

Р. Халіфе, Н.П. Меліш

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна

ВАРІАТИВНИЙ СПОСІБ ПОШУКУ РАЦІОНАЛЬНОГО ОБРИСУ ЗАДНЬОЇ ГРАНІ ПІДПІРНОЇ СТІНИ

Представлена постановка і реалізація варіативного завдання пошуку оптимального обрису задньої грані підпірної стіни. Суть методу полягає в апроксимації криволінійної котра утворює ламаної лінією і пошуку раціональної комбінації кутів нахилу ділянок. Виведено ключові залежності і описаний алгоритм рішення задачі. Реалізація підходу продемонстрована на чисельному прикладі.

Ключові слова: підпірна стіна, криволінійна поверхня, апроксимація, варіаційний підхід.

Постановка проблеми

Конструктивні елементи будівель і споруд, що сприймають бокове навантаження від сипучого середовища, відносяться до таких систем, в яких величина і характер навантаження безпосередньо залежить від конфігурації елемента, що сприймає це навантаження. Тут можна провести аналогію з такими динамічними системами аеро- і гідродинаміки, як крило літака або корпус плавального кошти. Форма згаданих елементів задає характер впливають на них потоків, які при розрахунках задають навантаження.

До будівельних конструкцій розглянутого типу відносяться стінки зерносховищ, бункерів, силосів, стіни підвалів, берегоукріплювальні споруди і, найбільш поширеними можна вважати підпірні стіни. Загальноприйнятою теорією тиску незв'язного сипучого на бічну поверхню, зокрема, ґрунту на підпірні стіни, є теорія Кулона [1], згідно з якою величина бічного тиску сипучого визначається як:

$$q_h = \lambda \gamma h \quad (1)$$

де: γ - об'ємна вага сипучого;

h - висота вищерозміщених товщі сипучого;

λ - коефіцієнт бокового тиску сипучого, який визначається як:

$$\lambda = \left[\operatorname{tg} \left(45 - \frac{270 + \varphi + \alpha}{2} \right) + \operatorname{tg}(270 + \alpha) \right]^2 \cos(270 + \alpha) \quad (2)$$

де: φ - кут внутрішнього тертя сипучого;

α - кут між вертикальною площиною і задньою гранню сприймає бічний тиск конструкції.

З (1,2) випливає, що зменшення кута нахилу задньої грані підпірної стіни (α) призводить до зменшення величини діючої на стіну навантаження [2]. При прагненні величини кута нахилу задньої

грані до кута природного укосу ($\alpha \rightarrow \varphi$) величина бічного тиску q_h прагнуть до нуля. Можлива така ситуація, коли бічний тиск сипучого відсутня - конструкція власною вагою впливає на масив сипучого, який, в свою чергу, зайняв форму призми з куту нахилу ската рівним куту природного укосу сипучого. Зі сказаного можна припустити, що обмежуючи горизонтальну проекцію підпірної стіни і зрадивши її обрис, відмінне від площини, можна знайти таку її конфігурацію, яка забезпечить мінімальне значення прийнятого критерію раціоналізації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Перевіримо висунуте припущення на простому прикладі. Розглянемо конструкцію підпірної стіни у вигляді жорстко затисненої билинейної консолі. Конструкція сприймає розподілене навантаження у вигляді трикутника на першій ділянці і в вигляді трапеції на другому (рис. 1). При заданих зовнішніх геометричних параметрах системи, а саме - висоти стіни H і її горизонтальної проекції B , довжина верхньої вертикальної частини стіни задає кут нахилу нижньої частини, що також ставить навантаження на систему. Таким чином, при заданій висоті і горизонтальної проекції можливо побудувати безліч білінійних систем.

