

УДК 624.131
DOI 10.47049/2226-1893-2023-4-49-58

НЕЛІНІЙНИЙ РОЗРАХУНОК ПРИЧАЛУ З ЗАЛІЗОБЕТОННОЇ ШПУНТОВОЇ СТІНКИ ВІД ДІЇ ДИНАМІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

А.В. Гришин

д.т.н., професор кафедри «Машинознавство й інженерна механіка»

В.В. Олейніков

к.т.н., доцент кафедри «Машинознавство й інженерна механіка»

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

Анотація. Розглядається зв'язана динамічна система, що складається з тонкої підпірної стінки, ґрунтового і водного середовища. Досліджуються хвильові процеси, виникаючі в системі від динамічного навантаження, джерелом якого може бути навал судна на стінку або дія падаючого вантажу на причал. Вивчається вплив хвильових процесів, що виникають від дії зазначеного навантаження на підпирну стінку та різні об'єкти, розташовані на території причалу.

Враховуються пружно-пластичні властивості матеріалів системи. Використовується теорія пластичної течії зі зміцненням. Результати дослідження хвильових процесів представлені у вигляді еюр переміщень і напружень на заданому інтервалі часу.

Ключові слова: тонка підпирна стінка, ґрунтове і водне середовище, динамічне навантаження, хвильові процеси, теорія пластичної течії зі зміцненням, еюри переміщень і напружень.

UDC 624.131
DOI 10.47049/2226-1893-2023-4-49-58

NONLINEAR CALCULATION OF A THIN REINFORCED CONCRETE RETAINING WALL FROM THE ACTION OF DYNAMIC LOAD

A. Grishin

Doctor of Technical Sciences, Professor
of the Department of «Mechine Science and Engineering Mechanics»

V. Oleynikov

PhD Associate Professor
of the Department of «Mechine Science and Engineering Mechanics»

Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine

Abstract. *A connected dynamic system consisting of a thin retaining wall, soil and water environment is considered. The wave processes arising in the system due to dynamic loading are studied, the source of which can be the collision of the ship against the wall or the action of the falling cargo on the pier. The influence of wave processes arising from the action of the specified load on the retaining wall and various objects located on the territory of the pier is studied.*

The elastic-plastic properties of the system materials are taken into account. The theory of plastic flow with strengthening is used. The results of the study of wave processes are presented in the form of graphs of displacements and stresses at a given time interval.

Keywords: *thin retaining wall, soil and water environment, dynamic load, wave processes, theory of plastic flow with strengthening, epuras of movements and stresses.*

Вступ. Причальні стінки морських та річкових портів широко використовують у гідротехнічному будівництві. Вони належать до основних виробничих потужностей портів та є стратегічними об'єктами портової інфраструктури і працюють під впливом як статичних, так і динамічних навантажень. Своєчасна оцінка їхнього фактичного технічного стану та використання сучасних методів розрахунку сприятиме виявленню причин небажаних змін і прийняттю адекватних заходів щодо забезпечення безпечної та ефективної їх експлуатації.

З розвитком сучасної обчислювальної техніки, впровадженням чисельних методів розв'язання задач будівельної механіки для багаторазово статично невизначених систем, розрахунок плоских і просторових рамних конструкцій з урахуванням складного характеру навантажень при різних граничних умовах став рядовим для інженера-проектувальника. Поняття скінчених елементів було вперше введено М. Тернером, Р. Клафом, Х. Мартіном, Л. Топпом. Подальший розвиток методу відображено в роботах зарубіжних і вітчизняних дослідників Дж. Аргіріса, Е.І. Вільсона, М.Р. Айронса, Р.У. Клафа, У.М. Дженкінса, О.К. Зенкевича, Л.А. Розіна, та ін. [1-4].

