

І. Г. Бугаєва¹, к.т.н., І. С. Бугаєв²¹Одеський національний морський університет, м. Одеса²Одеська державна академія технічного регулювання та якості, м. Одеса

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗМІНИ ПРОСТОРОВОГО ПОЛОЖЕННЯ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД

Морські порти України – важливий елемент транспортного комплексу держави. Головним елементом порту є гідротехнічні споруди, що утворюють причальний фронт. Стан споруди визначається зміненням міцності конструкції та залишковими деформаціями, що ведуть до виведення споруди з ладу, та в подальшому до її руйнування. Стаття присвячена розробці методу визначення зміни положення споруди у просторі, що обумовлено дією експлуатаційних навантажень та сейсмічності району її розташування.

Ключові слова: гідротехнічна споруда, стан споруди, моделювання, положення у просторі

Вступ. Експлуатацією причальних споруд займаються як державні, так і приватні організації. Всі вони зацікавлені в одержанні прибутку, що інколи веде до порушення режиму експлуатації споруд шляхом перевищення припустимих навантажень, що викликані складованим вантажем. Фінансування моніторингу стану причальних споруд, технічного обслуговування, ремонту та реконструкції здійснюється вкрай нерегулярно й часто у недостатньому обсязі. Внаслідок цього, причали інтенсивно руйнуються та приходять у непридатний для експлуатації стан. Це визначає необхідність проведення дослідження, спрямованого на розробку методів оцінювання технічного стану гідротехнічних споруд (ГТС) з урахуванням експлуатаційних і сейсмічних навантажень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Методи розрахунку причальних споруд розвивалися у двох напрямках: перший напрямок – це розрахунок по граничних станах, що, як правило не розглядає деформації, і другий напрямок – це методи, що враховують деформації споруди при розрахунку.

Перший напрямок заснований на ідеях Кулона, що припускають розгляд граничної рівноваги “затверділої” частини масиву. У цьому напрямку працювали: В. В. Соколовський, С. С. Голошукевич [1], Ю. Б. Михайлов [2], П. І. Яковлев, Н. К. Снитко [3], Г. К. Клейн [4], А. К. Бугрів [5].

Самостійний напрямок одержали ймовірно-статистичні методи рішення контактних завдань механіки ґрунтів, основи яких були закладені Г. И. Покровським, Ф. М. Шихієвим, В. Т. Бугаєвим [6 – 8].

Поряд із класичними методами розрахунків підірних стін, заснованих на теорії граничного напруженого стану, у теорії взаємодії споруди із ґрунтом широке застосування знаходять контактні моделі. Найбільшу популярність одержала контактна модель Фусса-Винклера [9], у якій приймається пряма пропорційність між вертикальним тиском і осіданням. Ускладненням моделі Винклера є двопараметричні моделі П. Л. Пастернаку, у яких пружна основа характеризується двома коефіцієнтами постелі – коефіцієнтом стиску й коефіцієнтом зрушення.

Питання впливу реології на стійкість і міцність конструкцій причальних споруд вивчалися в ЛІВТі А. Я. Будіним [10].

У теперішній час розрахунки підірних споруд виконуються чисельними методами із застосуванням ЕОМ. Найпоширенішим є метод кінцевих елементів (МКЕ) [11]. Він являє собою ефективний метод рішення інженерних і фізичних завдань.

Постановка завдання

Мета статті – розробка методу визначення сил і моментів, що виникають як у споруді, так і в навколишньому ґрунті під впливом експлуатаційних і сейсмічних навантажень, які ведуть до зміни положення споруди у просторі.

Виходячи з мети, необхідно вирішити наступні наукові завдання:

– проведення аналізу існуючих методів розрахунку ГТС;

– визначення діапазону зміни геометричних розмірів ГТС гравітаційного типу (ГТ) в залежності від величин експлуатаційних навантажень та характеристик ґрунтів;

– проведення обчислювального експерименту, що дозволяє оцінити взаємодію ГТС ГТ і на-

вколишнього середовища з урахуванням навантажень;

– аналіз отриманих результатів, визначення точності та адекватності запропонованих регресійних моделей;

– розробка рекомендацій із застосуванням запропонованого методу для аналізу стану споруд, що експлуатуються більше 25 років.