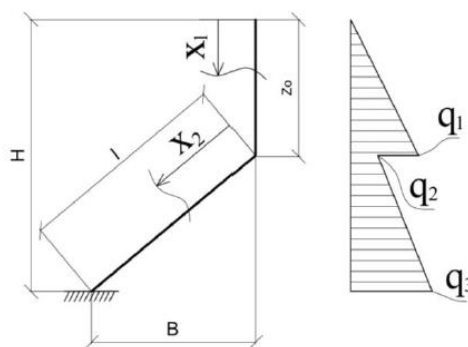


Рис. 1. До розрахунку білінійної системи

У роботах проф. Шмуклера В.С. [3, 4] запропонована наступна інтерпретація енергетичного критерію раціоналізації: для регульованих систем з постійним об'ємом матеріалу, числом зовнішніх і внутрішніх зв'язків під дією статичної зовнішнього навантаження, потенційна енергія деформації після перебудови досягає нижньої межі на раціональному поєднанні величин геометричних параметрів:

$$U = inf U(\alpha^k); \quad k = 1, 2, \dots, \infty \quad (3),$$

де: U - потенційна енергія деформації системи (ПЕД);

$$U = \frac{1}{2EI} \left[\frac{k_0}{7} z_0 + \frac{k_1}{7} (l^7 - z_0^7) + \frac{k_2}{6} (l^6 - z_0^6) + \frac{k_3}{5} (l^5 - z_0^5) + \frac{k_4}{4} (l^4 - z_0^4) + \frac{k_5}{3} (l^3 - z_0^3) + \frac{k_6}{2} (l^2 - z_0^2) + k_7 (l - z_0) \right] \quad (4),$$

$$\text{де: } k_0 = \frac{q_1^2}{36z_0^2}; \quad k_1 = \frac{q_2(q_3 - q_2)^2 \sin^2 \beta}{36l^2}; \quad k_2 = \frac{q_2(q_3 - q_2) \sin^2 \beta}{6l};$$

$$k_3 = \frac{\sin^2 \beta [3lq_2^2 + 2q_1(q_3 - q_2)z_0]}{12l}; \quad k_4 = \frac{q_1z_0 \sin \beta [9lq_2 \sin \beta + (q_3 - q_2)z_0]}{18l};$$

$$k_5 = \frac{q_1z_0^2 \sin \beta [3lq_1 \sin \beta + 2q_2]}{12}; \quad k_6 = \frac{q_1^2z_0^3 \sin \beta}{6}; \quad k_7 = \frac{q_1^2z_0^4}{36};$$

Аналізуючи вираз (4), можна помітити, що входять до нього величини при заданих горизонтальної B і вертикальної H проєкціях системи пов'язані з довжиною верхньої ділянки z_0 . З огляду на сказане, пошук екстремального значення ПЕД можливо виробляти в залежності від величини z_0 при заданій довжині горизонтальної проєкції B . Для кількісного пошуку оптимальних довжин ділянок l і z_0 задамося довільними характеристиками сипучого: $\gamma = 1,5 \text{ кН / м}^3$, $\phi = 40^\circ$. Жорсткісні характеристики перетину для якісної оцінки не принципові, тому приймемо $EI = 1$. Висоту конструкції приймемо рівної $H = 10 \text{ м}$, горизонтальну проєкцію $B = 10 \text{ м}$. На (рис. 2) показана функція залежності $U = U(z_0)$.

Як видно з графіка, функція U унімодальне, має чітко виражений екстремум типу мінімум, а значення довжини ділянки z_0 , відповідне екстремального значенням U , так само 0.97 метрів відповідно.

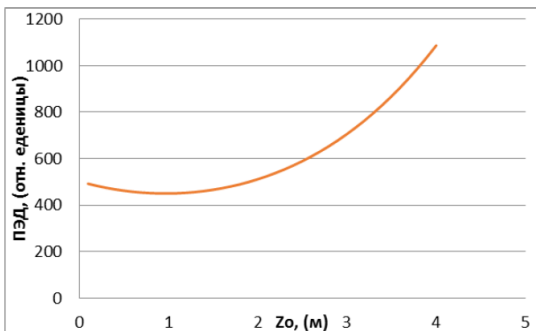


Рис. 2. Залежність $U = U(z_0)$.

α - номер варіанта порівняння;

$\alpha M, M$ - безліч допустимих значень зовнішніх геометричних параметрів;

Для кожного з числа нескінченної кількості конфігурацій даної системи притаманні свої, унікальні параметри геометрії і навантаження, а, отже, і величини ПЕД [5-7]. Варіювання конфігурацією бічної поверхні підпірної стіни, можливо знайти таку її геометрію, при якій величина ПЕД прийме значення внизу. З огляду на простоту даної системи, вираз для визначення величини потенційної енергії деформації виражається в загальному вигляді:

Мета є апроксимація криволінійної котра, утворює ламаної лінією і пошуку раціональної комбінації кутів нахилу ділянок.

