

УДК 624.154

асистент Скочко Л. О.

*Київський національний університет будівництва і архітектури*

## **ВПЛИВ ПОЛОЖЕННЯ ЯРУСІВ ПІДПІРНИХ СТІН В ПЛАНІ НА ВЕЛИЧИНУ ГОРИЗОНТАЛЬНИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ ТА ЗНАЧЕННЯ ЗГИНАЛЬНИХ МОМЕНТІВ**

Анотація: розглянуто роботу багатоярусних підпірних стін, за допомогою числового моделювання. Розв'язання задач виконано у плоскій постановці за допомогою методу скінченних елементів. Досліджено вплив зміни взаємного розташування ярусів підпірних стін в плані, а також їх взаємодія між собою. Визначені положення підпірних стін, які дозволяють зменшити витрати арматури. Приведено графіки зміни горизонтальних деформацій кожного з ярусів підпірних стін в залежності від їх взаємного розташування. Розв'язання ряду задач дало можливість аналізувати залежності між зміною взаємного положення ярусів у плані і напружено деформованим станом конструкції підпірних стін.

Ключові слова: багатоярусна утримуюча конструкція, напружено-деформований стан, числове моделювання, модель ґрунтового середовища.

**Постановка проблеми.** Сучасна щільна забудова міста, змушує забудовника все частіше обирати ділянки зі складним рельєфом. Забудова подібних ділянок потребує попереднього захисту територій, і зведення зсувозахисних споруд. Дуже часто, саме зведення підпірних стін є найбільш затратною частиною будівництва, тому інженери намагаються зробити зсувозахисні споруди не тільки надійними, а й обрати таку конфігурацію підпірних стін, яка б дозволила найбільш раціонально використати відведену територію і водночас зменшити витрати на захисні споруди. Таким рішенням може бути терасування, використання декількох ярусів підпірних стін. Таким чином, кожна з підпірних стін сприймає не весь перепад ґрунту, а певну частину. Але при проектуванні ярусів підпірних стін необхідно врахувати, що кожен з них не працює окремо, а має взаємний вплив з іншими ярусами підпірних стін. Саме цей взаємний вплив ярусів і розглянуто в даній роботі.

**Формулювання цілей та завдання публікації.** Враховуючи все описане вище розглянемо роботу кожного ярусу підпірних стін, що запроектовані для утримання спільного перепаду ґрунту, що розподілений між ними рівномірно. Визначимо, який з ярусів підпірних стін сприймає найбільший тиск ґрунту, а який є найбільш піддатливим, як впливає положення середнього ярусу в плані по відношенню до двох інших ярусів, на горизонтальні переміщення та на

зусилля, що виникають у палях підпірних стін.

### Огляд основних досліджень.

Дослідження сумісної роботи ґрунту з утримуючими конструкціями передбачає вивчення і прогнозування поведінки ґрунту під дією різних факторів. Для вирішення подібних задач необхідно, визначити змінні фізичні та механічні властивості ґрунтів, які є наслідком їх геологічного формування, і одночасно, використовується математичний апарат суцільного середовища. Саме тому так звані, континуальні моделі ґрунтового середовища найбільш уживані в теперішній час, і реалізовані в різних розрахункових комплексах.

На сьогоднішній день важливим є вибір моделі ґрунту, що буде коректно описувати сумісну роботу ґрунтового середовища та конструкцій, саме для тих видів навантажень та конструктивних особливостей споруд, які передбачені умовами роботи системи «утримуючи конструкції – ґрунтовий масив». Модель ґрунтового середовища, що була використана в розрахунках – модифікована модель Мізеса-Губера [1], що базується на дилатансійній теорії професора В. М. Ніколієвського [2]. Приріст деформацій, у цій теорії, складається з приросту пружних деформацій  $\hat{\varepsilon}^e$  та пластичних деформацій  $\hat{\varepsilon}^p$

$$\hat{\varepsilon} = \hat{\varepsilon}^e + \hat{\varepsilon}^p \quad (1)$$

Зв'язок між приростами напружень  $d\sigma$  та приростами пружних деформацій  $\hat{\varepsilon}^e$  задається співвідношенням:

$$d\sigma = \hat{C} \cdot d\hat{\varepsilon}^e \quad (2)$$

де  $\hat{C}$  - тензор констант деформування, що обраховуються за формулою:

$$C^{ijkl} = \frac{E_0}{1+\nu} \left[ \frac{1}{1-2\nu} g^{ij} g^{kl} + 0.5(g^{ij} g^{kl} + g^{il} g^{jk}) \right], \quad (3)$$

де  $E_0$  – початковий модуль пружності суцільного середовища;  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона;  $g^{ij}$  - метричний тензор.

