



УДК 624.04

STUDY OF THE FEATURES OF THE WORK OF A SHEET MESH WALL WITH BUTTRESSES IN THE DESIGN OF AN ARTIFICIAL ISLAND

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ РОБОТИ ШПУНТОВОЇ СТІНКИ З КОНТРФОРСАМИ ПРИ ПРОЄКТУВАННІ ШТУЧНОГО ОСТРОВА

Slobodianyuk H. V. / Слободяник Г. В.

с.т.с., docent. / к.т.н., доцент

ORCID: 0000-0002-1453-6290

Dalekyi M.I. / Далекій М.І.

student / студент

Odessa National Maritime University, Odessa, Mechnikova, 34, 65029

Одеський національний морський університет, Одеса, вул. Мечникова, 34, 65029

Анотація. У статті розглянуто конструкцію штучного острова з вертикальним типом огороження у вигляді шпунтової стінки з контрфорсами. Розглянуто розроблений метод розрахунку активного тиску ґрунту з урахуванням розвантажувальної дії контрфорсів на прикладі штучного острова на глибині 20,0м. Для підбору основних параметрів контрфорсів та визначення їх впливу на бічний тиск ґрунту були виконані розрахунки з різними значеннями ширини та кроку контрфорсів і постійними параметрами, що характеризують систему «споруда - ґрунтове середовище». Були отримані епюри активного тиску ґрунту та зони впливу контрфорсів на лицьову стінку. Отримані результати дозволили визначити оптимальні розміри елементів споруди при раціональному розподілу матеріалів по висоті.

Ключові слова: шпунтова стінка, контрфорси, активний тиск, параметри контрфорсів, розвантажувальний вплив.

Вступ.

Нині дедалі більше виникає потреба у створенні нових територій. Цього можна досягти за рахунок освоєння водного простору шляхом настання берегової лінії у бік моря або створення штучних островів у прибережній зоні моря. Так можна розвинути площу портової території у бік моря для збільшення складських територій, створювати рекреаційні зони - курортні райони, розважальні комплекси, парки. На штучних територіях (острівних) створюють аеропорти та промислові підприємства далеко від великих населених пунктів [1, 2]. Штучні острови використовують також для облаштування родовищ нафти та газу на континентальному шельфі [3, 4].

Штучні намивні (рис. 1) та насипні острови без спеціальних берегозахисних споруд економічно доцільно зводити на невеликих глибинах води (до 10÷12 м). Якщо тіло острова створюється із піщаних ґрунтів по контуру острова



влаштовуються укоси 1:50. При використанні гравію або каменю укоси можна відсипати під нахилом 1:3...1:5.

