

БУДІВНИЦТВО

УДК 624.137.5

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.3/40>**Лучковський І.Я.**

Харківський національний університет будівництва та архітектури

Єсакова С.В.

Харківський національний університет будівництва та архітектури

Чепурний Д.О.

Харківський національний університет будівництва та архітектури

РОЗВИТОК ТИСКУ НА ПІДПІРНІ СТІНИ, ЩО УТРИМУЮТЬ УКОС ІЗ ДВОШАРОВОЮ ЗАСИПКОЮ ТА НАВАНТАЖЕННЯМ НА ПОВЕРХНІ

Під час проектування підірних стін відсутні методи обліку багатошарової основи за наявності навантажень на поверхні засипки. Існуючі методи не можуть бути використані, оскільки в кожному шарі неоднорідної засипки за врахування власної ваги ґрунту приймається свій не вигідний кут нахилу площин зсуву, а закономірності поширення в масиві тисків від різного виду корисних навантажень поки не знайдено. Тому для багатошарового ґрунту використання навіть найпростішого методу суперпозиції, за якого підсумовується тиск від ваги ґрунту і навантажень на поверхні, залишається технічно не здійсненним. Таким чином, розроблення методу, що дає змогу визначати бічний тиск багатошарової засипки за наявності навантаження на поверхні, є актуальним завданням для будівництва.

Під час проведення лабораторних експериментальних досліджень розподілу площин зсуву по глибині багатошарової ґрунтової засипки підірних стін нами встановлено, що з ростом глибини нахил площин зсуву змінюється, однак кожній глибині відповідає єдина площина, що проходить від поверхні ґрунту до розглянутої точки внутрішньої поверхні стінки незалежно від кількості шарів засипки. При цьому цей ефект не залежить від послідовності шарів із різними фізико-механічними характеристиками по глибині засипки.

Ухвалення єдиної площини ковзання для кожної глибини підірної стінки дає змогу сформулювати нові принципи визначення горизонтального тиску на підірну стінку з урахуванням навантажень на поверхні засипки та вирішити завдання визначення тиску у багатошаровій основі з навантажень на поверхні засипки, у тому числі для засипок, що мають укіс.

Також у роботі наведено конкретний розрахунок визначення горизонтального тиску ґрунту, що одержуваний за запропонованою методикою, та порівняння цих результатів із результатами вирішення завдання за допомогою програмної системи скінчено-елементного аналізу Plaxis.

Ключові слова: площини зсуву, призма обвалення, підірна стіна, горизонтальний тиск, смугове навантаження, багатошарова основа.

Постановка проблеми. Під час проектування підірних стін відсутні методи обліку багатошарової основи за наявності навантажень на поверхні засипки. Існуючі методи не можуть бути використані, оскільки в кожному шарі неоднорідної засипки за врахування власної ваги ґрунту приймається свій не вигідний кут нахилу площин зсуву, а закономірності поширення в масиві тисків від різного виду корисних навантажень поки не знайдено. Тому для багатошарового ґрунту використання навіть найпростішого методу суперпози-

ції, за якого підсумовується тиск від ваги ґрунту і навантажень на поверхні, залишається технічно не здійсненним. Таким чином, розроблення методу, що дає змогу визначати бічний тиск багатошарової засипки за наявності навантаження на поверхні, є актуальним завданням для будівництва.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Г.К. Клейн [1] дав наближену розрахункову схему для зосередженої сили, і ним же надано два варіанти визначення тиску від смугових навантажень обмеженої ширини.

Теоретичні дослідження дії місцевого навантаження на поверхні, виконані В.В. Синельниковим [2, с. 245–253], виявили наявність двох видів площин ковзання за одночасної дії тимчасового навантаження і ваги ґрунту. Тимчасове навантаження q різної інтенсивності сприяє підняттю початкової точки передачі горизонтального тиску на огорожу. За високої інтенсивності q кут нахилу до горизонту площини ковзання, що проходить через найближчу до стінки межу площадки навантаження, становить не θ_0 , а φ , тобто горизонтальний тиск передається значно вище, ніж за нормативною методикою. В.В. Синельников, проводячи чисельні дослідження конкретних прикладів, виявив на деякій глибині стінки з віддаленим на відстані a смуговим навантаженням наявність стрибка напруги σ , викликаним дією навантаження q .