Для визначення приросту пластичних деформацій  $d\hat{\varepsilon}^p$  використовується неасоційований закон пластичної течії.

$$d\hat{\varepsilon}^p = d\lambda \frac{\partial F}{\partial \sigma}, \quad (4)$$

де  $d\lambda$  – малий скалярний множник, що визначає абсолютну величину приростів пластичних деформацій;  $F(\sigma_{ij})$  – пластичний потенціал.

Теорія пластичної течії враховує траєкторію навантаження. Неасоційований закон пластичної течії передбачає, що поверхня пластичності, не співпадає з поверхнею пластичного потенціалу. В якості умови пластичної

течії  $f$  використовується критерій Мізеса-Губера, модифікований професором І. П. Бойко [1], для збільшення збіжності результатів моделювання із експериментальними даними у широкому діапазоні навантажень.

Умова  $f=0$  відповідає граничному стану, де  $f$  приймає вигляд:

$$f = \begin{cases} T + \sigma_m \operatorname{tg} \psi - \tau_s = 0, & \text{при } \sigma_m \geq P_0 \\ T + P_0 \operatorname{tg} \psi - \tau_s = 0, & \text{при } \sigma_m < P_0 \end{cases} \quad (5)$$

де  $T$  – інтенсивність дотичних напружень,  $\sigma_m$  – гідростатичний тиск,  $\psi$  – кут на октаедричній площадці,  $\tau_s$  – граничне значення інтенсивності дотичних напружень при відсутності гідростатичного тиску,  $P_0$  – рівень гідростатичного тиску, що визначає перехід від конічної поверхні до циліндричної (Рис. 1.).

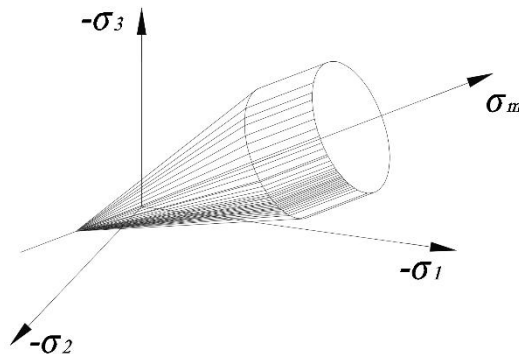


Рис. 1. Поверхні пластичності для модифікованої моделі Мізеса-Губера

В той же час, граничний рівень інтенсивності дотичних напружень  $T$  не залежить від гідростатичного тиску  $\sigma_m$ , а непружні зміни об'єму, такі як дилатансія та контракція, - не спостерігаються. В зв'язку з цим на відповідній ділянці гідростатичної осі, при  $\sigma_m < P_0$  конічна поверхня навантаження змінюється циліндричною (рис. 1). Таким чином, модифікований критерій Мізеса-Губера приймає вигляд виразу (5).

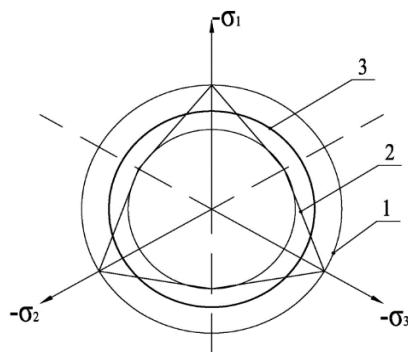


Рис. 2. Девіаторний переріз поверхні пластичності критерії:  
1 – Мізеса-Губера, 2 – Кулона-Мора, 3 – модифікований

Циліндрична форма поверхні текучості використана для опису, граничного стану ґрунту, коли переупаковка частинок майже завершилася і процес деформування дисперсного середовища стає подібним до роботи суцільного пружно-пластичного середовища.

