

## МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КРІПЛЕННЯ ГЛИБОКОГО КОТЛОВАНУ

В статті розглянуті питання кріплення глибоких котлованів. На основі моделювання напружено-деформованого стану визначений вплив різних параметрів, таких як кількість розстрілів, вид контрфорсів, а також запропонований новий спосіб кріплення за допомогою застосування нижніх залізобетонних в'язей (розпірок) під дном котловану.

*Ключові слова:* Глибокий котлован, розстріл, контрфорс, моделювання, «стіна в ґрунті», МСЕ

### Вступ

При всіх перевагах глибинної проходки і будівництва станцій метрополітену глибокого розташування в останні десятиліття все частіше будують лінії мілкового закладення, а станції будують відкритим способом у глибоких котлованах. Використання відкритого способу зменшує строки будівництва, знижує їх складність і дозволяє індустріалізувати будівництво.

Проблема влаштування міцного і жорсткого кріплення стінок, здатного стримувати тиск масиву ґрунту виникла із початком самого будівництва, як виду діяльності. Необхідно було насамперед забезпечити стійкість стінок котловану від руйнування. Останнім часом ця проблема стає все більш актуальною, оскільки будівництво перш за все ведеться у містах. Існують методи кріплення котлованів від руйнування, але від переміщення стінок досить дієвого, зручного і дешевого методу досі не існує.

Найбільш прогресивним і сучасним є спосіб закріплення стінок котловану за допомогою «стіни в ґрунті». Стіни, які утворені до розкриття котловану потім розпирають за допомогою розстрілів. В цей час і виникають основні труднощі. Сама по собі «стіна в ґрунті» при мінімальній товщині 600 мм є досить стійкою і жорсткою конструкцією, навіть без додаткового кріплення «стіна в ґрунті» утримає стінки досить великих котлованів від обвалення. Боківий тиск масиву ґрунту настільки великий, що навіть залізобетонна стіна товщиною 600 мм під його впливом значно деформується. Додаткове закріплення стіни по периметру поясами із зварних двотаврів та влаштування розстрілів із труб великого діаметру надасть конструкції необхідної жорсткості, що буде достатньою для мінімізації горизонтальних деформацій. Проте така конструкція значно зменшує вільний простір в котловані, що значно ускладнює як розробку так і будівельно-монтажні роботи при будівництві метрополіте-

ну, оскільки розстріли встановлюють із мінімальним кроком..

Проблема полягає в тому, що в надто закріпленому котловані дуже незручно виконувати будь які роботи. А кількість розстрілів, які необхідні для розпирання стінок котловану вибирають керуючись дуже приблизним аналітичним розрахунком, точність якого викликає сумніви, та попереднім досвідом проектування схожих конструкцій у схожих інженерно-геологічних умовах. Аналітичний розрахунок відсутній, так як постановка плоскої задачі не дає бажаних результатів [4]. По всій довжині котловану попеременно чергуються перерізи між розстрілами і перерізи, в які потрапляють розстріли. Приймавши плоску схему без розстрілів розрахунок ведеться як для защемленої в ґрунт консольної стінки, і при цьому робота розстрілів не враховується. Якщо використовують плоску схему в перерізі із розстрілом, то вирішивши декілька диференціальних рівнянь можна отримати результати, але вони будуть значно завищені і не будуть відповідати реальному стану роботи конструкції. Схожими проблемами, пов'язаними із розрахунком підпірних стін котловану займався Глушков Г. І. [1], Лучковський І. Я. [2, 3] та багато ін.

Єдиним на даний час методом, який може дати більш-менш переконливу відповідь на питання про кількість розстрілів, їх розташування та переріз є метод скінчених елементів. Сучасні програмні комплекси автоматичного проектування дозволяють побудувати ідентичну реальному котловану модель, задати всі необхідні параметри матеріалів та детально проаналізувати напруження та деформації [2].

Метою роботи є створення інженерного методу контролю надійності і стійкості кріплення глибоких котлованів на основі аналізу напружено-деформованого стану за допомогою сучасних комп'ютерних програм, заснованих на методі скінчених елементів.