А.Н. Богомолівим за співавторами [3] розроблено два нових підходи до визначення сил активного тиску ґрунту на елементи огорожувальних конструкцій будівельного котловану. Перший підхід полягає у тому, що як зігнута вісь вертикальної балки розглядається крива, що є обвідною епюри гіпотетичних горизонтальних переміщень, які можуть отримати точки, що лежать на вертикальній поверхні укусу, за умови, що під дією власної ваги і тимчасового навантаження укiс деформується не руйнуючись. Другий підхід заснований на методі розрахунку сил зсувного тиску. Проведено зіставлення отриманих результатів і відзначено можливість отримання істотного економічного ефекту, однак відзначено необхідність проведення експериментальних досліджень для обґрунтування можливості практичного використання зроблених пропозицій.

В.К. Квітковим [4] запропоновано методику розрахунку системи «ґрунт – підпірна стінка» за допомогою вирішення відповідних контак-

тних задач плоскої теорії пружності. Методика дає змогу врахувати вплив розмірів поперечного перерізу стінки, міцності матеріалу, з якого вона виготовлена, а також врахувати вплив на стійкість системи поверхневих навантажень.

І.Я. Лучковським і співавтором [5] розглянуто характер зміни активного тиску ґрунту за наявності на засипці підпірних стін смугових навантажень малої ширини, виявлено закономірності розподілу поверхонь ковзання за наявності навантаження на поверхні засипки.

Як видно з наведеного аналізу, сьогодні інженерні методи теорії граничної рівноваги у ґрунтовій засипці з урахуванням багат шаровості основи і навантаження на поверхні не розроблено, відсутні експериментальні дані про характер розподілу площин ковзання за багат шарової засипки; практично відсутні експериментальні дослідження розподілу горизонтального тиску на підпірні стіни, які утримують багат шарову основу; не встановлено закономірності впливу місцевих навантажень на розподіл горизонтального тиску на підпірні стіни в ідеально пружному середовищі (стані спокою).

Постановка завдання. Визначення тиску на підпірну стіну, що утримує схил та характерні положення площин ковзання, що проходять через двошаровий масив ґрунту зі смуговим навантаженням на поверхні.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Під час проведення лабораторних експериментальних досліджень розподілу площин зсуву по глибині багат шарової ґрунтової засипки підпірних стін нами встановлено, що з ростом глибини нахил площин зсуву змінюється, однак кожній глибині відповідає єдина площина, що проходить від поверхні ґрунту до розглянутої точки внутрішньої поверхні стінки, незалежно від кількості шарів засипки (рис. 1). При цьому цей ефект не залежить від послідовності шарів із різними фізико-механічними характеристиками по глибині засипки.

Ухвалення єдиної площини ковзання для кожної глибини підпірної стінки дає змогу сформулювати нові принципи визначення горизонтального тиску на підпірну стінку з урахуванням навантажень на поверхні засипки:

- масив засипки між стінкою і площиною ковзання ділиться на окремі призми, що спираються в межах кожного шару h_i на площину обвалення;