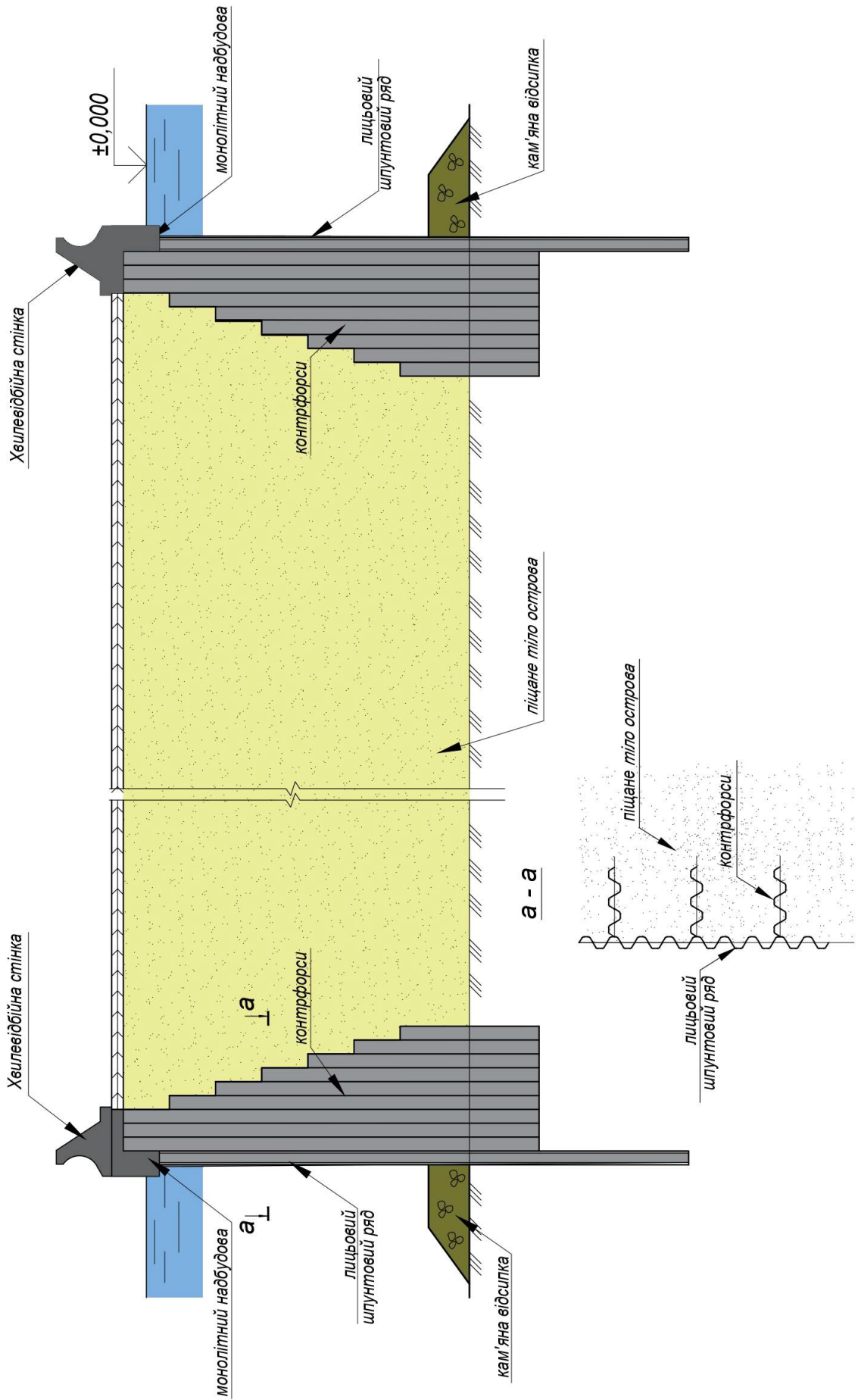


Рисунок 1 – Намивний острів на Мальдівах

Недоліком таких споруд є великі обсяги сипких матеріалів та періодичне відновлення контуру. Для скорочення обсягу тіла острова вони можуть бути оконтуреними по периметру конструкціями, що захищають, вертикального типу. Як огорожувальні конструкції зазвичай використовують залізобетонні масиви-гіганти, металеві понтони, понтони-моноблоки.

Викладення основного матеріалу.

У цій роботі як огорожувальна конструкція пропонується шпунтова стінка з контрфорсами [5, 7]. При створенні острова круглої або багатокутної форми з лицевого шпунтового ряду передбачається використання поперечних рядів шпунтових (контрфорсів) по довжині споруди, які з'єднуються з лицьовою стінкою за допомогою спеціальних замкових з'єднань (рис. 2). Контрфорси мають форму, близьку до прямокутної трапеції з розширенням донизу. Така форма контрфорсів сприяє ефективному зниженню активного тиску ґрунту, епюра якого має аналогічну трапецеїдальну форму. А також сприяє збільшенню жорсткості лицьової стінки та підвищенню загальної стійкості конструкції загалом.



Рисунк 3 – Штучний острів



Слід також зазначити, що наявність контрфорсів забезпечує більш раціональний розподіл матеріалу у конструкції споруди. При цьому несуча здатність і жорсткість конструкції регулюється параметрами контрфорсів і відстанями між ними за довжиною споруди.

Захисна хвилевідбійна стінка влаштовується по всьому або частково по периметру острова з метою унеможливлення наповзання льоду та нахату хвиль на надводну частину споруди. За нижнім контуром передбачається кам'яна відсипка для запобігання розмиву дна.

Відмінна риса даного конструктивного рішення полягає в тому, що:

- у основі шпунтових споруд немає необхідності у влаштуванні дорогої та трудомісткої кам'яної постелі;
- вона може застосовуватися на будь-яких ґрунтах, що допускають занурення шпунта;
- така споруда успішно протистоятиме силовому впливу хвиль (навіть у жорсткі шторми), а також дрейфуючим льодовим утворенням (рівним крижаним полям, одиночним торосам і полям торошення).

Стійкість шпунтової стінки з контрфорсами забезпечується за рахунок защемлення лицьової стінки в ґрунті основи та утримуючої сили контрфорсів. При розрахунку шпунтових стінок без контрфорсів враховується опір ґрунту в межах одного метра погонного споруди, тобто вирішується плоске завдання. При розрахунку шпунтової стінки з контрфорсами слід враховувати опір ґрунту по контрфорсах і сусідніх обсягів ґрунту, що залучаються до спільної роботи, тобто вирішувати просторове завдання.

Розрахункова схема пропонованої конструкції являє собою консольну балку, защемлену в основу з різними жорсткостями по висоті (частина стінки занурена в ґрунт і посиленої жорсткості від верху стінки до глибини забиття контрфорсів). При цьому розрахунок деформацій полягає у визначенні горизонтального зміщення верху стінки, яке не повинно перевищувати граничного значення.