Незважаючи на значний прогрес в описі роботи тонких стінок при використанні пружно-пластичної постановки в розрахунках портової гідротехніки, їхнє використання знаходиться в стадії наукових розробок і в даний час не набуло поширення в проектній практиці. Визначається це тим, що відсутня надійна апробація і доводиться долати деякі умовності в прийнятих моделях ґрунту, що описують дійсну роботу споруди.

У розробці прикладного програмного забезпечення, що реалізує скінчено-елементний підхід для вирішення завдань механіки, безперечно, лідируюче положення займає українська школа. Перш за все слід зазначити роботи А.С. Городецького і розроблене під його керівництвом сімейство програм, що не зовсім коректно об'єднується назвою «Ліра»; А.В. Перельмутера, В.С. Карпіловського, Е.З. Кріксунова, С.Ю. Фіалко та ін. співробітників «SCAD Soft»; Л.А. Розіна, С.Ф. Клованича, Ю.І. Немчинова та ін. [5; 6].

Протягом всієї історії будівництва і експлуатації причальних споруд і по теперішній час були відзначені численні випадки їх аварій і руйнувань, які можуть бути причиною загибелі людей і величезних матеріальних збитків, що є неприпустимим [7]. Тому вдосконалення існуючих і розробка нових методів розрахунку таких споруд з урахуванням реальних властивостей матеріалів конструкції та ґрунтів, процесу складного навантаження, дію як статичних так і динамічних навантажень є **актуальною задачею**. Однак, незважаючи на виняткову важливість, питання про причини руйнування причальних споруд розроблені далеко не достатньо. Такий стан пояснюється складністю аналізу причин руйнувань, різноманітністю їхніх форм і часто недостатністю фактичних даних спостережень за станом споруд і їхніх основ.

Мета цієї роботи полягає у вивченні хвильових процесів і напружено-деформованого стану спільної роботи тонкої підпірної стінки з ґрунтовим та водним середовищем, що знаходяться під дією динамічних навантажень. При цьому враховувалися пружно-пластичні властивості матеріалів конструкцій і ґрунту та процес складного навантаження.

Викладення основного матеріалу. Класифікація причальних споруд наведена в [8], їх конструкції представлені в [9]. В даний час довжина тільки вантажних причалів морських портів України становить приблизно 43 км (близько 330 причалів). У цій роботі розглядалася спільна робота конструкції причалу, оточуючого його ґрунтового та водного середовища, а також об'єкти, які в процесі експлуатації можуть впливати на роботу причалу. Вся сукупність цих елементів утворює єдину динамічну зв'язану систему.

Спочатку проводився розрахунок від впливу статичних навантажень, які передують динамічним. Потім з урахуванням отриманих деформацій та напружень виконувався динамічний розрахунок. Досліджувався коливальний процес елементів системи, спричинений динамічними навантаженнями.

Динамічний розрахунок причальних споруд у нелінійній постановці, що найбільш повно відображає їх роботу в реальних умовах, вперше виконано в монографії [10].

Стінки можуть бути виконані з металевих та залізобетонних паль та залізобетонних панелей. Різні їх варіанти наведені у [8; 9].

Статичними навантаженнями є власна вага системи та різні експлуатаційні навантаження, а як динамічні – можуть бути навантаження від натягу швартовів, навал судна при його підході до причалу, льодові, від падіння вантажів, від механізмів, що працюють на причалі, і сейсмічні впливи. Розрахункова схема системи показана на рис. 1.

Система перебуває під впливом динамічного навантаження, джерелом якого може бути навал судна на стінку чи дія падаючого вантажу на причал. Вивчався вплив хвильових процесів, що виникають від дії зазначених навантажень на підпірну стінку та різні об'єкти, розташовані на території причалу.

При визначенні напружено-деформованого стану системи враховувалися пружно-пластичні властивості матеріалу стінки та ґрунтового середовища. Зазвичай до динамічного збудження системи вона перебуває під впливом ста-

тичних навантажень, від яких у системі можуть бути пластичні деформації, що впливають на її коливальний процес. Тому неприпустимо визначати реакції системи шляхом підсумовування їх як окремо обчислених від статичних і динамічних навантажень.