- призми поділяються вертикальними площинами, що проходять із точок перетину

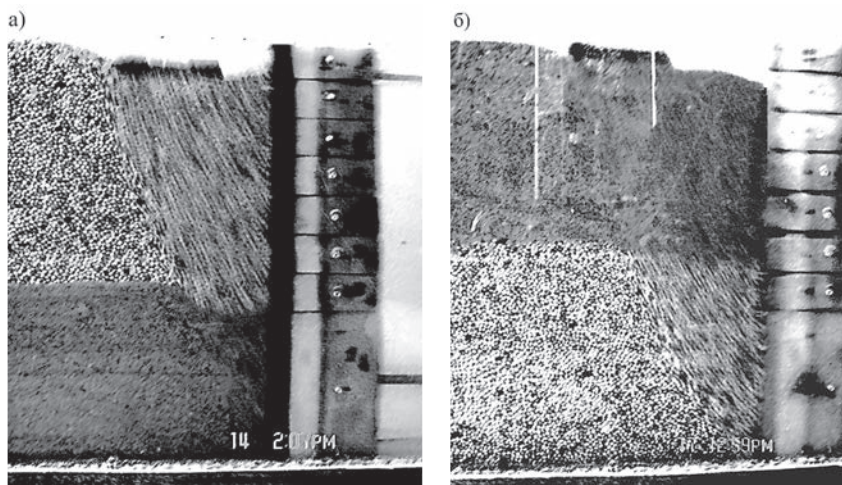
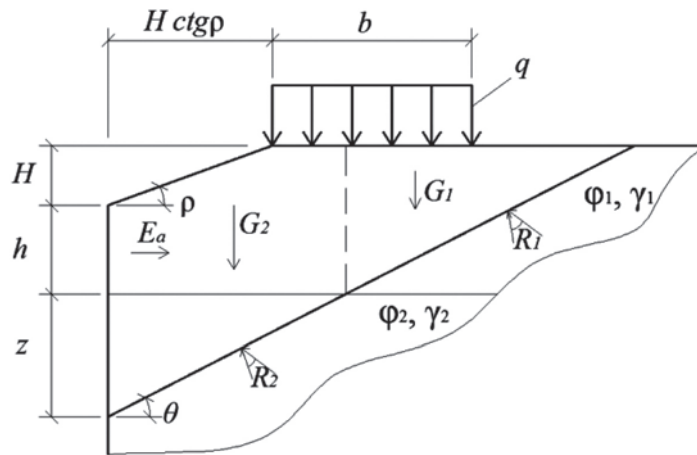
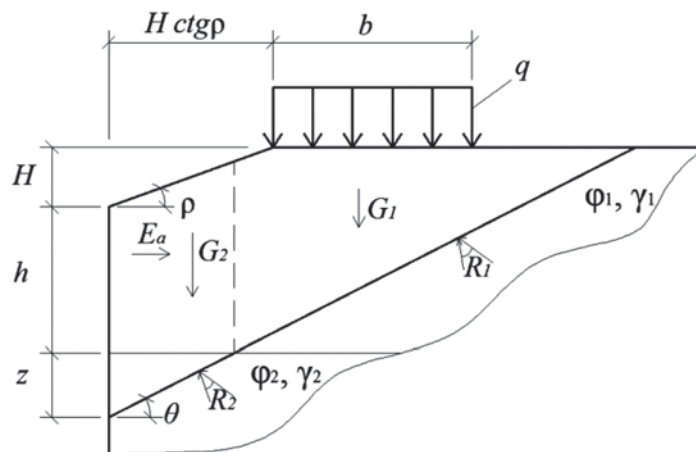


Рис. 1. Фотографія виникнення площини обвалення у двошаровій засипці зі смуговим навантаженням за горизонтального зсуву підпірної стінки: а – просо – пісок, б – пісок – просо



$$\left. \begin{aligned} G_1 &= \frac{\gamma_1(H+h)^2 \operatorname{ctg} \theta}{2} + (H \operatorname{ctg} \rho + b - z \operatorname{ctg} \theta)q; \\ G_2 &= \gamma_2 \frac{z^2 \operatorname{ctg} \theta}{2} + \gamma_1 \left[(H+h)z \operatorname{ctg} \theta - \frac{H^2 \operatorname{ctg} \rho}{2} \right] + (z \operatorname{ctg} \theta - H \operatorname{ctg} \rho)q. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Рис. 2. Випадок 1. Розташування площин ковзання у двошаровій засипці з укосом