Основна частина

У загальному випадку на ГТС гравітаційного типу діють наступні навантаження (рис. 1): активний тиск ґрунту засипання; горизонтальне навантаження, що виникає під дією маси ґрунту за спорудою (значення цього навантаження залежить від трьох основних фізико-механічних властивостей ґрунту: питомої ваги, кута внутрішнього тертя, зчеплення); розподілене експлуатаційне навантаження, що виникає при складуванні на території причалу вантажів; навал судна на причал; навантаження, що виникає під дією сильних поривів вітру або при підході судна до споруди; навантаження від сейсмічного впливу.

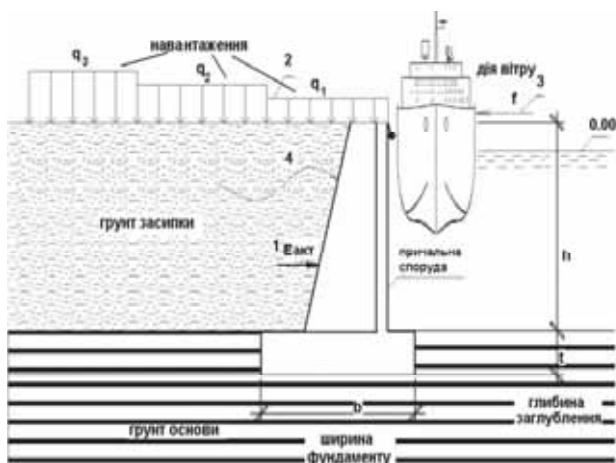


Рисунок 1 – Навантаження й вплив на причальні

ГТС: 1 – активний тиск ґрунту засипання; 2 – розподілене експлуатаційне навантаження; 3 – навал судна на причал; 4 – навантаження від сейсмічного впливу

Дія розглянутих навантажень може призвести до наступних ушкоджень причальної споруди: 1) перекиданню навколо точки обертання; 2) зрушенню по поверхні ковзання; 3) осіданню всієї споруди; 4) руйнуванню окремих елементів споруди; 5) відхиленню причального фронту від проектного положення.

Розрахунок сейсмічного впливу на ГТС виконувався динамічним методом, докладно описаним в [12] із застосуванням карти ОСР 2004 року.

Аналіз робіт [1–11] показав, що на сьогоднішній день вимоги РД 31.35.10-86. «Правила технической эксплуатации портовых сооружений и акваторий» [13] виконуються не в повному обсязі, а саме: багатофакторний аналіз стану споруд, що перебувають в експлуатації більше 25 років, не проводиться, це обумовлено відсутністю простого та надійного методу вимірювання напруг і деформацій.

Дослідження сил та моментів, що діють на ГТС ГТ проводилися за допомогою методу кінцевих елементів (МКЕ) [10] із застосуванням ЕОМ. Для цього використовувалась програма Plaxis [11], яка є спеціалізованою для розрахунків деформації й стійкості різних ГТС.

Розрахунок математичних моделей (ММ), що описують вплив величин експлуатаційних і сейсмічних навантажень на технічний стан ГТС ГТ, виконувався згідно рекомендацій [14] та включав до себе: визначення чинників, що впливають на ГТС ГТ, та діапазону їх змін; планування обчислювального експерименту; розрахунок коефіцієнтів регресійних ММ.

У якості факторів впливу приймалися: висота споруди; експлуатаційне навантаження; навал судна на причал; сейсмічний вплив; характеристики ґрунту основи.

Висота споруди приймалася у діапазоні: нижнє значення 5 м; верхнє – 15 м.

Експлуатаційне навантаження, в основному, залежить від категорії, до якої відноситься причал. Найбільше навантаження відповідає I категорії причалів, це обумовило прийняття верхнього значення зміни величини навантаження згідно [14]. Мінімальне значення експлуатаційного навантаження приймалося рівним 0.

Навантаження від навалу судна приймалося згідно рекомендації [14].

Вітрове навантаження (W_q) визначається співвідношенням

$$W_q = 7,4 \cdot 10^{-4} \cdot A_q \cdot V_q^2 \cdot \zeta \cdot k, \quad (1)$$

де A_q – площа надводної частини судна; V_q – швидкість вітру при 2 % забезпеченості; ζ – коефіцієнт нерівномірності повітряного потоку; k – коефіцієнт обтічності надводної частини корпусу судна.