## Результати досліджень

Для визначення напружено-деформованого стану системи «кріплення-масив» та знаходження оптимальних кількості та кроку розстрілів в конкретних умовах була побудована об'ємна модель (рис. 1) у програмі Plaxis 3D Foundation.

Модель представляє собою цілик ґрунту розмірами 150×60×25 м. В якості ґрунту вибрана глина в природному сухому стані. В даному масиві ґрунту змодельований котлован для будівництва станції мілкого закладення метрополітену. Розміри котловану 108×21×12 м. Котло-

ван з усіх чотирьох сторін закріплений залізобетонною стінкою, яка зводиться за технологією «стіна в ґрунті». Підшва стіни розташована на 4 м глибше підшви котловану. Загальна кількість кінцевих елементів 2944, всі вузли узгоджені, триангуляція кластера ґрунту виконана автоматично.

За такою схемою було побудовано 4 типи моделей (рис. 2). Перша модель представляє собою лише стіну в ґрунті, додаткові кріплення у вигляді розстрілів відсутні. У другій моделі додатково вводяться розстріли, крок між якими 12 м. У третій моделі крок між розстрілами 9 м, у четвертій – 6 м.

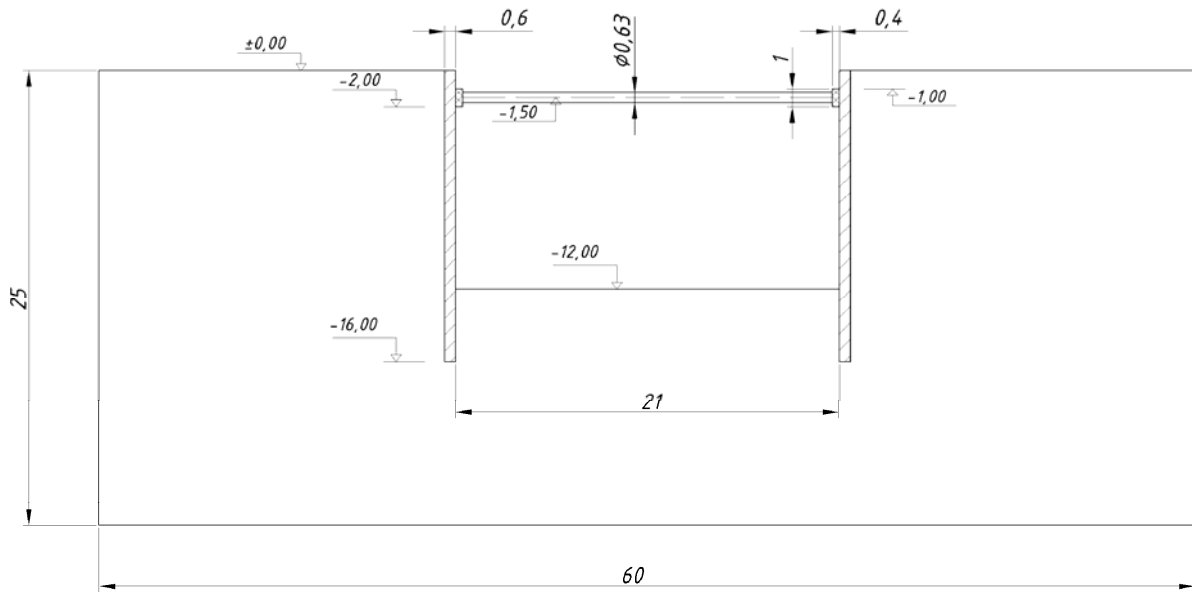


Рис. 1. Поперечний переріз розрахункової СЕ-моделі

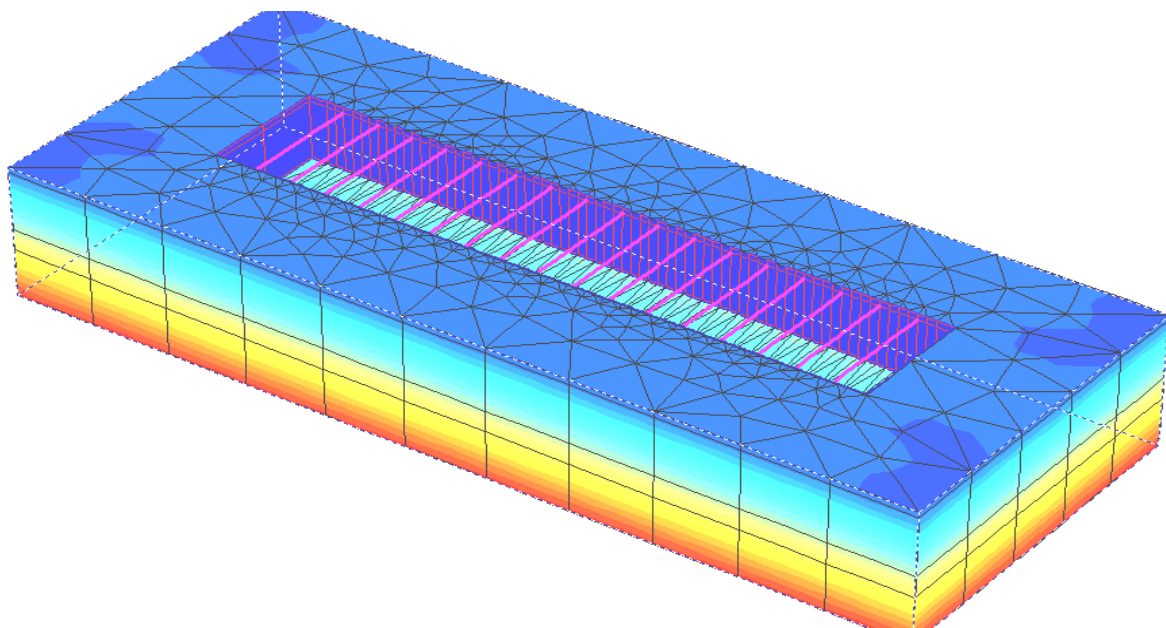


Рис. 2. СЕ-модель котловану із розстрілами

В усіх випадках розрахунку конструкція не втратила несучу здатність, напруження, які виникали в стінці та розстрілах не перевищували межі міцності матеріалів. Головною величиною для аналізу оптимально кількості розстрілів було прийнято величину деформації довшої сторони, тобто величину, на яку максимально перемістить підтримуюча залізобетонна стіна.