Основним навантаженням на споруди типу шпунтова стінка є активний



тиск ґрунту, який зростає зі збільшенням глибини біля дна. На підставі аналітичних та експериментальних досліджень було розроблено рекомендації щодо проектування даної запропонованої конструкції [5, 6].

Для визначення активного тиску ґрунту з урахуванням розвантажуючої дії контрфорсів був розроблений лінійний метод [6, 8], розрахункова схема якого приведена на рис. 3.

Тиск на лицьову стінку визначався з урахуванням втрат від сил тертя сповзаючого клину (призми) обвалення по бокових гранях контрфорсів. На лицьову стінку передається тиск призми обвалення ABC, яка сповзає під кутом обвалення $\beta_i = 45^\circ - 0,5 \varphi_i$. Сповзанню призми обвалення перешкоджають сили тертя, що виникають по бокових поверхнях контрфорса ADEF.

У процесі визначення сил тертя проводилися характерні вертикальні перетини (1-1, 2-2), за якими будувалися нормальні епюри тиску на бокову грань контрфорса. При цьому розпірний тиск між контрфорсами зростає до глибини h , яка визначалась за залежністю:

$$h = \frac{(S - \delta)0,5}{\text{tg}\beta} \quad (1)$$

Нижче цієї глибини розпірний тиск не змінюється. Далі, відповідно до отриманих епюр, наносилися ординати нормального тиску на похилі перерізу а-а, b-b, проведені з вершини контрфорса і точки перетину вертикального перетину з межею контрфорса під кутом обвалення (рис. 3, а). За цим перетином відбувається сповзання ґрунту і з ним спрямовані сили тертя. По епюрах тиску на похилі перерізу визначалися сили нормального тиску на контрфорс P , рівні площі відповідних епюр. Тоді, сили тертя T , діючі по похилих перерізах:

$$T = P_i f, \quad (2)$$

де f - коефіцієнт тертя, рівний $f_i = \text{tg}0,5\varphi_i$.

