

УДК 627.522:624.042.7

DOI 10.47049/2226-1893-2023-2-75-92

**АНАЛІЗ СЕЙСМІЧНОГО ВПЛИВУ НА ПРИЧАЛЬНУ СПОРУДУ
ТИПУ ЗААНКЕРОВАНИЙ БОЛЬВЕРК
У СКЛАДНИХ ІНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГІЧНИХ УМОВАХ**

К.В. Єгунов

д.т.н., проф., завідувач кафедри «Цивільна інженерія та архітектура»

А.В. Войтюк

інженер-гідротехнік,

магістр спец. 194 «Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології»

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

***Анотація.** У дослідженні розроблено алгоритм аналізу природних умов ділянки будівництва та виконано підбір сейсмостійкої конструктивної схеми для причальної споруди типу заанкерований больверк в порту Джурджулеїшть (Республіка Молдова) на ріці Прут. Під час розробки конструктивної схеми додатково враховані заходи із штучного покращення фізико-механічних властивостей ґрунтів основи та наявність значних перепадів рівнів води на ріці Прут. У дослідженні виконано комплекс розрахунків причальної споруди згідно до чинних нормативно-технічних документів та подальший її розрахунок на прямий сейсмічний вплив з врахуванням реальної акселерограми, отриманої за допомогою досліджень, виконаних дочірнім підприємством ДП «Сейсмобуд» Інститутом геофізики ім. С.І. Суботіна НАН України під керівництвом д.т.н. Єгунова К.В. Дослідження базуються на отриманих за допомогою мікросейсмічного районування даних та сучасних уявлень про поведінку причальної споруди типу заанкерований больверк під час землетрусів різного ступеню інтенсивності. В даному дослідженні аналізується відмінність між результатами розрахунків несучих кон'яктивних елементів причальної споруди за класичною теорією та за допомогою програми на основі сучасних пружно-пластичних моделей ґрунтів і теорії пластичності на основі принципу максимуму Мізеса, який дозволяє врахувати процес складного навантаження і зміцнення ґрунтової основи. Даний програмний комплекс дозволив завантажити в розрахункову схему отриману за допомогою мікросейсмічного районування акселерограму, яка моделює перерозподілення коливань із врахуванням структури та параметрів ґрунтів основи на майданчику будівництва причалу. Опис досліджуваного процесу дозволяє уточнити врахування сейсмічного впливу на причальні споруди типу заанкерований больверк. Отримані відмінності між коефіцієнтами стійкості споруди дають основу для розробки подальших рекомендацій при проектуванні подібних споруд на ріках в сейсмічно небезпечних регіонах із складними інженерно-геологічними умовами.*

Ключові слова: заанкерований больверк, сейсмічна стійкість, причальна споруда, розрахункова акселерограма, прямий сейсмічний вплив.

UDC 627.522:624.042.7

DOI 10.47049/2226-1893-2023-2-75-92

**ANALYSIS OF THE SEISMIC EFFECT
ON AN ANCHORED SHEET PILE MOORING STRUCTURE
IN COMPLEX ENGINEERING AND GEOLOGICAL CONDITIONS**

K.V. Egupov

Dr. Sci. (Engin.), prof.

Head of the Department «Civil Engineering and Architecture»

A.V. Voitiuk

Hydraulic engineer,

master of specialty 194 «Coastal and Offshore Construction» Water Engineering
and Water Technologies»

Odesa national maritime university, Odesa, Ukraine

Abstract. *The study developed an algorithm for analyzing the natural conditions of the construction site and selected an earthquake-resistant construction scheme for a dock structure of the type of anchored sheet pile wall in the port of Giurgiulesti (Republic of Moldova) on the Prut River. During the development of the structural scheme, measures to artificially improve the physical and mechanical properties of the base soils and the presence of significant water level differences on the Prut River were additionally taken into account. In the study, a set of calculations of the quay structure was performed according to the current regulatory and technical documents and its subsequent calculation for direct seismic impact, taking into account the real accelerogram, obtained with the help of studies by the subsidiary of SE «Seismobud» by the Institute of Geophysics named after S.I. Subotin of the National Academy of Sciences of Ukraine under the leadership of Dr. Yegupov K.V. The research is based on data obtained with the help of microseismic zoning and modern ideas about the behavior of a mooring structure such as an anchored sheet pile wall during earthquakes of various degrees of intensity. This study analyzes the difference between the results of calculations of the load-bearing structural elements of the pier structure according to the classical theory and using a program based on modern elastic-plastic models of soils and the theory of plasticity based on the principle of the Mises maximum, which allows taking into account the process of complex loading and strengthening of the soil base. This software complex made it possible to load the accelerogram obtained with the help of microseismic zoning into the calculation scheme, which models the redistribution of vibrations taking into account the structure and parameters of the foundation soils at the berth construction site. The description of the studied process makes it possible to clarify the consideration of the seismic impact on mooring structures of the anchored bulwark type. The obtained differences between the stability coefficients of the structure provide a basis for the development of further recommendations for the design of similar structures on rivers in seismically dangerous regions with complex engineering and geological conditions.*

Keywords: *anchored bulwark, seismic resistance, mooring structure, calculated accelerogram, direct seismic impact.*

Вступ. Рациональне проектування сейсмостійких конструкцій гідротехнічних транспортних споруд (далі ГТС), підвищення їх надійності має важливе інфраструктурне значення. Блокування українських портів у 2022-2323 рр. зумовило бурхливий розвиток портів та терміналів на р. Дунай та р. Прут.

Будівництво причальних ГТС у складних інженерно-геологічних умовах при прогнозованому сейсмічному впливі 9 балів на ріках з великим перепадом рівнів води є складною інженерною задачею. Правильний розрахунок сейсмічного впливу на несучі конструктивні елементи ГТС здатний не лише допомогти підібрати правильне конструктивне компонування причальної споруди, а й запобігти можливій катастрофі у випадку реального землетрусу.

У дослідженні виконано підбір сейсмостійкої конструктивної схеми для причальної споруди типу заанкерований больверк в порту Джурджулешть (Республіка Молдова) на річці Прут, її подальший розрахунок на статичні навантаження та сейсмічний вплив.