Площа надводної частини судна (A_q) визначається виразом

$$A_q = k_n \cdot L \cdot H, \quad (2)$$

де L – довжина судна; H – висота надводної частини судна; k_n – коефіцієнт наповненості проєкції надводної частини

Виходячи з формул (1 і 2), навантаження на погонний метр причальної стінки (q) розраховується

$$q = 1,1 \cdot W_q / l_d, \quad (3)$$

де l_d – довжина прямолінійної частини борта судна.

Навантаження, викликане навалом судна, представлено на рис. 2.

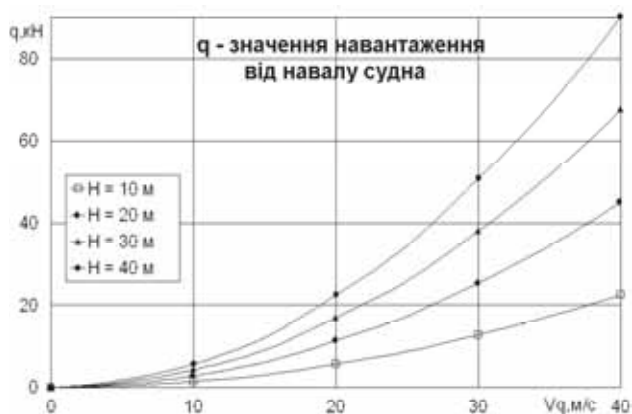


Рисунок 2 – Залежності навантаження від навалу судна

Розрахунок проводився для значень висоти надводної частини судна (H), рівних 10, 20, 30 і 40 м. Зміна швидкості вітру приймалася від 0 до 40 м/с, що було обґрунтовано даними метеорологічних спостережень.

Максимальне значення сейсмічного впливу приймалось для території Одеського морського району [12].

Характеристики ґрунтів змінюються в великих межах, що ускладнює створення регресійної ММ. У роботі приймалися граничні значення ґрунтів. Нижня – супісь щільна ($c=10$ кПа, $\varphi=24^\circ$ і $E=16$ МПа), верхня – глина щільна ($c=55$ кПа, $\varphi=14^\circ$, $E=59$ МПа).

Планування експериментів представлено у (табл. 1). Проводилося три паралельних дослідів в кожній точці плану (відповідно до рекомендації [15]) $n = 2 \div 4$.

Паралельні досліді проводилися при різних значеннях кроку сітки. Щоб виключити вплив систематичних похибок, викликаних зовнішніми умовами, досліді були попередньо рандомізовані.

У табл. 1 наведені результати розрахунків, значення факторів впливу X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 , їхні рівні й інтервали варіювання, та значення функцій відгуку $N, Q, M, \Delta X, \Delta Y$.

Для визначення мінливості паралельних дослідів використовувалась дисперсія (S^2) [16]. Ма-

ксимальне середнє квадратичне відхилення складо 0,11, що не перевищує 5%. Визначення функцій відгуку ($N, Q, M, \Delta X, \Delta Y$) у проведених експериментах проводилося з достатньою для інженерних розрахунків точністю.

Для перевірки однорідності дисперсії використовувався критерій Кохрена. Порівняння отриманого в досліді результату $G = 0,087$ з табличним $G=0,198$ показує, що дисперсії однорідні.

Дисперсія відтворюваності експерименту знаходилась згідно рекомендацій [17] та не перевищувала значення $S^2_{(Y)}=4,2 \cdot 10^{-2}$. У якості регресійних ММ приймалися поліноміальні залежності виду [17]

Коефіцієнти ММ визначалися згідно рекомендацій [17], результати обчислень наведені в табл. 2 – 6. Адекватність ММ перевірялася за критерієм Фішера (F) [17].

Дисперсія коефіцієнтів регресії визначалась по формулі

$$S^2_{\{a_j\}} = \frac{S^2_{\{y\}}}{N}, \quad (5)$$

де $S^2_{\{a_j\}}$ – середньоквадратична похибка коефіцієнта регресії (вона дорівнює $S^2_{\{a_j\}} = 1,31 \cdot 10^{-3}$).

Значимість коефіцієнтів регресії перевірялася побудовою довірчого інтервалу (Δa_j) [17] за критерієм Стюдента ($\Delta a_j = \pm 0,594$).