Основний матеріал

За результатами розгляду найпростішої билинейної системи можна зробити наступне твердження: при виборі конфігурації криволінійної поверхні, що сприймає бічний тиск сипучого, можна знайти таке її обрис, яке визначить мінімум прийнятого силового критерію [8]. З огляду на складність вираження рівнянь внутрішніх зусиль, а саме згинального моменту, в загальному вигляді, розіб'ємо систему, що складається з криволінійної оболонки і впливає на неї масиву сипучого, на кінцеве число n лінійних і рівних по висоті елементів. Таким чином розглянута оболонка прийме ламати обрис (рис. 3).

Величина кожного з ділянок визначається як відношення висоти конструкції до загальної кількості ділянок і дорівнює h . Величини бічного тиску сипучого на i -й ділянці визначаються як:

$$q_{i,1} = \lambda_i \gamma \sum_1^{i-1} h_i$$

$$q_{i,2} = \lambda_i \gamma \sum_1^i h_i \quad (5).$$

Для кожного з ділянок висловимо через розподілену навантаження вираз зосередженої сили, спрямованої по нормалі до відповідної ділянки:

$$Q_i = \frac{q_{i,1} + q_{i,2}}{2} \sin(\alpha_i) \times h \quad (6).$$

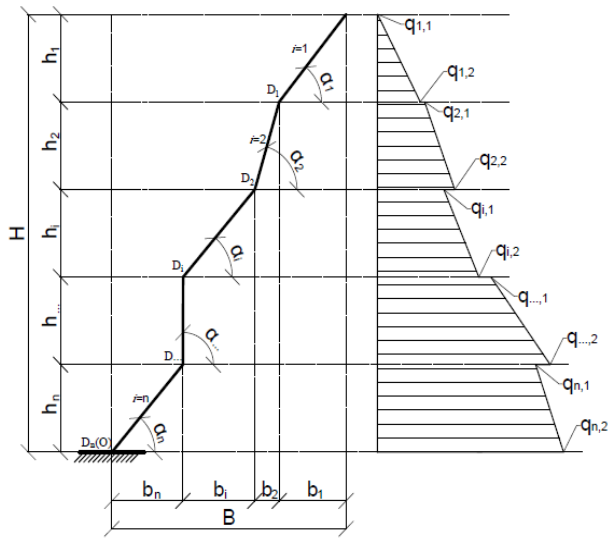


Рис. 3. Апроксимація криволінійної котра утворює.

Горизонтальна і вертикальна прив'язка точки прикладання до точки защемлення (рис. 4) виражаються як:

$$b_{,oi} = B - \sum_{i+1}^n \frac{h}{\operatorname{tg}(\alpha_i)} + \frac{h(2q_{i,1}+q_{i,2})}{3(q_{i,1}+q_{i,2}) \times \operatorname{tg}(\alpha_i)} \quad (7).$$

$$h_{,oi} = h \times (n - i) + \frac{h(2q_{i,1}+q_{i,2})}{3(q_{i,1}+q_{i,2})} \quad (8).$$