Горизонтальні складові сил тертя, перпендикулярні до лицьової стінки дорівнюють

$$T_x = T_i \sin \beta_i. \quad (3)$$

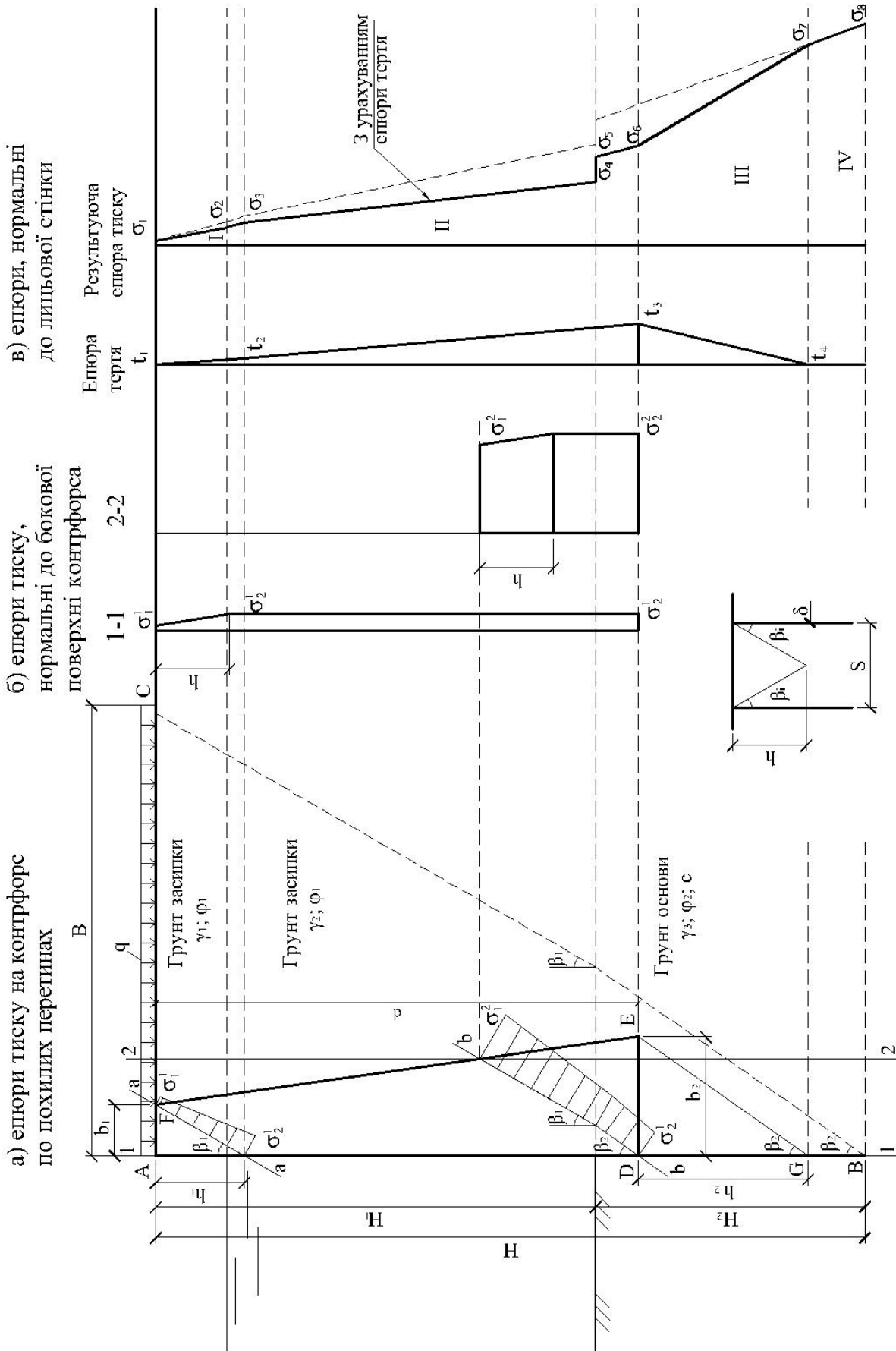


Рисунок 3 - Розрахункова схема



Таким чином, інтенсивність сил тертя t_i на лицьову стінку у відповідних точках дорівнює

$$t_i = \frac{P \cdot f \cdot \sin \beta}{0,5(S - \delta)} \quad (4)$$

Потім за отриманими значеннями будувалася еюра тертя до точки D. Від точки D на висоті $h_2 = b_2 / \operatorname{tg} \beta_2$, де β_2 – кут обвалення ґрунту основи, до точки G вплив контрфорсів зменшується до нуля.

Ординати еюри розпору на лицьову стінку без урахування розвантажувального впливу контрфорсів визначалися за класичним методом. Віднімаючи з еюри бокового тиску ґрунту без контрфорсів еюру сил тертя, була отримана еюра розпирного тиску на лицьову стінку з урахуванням розвантажувального впливу контрфорсів.

Аналіз розглянутої схеми дозволив виявити наступні зони впливу контрфорсів (рис. 3, в):

I - зона часткового впливу контрфорсів – ефект зменшення бокового тиску незначний;

II - зона повного впливу контрфорсів – ефект зменшення бокового тиску максимальний;

III - зона зменшення впливу контрфорсів (перехідна зона) – ефект зменшення бокового тиску знижується до нуля;

IV - зона відсутності впливу контрфорсів.

Зона I часткового впливу контрфорсів діє на ділянці заввишки $h_1 = b_1 / \operatorname{tg} \beta_1$, де β_1 – кут обвалення ґрунту засипки; зона II повного впливу контрфорсів має висоту $(d - h_1)$; зона III зменшення впливу контрфорсів (перехідна зона) діє на ділянці заввишки $h_2 = b_2 / \operatorname{tg} \beta_2$, де β_2 – кут обвалення ґрунту основи; зона IV відсутності впливу контрфорсів має висоту $[(H_1 + H_2) - (d + h_2)]$, де H_1 – висота стінки вище рівня дна, H_2 - глибина занурення стінки нижче рівня дна.

Для підбору основних параметрів контрфорсів та визначення їх впливу на бічний тиск ґрунту були виконані розрахунки з різними значеннями ширини та кроку і постійними параметрами, що характеризують систему «споруда -



грунтове середовище».

В якості розрахункової схеми було розглянуто шпунтову стінку висотою H з контрфорсами форми з розширенням донизу. Поверхня ґрунту засипки приймалася горизонтальною, до неї прикладалось рівномірно-розподілене навантаження інтенсивністю q . Глибина у дна -20.0м , висота кордону $+5.0\text{м}$. Розміри контрфорса - висота d , ширина зверху b_1 , ширина знизу b_2 , крок по довжині споруди S і товщина δ . Характеристики ґрунту засипки - питома вага γ_1 , кН/м^3 (над водою); γ_2 , кН/м^3 (під водою); кут внутрішнього тертя φ_1 , град. Характеристики ґрунту основи - питома вага γ_3 , кН/м^3 ; кут внутрішнього тертя φ_2 , град; питоме зчеплення c , кН/м^2 . Початок контрфорса прийнято на рівні верху шпунтової стінки.

При дослідженні впливу ширини контрфорсів на зміну бокового тиску ґрунту ширина контрфорсів розглядалася у трьох випадках при кроці контрфорсів 6.0м :

1. $b_1 = 4.0\text{м}$, $b_2 = 8.0\text{м}$;
2. $b_1 = 5.0\text{м}$, $b_2 = 10.0\text{м}$;
3. $b_1 = 6.0\text{м}$, $b_2 = 12.0\text{м}$.

Результати розрахунку бокового тиску ґрунту приведені у таблиці 2.