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_3 + a_4 \cdot x_4 + a_5 \cdot x_5 + a_6 \cdot x_1 \cdot x_2 + a_7 \cdot x_1 \cdot x_3 + a_8 \cdot x_1 \cdot x_4 + a_9 \cdot x_2 \cdot x_3 + a_{10} \cdot x_2 \cdot x_4 + a_{11} \cdot x_3 \cdot x_4 + a_{12} \cdot x_1 \cdot x_5 + a_{13} \cdot x_2 \cdot x_5 + a_{14} \cdot x_3 \cdot x_5 + a_{15} \cdot x_4 \cdot x_5 + a_{16} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 + a_{17} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_4 + a_{18} \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 + a_{19} \cdot x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 + a_{20} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_5 + a_{21} \cdot x_1 \cdot x_3 \cdot x_5 + a_{22} \cdot x_1 \cdot x_4 \cdot x_5 + a_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_5 + a_{24} \cdot x_2 \cdot x_4 \cdot x_5 + a_{25} \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 + a_{26} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 + a_{27} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_5 + a_{28} \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 + a_{29} \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 \cdot x_1 + a_{30} \cdot x_4 \cdot x_5 \cdot x_1 \cdot x_2 + a_{31} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_5. \quad (4)$$

Висновки

Основні результати проведеного дослідження:

1) Виконано теоретичний і методологічний аналіз наукового завдання по розробці методу визначення сил і моментів, що виникають як у споруді, так і в навколишньому ґрунті, і переміщень ГТС ГТ під впливом експлуатаційних і сейсмічних навантажень, умов їхньої експлуатації.

Таблиця 1 – План проведення експериментів, фактори впливу

X ₁ – зміна висоти причальної стінки										
X ₂ – експлуатаційне рівномірно розподілене навантаження										
X ₃ – навантаження від навалу судна; X ₄ – сейсмічне навантаження; X ₅ – ґрунт основи										
РІВНІ	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅					
Основний	10	5	2,5	4	Пісок середн. крупності					
Інтервал	5	5	2,5	4	–					
Верхній	15	10	5	8	Глина щільна					
Нижній	5	0	0	0	Супісь щільна					
Код. значення факторів					Отриманий результат					
№	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	N	Q	M	ΔX	ΔY
1	+	+	+	+	+	-379,434	-774,689	-3873,45	-0,11056	-0,04762
2	-	+	+	+	+	-230,73	-505,085	-841,81	-0,02896	-0,00121
3	+	-	+	+	+	-369,926	-875,698	-4378,49	-0,15713	-0,06351
4	-	-	+	+	+	-219,936	-151,86	-253,10	-0,02765	-0,00186
5	+	+	-	+	+	-370,64	-873,797	-4368,99	-0,1566	-0,06352
6	-	+	-	+	+	-229,753	-155,594	-259,32	-0,02764	-0,00186
7	+	-	-	+	+	-381,339	-864,14	-4320,70	-0,16008	-0,06794
8	-	-	-	+	+	-226,933	-151,533	-252,56	-0,02763	-0,00186
9	+	+	+	-	+	-398,75	-584,2	-2921,00	-0,04432	-0,00722
10	-	+	+	-	+	-318,853	-381,651	-636,09	-0,00988	-0,00253
11	+	-	+	-	+	-356,75	-420,484	-2102,42	-0,01075	-0,00462
12	-	-	+	-	+	-91,9036	-103,221	-172,04	-0,00236	-0,00255
13	+	+	-	-	+	-336,825	-599,102	-2995,51	-0,04269	-0,00838
14	-	+	-	-	+	-252,779	-371,723	-619,54	-0,00991	-0,00254
15	+	-	-	-	+	-250,545	-392,511	-1962,56	-0,00882	-0,01289
16	-	-	-	-	+	-95,6023	-42,1183	-70,20	-0,00243	-0,00229
17	+	+	+	+	-	-368,994	-844,66	-4223,30	-0,70189	-0,34729
18	-	+	+	+	-	-214,035	-366,742	-611,24	-0,18751	-0,00462
19	+	-	+	+	-	-332,688	-483,689	-2418,45	-0,64447	-0,28394
20	-	-	+	+	-	-268,672	-371,108	-618,51	-0,18744	-0,00462
21	+	+	-	+	-	-398,72	-1162,12	-5810,60	-0,6506	-0,22932
22	-	+	-	+	-	-251,24	-348,685	-581,14	-0,14582	-0,00995
23	+	-	-	+	-	-393,98	-1186,02	-5930,10	-0,06396	-0,02373
24	-	-	-	+	-	-212,377	-386,231	-643,72	-0,18867	-0,00538
25	+	+	+	-	-	-388,667	-523,352	-2616,76	-0,51675	-0,19204
26	-	+	+	-	-	-255,774	-335,246	-558,743	-0,07891	-0,01894
27	+	-	+	-	-	-295,588	-385,311	-1926,56	-0,06052	-0,0294
28	-	-	+	-	-	-100,438	-91,1107	-151,851	-0,01002	-0,00536
29	+	+	-	-	-	-375,025	-572,884	-2864,42	-0,17892	-0,06016
30	-	+	-	-	-	-265,049	-158,53	-264,217	-0,04463	-0,0068
31	+	-	-	-	-	-340,975	-352,524	-1762,62	-0,0608	-0,02875
32	-	-	-	-	-	-102,161	-50,8107	-84,6845	-0,01011	-0,00569