При розрахунку використана умова поетапного будівництва: першим етапом влаштовується стіна в ґрунті, другим – розробка ґрунту до рівня встановлення розстрілів, третім – встановлення необхідного числа розстрілів, четвертим – розробка ґрунту до дна котловану.

В ідеальній ситуації стіна, що підтримує стінки котлован повинна залишатись нерухомою, але це виконати неможливо, тому головним завданням є мінімізація горизонтальних переміщень в стінці та мінімізація кількості розстрілів. Необхідно наблизитись до того оптимального значення, при якій переміщення і кількість розстрілів буде найкращою.

Аналіз результатів розрахунку показав, що за відсутності розстрілів стіна деформується як консольна, найбільші переміщення величиною 400 мм виявлені у верхній точці стіни посередині довжини котловану. При встановленні 9 розстрілів з кроком 12 м деформації змінюють характер. Найбільші переміщення виникають приблизно на рівні дна котловану і за розраху-

нком становлять 21 мм. Чітко проглядається зменшення переміщень в точках спирання розстрілів і збільшення переміщень в прогонах між розстрілами.

Збільшивши кількість розстрілів до 12 із кроком 9 м принципова картина ізополя залишилася незмінною. Збільшення жорсткості призвело до того, що більші деформації передаються ґрунту на 1-2 м нижче дна котловану, і ці переміщення чисельно становлять теж 21 мм.

При максимальній кількості розстрілів 18 шт із кроком 6 м переміщення в місцях спирання розстрілів і в прогонах між ними рівні. Це свідчить про те, що прогон між розстрілами в 6 м настільки малий, що деформація його спричинена деформацією розстрілу, а не прогину самого прогону. Тобто при відстані в 6 м між розстрілами верх стінки стає рівним по жорсткості по всій довжині.