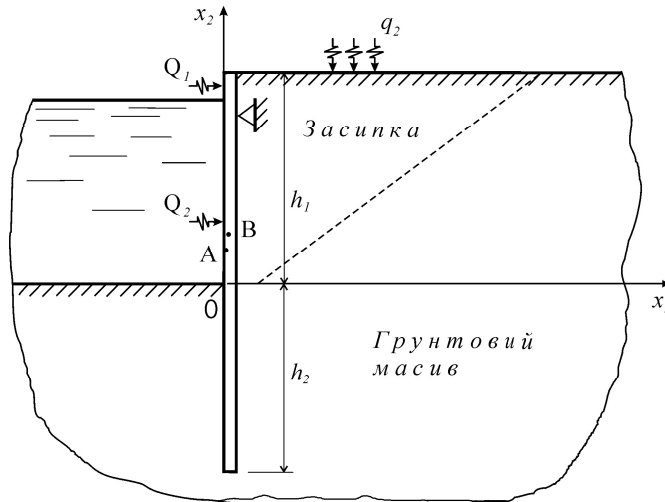


Рис. 1. Розрахункова схема споруди

При визначенні напружено-деформованого стану системи враховувалися пружно-пластичні властивості матеріалу стінки та ґрунтового середовища. Зазвичай до динамічного збудження системи вона перебуває під впливом статичних навантажень, від яких у системі можуть бути пластичні деформації, що впливають на її коливальний процес. Тому неприпустимо визначати реакції системи шляхом підсумовування їх як окремо обчислених від статичних і динамічних навантажень.

Отже, зміна жорсткості системи від дії статичних навантажень повинна враховуватися в динамічних пружнопластичних розрахунках. Статичні методи розрахунку таких споруд наведені у [11; 12]. Їхній розрахунок в пружно-пластичній постановці від спільної дії як статичних, так і динамічних навантажень автору невідомі.

Методика дослідження нелінійних динамічних задач викладена в [10], тому далі наводяться лише основні формули. Співвідношення принципу віртуальної роботи, яке не залежить від зв'язку між напруженнями та деформаціями матеріалів системи, і з якого випливають рівняння руху в момент часу t , має наступний вигляд

$$\int_{\Omega} [\delta \varepsilon]^T \sigma d\Omega + \int_{\Omega} [\delta u]^T (\rho \ddot{u} + c \dot{u} - Q) d\Omega - \int_S [\delta u]^T q ds = 0. \quad (1)$$

Вважалося, що деформації системи відбуваються при малих подовженнях, зсувах та кутах повороту. Тому у рішенні використовувалися геометричні співвідношення Коші та постулат підсумовування прирощень пружної та пластичної деформацій

$$\varepsilon_{ks} = \frac{1}{2}(u_{k,s} + u_{s,k}), \quad (2)$$

$$d\varepsilon_{ks} = d\varepsilon_{ks}^{(e)} + d\varepsilon_{ks}^{(p)}. \quad (3)$$

Збільшення пружних деформацій пов'язані зі збільшенням напруг законом Гука

$$d\varepsilon_{ks}^{(e)} = C_{ksmn}^{(e)} d\sigma_{mn}. \quad (4)$$

Збільшення пластичних деформацій визначалися з принципу максимуму Мізеса [13]

$$d\varepsilon_{ks}^{(p)} = d\lambda f_{,\sigma_{ks}}, \quad d\lambda = \text{const} > 0. \quad (5)$$

Функція навантаження f визначалася для ґрунтового масиву у вигляді умови Кулона-Мора

$$\left(\sigma_0 - \frac{\sigma_i}{\sqrt{3}} \sin \psi\right) \sin \varphi + \sigma_i \cos \psi - c \cos \varphi = 0. \quad (6)$$