2) Проведено чисельні експерименти по визначенню величин сил і моментів, що виникають у ГТС ГТ і навколишньому ґрунті, і переміщень залежно від експлуатаційних і сейсмічних навантажень.

3) Запропоновано математичні регресійні моделі, призначені для знаходження значення сил і викликаних ними моментів, що впливають на ГТС ГТ. Запропоновані моделі враховують наступні фактори: геометричний розмір споруди,

характеристику ґрунту основи, експлуатаційне, сейсмічне й навантаження від навалу судна.

4) Запропоновано метод визначення сил і моментів, що виникають як у споруді, так і в навколишньому ґрунті, і переміщень ГТС ГТ під впливом експлуатаційних і сейсмічних навантажень, в основі якого лежать чисельні обчислення по запропонованим автором регресійним моделям.

Таблиця 2 – Коефіцієнти моделі для поперечних сил Q

Коефіцієнти		Сума квадратів відхилення
$a_0 = -464,58$	$a_{12} = -3,74$	$\sum_{i=1}^N \Delta y_i^2 = 4,421639 \cdot 10^{-5}$
$a_1 = -216,37$	$a_{13} = -7,46$	
$a_2 = -70,3$	$a_{14} = -36,34$	
$a_3 = 14,694$	$a_{15} = 38,19$	
$a_4 = -129,28$	$a_{16} = 9,955$	
$a_5 = 11,613$	$a_{17} = -5,048$	$a_{24} = 9,291$
$a_6 = 9,401$	$a_{18} = -21,766$	$a_{25} = -43,603$
$a_7 = 54,744$	$a_{19} = 36,512$	$a_{26} = -3,197$
$a_8 = -72,88$	$a_{20} = 33,497$	$a_{27} = 18,265$
$a_9 = -19,27$	$a_{21} = -23,786$	$a_{28} = 0,981$
$a_{10} = 35,24$	$a_{22} = -10,041$	$a_{29} = -12,799$
$a_{11} = 32,47$	$a_{23} = 10,241$	$a_{30} = 18,230$
		$a_{31} = 32,455$

Таблиця 3 – Коефіцієнти моделі для нормальних сил N

Коефіцієнти		Сума квадратів відхилення
$a_0 = -283,596$	$a_{12} = 1,474$	$\sum_{i=1}^N \Delta y_i^2 = 3,52343 \cdot 10^{-5}$
$a_1 = -75,082$	$a_{13} = -1,694$	
$a_2 = -31,108$	$a_{14} = -10,517$	
$a_3 = -3,350$	$a_{15} = 0,323$	
$a_4 = -19,491$	$a_{16} = -2,807$	
$a_5 = 1,678$	$a_{17} = -15,28$	$a_{24} = 2,497$
$a_6 = 12,654$	$a_{18} = 3,460$	$a_{25} = 6,561$
$a_7 = 0,678$	$a_{19} = 5,991$	$a_{26} = -5,774$
$a_8 = 3,704$	$a_{20} = 4,262$	$a_{27} = 9,171$
$a_9 = -1,351$	$a_{21} = -7,500$	$a_{28} = -3,628$
$a_{10} = 28,752$	$a_{22} = -4,345$	$a_{29} = 0,406$
$a_{11} = 8,385$	$a_{23} = -2,004$	$a_{30} = 0,215$
		$a_{31} = -2,119$