Максимальні деформації у цьому випадку складають 20 мм і спостерігаються вони по всій висоті 4 м між підшоною стінки і дном котловану. Це свідчить про можливість виникнення випирання дна котловану [5].

Так, як максимальні деформації кріплення при кроці розстрілів від 6 до 12 м майже незмінні, то необхідно проаналізувати внутрішні моменти (рис. 3), що виникають в «стіні в ґрунті».

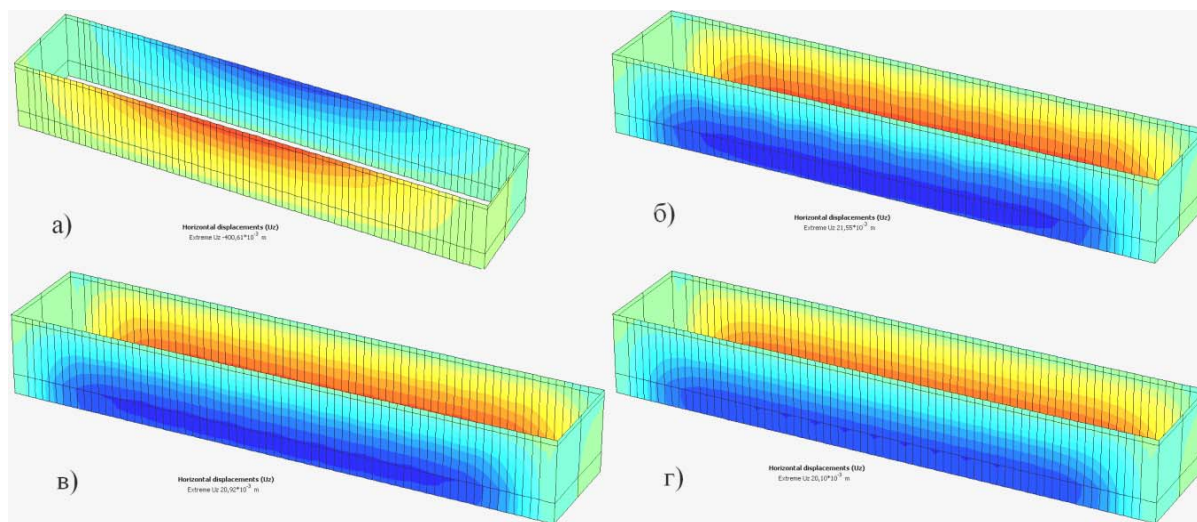


Рис. 3. Горизонтальні деформації стінок котловану:

а) – без розстрілів; б) – розстріли через 12 м; в) – розстріли через 9 м; г) – розстріли через 6 м

При відсутності розстрілів основне зусилля по утриманню поздовжніх стін котловану сприймають торцеві стіни. Це досить наочно ілюструє результати представлення на рис. 3а. В місцях перетину поздовжніх і торцевих моменти досягають максимального значення.

При установці розстрілів ситуація кардинально змінюється. Торцеві стіни майже повністю розвантажені, натомість згинальні моменти виникають в місцях спирання розкосів та на рівні дна котловану у площині розкосів.

Збільшення кількості розкосів призводить до зменшення значення максимального момен-

ту, проте збільшується кількість точок із значними значеннями. Тобто в горизонтальній площині спірання розстрілів і площині дна котловану площа дії згинальних моментів збільшується.

Для визначення напружено-деформованого стану системи «кріплення-масив» при комбінованій конструкції кріплення та різних варіантах влаштування контрфорсів була змінена модель.

Контрфорс – поперечне ребро жорсткості певних розмірів, яке найчастіше влаштовується способом «стіна в ґрунті», і служить для збільшення жорсткості стінового кріплення котловану. Доцільність використання в конструкції контрфорсів пояснюється збільшенням жорсткості стіни із мінімальними витратами матеріалу. В промисловому та цивільному будівництві кріплення за допомогою «стіни в ґрунті» та контрфорсів набуло значного поширення, особливо при великих розмірах котловану в плані. Класичні розстріли, які розпирають в стінове кріплення значно ускладнюють процес розробки ґрунту та монтажу конструкцій фундаменту, особливо при збірному будівництві. Використання контрфорсів вирішує дану проблему. Контрфорси значно збільшують жорсткість стіни, а горизонтальні пояси обв'язки, працюючи на згин мінімізують деформації стінового кріплення.