Таблиця 1 - Вихідні дані для дослідження

Найменування	Позначення	Величина	Один. вим.	
Висота стінки повна	H	35	м	
Висота контрфорсу	d	27,0	м	
Крок контрфорсів	S	зміни	м	
Ширина контрфорсів (верх/низ)	$b_1(b_2)$	зміни	м	
Товщина контрфорсів	δ	0,01	м	
Рівномірно-розподілене навантаження	q	100	кПа	
Питома вага:	над водою	γ_1	18	кН/м^3
	під водою	γ_2	11	кН/м^3
Кут внутрішнього тертя ґрунту засипки	φ_1	30	град.	
Питома вага ґрунту основи	γ_3	9.5	кН/м^3	
Кут внутрішнього тертя ґрунту основи	φ_2	22	град.	
Питоме зчеплення	C	15	кПа	



Таблиця 2 - Результати розрахунку тиску ґрунту при різній ширині контрфорсів

Зона впливу	Глибина, м	$\sigma_{iк}$, кПа	$b_1 = 4,0\text{м}, b_2 = 8,0\text{м}$		$b_1 = 5,0\text{м}, b_2 = 10,0\text{м}$		$b_1 = 6,0\text{м}, b_2 = 12,0\text{м}$	
			$\sigma_{iтр}$, кПа	σ_i , кПа	$\sigma_{iтр}$, кПа	σ_i , кПа	$\sigma_{iтр}$, кПа	σ_i , кПа
I	0	29	0	29	0	29	0	29
	5,0	55,1	10,27	44,83	10,27	44,83	10,27	44,83
	$h_1(\beta_1)$	61,25	14,23	47,02	17,79	48,99	21,35	50,96
II	25,0	118,9 (153,7)	35,76	83,1 (117,9)	40,46	78,4 (113,2)	44,07	74,83 (109,6)
	27,0	161,5	32,63	123,35	38,09	118,26	42,42	114,3
III	$h_2(\beta_2)$	207,7	0	207,7	0	219,2	0	-
IV	42	219,9	0	219,9	0	219,9	0	219,9
E, кН		5125		4290		4134		3991

Примітка: $\sigma_{iк}$ – інтенсивність тиску ґрунту без урахування розвантажувальної дії контрфорсів; σ_i – інтенсивність тиску ґрунту з урахуванням розвантажувальної дії контрфорсів; $\sigma_{iтр}$ – інтенсивність сил тертя; h_1, h_2 – висота часткової (перехідної) зони впливу контрфорсів, що залежать від $\beta_1(\beta_2)$; E – рівнодіюча сил бокового тиску ґрунту; β_i – кут обвалення ґрунту.

На основі виконаних розрахунків були отримані епюри бокового тиску ґрунту на стінку з урахуванням і без урахування контрфорсів (рис. 4) та зони впливу контрфорсів (табл.3).

Таблиця 3 - Зони впливу контрфорсів при різних ширинах контрфорсів

Ширина контрфорса	Висота зони впливу				
	Зона I часткового впливу	Зона II повного впливу	Зона III перехідна	Зона IV відсутності впливу	Загальна зона впливу
$b_1 = 4,0\text{м}, b_2 = 8,0\text{м}$	0,17Н	0,48Н	0,28Н	0,07Н	0,93Н
$b_1 = 5,0\text{м}, b_2 = 10,0\text{м}$	0,21Н	0,43Н	0,34Н	0,01Н	0,99Н
$b_1 = 6,0\text{м}, b_2 = 12,0\text{м}$	0,25Н	0,40Н	0,35Н	0	1,00Н