Актуальність. Проблема визначення сейсмічного впливу на причальні ГТС типу заанкерований больверк ускладнюється великою різноманітністю конструктивних схем таких споруд та інженерно-геологічних умов. Додатковим ускладнюючим фактором є відмінності у категоріях навантажень на причальні споруди, відмінності у гідрологічних режимах Чорного моря та ріки Прут, а також різниці у проектних глибинах операційних акваторій.

У зв'язку з тим, що розрахунки несучих конструктивних елементів причальної споруди за класичною теорією Кулона-Мора можуть давати результати у згинальних моментах лицьової стінки та зусиллях в анкерних пристроях, вищі за реальні, до 30 % [5;7], постає проблема більш точних методах підбору конструктивних елементів. Сучасний підхід до розрахунку причальних споруд у сейсмостійкому виконанні є мало дослідженим та слабо систематизованим.

Як наслідок, інженери-гідротехніки вимушені або користуватися застарілими радянськими нормами сейсмостійкого проектування ГТС, або стикатися з проблемою відсутності рекомендацій щодо використання реальних акселерограм для сучасного розрахунку причальної споруди на прямий динамічний вплив.

Тому, актуальною задачею для дослідження сейсмічного впливу на причальну споруду типу заанкерований больверк буде проходження всіх етапів сейсмостійкого проектування: від аналізу природних умов ділянки будівництва споруди та вибору конструктивної схеми причальної споруди виходячи з конкретних вимог до її експлуатаційних навантажень, до розрахунку основних конструктивних елементів споруди за чинними нормативно-технічними документами та подальший її розрахунок на прямий сейсмічний вплив з врахуванням реальної акселерограми. Після виконання розрахунків отримані результати порівнюються з метою аналізу відмінностей в отриманих згинальних моментах та зусиллях в анкерних пристроях споруди.

Метою дослідження є **порівняння результатів класичних методів розрахунку за двома групами граничних станів та розрахунку з використанням математичного моделювання на основі сучасних пружно-пластичних моделей**

грунтів і теорії пластичності на основі принципу максимуму Мізеса, який дозволяє врахувати процес складного навантаження і зміцнення.

Робоча гіпотеза дослідження. Розрахунок міцності причальної споруди типу заанкерований больверк за класичною теорією Кулона-Мора та загальної стійкості за методом Терцагі погано враховують пластичні і реологічні властивості ґрунтів. Методи розрахунку на сейсмічний вплив згідно чинних нормативно-технічних документів [5-7] погано відображають реальну роботу споруди разом з ґрунтами основи під час розрахункового землетрусу.

Найбільш перспективним методом розрахунку причальних споруд на сейсмічний вплив є розрахунок за допомогою математичного моделювання на прямий динамічний вплив з використанням реальних акселерограм, які отримують шляхом виконання мікросейсморайонування будівельного майданчику, на якому буде побудовано причальну ГТС [4; 7].

Задача дослідження сейсмічного впливу на причальну ГТС типу заанкерований больверк **формулюється наступним чином:**

- на першому етапі досліджуються природні умови, гідрологічний режим ріки Прут та інженерно-геологічна будова ділянки будівництва;
- другий етап пов'язаний із мікросейсморайонуванням ділянки будівництва та визначення параметрів розрахункового землетрусу;
- на третьому етапі на підставі вимог до майбутньої причальної споруди формується сейсмостійка конструктивна схема;
- четвертий етап передбачає виконання класичних розрахунків причальної споруди за двома методами граничних станів та розрахунків у програмному комплексі;
- на п'ятому етапі аналізуються отримані результати розрахунків та робиться висновок про сейсмічну стійкість причальної ГТС типу заанкерований больверк.

Прямий динамічний метод розрахунку споруд. З бурхливим розвитком інформаційних технологій, ЕОМ і чисельних методів вирішення задач будівельної механіки [12,13] виникла можливість аналізувати і моделювати складні зміни в часі процеси, що відбуваються у будівлі або споруді протягом циклу зведення, експлуатації та / або реконструкції. При цьому існує практично необмежена можливість моделювання цих процесів. Одним з аналізів в КЕ-моделюванні є порівняно новий прямий динамічний аналіз (розрахунок), в якому використовується пряме інтегрування рівнянь руху без будь-яких перетворень рівнянь. Матричне рівняння руху просторової системи для переміщень має вигляд

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + K\bar{X} = -M\ddot{\Delta}$$

Для чисельного інтегрування рівнянь руху можуть бути використані і інші прямі методи, зокрема, метод Ньюмарка, який отримав широке застосування в динамічних розрахунках.

Поряд з описаними вище підходами до розрахунку споруд на вплив акселерограм, може бути використаний і більш загальний підхід, заснований на застосуванні МСЕ до завдань розрахунку споруд на динамічні впливи.

Останнім часом значна увага приділяється проблемі взаємодії споруди з ґрунтом основи. У найбільш загальній постановці ця проблема може бути сформульована у вигляді динамічної контактної задачі поєднання основи і споруди [11].

Виклад основного матеріалу. Міжнародний Вільний Порт Джурджулешть (далі МВПД) розташований на 133,8 км/72,2 морської милі від Чорного моря на приморській ділянці річки Дунай. МВПД користується вигідним стратегічним розташуванням у безпосередній близькості від молдавського кордону з Румунією та Україною. МВПД володіє 480 м узбережжя Дунаю, яке Молдова отримала від України замість ділянки території з дорогою біля села Паланка у Штефан-Водському районі Молдови, що є власністю України. Акваторія порту має глибини до 7,0 м, що дозволяє приймати як судна внутрішнього плавання, так і морські судна.

Ділянка будівництва причальної споруди типу заанкерований больверк розташована у місці впадання р. Прут в р. Дунай, тому відмітки лінії кордону та понижених майданчиків фактично залежать від гідрологічного режиму р. Прут (рис. 1).



 – майданчик будівництва універсального причалу

Рис. 1. Розташування будмайданчику в порту Джурджулешть

Гідрологічний режим. Річний перебіг рівня води р. Прут характеризується весняним підйомом, обумовленим таненням снігу і частими дощовими паводками, що зазвичай по висоті перевищують підйом весняної повені [10].

Середня інтенсивність підйому рівня води 20-40 см/добу. У роки з високою повинню інтенсивність підйому 150 см/добу, а у роки з низьким – 20-35 см/добу. Амплітуда коливання рівня води зменшується у міру просування вниз за течією річки. З початку сімдесятих років умови проходження паводкової хвилі змінилися, внаслідок споруди у шістдесяті роки та продовження будівництва на початку сімдесятих років огорожувальних валів.