Для підпірної стінки як функція навантаження застосовується умова Генієва [14]

$$3(\sigma_c - \sigma_p)\sigma_0 + 3\sigma_i^2 - \sigma_p\sigma_c = 0. \quad (7)$$

Використовуючи наведені вище формули, рівняння стану для пружно-пластичних середовищ, що зміцнюються, в компонентній формі записувалися у вигляді

$$d\sigma_{ks} = D_{ksmn}^{(e)} d\varepsilon_{mn}, \quad \text{якщо } f = 0, d'f \leq 0 \text{ або } f = 0;$$

$$d\sigma_{ks} = D_{ksmn}^{(ep)} d\varepsilon_{mn}, \quad \text{якщо } f = 0, d'f > 0, \quad (8)$$

Для визначення переміщень та напруг у динамічних нелінійних системах переважно застосовуються прямі крокові методи, алгоритми яких розроблені головним чином для вирішення лінійних завдань [15]. Їхня модифікація для пружно-пластичних завдань викладена в [10]. Ці методи включають два основних етапи: дискретизацію основних рівнянь і побудова ітераційного процесу для визначення напружено-деформованого стану системи із заданою точністю.

Дискретизація системи проводиться як у часі, і у сфері системи. В результаті для моменту часу t_n отримано наступне матричне рівняння [10]

$$M\ddot{\delta}_n + C\dot{\delta}_n + K(\delta)\delta_n = Q_n. \quad (9)$$

Для вирішення рівняння (9) використовується модифікований неявний метод Ньюмарка, який є безумовно стійким, що дозволяє суттєво збільшувати довжину тимчасового кроку порівняно з явними методами та отримувати надійніші результати. Алгоритм рішення та його обґрунтування викладено у [10].

Для чисельної реалізації запропонованої методики у системі Delphi розроблено програмний комплекс, який дозволяє проводити спільний розрахунок всіх елементів системи від дії статичних і динамічних навантажень. Його докладний опис наведено в [10].

Було розглянуто чисельне рішення рівнянь для поставленої задачі за наступних вихідних даних: $h_1=10,75$ м, $h_2=6$ м. Характеристики засипки: $E_1=40$ МПа, $\mu_1=0,3$, $c=0,002$ МПа, $\varphi=28^\circ$; ґрунтового масиву: $E_2=20$ МПа, $\mu_2=0,4$, $c=0,003$ МПа, $\varphi=21^\circ$. Для бетону стінки: $E=32500$ МПа, $\mu=0,2$, $\sigma_p=1,5$ МПа, $\sigma_c=17$ МПа. Тимчасовий відрізок, у якому розглядався коливальний процес, дорівнює 7 сек. Довжина тимчасового кроку $\Delta t=0,01$ сек. Протягом 0,1 сек. на причал діє імпульсне динамічне навантаження Q_2 інтенсивністю 0,013 МПа.

На рис. 2 та рис. 3 наведені епюри горизонтальних та вертикальних коливань точки A , показаної на рис. 1. Максимальні коливання спостерігалися до 0,3 сек., потім було їх поступове згасання. Система складається з різнорідних матеріалів, у процесі її коливань відбувалися всілякі відбитки хвиль. Тому рівномірних гармонійних загасаючих коливань з постійним періодом не спостерігалось. Хоча на нескінченних межах ґрунтового масиву при його дискретизації застосовувалися нескінченні елементи для усунення відбиття від них хвиль.

На рис. 4 зображена епюра коливань напруг σ_{22} в точці B системи. Найбільший розмах коливань відбувався в початковий момент часу, потім було їх різке згасання.

На закінчення можна відзначити, що запропонована методика та програмний комплекс дозволяють проводити розрахунок різних систем, на які діють статичні та динамічні навантаження з урахуванням пружно-пластичних властивостей їх матеріалів.