Таблиця 4 – Коефіцієнти моделі для згинальних моментів M

Коефіцієнти		Сума квадратів відхилення
$a_0 = -1909,21$	$a_{12} = 6,88$	$\sum_{i=1}^N \Delta y_i^2 = 2,531348 \cdot 10^{-5}$
$a_1 = -1495,54$	$a_{13} = 30,95$	
$a_2 = -218,67$	$a_{14} = -160,78$	
$a_3 = 140,22$	$a_{15} = 110,57$	
$a_4 = -552,38$	$a_{16} = 1,07$	
$a_5 = 32,47$	$a_{17} = 41,90$	$a_{24} = 61,35$
$a_6 = -85,83$	$a_{18} = -77,88$	$a_{25} = -166,67$
$a_7 = 206,97$	$a_{19} = 175,82$	$a_{26} = -46,93$
$a_8 = -458,38$	$a_{20} = 99,21$	$a_{27} = 77,95$
$a_9 = -47,64$	$a_{21} = -139,86$	$a_{28} = 57,36$
$a_{10} = 109,04$	$a_{22} = 30,18$	$a_{29} = -115,33$
$a_{11} = 169,08$	$a_{23} = 64,58$	$a_{30} = 76,25$
		$a_{31} = 109,82$

5) Запропонований метод може бути рекомендований для проведення комплексної оцінки ГТС ГТ, що перебувають в експлуатації більше 25 років, і тим самим використовуватись при ви-

конанні рекомендацій РД 31.35.10-86 щодо необхідності проведення багатфакторного аналізу стану споруд, які перебувають в експлуатації більше 25 років.

Таблиця 5 – Коефіцієнти моделі для переміщень по осі X

Коефіцієнти		Сума квадратів відхилення
$a_0 = -0,142451$	$a_{12} = 0,045947$	$\sum_{i=1}^N \Delta y_i^2 = 1,84 \cdot 10^{-5}$
$a_1 = -0,080603$	$a_{13} = 0,038917$	
$a_2 = -0,041023$	$a_{14} = 0,034006$	
$a_3 = -0,031244$	$a_{15} = 0,038894$	
$a_4 = -0,074212$	$a_{16} = 0,009785$	
$a_5 = 0,090738$	$a_{17} = -0,003503$	$a_{24} = 0,001709$
$a_6 = -0,036214$	$a_{18} = 0,028135$	$a_{25} = 0,010988$
$a_7 = -0,026501$	$a_{19} = -0,007312$	$a_{26} = 0,028748$
$a_8 = -0,033395$	$a_{20} = 0,036147$	$a_{27} = -0,006990$
$a_9 = 0,004871$	$a_{21} = 0,029418$	$a_{28} = -0,025539$
$a_{10} = 0,006489$	$a_{22} = 0,008990$	$a_{29} = 0,010687$
$a_{11} = -0,007794$	$a_{23} = -0,002243$	$a_{30} = 0,009991$
		$a_{31} = -0,025995$

Таблиця 6 – Коефіцієнти моделі для переміщень по осі Y

Коефіцієнти		Сума квадратів відхилення
$a_0 = -0,048387$	$a_{12} = 0,027321$	$\sum_{i=1}^N \Delta y_i^2 = 2,34 \cdot 10^{-5}$
$a_1 = -0,043508$	$a_{13} = 0,015778$	
$a_2 = -0,014363$	$a_{14} = 0,017081$	
$a_3 = -0,015196$	$a_{15} = 0,011105$	
$a_4 = -0,024002$	$a_{16} = 0,000698$	
$a_5 = 0,030112$	$a_{17} = -0,002109$	$a_{24} = 0,002627$
$a_6 = -0,013185$	$a_{18} = 0,009671$	$a_{25} = 0,007486$
$a_7 = -0,014863$	$a_{19} = -0,007923$	$a_{26} = 0,008582$
$a_8 = -0,024961$	$a_{20} = 0,014548$	$a_{27} = -0,000483$
$a_9 = 0,000262$	$a_{21} = 0,016698$	$a_{28} = -0,008486$
$a_{10} = -0,001422$	$a_{22} = 0,011673$	$a_{29} = 0,008548$
$a_{11} = -0,006748$	$a_{23} = 0,000068$	$a_{30} = 0,003204$
		$a_{31} = -0,007445$