Для розв'язку задач нелінійного деформування ґрунту використовується дилатансійна умова проф. В.М. Ніколаєвського. Важливо відмітити що дилатансія це - непружна зміна питомого об'єму зернистого середовища, і відбувається в наслідок того що ґрунт складається з мінеральних часточок, які контактують між собою. Відповідно дилатансія геометрична, і може розглядатись в якості внутрішніх зв'язків на деформаціях. В якості пластичного потенціалу Ніколаєвським використана наступна функція: [6]:

$$F = T^2 - A \cdot \operatorname{tg} \psi \cdot (\sigma_m + H)^2, \quad (6)$$

де  $A$  – коефіцієнт дилатансії ( при  $A < 0$  рівняння 6 в координатах  $(T, \sigma_m)$  визначає еліпс, при  $A = 0$  - пряму, при  $A > 0$  – гіперболу),  $H$  – граничний опір всебічному стиску. Але для побудови розрахункових співвідношень достатньо використати наступне співвідношення:

$$d\varepsilon^p = A(\chi, \sigma_m) d\gamma^p, \quad (7)$$

де  $d\varepsilon^p$  – приріст об'ємної пластичної деформації,  $\chi$  – параметр зміцнення,  $d\gamma^p$  – приріст інтенсивності пластичних деформацій зсуву.

В залежності від співвідношень щільностей  $\rho_i$  та  $\rho_{cr}$ , коефіцієнт дилатансії може бути додатним (при  $\rho_i > \rho_{cr}$ ), що відповідає явищу дилатансії (розрихлення), рівним нулю, (при  $\rho_i = \rho_{cr}$ ) – досягнення критичної щільності та від'ємним (при  $\rho_i < \rho_{cr}$ ), визначає контрактансію (ущільнення). Таким чином, в процесі деформування ґрунту в межах дилатансійної теорії моделюється зміна таких взаємопов'язаних параметрів, як кут внутрішнього тертя та щільність в залежності від коефіцієнта дилатансії.

Модифікована модель Мізеса-Губера використана у чисельному моделюванні випробувань паль на горизонтальне навантаження [5]. Результати чисельного моделювання показали високу збіжність з результатами натурних випробувань, і навіть на останньому етапі навантажень похибка була близько 30%. Таким чином дана модель ґрунтового середовища використана при розрахунках підпірних стін.

Вхідною інформацією при проектуванні підпірних стін зазвичай є загальний перепад ґрунту, який необхідно утримати, та відстань між верхнім і нижнім ярусами підпірних стін, тобто та частина ділянки що виокремлена генпланістами під зведення зсувозахисних конструкцій. Розглянемо роботу трьохярусної підпірної стінки у супіщаних ґрунтах.

Для визначення впливу положення ярусів в плані було вирішено 17 задач, відмінність задач між собою – різне положення середнього ярусу підпірних стін. Відстань між верхнім і нижнім ярусами для всього комплексу задач,  $L$  – стала величина. Тобто змінною, для задач, є відстань між верхнім і середнім ярусами підпірних стін. Кожна наступна вирішена задача змінює положення підпірної стіни на 1 м у бік нижнього ярусу.