Рівень режиму річки Прут значною мірою залежить від рівневого режиму річки Дунай. Середньорічні рівні води приведені в таблиці нижче відповідно до замірів на п/п Бринза.

<i>Середньорічні рівні води різної забезпеченості, м БСВ</i>					
25%	50%	75%	80%	90%	95%
<i>До побудування водосховища</i>					
5,95	5,40	4,98	4,90	4,70	4,60
<i>Після побудування водосховища</i>					
6,57	6,14	5,59	5,41	5,08	4,83

Льодовий режим. Льодові явища спостерігаються не щорічно та відрізняються крайньою нестійкістю. Основною фазою є внутрішньо-водний лід. Осінній льодохід триває 2-15 днів. У деякі роки льодохід не спостерігається взагалі [10]. Середня тривалість льодоставу становить 30 днів. Товщина льоду в середньому до 30 см, суворі зими – 50-60 см. Руйнування льодового складу відбувається наприкінці лютого.

Інженерно-геологічні умови. У геоморфологічному відношенні територія відноситься до лесової акумулятивно-денудаційної рівнини та розташована в межах північно-західної частини Причорноморської низовини, яка нахилена у південному напрямку [10].

Рельєф є порожнистою нахиленою у бік річки Дунай та її заплави рівнину, розчленовану долинами приток – річками Кагул, Прут. Абсолютні позначки поверхні становлять від 2 м – у заплаві річок до 60 м і більше – на вододілах.

У геоморфологічному відношенні територія відноситься до Причорноморської низовини – Нижньо-Дунайській дельтовій рівнині. Майданчик знаходиться в межах лівобережної високої заплавної тераси річки Прут, в районі впадання в Дунай. Абсолютні позначки поверхні становлять 7-8 м Балтійської системи висот (БСВ).

В інженерно-геологічній будові території беруть участь четвертинні алювіально-ліманні відкладення (al QI-IV), які залягають на розмитій поверхні неогенових порід (N1 m). Загальна потужність четвертинних відкладень 70-80 м.

Поверхня майданчика покрита насипними ґрунтами (бетонні плити, щебінь, пісок, суглинок) потужністю 0,3-0,8 м.

Нижче залягає супісок ПЕ-2 буро-палевий, з прошарками світло-бурого суглинка, із включенням карбонатів, твердої консистенції, потужністю 2,0-3,8 м.

На глибині 2,5-4,3 м залягають супіски та суглинки коричнево-сірі, сірі, твердо-напівтвердої (ПЕ-3 а, 3 б) та пластичної (ПЕ-3а*) консистенції, загальною потужністю 2-4 м [10].

З глибини 4-6 м залягає товща суглинків, що перешаровуються, і глини замулених, темно-сірих, блакитно-сірих, з домішкою органічної речовини, місцями слабо заторфованих, з консистенцією від напівтвердої (ІГЕ-4), туго- і м'якопластичної (ІГЕ-4*, 6,6*), до текучопластичної та текучої (ІГЕ-6**), з прошарками та лінзами піску чорного, сірого, пілуватого та дрібного, водонасиченого (ІГЕ-5,8), пухкого та середньої щільності, з прошарками супіску текучого (ІГЕ-7). Ґрунти не витримані за потужністю та простяганням, заміщають один одного, виклинюються. Загальна потужність цих відкладень 10-13 м (рис. 2).

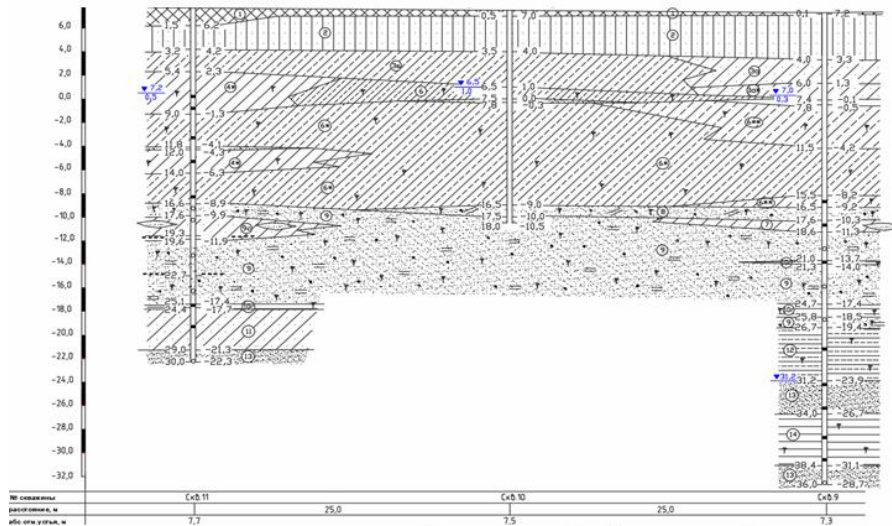


Рис. 2. Інженерно-геологічний розріз ділянки будівництва [10]

На глибині 17,0-19,5 м залягає пісок ІГЕ-9 сірувато-жовтий, буро-сірий, дрібний і пілуватий, з лінзами супіску, з домішкою органічної речовини, середньої щільності. У піску зустрічаються прошарки (від 0,5 до 4,0 м) супіску пластичного (ІГЕ-9с), суглинку та глини (ІГЕ-10с,10г) напівтвердої консистенції. Загальна потужність піщаної товщі 10-14 м.

На глибинах 25-29 м пісок підстиляється суглинками (ІГЕ-12), супісками (ІГЕ-11, 13с), піском (ІГЕ-13), з прошарком глини (ІГЕ-14). Глинисті ґрунти переважно напівтвердої консистенції. Пісок дрібний та пілуватий, водонасичений, середньої щільності. Усі ґрунти містять домішки органічної речовини [10].

Мікросейсмічне районування. Аналіз результатів досліджень щодо уточнення сейсмічності майданчика будівництва, виконаного ДП «Сейсмобуд», ПП «Геолаб» та Інститутом геофізики ім. С.І. Суботіна НАН України [4] показує:

1. Основну сейсмічну небезпеку для досліджуваної території становлять сильні землетруси, що генеруються сейсмоактивними структурами зони Вранча та Добруджі. Спостережені сейсмічні впливи від осередків землетрусів зони Вранча

на території Ренійського району Одеської області на ґрунтах 3-ї категорії за сейсмічними властивостями становили 8-9 балів (землетруси 1802 та 1940 рр.).