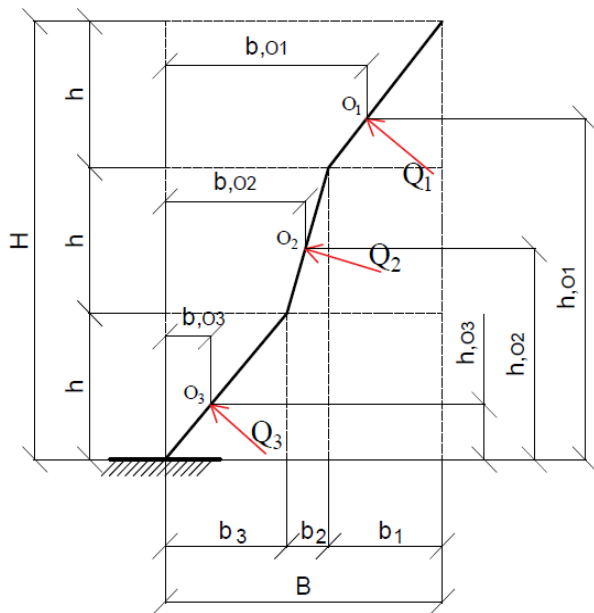
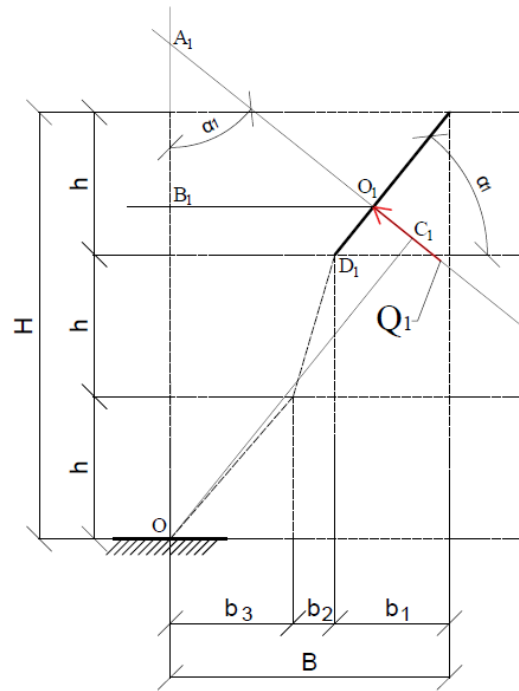


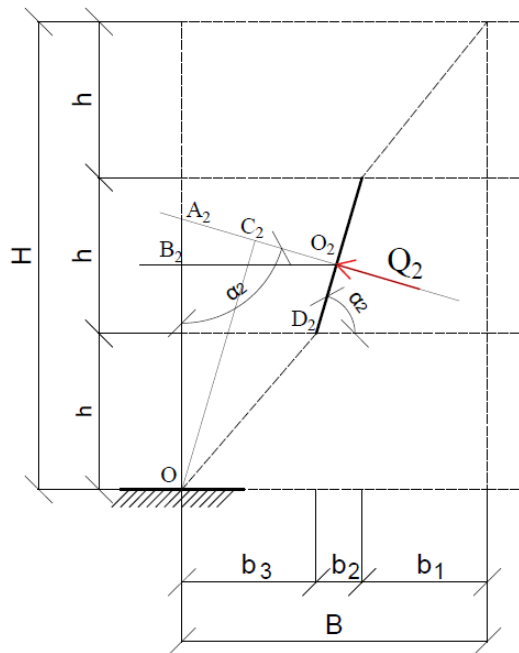
Рис. 4. Прив'язка точки прикладання сили Qi.

Величина згинального моменту для кожного з ділянок щодо точки защемлення (обпирання у вигляді жорсткої закладення):

$$M_i = Q_i \times OC_i \quad (9).$$



де: OC_i - плечі для сили Q_i щодо точки защемлення (рис. 5).



де: OC_i - плечі для сили Q_i щодо точки защемлення (рис. 5).

Рис. 5. До визначення плеча OC_i .

Висловимо плече OC_i через прийняті на рис. 5 геометричні позначення:

$$OC_i = OA_i \times \sin(\alpha_i) \quad (10).$$

$$OA_i = OB_i + A_iB_i \quad (11).$$

$$OB_i = h_{,oi}; O_iB_i = b_{,oi} \quad (12).$$

$$A_i B_i = \frac{O_i B_i}{\operatorname{tg}(\alpha_i)} \quad (13).$$

Підставляючи вирази (7, 8) в (11-13) і далі в (10) отримуємо:

$$O C_i = \frac{\left[h(n-1) + \frac{h(2q_{i,1} + q_{i,2})}{3(q_{i,1} + q_{i,2})} \right] \operatorname{tg}(\alpha_i) + B - \sum_{i=1}^n \frac{h}{\operatorname{tg}(\alpha_i)} + \frac{h(2q_{i,1} + q_{i,2})}{3(q_{i,1} + q_{i,2}) \operatorname{tg}(\alpha_i)}}{\operatorname{tg}(\alpha_i) \sin(\alpha_i)} \quad (14).$$

Загальний вигинає момент в затисканні визначається як сума моментів M_i від кожної ділянки:

$$M_{max} = \sum_{i=1}^n Q_i \times O C_i \quad (15).$$

Довільна кривизна криволінійної котра утворює задній грані підпірної стіни, розбита на n ділянок, в рамках заданих зовнішніх габаритів H, B ,

має своєю, унікальну комбінацію кутів нахилу α_i кожного з ділянок, якої вона може бути описана. При збільшенні кількості ділянок n в межі ламана лінія прагне до криволінійного обрису. При заданих характеристиках сипучого (φ, γ) величина моменту в затисканні, фактично, може бути описана через комбінацію кутів нахилу α_i кожного з ділянок, а в загальному вигляді таких комбінацій безліч. Тоді задача зводиться до пошуку такої комбінації α_i , при якій введений критерій (в розглянутій постановці момент в затисканні) займе своє значення внизу.