Для визначення напружено-деформованого стану кріплення із влаштуванням контрфорсів і горизонтальними поясами обв'язки запропоновані нові розрахункові моделі. Контрфорси відносно стінового кріплення розташовуються із внутрішньої сторони, зовні та з двох сторін одночасно.

Класичним виконанням контрфорсу є його тавровий вид. Контрфорс влаштовують поперек стінового кріплення із середини котловану. Звісно, щоб забезпечити необхідний простір для монтажу станції необхідно розширити котлован на значення, рівне довжині двох контрфорсів, тож розміри «у світлі» котловану залишаються  $105 \times 21 \times 12$  м.

Для збільшення жорсткості поздовжніх стін у горизонтальному напрямку влаштовують пояси обв'язки. По мірі розробки котловану на проектній відмітці бетонують горизонтальну балку, з'єднуючи її із стіновим кріпленням. Такі балки влаштовують із певним кроком на різних глибинах. Принципова різниця у влаштуванні контрфорсів зображена на рис. 4.

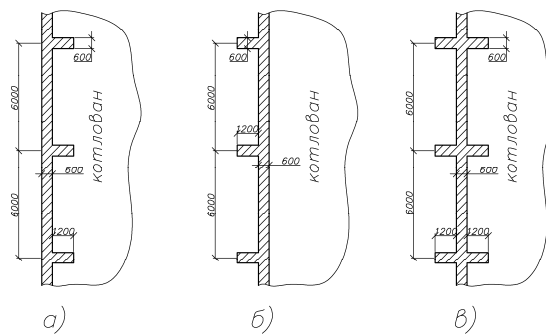


Рис. 4. Схеми влаштування контрфорсів в поздовжній стіні котловану:

а) – внутрішні; б) – зовнішні; в) – «хрестоподібні»

В результаті попередніх розрахунків виявлено, що основа дна котловану недостатньо міцна, до того ж виникає випирання дна котловану і виникає необхідність зменшити деформацію поздовжніх стін на рівні дна котловану.

Для вирішення цих проблем запропонована наступна конструкція. Додатково виконується вертикальна стінка між дном котловану та підшвою стінового кріплення. Стінка виконується на рівні контрфорсів і однакова із ними по ширині. Після розробки котловану до рівня встановлення розстрілів виривають траншею на рівні контрфорсів до рівня підшви стінового кріплення. В цій траншеї виконують бетонування залізобетонної стінки між рівнями – 12,000 та –16,000.

В результаті порівняльного аналізу виконується розрахунок трьох моделей із різним розташуванням та конструкцією контрфорсів. Схема комбінованого кріплення із внутрішнім розташуванням контрфорсів (див. рис. 4).

Третьою конструкцією, що піддається розрахунку є конструкція із «хрестоподібними» контрфорсами. Ця конструкція поєднує в собі перші дві схеми. Тобто контрфорси розташовуються як із внутрішньої, так із зовнішньої сторони.

Із внутрішньої сторони вони додатково з'єднуються із поясами обв'язки. В результаті довжина контрфорса збільшується вдвічі у порівнянні із попередніми схемами конструкції.

Ця схема кріплення більш матеріалоемна, ніж дві попередня, натомість жорсткість поздовжньої стіни значно збільшена, нижня залізобетонна в'язь стримує горизонтальні переміщення стіни нижче дна котловану, а поздовжні пояси збільшують опір згинанню стіни навколо вертикальної осі. Схема такого кріплення зображена на рис. 5.