2. Розрахована з точністю до сотої частки бала уточнена з урахуванням впливу локальних ґрунтових умов сейсмічна інтенсивність майданчика будівництва причалу в порту Джурджулешть у Молдові

$$IR = IRN + \Delta IM = 9,36 - 0,23 = 9,13 \text{ бала}$$

для повторюваності землетрусів 1 раз на 5000 років [11].

3. Оцінка IR повинна округлятися до цілої кількості, оскільки ДБН В.1.1-12:2014, що діє, не передбачає дробових значень сейсмічної бальності. Він базується на шкалі сейсмічної інтенсивності MSK-64, яка оперує цілими значеннями балів, так само як і її пізніші модифікації, в т.ч. та європейська шкала EMS-98. Отже, уточнена з урахуванням впливу локальних ґрунтових умов прогнозована інтенсивність сейсмічних струсів для майданчика будівництва причалу в порту Джурджулешть складає $IR = 9$ балів за шкалою MSK-64 та ДСТУ Б-В.1.1-28:2010, з допустимим сейсмічним ризиком – 1% (період повторюваності 5000 років) [1].

Таким чином, досліджувана ділянка будівництва універсального причалу в порту Джурджулешть має високі перепади рівня води (до 5,9 м) протягом року, що вимагає від конструкції причалу бути здатною для сприйняття навантажень від судна як у період низької води, так і в періоди з високим рівнем води. Тому розрахункова відмітка лінії кордону причалу приймається +7,20 м БСВ.

Досліджувана ділянка має складні інженерно-геологічні умови та слабкі ґрунти основи. Враховуючи вимоги до категорії навантажень на причальну споруду, необхідне посилення ґрунтів основи або їх заміна.

Дно перед спорудою має бути захищене від впливу придонних течій річки Прут, а також додатково бути стійким до впливу рушіїв розрахункового судна на дно та вертикальний профіль причальної стінки.

Причальна споруда обов'язково розраховується на сейсмічний вплив інтенсивністю 9 балів за шкалою MSK-64.

Конструювання причальної споруди. Основні вимоги до причальної споруди: відмітка лінії кордону складає +7,20 м у Балтійській системі висот (далі БСВ), відмітка дна перед спорудою -7,70 м БСВ. Призначення причальної споруди: універсальний причал, призначений для обробки вантажів за допомогою нобільного крану Sennebogen 6200 НСС.

Робоча вага крану (рис. 3) становить 250 тонн, максимальна вантажопідйомність складає 120 тонн. Таким чином, рівномірно-розподілене навантаження на причальну споруду становить до 60кПа з урахуванням перерозподілення навантажень за допомогою покриття споруди [5].

Максимальне розрахункове судно типу MV «SCALA», що має наступні параметри: довжина судна 115,0 м, ширина судна 17,2 м, осадка судна 5,76 м, дедвейт 7057 т.

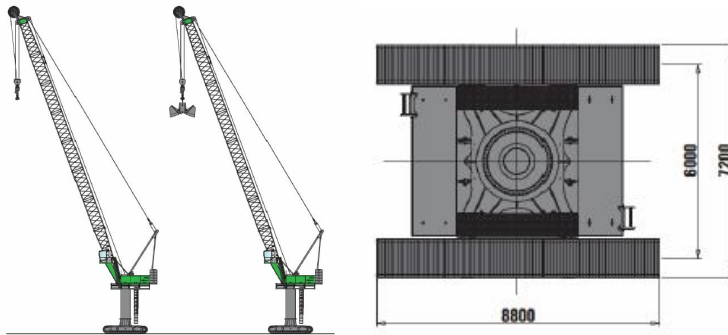


Рис. 3. Кран Sennebogen 6200 HSC. Габарити бази крана

Визначені відповідно до [9] навантаження на причал від судна: максимальне поперечне навантаження від дії вітру на розрахункове судно становить $W_q = 262,33 \text{ кН}$. Зусилля, що сприймається однією тумбою на рівні козирка, (її поперечна складова S_q) становить $S_q = 256,84 \text{ кН}$.

Додатковою вимогою до причальної споруди є забезпечення достатньої міцності ґрунтів основи та закріплення ґрунту дна перед спорудою з метою захисту його від розмиву рушіями розрахункового судна. Тому в тилівій частині причалу попередньо прийнято виконати посилення ґрунту методом струминної цементації до позначки -14,80 м БСВ шириною 16,50 м від лінії кордону в тил причалу, та кріплення ґрунтів основи дна до позначки -14,80 м БСВ на відстані до 15,0 м в акваторію [7].

Для зняття надлишкового моменту на лицьову стінку передбачено влаштування додаткового нижнього анкеруючого ряду у вигляді ґрунтових анкерів. Ґрунтові анкери кріпляться до лицьової стінки на відмітці мінус 4,00 м БСВ (рис. 4).

Для забезпечення обробки суден у період низької води, передбачається влаштувати два понижених майданчики, обладнаних додатковими швартовними пристроями типу ТСО.

Розрахунок споруди за класичними теоріями. Статичний розрахунок заанкерованого больверку виконано графоаналітичним методом згідно вимог нормативно-технічних документів [5-7]. Розрахунок виконаний для одного метра стінки за довжиною причалу за класичною теорією Кулона-Мора [5].

Активний тиск на стінку визначається за формулою

$$\sigma_a = (q_i + \sum \gamma_i h_i) \lambda_{ai} - c_i \lambda_{aci}, \text{ кПа.} \quad (1)$$

Пасивний тиск на стінку визначається за формулою

$$\sigma_p = \sum \gamma_i h_i \lambda_{pi} + c_i \lambda_{pci}, \text{ кПа.} \quad (2)$$

де c_i – зчеплення i -го шару ґрунту, кПа;

λ_{ai} , λ_{aci} – коефіцієнти горизонтальних складових активного тиску ґрунту та активного тиску від сил зчеплення;

λ_{pi} , λ_{pci} – коефіцієнти горизонтальних складових пасивного тиску ґрунту та пасивного тиску від сил зчеплення.