$$\left. \begin{aligned} G_1 &= \gamma_1 \left[\frac{(h+H)^2}{2} \operatorname{ctg} \theta - \frac{H \operatorname{ctg} \rho - z \operatorname{ctg} \theta}{2} (H - z \operatorname{ctg} \theta \operatorname{tg} \rho) \right] + qb; \\ G_2 &= z \operatorname{ctg} \theta \left[\gamma_2 \frac{z}{2} + \gamma_1 \left(h + \frac{z \operatorname{ctg} \theta \operatorname{tg} \rho}{2} \right) \right]. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Рис. 3. Випадок 2. Розташування площин ковзання у двошаровій засипці з укосом

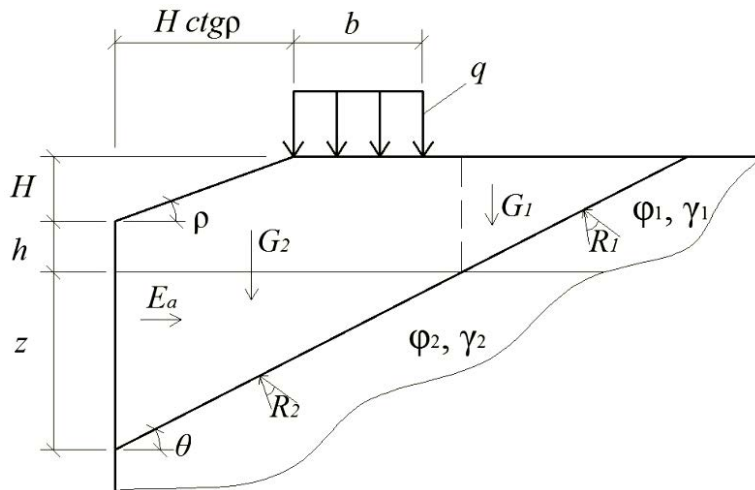
площини ковзання (обвалення) з межами шарів ґрунту до поверхні засипки (на ділянках, що не мають навантаження на поверхні) або до підшви місцевого навантаження;

– частина розподіленого навантаження, що знаходиться на будь-якій призмі, підсумовується з вагою цієї призми, тобто входить у величину G_i ;

– взаємодія призм по вертикальних площинах не враховується;

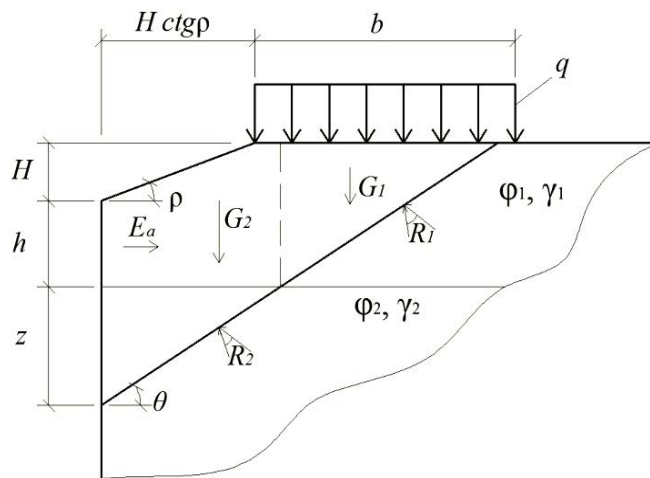
– кожній глибині відповідає своя площина ковзання, положення якої не залежить від загальної глибини стінки.