Ілюстративний приклад: Для наочної демонстрації експлуатації запропонованого підходу продемонструємо найпростіший приклад його застосуваннями. Задані вихідними даними підпірної стіни і впливає на неї ґрунтом (табл. 1).

Прийняті вихідні дані геометрії системи задають обмеження для можливих варіантів кутів нахилу ділянок і область пошуку мінімального значення згинального моменту (рис. 6).

Таблиця 1

Вихідні дані

Параметр	Позначення	Величина
Вертикальна проекція	$H, \text{ м}$	10
Горизонтальна проекція	$B, \text{ м}$	5
Питома вага ґрунту	$\gamma, \text{ т/м}^3$	1,5
Кут внутрішнього тертя ґрунту	$\varphi, ^\circ$	30°
Висота ділянки	$h, \text{ м}$	2.5
Кількість горизонтальних ділянок	n	4
Кількість вертикальних ділянок	m	4

Задані горизонтальна і вертикальна проекції визначають початкову та кінцеву точки ламаної утворює - лівий нижній і правий верхній кути області пошуку (рис. 6, б). В рамках заданих обмежень можливо побудувати 35 варіантів криволінійної котра утворює, яка описує задню грань підпірної стіни (рис. 7).

Як видно з таблиці 2, конфігурація кутів α_i , відповідна 12-ому варіанту, визначає мінімальне значення моменту в затисканні. Збільшення кількості ділянок розбиття системи дозволить уточнювати мінімум цільової функції завдання раціоналізації, і той же момент, тягне за собою значне збільшення числа можливих комбінацій кутів α_i .

Висновки

Запропонований підхід дозволяє варіативним методом визначати конфігурацію поверхні підпірної стіни, раціональну з позиції прийнятого критерію. Наведений в роботі приклад наочно доводить коректність постановки задачі і її рішення. У загальному вигляді, при значно більшій кількості ділянок розбиття n , ламана утворює задній грані підпірної стіни згладжується, прагне до криволінійного обрису. У подальшому дослідженні представляє інтерес постановка і рішення даного завдання в інформаційному середовищі, а також із застосуванням методів лінійного програмування, зокрема, симплекс методу.

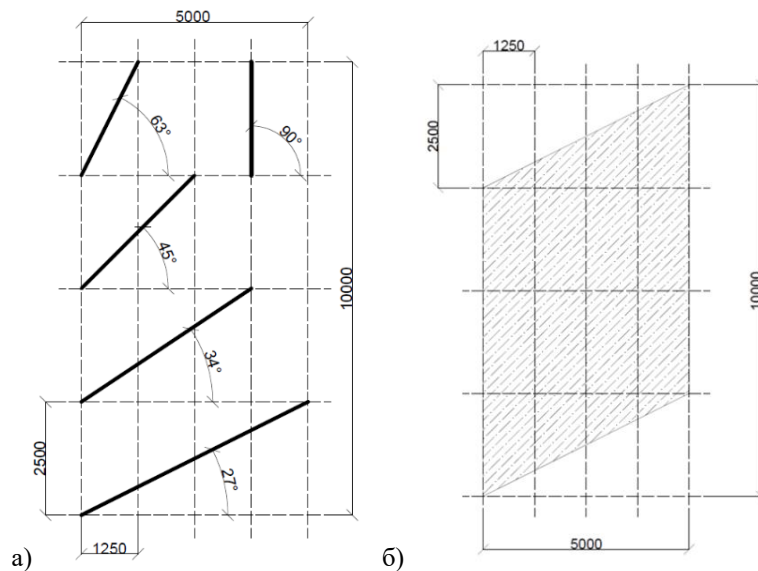


Рис. 6. Прийняті обмеження:

а) можливі варіанти нахилу ділянок; б) область пошуку.