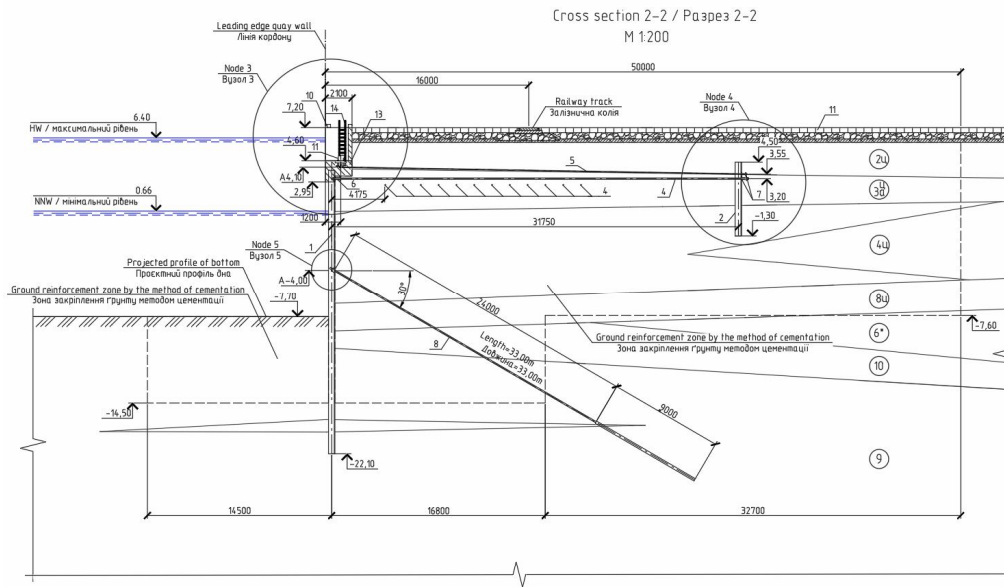


Рис. 4. Розріз причальної ГТС типу заанкерований больверк:

- 1 – шпунт марки AZ 50-700N; 2 – шпунт марки AZ 24-700N;
4 – анкерна тяга діаметром 100 мм, крок 1,40 м;
5 – анкерна тяга пониженого майданчика діаметром 56 мм, крок 1,20 м;
6 – розподільний пояс з двох швелерів П40;
7 – розподільний пояс з двох швелерів П33;
8 – ґрунтовий анкер діаметром 100 мм, крок 1,40 м;
10 – колесовідбійний брус; 11 – покриття причалу; 12 – швартовна тумба;
13 – залізобетонний масив пониженого майданчика; 14 – сходи порятунку

Повне зчеплення приймається на глибині, що дорівнює одному метру (рис. 5). На цій ділянці стінки зміна величини зчеплення від нуля до повного приймається лінійним.

Розрахунок з врахуванням сейсмічного впливу. Для проведення розрахунку конструктивних елементів до статичної розрахункової схеми, використаної раніше, вносяться додаткові зміни.

Поверхня причалу, а також шари ґрунтів отримують в порівнянні з початковим положенням додатковий нахил на сейсмічний кут ε_y , який розраховується за формулою

$$\varepsilon_y = \arctg A_{zy} . \quad (3)$$

Додатково для ділянки з розрахунковою сейсмічністю 9 балів кут внутрішнього тертя ϕ зменшують на 2° (рис. 6). Розрахункові навантаження на причальну споруду враховуються з коефіцієнтом 0,8 (згідно з п.7 [7]).

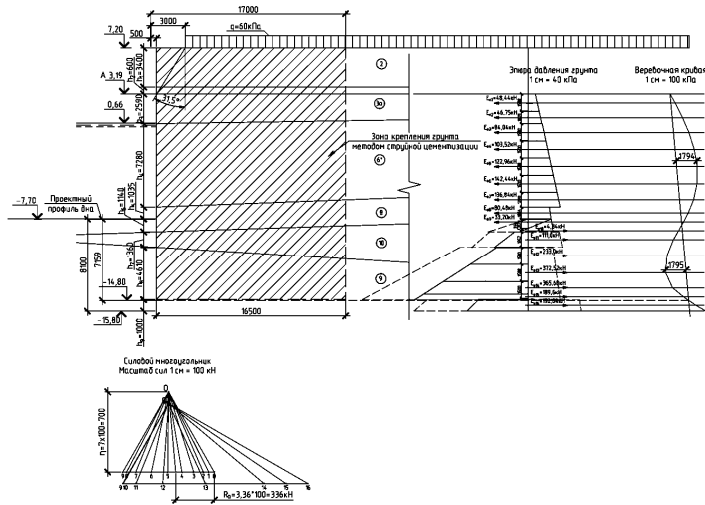


Рис. 5. Розрахункова схема без врахування сейсмічного впливу

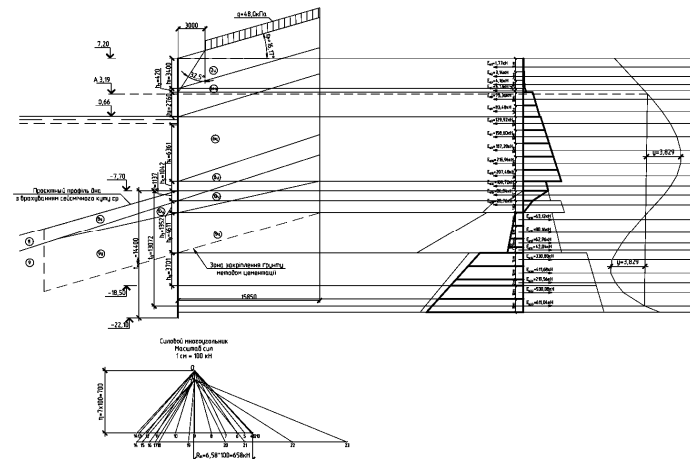


Рис. 6. Розрахункова схема з врахуванням сейсмічного впливу

Для попередніх розрахунків стійкості ефективний коефіцієнт сейсмічності для зсувного масиву A_{zy} дозволяється визначати за формулою

$$A_{zy} = K_1 A_t K_y \quad (4)$$

де $K_1 = 0,25$ – коефіцієнт, що враховує допустимі пошкодження причальних споруд, значення якого приймається згідно до [10];

$K_y = 2,4$ – коефіцієнт збільшення ефективної сейсмічності для зсувного масиву ґрунту, який враховує динамічний характер сейсмічного впливу та водонасиченість ґрунту;

$A_t = 0,48$ – коефіцієнт сейсмічності, який визначається в залежності від розрахункової сейсмічності та нормативного (залишкового) терміну служби споруди.