На рис. 2–7 представлено шість характерних положень площин ковзання, що проходять через двошаровий масив ґрунту. На цих розрахункових схемах дано також формули для визначення G_1 та складників ваги повної призми зсуву на глибині z_i другого шару, що відповідають прийнятому куту θ_i на кожному етапі ітерації.



$$\left. \begin{aligned} G_1 &= \gamma_1 \frac{(h+H)^2 \operatorname{ctg} \theta}{2}; \\ G_2 &= \gamma_2 \frac{z^2 \operatorname{ctg} \theta}{2} + \gamma_1 \left[(H+h)z \operatorname{ctg} \theta - \frac{H^2 \operatorname{ctg} \rho}{2} \right] + qb. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Рис. 4. Випадок 3. Розташування площин ковзання у двошаровій засипці з укосом



$$\left. \begin{aligned} G_1 &= \frac{\gamma_1 (H+h)^2 \operatorname{ctg} \theta}{2} + (H+h)q \operatorname{ctg} \theta; \\ G_2 &= \gamma_2 \frac{z^2 \operatorname{ctg} \theta}{2} + \gamma_1 \left[(H+h)z \operatorname{ctg} \theta - \frac{H^2 \operatorname{ctg} \rho}{2} \right] + (z \operatorname{ctg} \theta - H \operatorname{ctg} \rho)q. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Рис. 5. Випадок 4. Розташування площин ковзання у двошаровій засипці з укосом

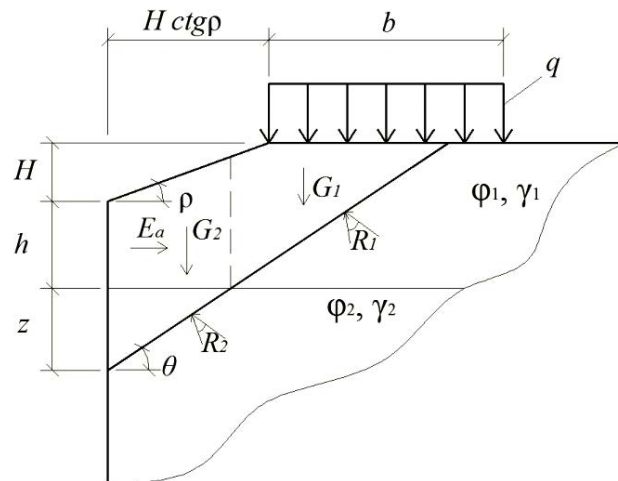
При цьому значення рівнодіючої горизонтального тиску E і функцій F_1 та F_2 визначається за формулами:

$$E = G_1 F_1 + G_2 F_2$$

де $F_i = \operatorname{ctg} \theta \operatorname{tg} (\theta - \varphi_i)$.

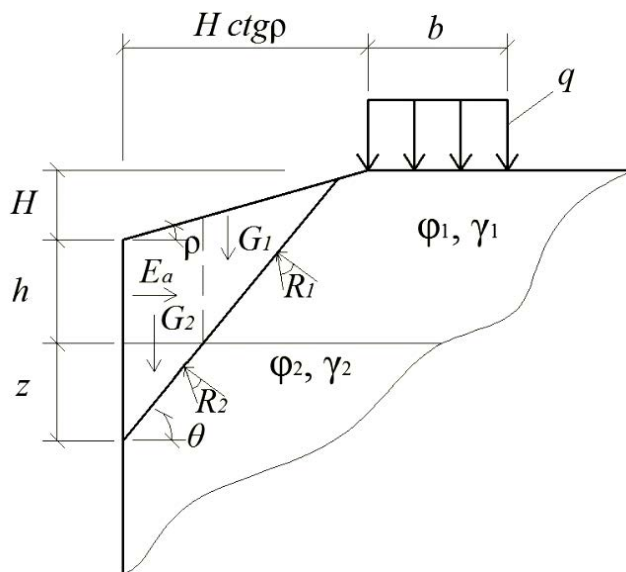
Приклад.