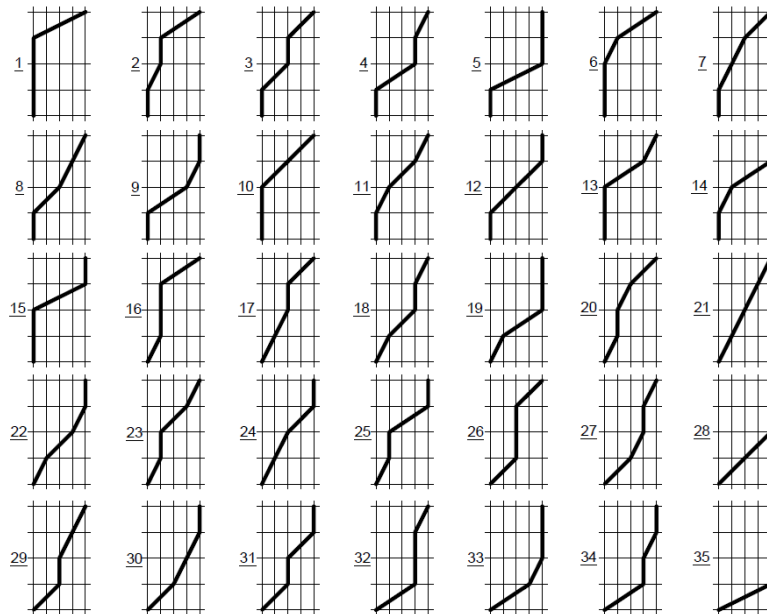


Рис. 7. Загальна кількість варіантів конфігурацій при заданих обмеженнях.

Використовуючи вирази (6, 14, 15) визначимо величини згинальних моментів для кожної з можливих 35 конфігурацій (табл. 2).

Таблиця 2

Величини згинальних моментів

№ варіанта	1	2	3	4	5	6	7
M, кН*м	70,66	56,93	49,79	48,79	55,04	54,33	41,53
№ варіанта	8	9	10	11	12	13	14
M, кН*м	38,52	42,58	46,75	36,67	34,16	48,74	39,30
№ варіанта	15	16	17	18	19	20	21
M, кН*м	54,95	64,23	52,24	46,92	48,88	51,02	43,64
№ варіанта	22	23	24	25	26	27	28
M, кН*м	40,70	46,16	39,29	48,79	61,61	55,05	49,79
№ варіанта	29	30	31	32	33	34	35
M, кН*м	53,01	48,84	48,65	64,37	61,02	58,15	70,66