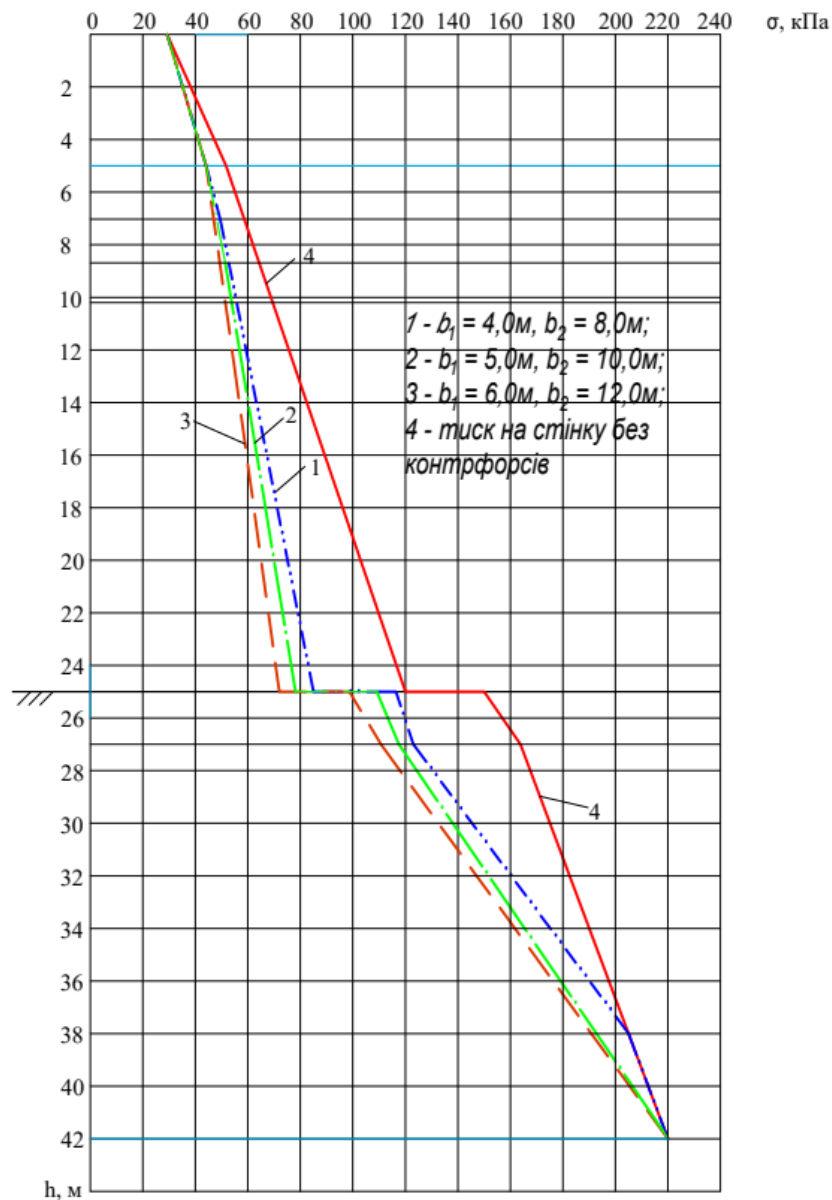


Рисунок 4 - Епюри тиску ґрунту при різній ширині контрфорсів

Аналіз розрахункових даних показав, що із збільшенням ширини ребра жорсткості висота зони впливу H_{36} контрфорсів змінюється. При *першому* випадку висота зони впливу дорівнює $H_{36} = 0,93 H$, при *другому* дорівнює $H_{36} = 0,99 H$, а при *останньому* дорівнює $H_{36} = 1,0 H$. В останньому випадку зона впливу дорівнювала всій висоті лицьової стінки. Розвантажувальний ефект у першому випадку склав 16,31 %, у другому – 19,35 %, а в третьому – 22,13 %.

З вищесказаного можна зробити висновок, що ступінь зниження бічного тиску ґрунту залежить від загальної висоти H_{36} зони впливу контрфорсів. При максимальному використанні спільної зони впливу, коли $H = H_{36}$, тобто зона



впливу контрфорсів охоплює всю висоту лицьової стінки, ступінь зниження найбільша. Від призначення висоти контрфорси залежить величина зони повного впливу контрфорси. При призначенні геометричних розмірів контрфорси важливу роль відіграє ширина понизу b_n , яка суттєво впливає на величину перехідної зони.

При дослідженні впливу кроку контрфорсів на боковий тиск ґрунту, було розглянуто три варіанта кроків $S_1 = 0,5b_{\text{сеп}}$, $S_2 = b_{\text{сеп}}$, $S_3 = 1,5b_{\text{сеп}}$ при ширині контрфорсів $b_1 = 5,0\text{м}$, $b_2 = 10,0\text{м}$.

Результати розрахунку приведені в таблиці 4, отримані епюри бокового тиску ґрунту з урахуванням і без урахування контрфорсів (рис. 5).

Розвантажувальний ефект у першому випадку склав 30,72 %, у другому – 16,2 %, а в третьому – 11,9 %.

Аналіз таблиць 3 та 4 показав, що зменшення кроку контрфорсів більше впливає на ступінь зниження тиску ґрунту, ніж збільшення ширини контрфорсів.

Основні параметри контрфорсів (ширина та крок) підбираються з урахуванням раціонального використання матеріалу в конструкції. Так, в даному випадку можливо прийняти контрфорси з розмірами $b_1 = 5,0\text{м}$, $b_2 = 10,0\text{м}$, $S = 7,5\text{м}$ чи $b_1 = 4,0\text{м}$, $b_2 = 8,0\text{м}$, $S = 6\text{м}$, при яких отримується розвантажувальний ефект біля 16%.