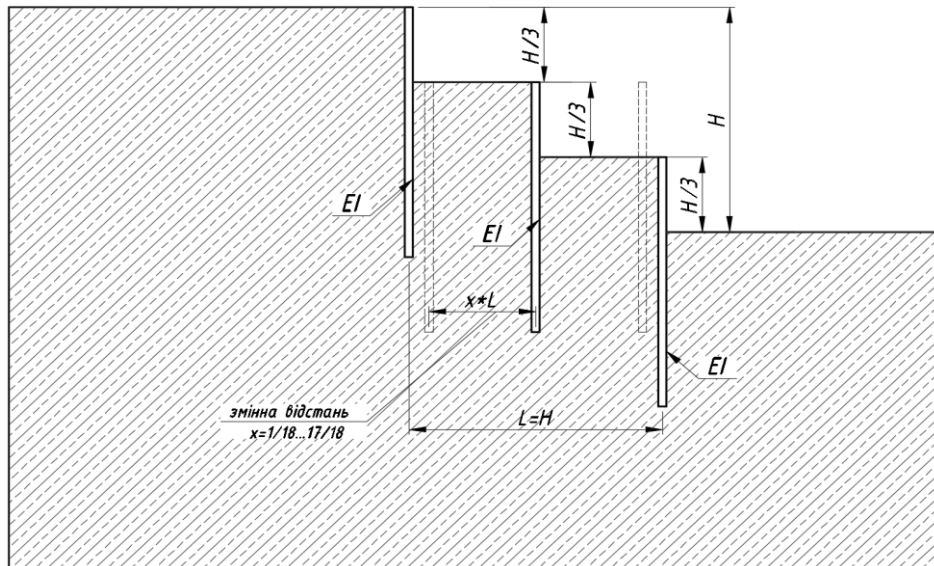


Рис. 3. Розрахункова схема, для визначення впливу взаємного положення ярусів підпірних стін в плані на напружено деформований стан системи «грунтовий масив- утримуючі конструкції», для супісків, при співвідношенні  $L=H$

Створено розрахункову схему трьох ярусів підпірних стін. (рис. 2) Кожен ярус підпірних стін має однакову жорсткість  $EI$  та однаковий перепад ґрунту. Тобто, якщо загальний перепад ґрунту –  $H$ , то величина перепаду ґрунту для кожного ярусу -  $H/3$ .

Для виключення впливу нашарувань ґрунту, підпірні стіни знаходяться у однорідному супіску, з наступними характеристиками: питома вага ґрунту,  $\gamma=20,2 \text{ кН/м}^3$ ; коефіцієнт Пуассона,  $\nu=0,3$ ; питоме щеплення,  $C=15 \text{ кПа}$ ; кут внутрішнього тертя,  $\varphi=26 \text{ град}$ ; модуль деформації,  $E=38 \text{ МПа}$ .

Нижче, наведено графіки значень горизонтальних переміщень голів паль при різних положеннях середнього ярусу в плані. Значення показані на графіках отримані, в результаті вирішення ряду задач з наступними вхідними даними:  $H=L=18\text{м}$ , палі підпірних стін – буронабивні, діаметром 820 мм, розташовані з кроком 1 м. Поетапно, змінюючи положення середнього ярусу кроком 1 м, для вирішення кожної наступної задачі, отримуємо 17 положень середнього ярусу і відповідно відстань між верхнім та середнім ярусом

змінюється в межах від 1 до 17 м (або від  $1/18L$  до  $17/18L$ ).

Отримані дані показали, що при значеннях  $x=10/18\dots17/18$  (див. рис.2) приріст горизонтальних переміщень верхнього ярусу підірних стін майже відсутній, а наближення середнього ярусу до верхнього в межах значень  $x$  від  $10/18$  до  $1/18$  показало збільшення деформацій верхньої підірної стіни на 68%. Це зумовлено тим, що при наближенні середнього ярусу до верхнього об'єм ґрунтового масиву, що утримує верхню підірну стінку зменшується, і напруження перерозподіляються нижче по схилу.