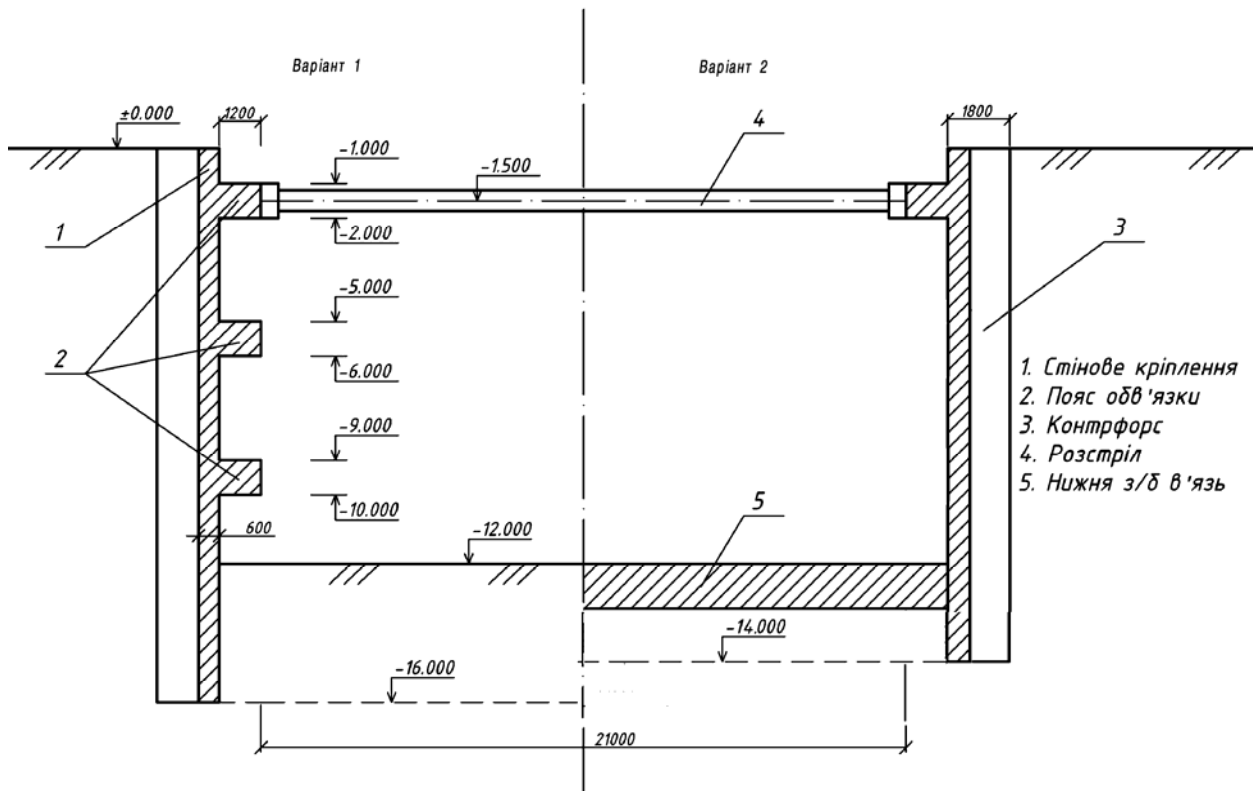


Рис. 5. Схема конструкції комбінованого кріплення котловану із нижніми в'язями:  
Варіант 1) – з поясами обв'язки; Варіант 2) – з нижніми залізобетонними в'язями

Повні переміщення в стіновому кріпленні ідентичні в усіх випадках розрахунку. Максимальне значення не перевищує 20 мм. Будь-яке розташування контрфорсів значно збільшує жорсткість конструкції, в результаті деформації мінімальні.

Нижні залізобетонні в'язі деформуються у вертикальній площині угору, в результаті розтягуються верхні волокна. Величина максимальних деформацій 60...70 мм. В стадії котловану це носить негативний ефект. Але при встановленні конструкції станції на ґрунт та в'язі матимемо розтяг нижніх волокон і ефект «попереднього напруження», що зменшить абсолютні деформації конструкції і позитивно вплине на роботу конструкції станції.

Наявність різної конструкції контрфорсів не впливає на деформування торцевої стіни, оскільки деформації у вигляді згину відбуваються відносно вертикальної осі  $y$ , а контрфорси збільшують жорсткість на згин відносно осі  $z$ . Отже, контрфорси не зменшують деформацію торцевої стіни котловану. Також вздовж осі  $x$  деформуються і крайні з/б в'язі, їх деформація спричинена активним тиском на торцеву стіну, яка стискує ґрунт в середині котловану між рівнями  $-12,000$  та  $-16,000$ . В свою чергу реактивний тиск ґрунту зосереджений на край-

ній з/б в'язі, в результаті чого вона і піддається більшій деформації, ніж інші.