Таблиця 4 - Результати розрахунку тиску ґрунту при різному кроці контрфорсів

Зона впливу	Глибина, м	$\sigma_{iк}$, кПа	$S_1 = 0,5b_{\text{сеп}}$		$S_2 = b_{\text{сеп}}$		$S_3 = 1,5b_{\text{сеп}}$	
			$\sigma_{iтр}$, кПа	σ_i , кПа	$\sigma_{iтр}$, кПа	σ_i , кПа	$\sigma_{iтр}$, кПа	σ_i , кПа
I	0	29	0	29	0	29	0	29
	5,0	55,1	16,08	39,0	8,64	46,46	6,47	48,63
	$h_1(\beta_1)$	61,25	27,85	38,9	14,97	51,81	11,21	55,56
II	25,0	118,9 (153,7)	65,56	53,34 (88,14)	33,43	85,47 (120,3)	24,06	94,84 (129,6)
	27,0	161,5	61,84	91,31	31,5	125,8	22,58	135,9
III	$h_2(\beta_2)$	207,7	0	219,2	0	219,2	0	219,2
IV	42	219,9	0	219,9	0	219,9	0	219,9
E, кН		5125		3551		4297		4514

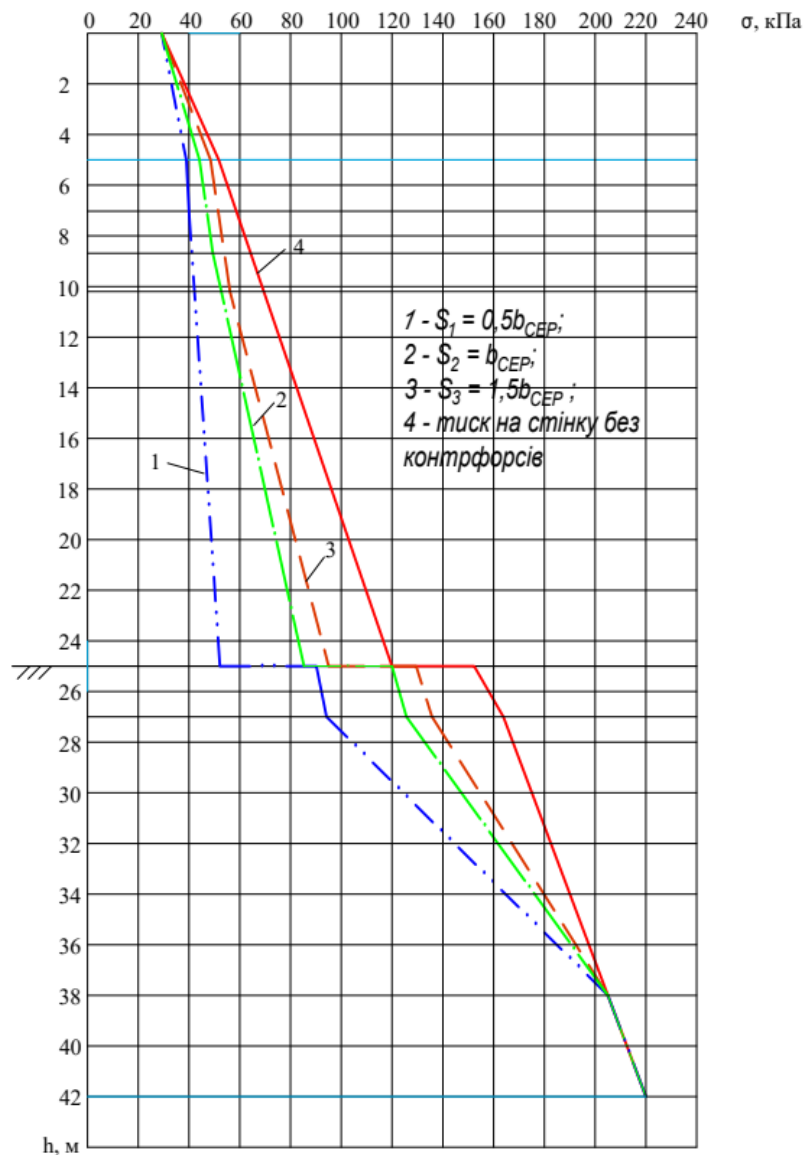


Рисунок 5 - Епюри активного тиску ґрунту при різному кроку контрфорсів

Висновки.

1. Проаналізовано конструктивне рішення штучного острова з огорожувальними елементами у вигляді шпунтової стінки з контрфорсами та виявлено переваги його застосування.

2. Наявність контрфорсів забезпечує раціональний розподіл матеріалу в конструкції споруди, що в цілому приведе до зменшення його матеріаломісткості.

3. Підібрані основні параметри контрфорсів – ширина та крок.



Основними перевагами даного конструктивного рішення є:

- підвищена жорсткість конструкції, яка може регулюватися параметрами контрфорсів і їх кількістю;
- зниження активного тиску ґрунту за рахунок контрфорсів.