Як приклад було розглянуто двошарову основу з такими характеристиками: $\gamma_1 = \gamma_2 = 2 \text{ тс/м}^3$, $\varphi_1 = 30^\circ$, $\varphi_2 = 20^\circ$, висота укосу $H = 1 \text{ м}$, $h = 3 \text{ м}$, $\rho = 20^\circ$. Основу завантажено смуговим навантаженням $q = 5 \text{ тс/м}^2$, $b = 3 \text{ м}$.



$$\left. \begin{aligned}
 G_1 &= \gamma_1 \left[\frac{(h+H)^2}{2} \text{ctg} \theta - \frac{H \text{ctg} \rho - z \text{ctg} \theta}{2} (H - z \text{ctg} \theta \text{tg} \rho) \right] + q [(H+h+z) \text{ctg} \theta - H \text{ctg} \rho]; \\
 G_2 &= z \text{ctg} \theta \left[\gamma_2 \frac{z}{2} + \gamma_1 \left(h + \frac{z \text{ctg} \theta \text{tg} \rho}{2} \right) \right].
 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Рис. 6. Випадок 5. Розташування площин ковзання у двошаровій засипці з укосом



$$\left. \begin{aligned}
 G_1 &= \frac{\gamma_1 \text{ctg}^2 \theta}{2} \left(\frac{(h+z)^2 \sin \theta \sin \rho}{\sin(\theta - \rho)} - z^2 \text{tg} \rho + \frac{h^2}{\text{ctg} \theta} \right); \\
 G_2 &= \gamma_2 \frac{z^2 \text{ctg} \theta}{2} + \gamma_1 \left(h z \text{ctg} \theta + \frac{z^2 \text{ctg}^2 \theta \text{tg} \rho}{2} \right).
 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Рис. 7. Випадок 6. Розташування площин ковзання у двошаровій засипці з укосом

На рис. 8а показано площини зсуву по глибині масиву, а на рис. 8б дано епюри горизонтальних напружень σ .

Висновки. У практиці проектування підпірних стін інженерні методи розрахунку багат шарової основи не розроблено. Існуючі методи

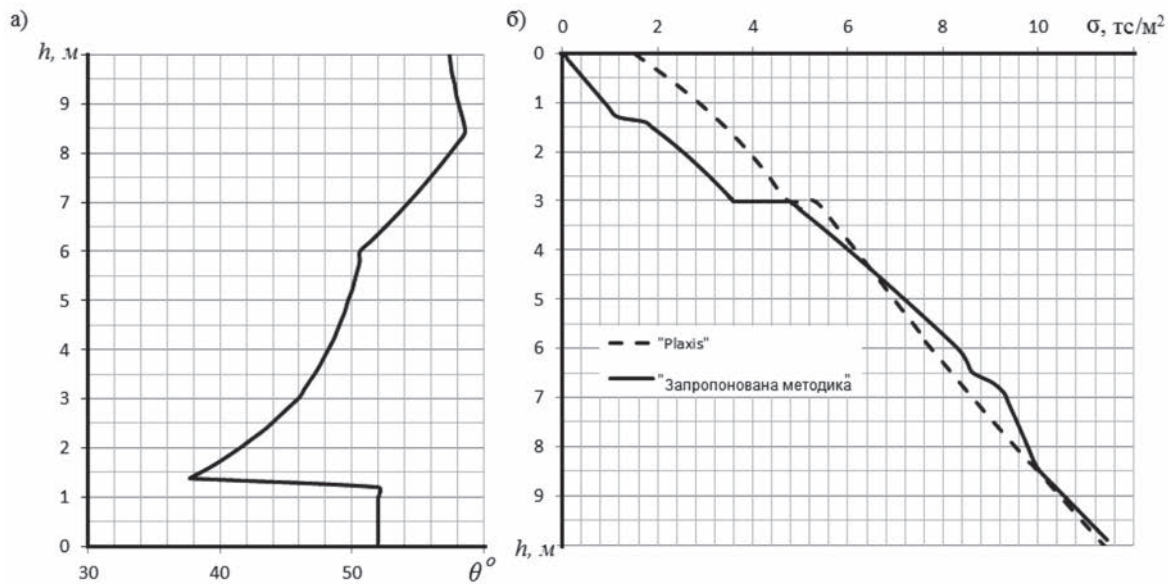


Рис. 8. Приклад розрахунку активного тиску за наявності смугового навантаження на поверхні засипки з укосом: а) площини зсуву; б) епюри горизонтальних напружень σ

не можуть бути використані, оскільки в кожному шарі неоднорідної засипки під час розрахунку власної ваги ґрунту приймається свій невідгдний кут нахилу площин зсуву, а закономірності поширення в масиві тисків від місцевих (смугових) навантажень поки не знайдено. Тому для багатшарового ґрунту використання навіть найпростішого методу суперпозиції залишається технічно не здійсненним.