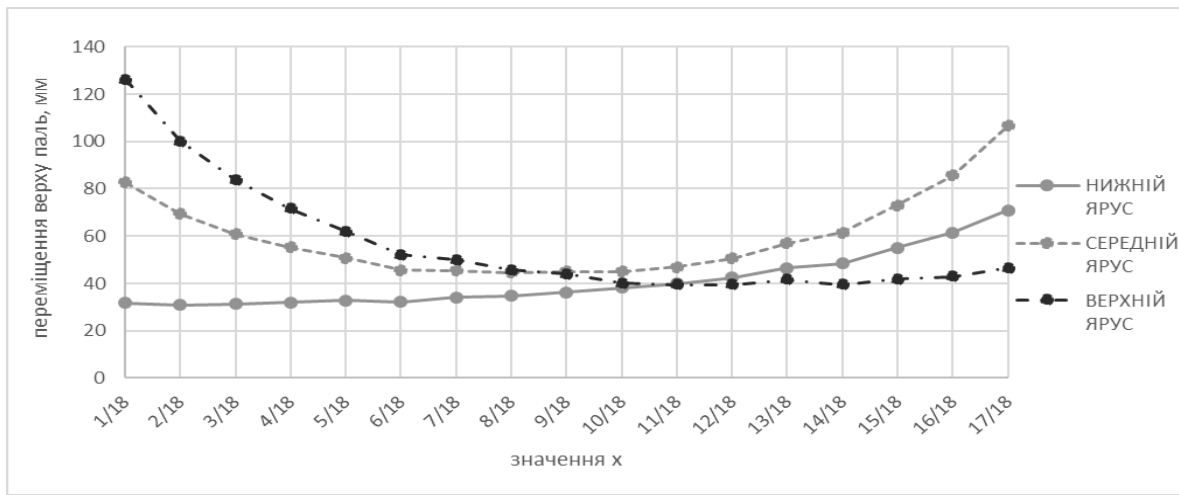


Рис. 4. Переміщення голів паль кожного ярусу підірних стін в залежності від їхнього взаємного положення в плані, для супісків, при співвідношенні  $L=H$

Для середнього ярусу підірних стін, його положення на відстані  $6/18L\dots10/18L$  майже не впливає на власні горизонтальні переміщення. Максимальні значення горизонтальних переміщень для цього ярусу підірних стін отримані при максимальному його наближенні до нижньої підірної стіни. Різниця між максимальними і мінімальними значеннями горизонтальних переміщень для середнього ярусу складає 58%.

Найменший вплив від положення ярусів на горизонтальні переміщення - для нижнього ярусу підірних стін. Коли середній ярус розташований на відстані  $1/18L\dots6/18L$ , горизонтальні переміщення нижнього ярусу майже не змінні. Але, поступове наближення середньої підірної стіни до нижнього ярусу призводить до зростання горизонтальних переміщень до 54%.

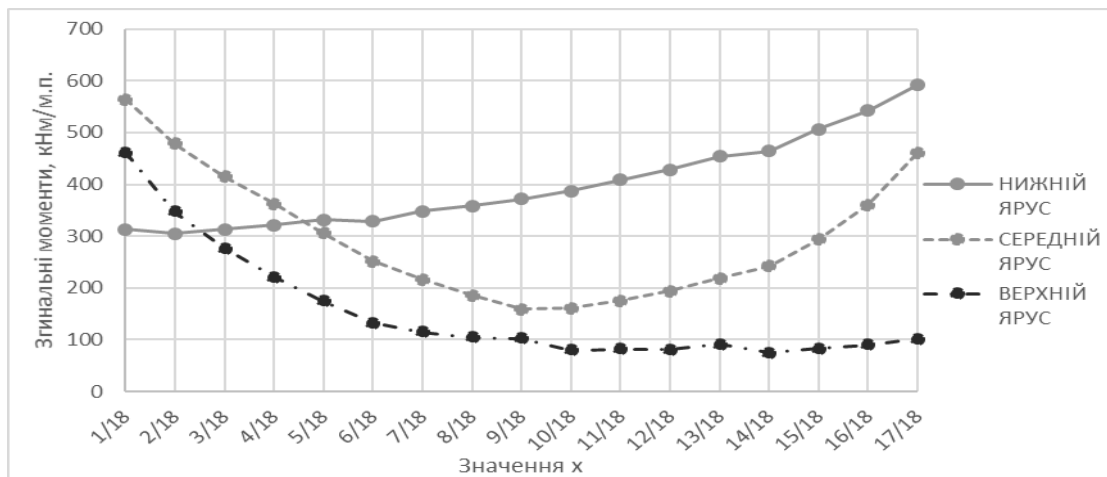


Рис. 5. Згинальні моменти для кожного ярусу підпірних стін в залежності від їхнього взаємного положення в плані, для супісків, при співвідношенні  $L=N$