Коефіцієнт розраховується за формулою

$$A_{\tau} = AK_{\tau} \quad (5)$$

де $A = 0,4$ – коефіцієнт сейсмічності, що приймається згідно [10] для розрахункової сейсмічності 9 балів;

$K_{\tau} = 1,2$ – коефіцієнт, що враховує нормативний або залишковий термін експлуатації споруди τ (у роках) згідно до [5].

Інтенсивність горизонтальної складової активного P_a^s і пасивного P_p^s залишкових тисків ґрунту на стінку при сейсмічному впливі, кПа визначаються за формулами

$$P_a^s = (q^z + mq^s)\lambda_a^s - c\lambda_{ac} \quad (6)$$

$$P_p^s = (q^z + mq^s)\lambda_p^s - c\lambda_{pc} \quad (7)$$

де λ_a^s та λ_p^s – коефіцієнти горизонтальної складової активного та пасивного тиску ґрунту при врахуванні сейсмічного впливу;

q^s – інтенсивність рівномірно розподіленого навантаження на поверхні причалу, кПа;

q^z – інтенсивність вертикального тиску ґрунту, що визначається у відповідності до [7], кПа;

m – коефіцієнт, що визначається згідно з [6];

λ_{ac} та λ_{pc} – коефіцієнти горизонтальної складової активного та пасивного тисків ґрунту від сил зчеплення, що визначаються у відповідності до РД 31.31.27-81 [17].

Кути відхилення від вертикалі рівнодіючих сил ваги та сейсмічних сил для зон активного та пасивного тисків визначаються за формулами

$$\varepsilon_a = \arctg A_{\varepsilon a} \quad (8)$$

$$\varepsilon_p = \arctg A_{\varepsilon p} \quad (9)$$

Розрахунок загальної стійкості. Загальну стійкість причальної споруди виконано за методом Терцагі для розрахункової схеми з врахуванням сейсмічного впливу інтенсивністю 9 балів по шкалі MSK-64 згідно до нормативно-технічних документів [5; 7].

Масив ґрунтів в межах поверхні зсуву розбивається на ряд умовно не пов'язаних між собою вертикальних елементів шириною b та вираховується вага кожного з сегментів G_i з врахуванням навантаження q , що розташоване над ними (рис. 7). Ширина сегментів розраховується за формулою

$$b = 0,1R, \text{ м}, \quad (10)$$

де $R = 31,72$ м – радіус круглоциліндричної поверхні ковзання.

Вага кожного з сегментів розраховується на один погонний метр споруди за формулою

$$G_i = S_i * \gamma_i, \text{ кН}, \quad (11)$$

де S_i – площа i -го елементу ґрунту;

γ_i – питома вага i -го елементу ґрунту в сегменті.

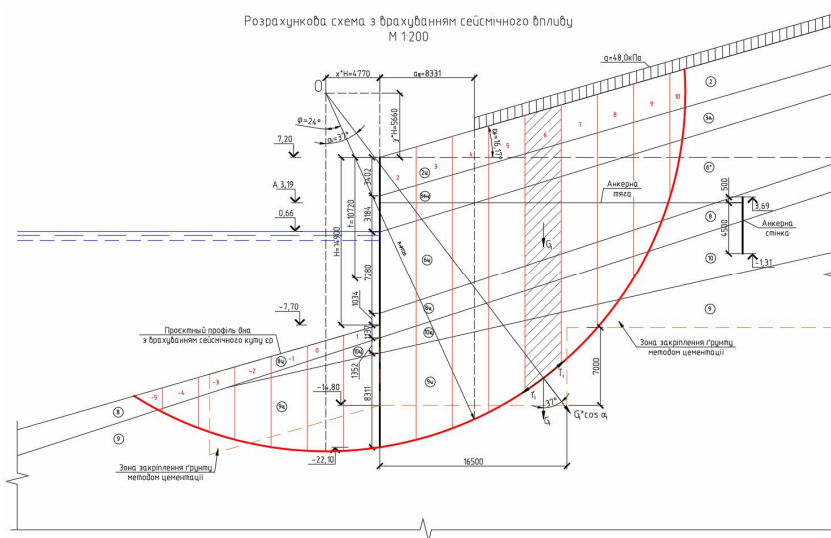


Рис. 7. Розрахункова схема загальної стійкості споруди за методом Терцагі

Зсувні сили для кожного i -го вертикального елемента, позначаються τ_i та розраховуються за формулою

$$\tau_i = G_i \sin \alpha_i, \text{ кН.} \quad (12)$$

Зсуву i -го сегменту ґрунту перешкоджають сили тертя T_i і сили зчеплення c_i , що діють на його підшві. Положення центру підшви i -го елемента визначається кутом α_i між вертикаллю і радіусом R , проведеним через центр підшви елемента. T_i розраховується за формулою

$$T_i = G_i \cos \alpha_i \tan \varphi_i, \text{ кН.} \quad (13)$$

Згідно до нормативного документу [5; 7] при розрахунку загальної стійкості причальної споруди по схемі глибинного зсуву (за методом Терцагі) має виконуватись наступна умова стійкості:

$$n_c n_d \sum \tau_i = \frac{m}{k_n} \sum T_i, \text{ кН} \quad (14)$$

Розрахунок у програмному комплексі. Розрахунок у програмному комплексі можна розділити на етапи.

Етап перший – побудова розрахункової схеми для погонного метру причальної споруди із врахуванням експлуатаційних навантажень.

Етап другий – призначення фізико-механічних характеристик ґрунтам основи та конструктивним елементам заанкереного більверку.

Етап третій – призначення інтерфейсу динамічного навантаження для подальшого завантаження розрахункової акселерограми в схему.

Етап четвертий – виконання розрахунку споруди, подальший аналіз результатів розрахунку.

У розрахунковій схемі (рис. 8) додатково враховуються заходи із закріплення ґрунтів основи методом цементації та мінімальний рівень води у річці Прут з метою коректного відображення поведінки споруди. За підсумками розрахунку отримано наступні дані (рис. 9; 10).