## Висновки

Встановлення великого числа розстрілів не тільки погіршує умови монтажу конструкцій, але і значно впливає на ґрунт і стінку нижче рівня котловану, спричиняючи додаткові напруження і деформації. В результаті чого необхідно збільшувати глибину підшви стінки відносно дна котловану або виконувати додаткові заходи для покращення характеристик ґрунту.

Для зменшення деформацій в нижній частині стінки необхідно розглянути варіант із влаштуванням контрфорсів на всю глибину кріплення.

Першим варіаційним розрахунком виконаний підбір оптимальної кількості розстрілів в найрозповсюдженішому на даний момент кріпленні «стіна в ґрунті» + розстріли. Встановлений вплив кроку розстрілів на напружено-деформований стан системи «кріплення-масив», визначена оптимальний крок розстрілів при кріпленні котловану. Встановлена залежність внутрішнього стискуючого зусилля в розстрілах при різних кроках котловану.

Запропонована альтернатива класичному розстрільному кріпленню. Прораховані варіан-

ти комбінованого кріплення за допомогою контрфорсів із поясами обв'язки, розстрілів та додаткових нижніх залізобетонних розпірок (в'язів). Встановлений вплив різної конструкції контрфорсів на напружено-деформований стан системи «кріплення-масив».

Визначена оптимальна конструкція контрфорсів та позитивний вплив влаштування додаткових нижніх залізобетонних розпірок (в'язів) на напружено-деформований стан кріплення котловану.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Глушков, Г. И. Расчёт сооружений, заглубленных в грунт [Текст] / Г. И. Глушков. – М. : Стройиздат. 1977. – 295 с.
2. Лучковский, И. Я. Применение модели слоя конечной ширины к исследованию распределения давления грунта на подпорные стены при наличии местных нагрузок на поверхности

- [Текст] / И. Я. Лучковский, А. М. Данько, А. В. Самородов. // Дороги і мости: зб. наук. праць. / ДерждорНДІ. – К., 2008. – Вип. 9
3. Лучковский, И. Я. Техническая документация (альбом конструктивных решений с данными для расчёта) по ограждающим конструкциям котлованов вблизи существующих фундаментов [Текст] / И. Я. Лучковский. – М.: ХПСНИИП, 1990.
  4. Петраков, А. А. О расчётных моделях нелинейно-деформируемого грунтового массива [Текст] / А. А. Петраков. – Полтава: ПТУ, 1995.
  5. Шихиев, Ф. М. О критических смещениях ограждения, приходящих к предельному напряжённому состоянию в засыпке [Текст] / Ф. М. Шихиев, М. Н. Виргин // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1971.

Надійшла до редколегії 02.07.2012.

Прийнята до друку 17.07.2012.

В. П. КУПРИЙ, Д. В. ТЮТЬКИН (ДИИТ)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КРЕПЛЕНИЯ ГЛУБОКОГО КОТЛОВАНА

В статье рассмотрены вопросы крепления глубоких котлованов. На основе моделирования напряженно-деформированного состояния определено влияние разных параметров, таких как количество расстрелов, вид контрфорсов, а также предложен новый способ крепления с помощью нижних железобетонных связей (распорки) под дном котлована.

*Ключевые слова:* глубокий котлован, расстрелы, моделирование, «стена в грунте», МКЭ

V. P. KYPRIY, D. V. TIUTKIN (Dniepropetrovsk National University of Railway Transport)

## MODELING STRESS-STRAIN STATE OF MOUNT DEEP DITCH

In the article describe the questions mount deep ditch. Based on the modeling of the stress-strain state determined the effect of various parameters. This parameters are the number of executions and the type of buttresses. Also proposed a new method of mount deep ditch with the lower concrete ties (spacers) under the bottom of ditch.

*Keywords:* Deep ditch, spacer, modeling, «wall in the ground», FEM