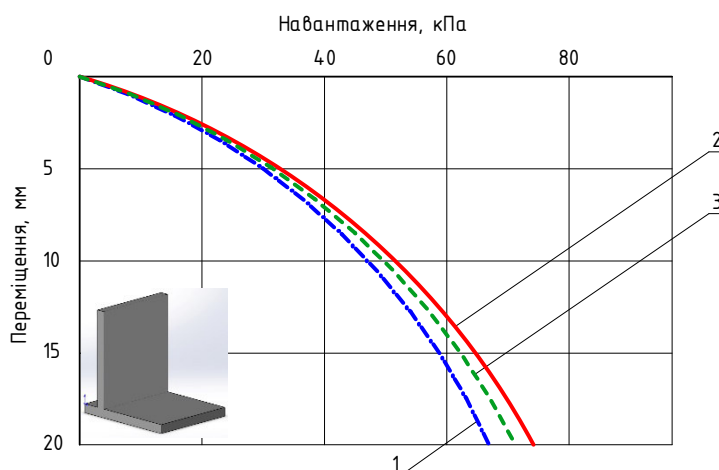


Рисунок 5 – Результати досліджень кутникової підпірної стіни:  
 1 – плоска задача математичного моделювання в ПК ЛІРА;  
 2 – об’ємна задача математичного моделювання в ПК ЛІРА;  
 3 – експериментальні показники.

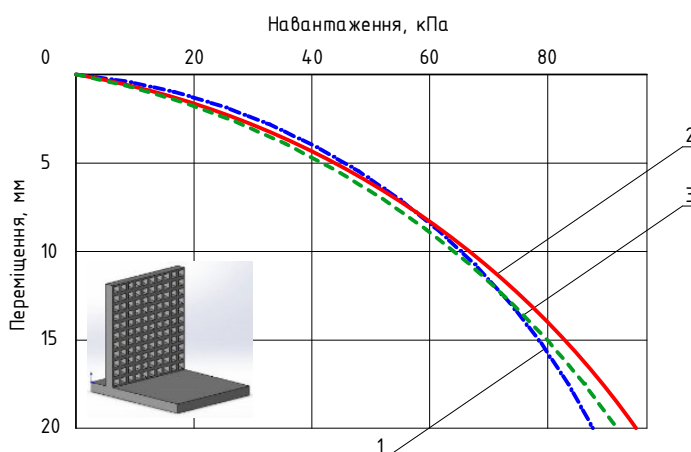


Рисунок 6 – Результати досліджень ПССП:  
 1 – плоска задача математичного моделювання в ПК ЛІРА;  
 2 – об’ємна задача математичного моделювання в ПК ЛІРА;  
 3 – експериментальні показники.

У **п’ятому розділі** розроблено методичні рекомендації щодо проєктування підпірних стін зі структурною поверхнею, які можуть використовуватися для розрахунку ПССП у складних інженерно-геологічних умовах.

Сформульовано перелік необхідних вихідних даних, визначено вимоги до інженерно-геологічних вишукувань.

Розроблено основні положення з розрахунку та проєктування ПССП, які враховують впливи від підроблювання територій.

При проєктуванні підпірних стін повинні прийматися конструктивні схеми, що забезпечують необхідну міцність, стійкість і просторову

незмінюваність споруди загалом, а також окремих її елементів на всіх стадіях будівництва та експлуатації.

Було визначено чітку область застосування ПССП, яка залежить від інженерно-геологічних умов майданчика будівництва, призначення й терміну експлуатації конструкцій, вимоги до матеріалів і правила влаштування ПССП, сформовано основні положення за розрахунком.

Розроблено та експериментально перевірено методику розрахунку, яка відображає новий підхід до проєктування ПССП із урахуванням тривало навантаженої основи.

## ВИСНОВКИ

Проведені експериментальні дослідження підтверджують теоретичні положення й свідчать про розв'язання в дисертаційній роботі актуального наукового та практичного завдання використання підпірних стін зі структурною поверхнею в складних інженерно-геологічних умовах. Це дозволяє зробити такі висновки:

1. За результатами аналізу конструктивного рішення підпірних стін та умов їх експлуатації, із узагальненням вітчизняного та зарубіжного досвіду їх проєктування, обґрунтовано необхідність розроблення нового конструктивного рішення підпірних стін для роботи в складних інженерно-геологічних умовах.

2. Розроблено нове конструктивне рішення для підпірних стін в умовах роботи на підроблюваних територіях, особливість якого полягає у формуванні структурної поверхні з контактної сторони, яке запатентовано.