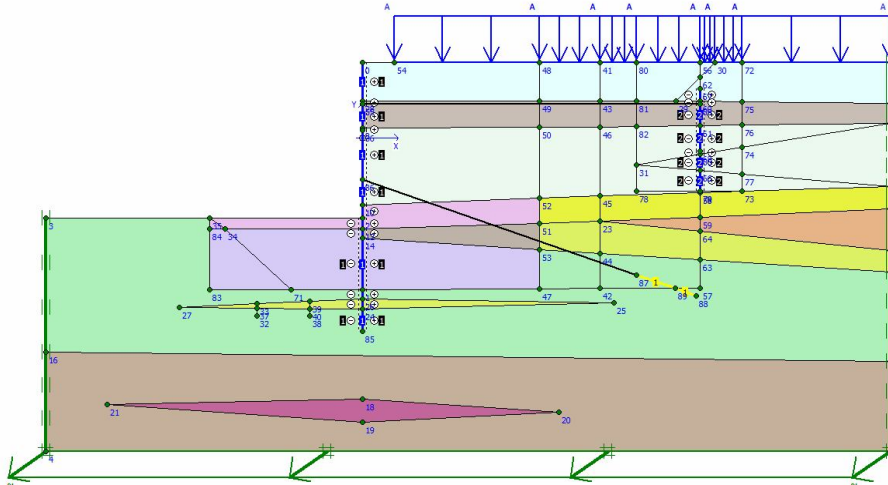


Рис. 8. Розрахункова схема заанкерованого більверку

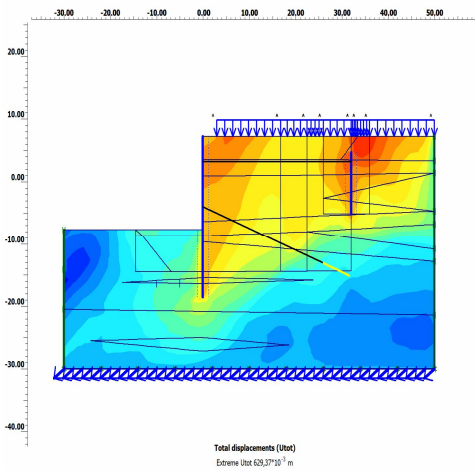


Рис. 9. Схема загальних переміщень ґрунту. Загальне максимальне переміщення становить 62,937 см

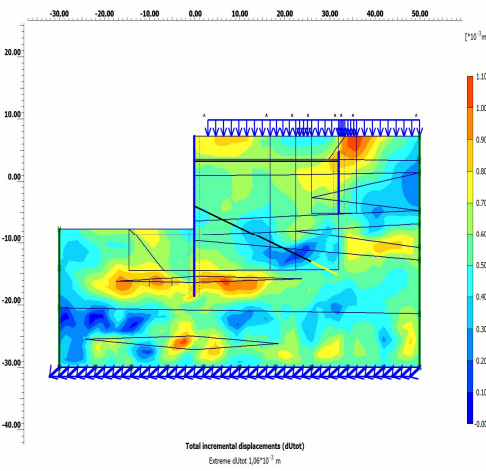


Рис. 10. Схема збільшення переміщень при сейсмічному навантаженні, отриманому при аналізі акселерограми

Порівняння результатів розрахунків. Отримана інформація дозволяє порівняти результати виконання розрахунків класичними графоаналітичними методами з методами кінцевих елементів (МКЕ).

Згідно до розрахунку, виконаному за методом Кулона-Мора, при дії статичних навантажень максимальний згинальний момент, що виникає у лицьовій стінці, становить $M_{\min}=1790,51$ кН*м/м. При цьому, з врахуванням сейсмічного впливу, момент збільшується до $M_{\max}=2680$ кН*м/м.

При цьому, значення максимального згинального моменту в лицьовій стінці, отриманого в програмному комплексі з врахуванням реальної акселерограми складає $2530,0$ кН*м/м (рис. 11).

Розбіжності в значеннях згинальних моментів в анкерній стінці заанкереного больверку є більш значними. Якщо при дії статичних навантажень анкерна стінка в роботі причальної споруди практично не задіюється ($M = 7,20$ кН*м/м), то при врахуванні сейсмічного навантаження за класичною теорією Кулона-Мора згинальний момент збільшується до $M_{\max} = 670,0$ кН*м/м (рис. 12). Таким чином, анкерний пристрій з анкерних тяг та анкерної стінки є елементом, який забезпечує сейсмічну стійкість споруди та забезпечує надійність роботи швартовних пристроїв.

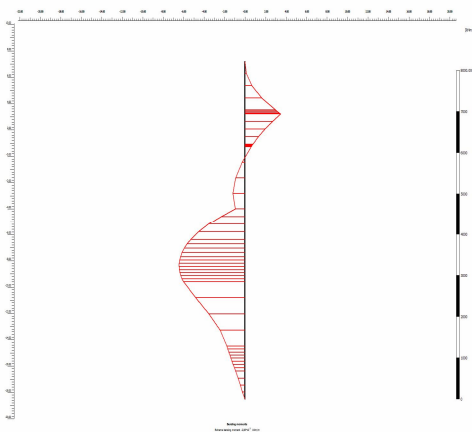


Рис.11. Максимальний згинальний момент в лицьовій стінці складає $M_{\max}=2530$ кН*м

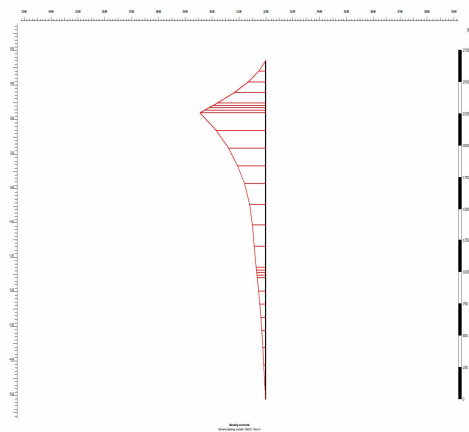


Рис. 12. Максимальний згинальний момент в анкерній стінці складає $M_{\max}=664,25$ кН*м

Поздовжнє зусилля в анкерних тягах діаметром 100 мм заанкереного больверку, розраховане за класичною теорією, становить $N = 999,6$ кН/м, при цьому в програмному комплексі при врахуванні розрахункової акселерограми (рис. 13) зусилля в анкерній тязі є більшим $N_{\max} = 1022,0$ кН/м.