Характер зміни згинальних моментів для верхнього ярусу підпірних стін (рис. 4) подібний до характеру зміни горизонтальних переміщень для цього ярусу: при значеннях  $x=10/18\dots17/18$  значення згинальних моментів не змінюється, а наближення середнього ярусу до верхнього в межах значень  $x$  від  $10/18$  до  $1/18$  показало зростання зусиль у палях верхньої підпірної стіни на 78%. Тобто, якщо необхідно зменшити значення згинальних моментів, або горизонтальні переміщення верхнього ярусу підпірних стін, важливо розуміти, що зміна положення середнього ярусу, майже не впливає, а ні на згинальні моменти, а ні на горизонтальні переміщення, коли середній ярус знаходиться на відстані більше ніж  $0,5L$  від верхнього.

Мінімальні значення згинальних моментів у палях середнього ярусу виникають, коли він розташований рівно по середині між верхнім і нижнім ярусами в плані. Максимальні значення згинальних моментів для середнього ярусу підпірних стін, як і у попередньому комплексі задач виникають коли цей ярус розташований максимально близько до верхнього.

Накопичення напружень із розробкою котловану зумовлює те, що у більшості випадків положення середнього ярусу максимальні згинальні моменти виникають у нижній підпірній стінці. Зусилля, що виникають у палях нижньої підпірної стінки поступово зростають по мірі наближення до неї середнього ярусу підпірних стін. Різниця між максимальним і мінімальним значеннями згинальних моментів при різному положенні середнього ярусу складає 48%.

З метою визначення найбільш раціонального положення підпірних стін у плані, з точки зору витрат арматури, значення згин моментів всіх ярусів були

складені і побудовано інтегральний графік залежності між значеннями згинальних моментів і положенням середнього ярусу в плані (рис. 5.).

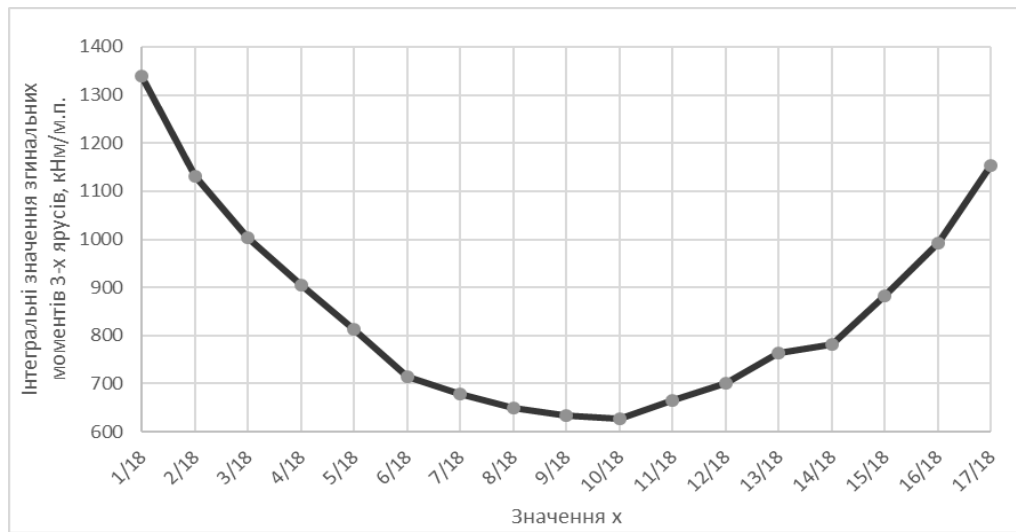


Рис. 5. Графік залежності інтегральних значень згинальних моментів 3-х ярусів підірних стін від розташування середнього ярусу у плані, для супісків, при співвідношенні  $L=H$

Відповідно до отриманого графіку (рис. 5) мінімальна сума згинальних моментів для трьох ярусів підірних стін відповідає положенню середнього ярусу при  $x=10/18$  (рис. 1). Також, якщо розділити загальну відстань між ярусами підірних стін,  $L$  на 3 рівні частини, то найменші сумарні зусилля для трьох ярусів виникають, коли середня підірна стіна розташована в межах другої третини.