Прийняття підтвердженої лабораторними дослідженнями гіпотези про існування в багатшаровій засипці на будь-якій глибині підірних

стін єдиної площини ковзання дало змогу створити чисельний метод визначення горизонтального тиску ґрунту за наявності смугового навантаження q , у тому числі для підірних стін, що утримують укіс.

Зіставлення епюр горизонтального тиску ґрунту, одержуваних за запропонованою методикою і за програмою Plaxis (де використовується МСЕ), показує близькість одержуваних результатів, хоча у верхньому шарі Plaxis завищує результати, що одержані з використанням принципів теорії Ш. Кулона.

Список літератури:

1. Клейн Г.К. Строительная механика сыпучих тел. Москва : Стройиздат, 1977. 256 с.
2. Синельников В.В. Развитие метода Кулона при определении давления сыпучего тела. *Строительная механика*. 1946. Вып. 69. С. 241–265.
3. Два новых подхода к определению горизонтального давления ґрунта на ограждающие конструкции котлована / А.Н. Богомолов и др. *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия «Строительство и архитектура»*. 2012. Вып. 29(48). С. 26–35.
4. Цветков В.К. Расчет системы «ґрунт – подпорная стенка» на основе анализа их напряженного состояния. *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия «Строительство и архитектура»*. 2008. Вып. 10(29). С. 41–46.
5. Лучковский И.Я., Данько А.М. Распределение давления ґрунта на подпорные стены при «узких» площадках нагружения поверхности полосовой нагрузкой. *Коммунальное хозяйство городов. Серия «Технические науки и архитектура»*. 2010. Вып. 93. С. 471–479.

Luchkovsky I.Ya., Chepurnyi D.O., Yesakova S.V. DEVELOPMENT OF PRESSURE ON RETAINING WALLS THAT KEEPS THE SLOPE WITH DOUBLE-LAYER FILLING AND SURFACE LOADS

In the design of retaining walls no accounting methods multilayered bases in the presence of stress on the surface of the filling. Existing methods cannot be used, as each layer of inhomogeneous backfill, taking into account its own soil weight, takes its unfavorable angle of inclination of the landslide planes, and the patterns of propagation in the array of pressures from different types of payloads have not yet been found. Therefore, at

present, for multilayer soil, using of even the simplest method of superposition, which summarizes the pressure from the weight of the soil and the loads on the surface, remains technically impossible. Thus, the development of a method that allows to determine the lateral pressure of the multilayer backfill in the presence of a load on the surface, is an urgent task for construction.

In laboratory experimental studies of the distribution of landslide planes along the depth of multilayer soil backfill, we found that with increasing depth, the slope of the landslide planes changes, but each depth corresponds to a single plane passing from the soil surface to the considered point of the inner surface of the wall, regardless of the number of backfill layers. This effect does not depend on the sequence of layers with different physical and mechanical characteristics along the backfill depth.

Adoption of a single sliding plane for each depth of the retaining wall allows to formulate new principles for determining the horizontal pressure on the retaining wall considering the loads on the backfill surface and solve the problem of determining the pressure in a multilayer base from loads on the backfill surface, including for backfills.

Also in the work the concrete calculation of definition of horizontal pressure of the soil received by the offered technique and comparison of these results with results of the decision of a problem by means of the software system of the finite element analysis "Plaxis".

Key words: *shear planes, collapse prism, retaining wall, horizontal pressure, strip load, multilayer base.*