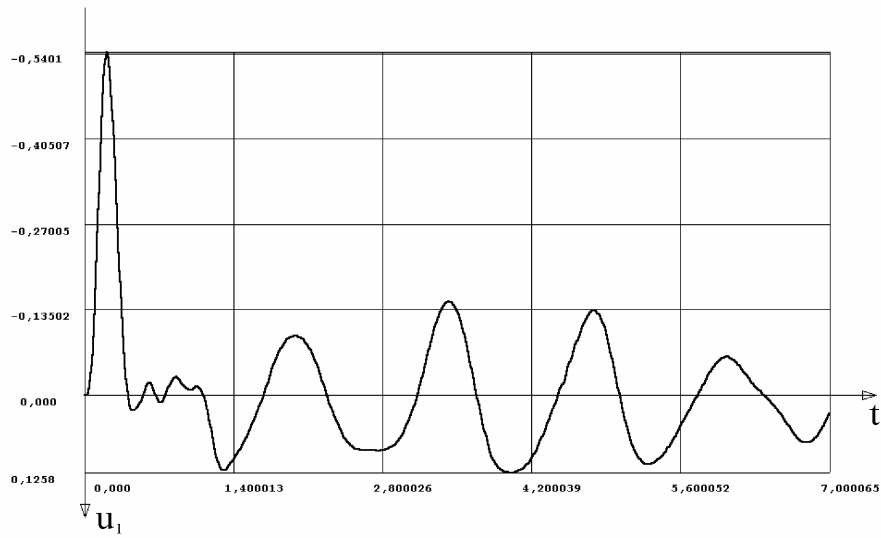


Рис. 2. Етюра горизонтальних коливань точки А системи (в см і сек.)

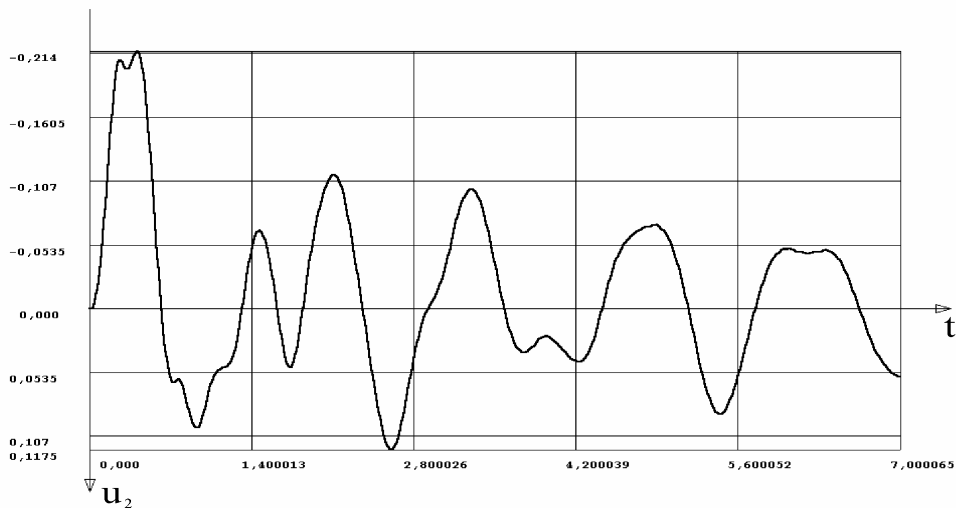


Рис. 3. Етюра вертикальних коливань точки А системи (в см і сек.)