Список використаних джерел

1. Голушкевич С. С. Статика предельных состояний грунтовых масс / С. С. Голушкевич. – М.: Госиздтехлит, 1957. – 286 с.
2. Михайлов Ю. Б. Решения для сложных случаев загрузки подпорных стен / Ю. Б. Михайлов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – М.: 1978. – № 2. – С. 21-24.
3. Снитко Н. К. Определение действительно бокового давления грунта по уравнению совместности перемещений сдвига / Н. К. Снитко – М.: Стройиздат, 1963. – № 1. – С. 4 – 7.
4. Клейн Г. К. Давление грунта на подпорную стенку в зависимости от ее перемещений и жесткости основания / Г. К. Клейн // Основания, фундаменты и механика грунтов. – М.: 1963. – №4. – С. 1 4.

5. Бугров А. К. О давлении несвязного грунта на жесткую стенку с учетом перемещений / А. К. Бугров // Основания, фундаменты и механика грунтов. – М.: 1972. – № 5. – С. 5-8.
6. Шихиев Ф. М. Кинематическая теория давления грунтов: дисс. докт. техн. наук / Ф. М. Шихиев. – Одесса, 1965. – 286 с.
7. Бугаев В. Т. Исследование давления грунта на гравитационные причальные сооружения с учетом перемещений в процессе образования засыпки: дис. канд. техн. наук / В. Т. Бугаев. – Одесса, 1972. – 174 с.
8. Клепиков С. Н. Расчет конструкций на упругом основании / С. Н. Клепиков. – Киев: Будівельник, 1967. – 245 с.
9. Будин А. Я. Эксплуатация и долговечность портовых гидротехнических сооружений / А. Я. Будин. – М.: Транспорт, 1979. – 287 с.
10. Zienkiewicz O. C. The finite element method / O. C. Zienkiewicz. – McGraw : Hill Book Company (UK) Limited, 1986. – 787 p.
11. Balkem A. A. PLAXIS Finite Element Code for Soil and Rock Analyses Version 8 / A. A. Balkem. – Rotterdam: Broocfield, 1995. – 185 p.
12. СНиП П-7-81*. Учет сейсмического воздействия при проектировании гидротехнических сооружений. – Л.: 1986.
13. РД 31.35.10-86. Правила технической эксплуатации портовых сооружений и акваторий. – М.: Мортехинформреклама, 1988. – 200 с.
14. ДБН В.1.2-2:2006. навантаження і впливи – Київ: МІНБУД УКРАЇНИ, 2006. – 75 с.
15. Дикий Н. А. Основы научных исследований / Н. А. Дикий, А. А. Халатов. – Киев: Высшая школа, 1985. – С. 137-192.
16. Новицкий П. В. Оценка погрешностей результатов измерений / П. В. Новицкий, И. А. Зограф. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – С. 20-300.
17. Боровиков В. П. Statistica – статистический анализ и обработка данных в среде Windows / В. П. Боровиков, И. П. Боровиков – М.: Филинь, 1997. – 592 с.

Надійшла до редакції 17.11.2014

Рецензент: д.т.н., с.н.с. Братченко Г.Д.,
Одеська державна академія технічного регулювання та якості, м. Одеса.

И. Г. Бугаева, к.т.н., И. С. Бугаев

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО СООРУЖЕНИЯ

Морские порты Украины – важный элемент транспортного комплекса государства. Главным элементом порта является гидротехнические сооружения, образующие причальный фронт. Состояние сооружения определяется изменением прочности конструкции и остаточными деформациями, ведущими к выходу сооружения из строя, и в дальнейшем к его разрушению. Статья посвящена разработке метода определения изменения положения сооружения в пространстве, что обусловлено действием эксплуатационных нагрузок и сейсмичности района ее расположения.

Ключевые слова: гидротехническое сооружение, состояние сооружения, моделирование, положение в пространстве

I. G. Bugaeva, PhD, I. S. Bugaev

MATHEMATICAL MODELING OF ATTITUDE HYDRAULIC STRUCTURES

Sea ports of Ukraine is an important element of the transport complex state. The main element is the port hydraulic structures forming waterfront. State structures determined by changes in structural strength and residual strains leading to the conclusion that the construction of the building, and further to its destruction. Article is devoted to developing methods for changing the position of structures in space, due to the influence of operating loads and seismicity of the region's location.

Keywords: hydraulic structures, state structures, modeling, position in space