3. Отримане рівняння багатовимірної лінійної регресії  $\bar{Y}_x = 0,0004 + 0,14 \cdot X_1 + 0,13 \cdot X_2 + 0,0005 \cdot X_3 + 0,04 \cdot X_4 + 0,001 \cdot X_5$  статистично динамічне, є задовільна збіжність з даними експерименту, параметри моделі регресії статистично значущі, тобто вони не можуть приймати нульові значення. Визначені оптимальні параметри конструктивного рішення підпірної стіни зі структурною поверхнею, при цьому аналіз значень коефіцієнтів при чинниках в отриманому рівнянні регресії показав, що основний вплив на напружено-деформований стан основи надає контактна площа опорних призматичних ділянок і об'єм порожнин.

4. Розроблено методику проведення експериментальних досліджень в лабораторних умовах на моделях. Поставлені завдання експерименту, визначені параметри моделей ґрунту та конструкцій підпірних стін, вибрані засоби для фіксації результатів.

5. Проведені експериментальні дослідження взаємодії підпірних стін зі структурною поверхнею з деформованою основою, встановлено, що запропоновані конструкції реалізують принцип трансформації тиску на контактних поверхнях підпірної стіни й можуть застосовуватися на основах, що нерівномірно деформуються. Теорія спільної роботи підпірної стіни зі структурною поверхнею з основою, при якій виникає «арочний» ефект, знайшла підтвердження в процесі експериментальних досліджень для ґрунтів із характеристиками, що лежать у межах: кут внутрішнього тертя  $\varphi=20\div 26^\circ$ ,

питоме зчеплення  $c=15\div 45$  кПа. Запропоновано математичні залежності для конструювання підпірних стін зі структурною поверхнею, де емпіричний коефіцієнт  $C$  враховує об'ємно-напружений стан для глинистих і суглинистих ґрунтів і знаходиться в межах 2,15–2,5.

6. Моделювання за допомогою програмних комплексів PLAXIS, ЛІРА дозволило провести аналіз напружено-деформованого стану підпірних стін, що взаємодіють із основою, яка нерівномірно деформується (радіус кривизни – 1-3 км), відповідно до розрахункових схем для двох варіантів. Це підтвердило ефективність роботи нової конструкції при деформаційних впливах основи. Отримано зменшення зусиль в елементах конструкцій, а саме: в місці з'єднання лицьової й фундаментної плит на 12–15 %.

7. На основі проведених досліджень визначено: формування ущільненого ядра, виникнення й розвиток областей граничної рівноваги ґрунту, що відповідає результатам експериментальних і теоретичних досліджень із задовільною збіжністю, для навантажень – 3-5 %, для осідання конструкцій – 5-10 %, що підтверджує правильний вибір фізичної моделі основи.

8. Розроблено рекомендації щодо проектування підпірних стін зі структурною поверхнею, які мають конкретну область застосування – складні інженерно-геологічні умови, а саме: підроблювальні території на глинистих і суглинистих ґрунтах.

9. При практичному впровадженні запропонованих конструкцій на об'єктах промислового й цивільного будівництва порівняно з типовими рішеннями, орієнтованими на застосування у звичайних умовах, отримано економічний ефект у розмірі 55,00 тис. грн при зведенні 10 м/п стіни.

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

**Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації**

1. Тімченко Р. О., Настич О. Б., Крішко Д. А., Савенко В. О. Напружено-деформований стан підпірних стінок спеціального типу при складних деформаціях. *Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво*. 2014. Вип. 3 (42), т.2. С. 150-156.

2. Тімченко Р. О., Настич О. Б., Крішко Д. А., Савенко В. О. Конструктивні рішення підпірних стін спеціального типу для територій з особливими умовами. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2015. Вип. 30. С. 425-432.

3. Тімченко Р. О., Крішко Д. А., Богатинський А. В., Савенко В. О. Математичне моделювання нелінійно-непружних контактних задач. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2015. № 12. С. 78-83.

4. Савенко В. О., Тімченко Р. О., Крішко Д. А. Застосування програм заснованих на методі скінченних елементів (МСЕ) для моделювання роботи системи «основа-інженерна споруда». *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серія: Компьютерные системы и информационные*

*технологии в образовании, науке и управлении*. 2016. Вып. 94. С. 143-148.

5. Timchenko R. A., Krishko D. A., Savenko V. O. Experimental research technique of retaining walls of a special type. *Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво*. 2017. Вип. 2 (49). С. 221-226. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus).

6. Timchenko R., Krishko D., Savenko V. Experimental research of retaining walls with structural surface. *Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво*. 2018. Вип. 2 (51). С. 139-144. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus).

7. Timchenko R., Krishko D., Savenko V. Modeling using the «ЛІРА» software package of contact interaction of the retaining wall with the base. *Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво*. 2019. Вип. 1 (52). С. 133-138. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus).