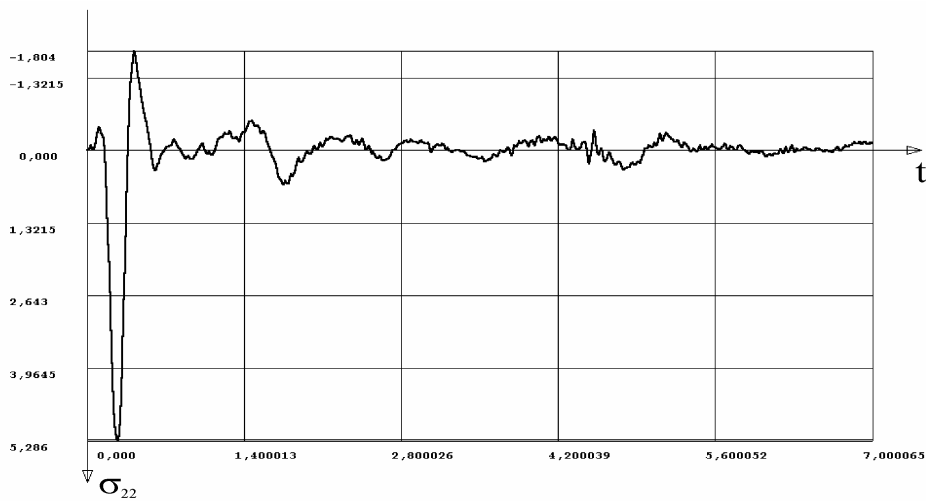


Рис. 4. Етюра коливань напруг σ_{22} у точці В системи (в 10 МПа і сек.)

Висновки, які можна зробити з розглянутого в роботі прикладу, полягають у тому, що розглянута споруда, ґрунтове та водне середовище взаємопов'язані між собою.

Зміна у часі властивостей одного елемента системи впливає на напружено-деформований стан іншого. Тому лише їхній спільний розрахунок дозволить отримати правильні результати.

Крім того, при вирішенні динамічних задач необхідно враховувати деформації та напруги, що отримані від статичних навантажень, оскільки вони впливають на коливальний процес, що виникає при динамічному навантаженні системи.

Динамічні впливи, що діють на спорудження, розглядалися не статичними, як це прийнято в посібниках та існуючих методиках розрахунку, а динамічними, що дозволило наблизити результати рішень до реальних зусиль, що виникають як у самій системі, так і в розташованих поблизу інших спорудах.

Модель системи, що використовувалась в роботі, дозволила розглянути не тільки навантаження, що змінюються пропорційно до будь-якого параметра, що необхідно для деформаційних теорій пластичності, а й складне навантаження. Це дало змогу врахувати послідовність прикладання навантажень системи у процесі її зведення та експлуатації, що було реалізовано в алгоритмі рішення. Інерційні властивості моделі дозволили визначати хвильові коливальні процеси не тільки в елементах, до яких прикладено динамічне навантаження, а й у всій системі та сусідніх спорудах.

Також було встановлено, що на початку фази вільних коливань гармонійні та імпульсні навантаження викликають переміщення та напруги, які перевищують їх значення у стабілізованому стані більш ніж удвічі. Отже, ці ефекти мають бути враховані під час проектування причальних споруд.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Zienkiewicz O. C., Cheung Y. K. *The finite element method in structural and continuum mechanics*. London, 1967. 268 p.
2. Аргурис Дж. *Современные достижения в методах расчета конструкций с применением матриц / Пер. с англ.* М.: Стройиздат, 1968. 241 с.
3. Turner M.J., Clough R.W., Martin H.C., Topp L.J. *Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures*. *Journal of the Aeronautical Sciences*, 1956. Vol.23. P. 805-823.
4. Розин Л.А. *Современное состояние метода конечных элементов в строительной механике // Изв.ВУЗов. Строительство и архитектура*, 1981. № II. С.41-54.
5. Городецкий А.С., Евзеров И.Д. *Компьютерные модели конструкций*. К.: Факт, 2007. 394 с.
6. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. *Расчетные модели сооружения и возможность их анализа*. К.: Сталь, 2002. 360 с.
7. Гуревич В.Б., Даревский В.Э., Самарин В.Ф., Федоров Ю.М. *Портовые гидротехнические сооружения / Под ред. В.Б. Гуревича*. М.: Транспорт, 1992. 256 с.
8. Смирнов Г.Н., Горюнов Б.Ф. и др. *Порты и портовые сооружения*. – М.: Стройиздат, 1993. 636 с.
9. Яковенко В.Г. *Строительство молв и волноломов*. – М.: Транспорт, 1983. 191 с.
10. Гришин А.В., Федорова Е.Ю. *Нелинейные динамические задачи расчета портовых гидротехнических сооружений*. Одесса: Изд-во ОГМУ, 2002. 126 с.
11. Смирнов Г.Н., Горохов Б.Ф. и др. *Порты и портовые сооружения*. М.: Стройиздат, 1979. 607 с.
12. Алмазов В.О., Смирнов Г.Н. *Железобетонные конструкции в портовом гидротехническом строительстве*. М.: Транспорт, 1986. 199 с.
13. Ивлев Д.Д., Быковцев Г.И. *Теория упрочняющегося пластического тела*. М.: Наука, 1971. 231 с.
14. Гениев Г.А., Киссюк В.Н., Тюпин Г.А. *Теория пластичности бетона и железобетона*. М.: Стройиздат, 1974. 316 с.