Література

1. Клейн, Г.К. Расчет подпорных стен [Текст] / Клейн Г.К. - М.: Высшая школа, 1964. - 196 с.
2. Shmukler, V.S., Feirusha, S.H., Kalmykov, O., Khalife, R. (n.d.) About the possibility of controlling the nature of the seismic effect of bulky material on lateral surfaces. *ZANCO Journal of Pure and Applied Sciences*. Retrieved from <https://zancojournals.su.edu.krd/index.php/JPAS/article/download/3118/1927>
3. Babaev, V.N., Shmukler, V.S., Feirushah, S.H., Kalmykov, O.A., Zinchenko, V.M. (2012) Rational design of retaining walls. *BUTITEMS "Journal of applied and emerging sciences"*, 3, 1, 94-121.
4. Шмуклер, В.С. Каркасные системы облегченного типа [Текст] / Шмуклер В. С., Климов Ю. А., Бурак Н. П. – Харьков: Золотые страницы, 2008. – 336 с.
5. Kalmykov, O., Khalife, R., Grabowski, A. (2019) Search for rational contour of back surface of retaining wall. *AIP Conference Proceedings*.
6. Шмуклер, В.С. Поиск оптимальных конфигураций поверхностей конструкций, нагруженных сыпучим. [Текст] / В.С. Шмуклер, О.А. Калмыков, // Збірник наукових праць УкрДАЗТ, вип.149, с. 150-156, Харків, 2014.
7. Babaev, V.N., Shmukler, V.S., Feirushah, S.H., Kalmykov, O.A. (n.d.) Rational design of retaining walls. *Journal of Applied and Emerging Sciences*, 94-121. Retrieved from <http://121.52.157.188/j/index.php/bj/article/viewFile/29/30/>
8. Калмыков, О.А. Подпорная стена рационального очертания. [Электронный ресурс] / О.А. Калмыков. - Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій, державне підприємство. Вип – 78. сс. 232-239 – Режим доступу: [http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/buko_2013_78\(1\)_35.pdf](http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/buko_2013_78(1)_35.pdf)
9. <https://zancojournals.su.edu.krd/index.php/JPAS/article/download/3118/1927>
10. Babaev, V.N., Shmukler, V.S., Feirushah, S.H., Kalmykov, O.A., Zinchenko, V.M. (2012) Rational design of retaining walls. *BUTITEMS "Journal of applied and emerging sciences"*, 3, 1, 94-121.
11. Shmukler, V.S., Klimov, O.A., Burak, N.P. (2008) Lightweight-type frame systems - Kharkiv: Golden Pages, 336.
12. Kalmykov, O., Khalife, R., Grabowski, A. (2019) Search for rational contour of back surface of retaining wall. *AIP Conference Proceedings*.
13. Shmukler, V.S., Kalmykov, O.A. (2014) Search for optimal configurations of surfaces of structures loaded with bulk. *Collection of scientific works of UkrDAZT*, 149, 150-156.
14. Babaev, V.N., Shmukler, V.S., Feirushah, S.H., Kalmykov, O.A. (n.d.) Rational design of retaining walls. *Journal of Applied and Emerging Sciences*, 94-121. Retrieved from <http://121.52.157.188/j/index.php/bj/article/viewFile/29/30/>
15. Kalmykov, O.A. (n.d.) Retaining wall of rational outline. State Research Institute of Building Structures, State Enterprise. Retrieved from [http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/buko_2013_78\(1\)_35.pdf](http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/buko_2013_78(1)_35.pdf) Вип – 78. сс. 232-239/ ВИП – 78. сс.. 232-239

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.С. Шмуклер, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Харків, Україна.

Автор: ХАЛІФЕ Рабі
аспірант кафедри будівельних конструкцій
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – Sama4eng@gmail.com

Автор: МЕЛІШ Ніколь Павлівна
студенка 5 курсу
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – istominanik0.0@gmail.com

References

1. Klein, G.K. (1964) Calculation of retaining walls. M.: Higher School, 196.
2. Shmukler, V.S., Feirusha, S.H., Kalmykov, O., Khalife, R. (n.d.) About the possibility of controlling the nature of the seismic effect of bulky material on lateral surfaces. *ZANCO Journal of Pure and Applied Sciences*. Retrieved from

VARIABLE METHOD FOR SEARCHING THE RATIONAL DESIGN OF BACK RETAINING WALL SURFACE

R. Khalife, N. Melish

O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine

The article presents the formulation and implementation of the variable task of finding a rational outline of the back face of a retaining wall. In the framework of the Coulomb theory, an analysis is made of a system consisting of a retaining structure and soil pressing on it for the possibility of formulating a rational design problem. The simplest example shows the possibility of formulating the problem of finding the rational geometry of the back face of a retaining wall within a given horizontal projection. The substantiation of the operation of the energy method of rationalization in solving the problem under consideration is given. The essence of the proposed method for finding the rational geometry of the back face of the retaining wall is to approximate the curved generatrix of the back face of the retaining wall with a broken line. For each broken section, key dependencies are derived for its effect on the nature of the stress-strain state of the structure, in particular, in the formulation under consideration, on the magnitude of the bending moment in pinching. Key dependencies are derived and an algorithm for solving the problem is described. An illustrative example shows that, given the characteristics of a loose granular moment, the moment of pinching can actually be described through a combination of the angles of inclination of each of the sections, and in general the form of such combinations is infinite. The problem is reduced to searching for such a combination α_i , in which the introduced criterion (in the formulation under consideration, the moment in pinching) takes its lower value. The implementation of the approach is demonstrated by a numerical example.

The proposed approach allows a variable method to determine the surface configuration of the retaining wall, rational from the standpoint of the accepted criterion. The example given in the work clearly proves the correctness of the statement of the problem and its solution. The operation of this method is advisable in the computing information environment. In particular, the practical application of the presented approach is possible by formulating and solving the linear programming problem by the simplex method.

Keywords: Retaining wall, curvilinear surface, approximation, variational approach.