#### **Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації**

8. Тімченко Р. О., Крішко Д. А., Савенко В. О. Використання діаграм деформування ґрунту для розрахунку конструкцій в складних інженерно-геологічних умовах. *Розвиток національної економіки: теорія і практика: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф.*, 3–4 квітня 2015 р. Івано-Франківськ, 2015. С. 94-95.

9. Тімченко Р. О., Крішко Д. А., Савенко В. О. Огляд конструктивного рішення підпірної стіни спеціального типу. *Розвиток промисловості та суспільства: матеріали Міжнар. наук.-техн. конф.*, 25-27 травня 2016 р. Кривий Ріг: Криворізький національний університет, 2017. С. 185.

10. Тімченко Р. О., Крішко Д. А., Савенко В. О., Хоруженко І. В. Застосування програмного комплексу «ЛІРА» для моделювання роботи системи «основа – інженерна споруда». *Комп'ютерні системи та інформаційні технології в освіті, науці та управлінні: тези доп. VI Міжнар. наук.-практ. конф.*, 23-25 жовтня 2019 р. Д.: ДВНЗ ПДАБА, 2019. С. 48-49.

#### **Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації**

11. Монолітна підпірна стіна кутникового типу: пат. 100212 Україна: МПК E02D 29/02 (2006.01). Тімченко Р. О., Крішко Д. А., Савенко В. О., Настич О. Б., № у 2015 01700; заявл. 26.02.2015; опубл. 10.07.2015, Бюл. № 13. 4 с.

12. Збірна підпірна стіна блочного типу: пат. 100518 Україна: МПК (2015.01), E02D (2006.01), E04C 1/100. Тімченко Р. О., Крішко Д. А., Савенко В. О., Кадол Л. В., Попов С. Н., Настич О. Б. № у 2015 01699; заявл. 26.02.2015; опубл. 27.07.2015, Бюл. № 14. 4 с.

13. Збірна підпірна стіна блочного типу: пат. 100799 Україна: МПК E02D 29/02 (2006.01). Тімченко Р. О., Крішко Д. А., Савенко В. О., Целіков С. Л., Ревенко О. О. № у 2015 01697; заявл. 26.02.2015; опубл. 10.08.2015, Бюл. № 15. 4 с.

14. Тімченко Р. А., Кришко Д. А., Савенко В. О. Физические модели

подпорных стенок и основания для изучения их контактного взаимодействия. *Гірничий вісник*. 2017. Вип. 102. С. 56-61.

15. Timchenko R., Popov S., Nastich O., Krishko D., Savenko V. The use of new structural solutions of retaining walls to ensure the stable operation of the «base – engineering structure» system. *E3S Web of Conferences. The International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF 2020)*, May 20-22, 2020. Kryvyi Rih, 2020. Vol. 166, article 02003. P. 8. DOI: 10.1051/e3sconf/202016602003. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази Scopus).

### АНОТАЦІЯ

Савенко В. О. Работа конструкций подпёрной стёны зé структурной поверхнею на основé, що нерéвномерно деформується. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.02 – основи і фундаменти. – Криворізький національний університет Міністерства освіти і науки України, Кривий Ріг, 2021.

Дисертація присвячена вирішенню актуального наукового та практичного завдання подальшого вдосконалення конструктивного рішення підпёрних стéн зé структурною поверхнею і методів їх розрахунків з метою проектування та експлуатації будéвель і споруд у складних інженерно-геологічних умовах.

Для практичних розрахунків застосовано модель змéнного коефіцієнта жорсткостé основи і розрахункового опору для тривало навантаженої основи, яка дозволяє врахувати особливостé контактноé взаємодé в умовах нерéвномерних деформацій основи.

У серéї експериментальних дослédжень визначено основнé властивостé цих підпёрних стéн – ущéльнення і збéльшення несучоé здатностé ґрунтовоé основи. Розроблено рекомендації щодо проектування підпёрних стéн зé структурною поверхнею, якé можуть використовуватись для розрахунку підпёрної стёны зé структурною поверхнею в складних інженерно-геологічних умовах.

При практичному впровадженнé запропонованих конструкцій на об'єктах промислового і цивéльного будéвництва в порéвняннé з типовими рéшеннями, якé орієнтованé на застосування в звичайних умовах, отримано економéчний ефект в розмéрi 55,00 тис. грн при влаштуваннé 10 м/п стёны.

Ключовé слова: підпёрна стёна зé структурною поверхнею, напружено-деформований стан, основа, що нерéвномерно деформується, ґрунт, «арочний» ефект, математичне моделювання.

### АННОТАЦИЯ

Савенко В. О. Работа конструкций подпорной стёны со структурной поверхностью на неравномерно деформируемом основании. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.02 – основания и фундаменты. – Криворожский национальный университет Министерства образования и науки Украины,

Кривой Рог, 2021.