REFERENCES

1. Zienkiewicz O. C., Cheung Y. K. *The finite element method in structural and continuum mechanics*. London, 1967. 268 p.
2. Argyris J. *Modern advances in methods of calculation of structures using matrices / Per. from English*. M.: Stroyizdat, 1968. 241 p.
3. Turner M.J., Clough R.W., Martin H.C., Topp L.J. *Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures*. *Journal of the Aeronautical Sciences*, 1956. Vol.23. pp. 805-823.
4. Rozin L.A. *The current state of the finite element method in structural mechanics*. *Izv.VUZov. Construction and architecture*, 1981. No. II. P.41-54.
5. Gorodetsky A.S., Evzerov I.D. *Computer models of structures*. K.: Fact, 2007. 394 p.
6. Perelmuter A.V., Slivker V.I. *Calculation models of the structure and the possibility of their analysis*. K.: Steel, 2002. 360 s.
7. Gurevich V.B., Darevsky V.E., Samarin V.F., Fedorov Yu.M. *Port hydraulic structures*. Ed. Gurevich V.B. M.: Transport, 1992. 256 p.
8. Smirnov G.N., Goryunov B.F. and other *Ports and port facilities*. M.: Stroyizdat, 1993. 636 p.
9. Yakovenko V.G. *Construction of moles and breakwaters*. M.: Transport, 1983. 191 p.
10. Grishin A.V., Fedorova E.Yu. *Nonlinear dynamic problems of calculating port hydraulic structures*. Odesa: OGMU Publishing House, 2002. 126 p.
11. Smirnov G.N., Gorokhov B.F. and other *Ports and port facilities*. M.: Stroyizdat, 1979. 607 p.
12. Almazov V.O., Smirnov G.N. *Reinforced concrete structures in port hydraulic engineering*. M.: Transport, 1986. 199 p.
13. Ivlev D.D., Bykovtsev G.I. *Theory of hardening plastic body*. M.: Nauka, 1971. 231 p.
14. Geniev G.A., Kissyuk V.N., Tyupin G.A. *Theory of plasticity of concrete and reinforced concrete*. M.: Stroyizdat, 1974. 316 p.

Стаття надійшла до редакції 20.09.2023

Посилання на статтю: Гришин А.В., Олейніков В.В. Нелінійний розрахунок причалу з залізобетонної шпунтової стінки від дії динамічного навантаження // Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наук. праць, 2023. № 4 (71). С. 49-58. DOI 10.47049/2226-1893-2023-4-49-58.

Article received 20.09.2023

Reference a journalartic: Grishin A., Oleynikov V. Nonlinear calculation of a thin reinforced concrete retaining wall from the action of dynamic load // Herald of the Odesa national maritime university: Coll. scient. works, 2023. № 4 (71). P. 49-58. DOI 10.47049/2226-1893-2023- 4-49-58.