Побудова графіку залежності інтегральних значень згинальних моментів 3-х ярусів підірних стін від розташування середнього ярусу у плані показала, положення середнього ярусу при якому сума згинальних моментів всіх ярусів – мінімальна. За отриманим графіком видно, що розташування ярусів у плані впливає на зусилля, що виникають у всіх ярусах підірних стін і правильний вибір цього розташування дозволяє зменшити витрати на армування паль біля 2-х разів. При співвідношенні  $L=H$  у супіщаних ґрунтах різниця між максимальною і мінімальною сумою згинальних моментів складає 53%.

### Висновки.

1. Використана модель, що базується на теорії пластичної течії, забезпечує врахування характеру навантажень і дозволяє прийняти раціональну конструкцію підірних стін.

2. За даними числового експерименту виявлені і зони розташування середнього ярусу підірних стін, коли фіксуються максимальні згинальні моменти які виникають у нижній підірній стінці і максимальні горизонтальні



переміщення – у верхній.

3. Розроблена методика забезпечує виявлення зони максимальних моментів, а за їх значенням обирається раціональне положення утримуючих конструкцій, що дозволяє зменшити витрати арматури до 2-х разів.

#### Список використаних джерел:

1. *Бойко И. П.* Свайные фундаменты на нелинейно-деформируемом основании: дис. доктора тех. наук. 05:23:02 / *Бойко Игорь Петрович.* – К., 1988. – 372 с.

2. *Николаевский В. Н.* Современные проблемы механики грунтов / *В. Н. Николаевский* // Определяющие законы механики грунтов. – М. Стройиздат, 1975. – С. 210–227.

3. *Скочко Л. О.* Рівняння параметрів стану та положення в'язей сітчастих структур / *Л. О. Скочко, В. І. Скочко* // Основи і фундаменти. – К. КНУБА, 2013. – Вип. 34. – с 47-57.

4. *Boyko I. P.* Finite element simulation of the loss of stable resistance in a foundation-soil system/ *I. P. Boyko, V. S. Boyandin, A. E. Delnik A. L. Kozak., A. S. Sakharov* //Archive of Applied Mechanics - 1992. - issue. 62. – 315-328.

5. *Скочко Л. О.* Особливості числового моделювання напружено-деформованого стану багатоярусних підпірних стін з врахуванням зміни конфігурації їх окремих ярусів/ *Л.О. Скочко* // Енергозбереження в будівництві та архітектурі. – Вип. 9.– Київ: КНУБА, 2017. С. 227–231.

6. *Николаевский В. Н.* Дилатансия и законы необратимого деформирования грунтов / *В. Н. Николаевский* // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1979. - №5 с. 29-32.

#### Аннотация

Рассмотрено работу многоярусных подпорных стен, с помощью численного моделирования. Решение задач выполнено в плоской постановке, с помощью метода конечных элементов. Исследовано влияние изменения положения ярусов в плане, а также их взаимодействие между собой. Определены положения подпорных стен, которые позволяют уменьшить расход арматуры. Приведено графики изменения горизонтальных деформаций каждого из ярусов подпорных стен в зависимости от их взаимного расположения. Решение ряда задач дало возможность проанализировать зависимости между изменением взаимного положения ярусов в плане и напряженно-деформированным состоянием конструкции подпорных стен.

Ключевые слова: многоярусная удерживающая конструкция, напряженно-деформированное состояние, численное моделирование, модель грунтовой среды.

### Annotation

The work of multi-level retaining walls is considered using numerical simulation. All calculations, which are described in this article, are made in a flat setting, using the finite element method. The influence of the changing the position of the levels in the plan, and the way in which their location affects the operation of each tier are investigated. The positions of the retaining walls that allow to reduce the expenditure of reinforcement are determined. Graphs of changing horizontal displacement of each of the levels of retaining walls are shown, depending on their mutual arrangement. The solution of a number of tasks made it possible to analyze the relationships between the changing the mutual position of the longlines in the plan and the stress-strain state of the retaining wall construction.

Key words: multi-level retaining structure, stress-strain state, numerical simulation, soil model.