Література

1. М.П. Дубровський. Гідротехнічні споруди на континентальному шельфі. Нав. Посібник. Одеса. 2021. 123с.
2. Гришин В., Гембарський Л., Снісаренко В. Існуючі й проєктовані штучні острови та їх призначення. Підводні технології. 02/2015, с.32-39.
3. <https://amp.meduza.io/feature/2024/05/10/maldivam-ne-hvataet-sushi-vlasti-nashli-reshenie-i-stroyat-novye-ostrova-iz-peska-i-korallovyh-oblomkov> - Мальдіви
4. <https://worldwithatwist.com/dubai-oae-4-2/>
5. Патент № 84888. Україна. МПК(2006) E02D 29/2, E02B 3/06. Підпірна стінка / Г.В. Слободяник, М.П. Дубровський // Одеський національний морський університет. – Заяв. 29.05.2006. Від. 10.12.2008. - Бюл. №23. – 4 с.
6. Slobodyanik A. A method developed to calculate lateral earth pressure on a sheet pile wall with counterforts / Slobodyanik, A.// Eastern-European Journal of enterprise technologies, 2018, 1/7 (91) - pp. 11-18.
7. Слободяник Г.В., Дойчева О.Д. Область використання шпунтової стінки з контрфорсами / II International scientific and practical conference “Modern trends of scientific development”, (Vancouver, Canada January 18-21, 2022). p. 37-40.
8. Слободяник Г.В. Дослідження впливу бокового тиску ґрунту на шпунтову стінку з контрфорсами / Розвиток методів проєктування, будівництва та реконструкції гідротехнічних споруд. Частина 1: серія монографій/ [авт. кол. Дубровський М.П., Рогачко С.І., Бугаєва С.В. та ін.] за ред. М.П. Дубровського. - Одеса: КУПРІЄНКО СВ, 2019-с.114-131

References.

1. M.P. Dubrovs'kyu. Hidrotekhnichni sporudy na kontynental'nomu shel'fi. Nav. Posibnyk. Odesa. 2021. 123s.
2. Hryshyn V., Hembars'kyu L., Snisarenko V. Isnuyuchi y proektovani shtuchni ostrovy ta



yikh pryznachennya. Pidvodni tekhnolohiyi. 02/2015, s.32-39.

3. <https://amp.meduza.io/feature/2024/05/10/maldivam-ne-hvataet-sushi-vlasti-nashli-reshenie-i-stroyat-novye-ostrova-iz-peska-i-korallovyh-oblomkov> - Maldivu

4. <https://worldwithatwist.com/dubai-oae-4-2/>

5. Patent № 84888. UKRAINE. MPK (2006) E02D 29/2, E02B 3/06. Retaining wall. G.V. Slobodyanik, M.P. Dubrovsky, inventor and owner: Odessa National Marine University. *Said.* 29.05.2006. *Vid.10.12.2008. Bull. № 6723*, 4 p.

6. Slobodyanik A. A method developed to calculate lateral earth pressure on a sheet pile wall with counterforts / Slobodyanik, A.// Eastern-European Journal of enterprise technologies,, 2018, 1/7 (91) - pp. 11-18.

7. Slobodyanyk H.V., Doycheva O.D. Oblast' vykorystannya shpuntovoyi stinky z kontrforsamy / II International scientific and practical conference "Modern trends of scientific development", (Vancouver, Canada January 18-21, 2022). p. 37-40.

8. Slobodyanyk H.V. Doslidzhennya vplyvu bokovoho tysku hruntu na shpuntovu stinku z kontrforsamy / Rozvytok metodiv proektuvannya, budivnytstva ta rekonstruktsiyi hidrotekhnichnykh sporud. Chastyna 1: seriya monohrafiy/ [avt. kol. Dubrovs'kyi M.P., Rohachko S.I., Buhayeva S.V. ta in.] za red. M.P. Dubrovs'koho. - Odesa: KUPRIYENKO SV, 2019-s.114-131

Abstract. *This article examines the design of an artificial island with a vertical enclosure in the form of a sheet pile wall with buttresses. A developed method for calculating active soil pressure, taking into account the unloading effect of the buttresses, is presented using the example of an artificial island at a depth of 20.0 m. To select the key buttress parameters and determine their impact on lateral soil pressure, calculations were performed with different buttress widths and spacings and constant parameters characterizing the "structure-soil" system. Active soil pressure diagrams and the buttress influence zones on the facing wall were obtained.*

Analysis of the results showed that using buttresses can achieve a load-relief effect of up to 30%. Furthermore, decreasing the buttress spacing has a greater impact on the soil pressure than increasing the buttress width.

The obtained results made it possible to determine the optimal dimensions of the structural elements with a rational distribution of materials along the height of the structure. The main advantage of this design solution is the increased structural rigidity, which can be regulated by adjusting the buttress parameters and their numbers.

Key words: *sheet pile wall, counterforts, active vice, parameters of counterforts.*

Стаття відправлена 22.11.2024

© Слободяник Г.В.