Диссертация посвящена решению актуальной научной и практической задачи дальнейшего совершенствования конструктивного решения подпорных стен со структурной поверхностью и методов их расчетов с целью проектирования и эксплуатации зданий и сооружений в сложных инженерно-геологических условиях.

Для практических расчетов применена модель переменного коэффициента жесткости основания и расчетного сопротивления для длительно нагруженного основания, которая позволяет учесть особенности контактного взаимодействия в условиях неравномерных деформаций основания.

В серии экспериментальных исследований определены основные свойства этих подпорных стен - уплотнение и увеличение несущей способности грунтового основания. Разработаны рекомендации по проектированию подпорных стен со структурной поверхностью, которые могут использоваться для расчета подпорной стены со структурной поверхностью в сложных инженерно-геологических условиях.

При практическом внедрении предложенных конструкций на объектах промышленного и гражданского строительства по сравнению с типовыми решениями, которые ориентированы на применение в обычных условиях, получен экономический эффект в размере 55,00 тыс. грн при устройстве 10 м/п стены.

Ключевые слова: подпорная стена со структурной поверхностью, напряженно-деформированное состояние, неравномерно деформируемое основание, грунт, «арочный» эффект, математическое моделирование.

## SUMMARY

Savenko V. O. Work of retaining wall with structural surface on unevenly deformed base. – As a manuscript.

Thesis for the scientific degree of the candidate of technical sciences in specialty 05.23.02 – bases and foundations. – Kryvyi Rih National University of the Ministry of education and science of Ukraine, Kryvyi Rih, 2021.

The dissertation is devoted to the solution of the actual scientific and practical problem of further improvement of the structural solution of retaining walls with a structural surface (RWSS) and methods of their calculations for the purpose of designing and operation of buildings and structures in difficult engineering - geological conditions.

For practical calculations, the model of the variable coefficient of rigidity of the base and the calculated resistance for a long loaded base is used, which allows to take into account the features of contact interaction in the conditions of uneven deformations of the base.

In a series of experimental studies basic properties of these retaining walls are determined - compaction and increase of bearing capacity of the soil base. Recommendations on the design of retaining walls with structural surfaces have been developed, which can be used to calculate retaining walls with structural surfaces in

complex engineering-geological conditions.

The most unfavorable variants of realization of reactive pressures are possible at such combinations of deformation and force influences: curvature of convexity of a surface of a basis and the external moment which is directed perpendicularly to the plane of curvature; the curvature of the concavity of the base surface and the external moment directed parallel to the plane of curvature; ledge or failure at the end of the foundation element of the retaining wall and the external moment directed perpendicular to the line of the ledge.

Modeling with the help of software PLAXIS allowed to analyze the stress-strain state of retaining walls that interact with the base, which is unevenly deformed (radius of curvature - 1-3 km), according to the calculation schemes for two options: 1 option - angular retaining wall; option 2 - retaining wall with a structural surface. With a slight difference in total displacement within (15-18 %) and uniform subsidence of the retaining wall with structural surface, compared with the retaining wall of the angular type, the whole soil mass was involved, confirming the contact stresses, which are evenly distributed on the surface of the RWSS.

Mathematical modeling shows a reduction in stresses on the contact surface up to 15 %. Gradual filling of voids leads to an even distribution of efforts, which in the long run increases the service life of the structure, thus providing an economic effect. The peculiarity of the design solution of RWSS in the interaction of soil with the structural surface increases the bearing capacity of the base due to the formation of elastic cores and unloading vaults.

The fifth section develops «Guidelines for the design of retaining walls with a structural surface», which can be used to calculate the RWSS in complex engineering and geological conditions.

When designing retaining walls, structural schemes must be adopted that provide the necessary strength, stability and spatial immutability of the structure as a whole, as well as its individual elements at all stages of construction and operation.

A clear scope of application of the RWSS was determined, which depends on the engineering and geological conditions of the construction site, purpose and service life of structures, requirements for materials and rules of installation of the RWSS, the basic provisions of the calculation were formed.

The calculation technique, which reflects a new approach to the design of RWSS, taking into account the long-loaded basis, has been experimentally tested.

The conducted experimental researches confirm theoretical calculations and testify to the decision in the dissertation work of an actual scientific and practical problem of use of retaining walls with a structural surface in difficult engineering-geological conditions.

With the practical implementation of the proposed structures at industrial and civil engineering facilities compared to typical solutions, which are oriented to use in normal conditions, an economic effect of 55.00 thousand was obtained UAH at the device of 10 m/p of a wall.

Keywords: retaining wall with a structural surface, stress-strain state, unevenly deformed base, soil, «arched» effect, mathematical modeling.