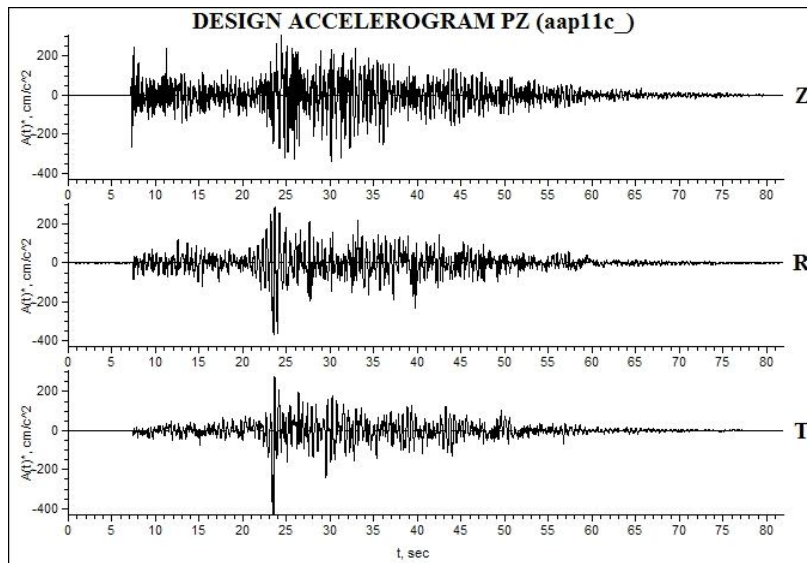


Рис. 13. Графік трикомпонентної розрахункової акселерограми, що моделює 9-ти бальний розрахунковий землетрус із зони Вранча [4]

При розрахунках загальної стійкості за методом Терцагі з врахуванням сейсмічного навантаження було отримано коефіцієнт стійкості $K_{ст} = 1,10$. Отриманий за допомогою розрахункової акселерограми коефіцієнт стійкості становить $K_{ст} = 1,16$.

Висновки. Таким чином, виявлено залежність між даними, отриманими за допомогою класичних методів розрахунку, та даними, отриманими за допомогою програмного комплексу. В середньому, отримані за допомогою класичного розрахунку значення згинальних моментів вищі за значення, отримані у програмному комплексі на 10 %. Таким чином, підтверджується теза нормативного документу [8] про те, що за епіюрами Кулона-Мора можливо отримувати значення, завищені до 30 % у порівнянні з МКЕ.

Більш цікаві відмінності можна побачити у різниці в результаті розрахунків загальної стійкості. Отриманий коефіцієнт стійкості **за методом Терцагі становить $K_{ст} = 1,10$** – споруда за умови сейсмічного впливу знаходиться в граничному стані, що може призвести до аварійної ситуації, катастрофи та людських жертв. Однак, отримані дані за МКЕ в програмному комплексі, що краще моделює поведінку ґрунту та використовує реальну розрахункову акселерограму, вже показують **$K_{ст} = 1,16$** , що свідчить про достатню стійкість та надійність причальної споруди.

Виходячи з цього, обрана **конструктивна схема** причальної ГТС типу заанкерований больверк **є стійкою до максимального розрахункового землетрусу** інтенсивністю 9 балів по шкалі MSK-64.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ДБН 1.1-12:2014. «Будівництво в сейсмічних районах України». – К.: Мінрегіонбуд України, Укрархбудінформ, 2014. – 110 с.
2. ДБН В.2.4-3:2010 «Гідротехнічні споруди. Основні положення». – К.: Мінрегіонбуд України, Укрархбудінформ, 2010. – 36 с.
3. ДСТУ Б-В.1.1-28:2010 «Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Шкала сейсмічної інтенсивності». – К.: ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» (НДІБК). 2011. – 79 с.
4. Отчет «Определение сейсмической опасности площадки реконструкции компрессорной станции «Орловка-1» газопровода «Шебелинка-Днепропетровск-Кривой Рог-Измаил» по данным сейсмического районирования и генерирования расчетных акселерограмм». Дочернее предприятие «Сейсмобуд» Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины. Киев-Одесса 2015. – 79 с.
5. РД 31.31.27-81 «Руководство по проектированию морских причальных сооружений». – М.: В/О «Мортехинформреклама», 1984. – 400 с.
6. РД 31.31.55-93 «Инструкцию по проектированию морских причальных и берегоукрепительных сооружений». – М., 1996. – 259 с.
7. РД 31.3.06-2000 «Руководство по учету сейсмических воздействий при проектировании морских гидротехнических сооружений типа больверк». – М.: Минтранс, 2001. – 68 с.
8. СНиП 2.06.04-82 «Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)». – Всесоюзный научно-исследовательский институт гидротехники им. Б.Е. Веденеева (ВНИИГ), 1984. – 46 с.
9. СНиП II-7-81* «Строительство в сейсмических районах». – М.: ФГУП ЦПП, 1981. – 44 с.
10. Технический отчет по инженерно-геологическим изысканиям на объекте «Рабочий проект по строительству на территории МС причала универсального назначения на участке между двумя зерновыми терминалами»: ТОВ «ЛАКОСА». Одесса, 2019.
11. Єзупов В.К. Методи оцінки сейсмостійкості будівель та споруд: автореф. дис. ... канд. техн. наук // В.К. Єзупов. – Одесса: ОНМУ, 2018. – 23 с.
12. Chopra, A.K. Capacity-Demand-Diagram Methods Based on Inelastic Design Spectrum / A.K. Chopra, R.K. Goel // Earthquake Spectra. – 1999. – Vol. 15. – № 4. – P. 637-656.

REFERENCES

1. DBN 1.1-12:2014. «Construction in seismic areas of Ukraine». – K.: Ministry of Regional Development of Ukraine, Ukrakhbudinform, 2014. – 110 p.

2. DBN V.2.4-3-2010 «Hydraulic structures. Substantive provisions». – K.: Ministry of Regional Development of Ukraine, Ukrarchbudinform, 2010. – 36 p.
3. DSTU B-V.1.1-28:2010 «Protection against dangerous geological processes, harmful operational influences and fire. Scale of seismic intensity». – K.: SE «State Research Institute of Building Structures» (NDIBK). 2011. – 79 p.
4. Report «Determining the seismic hazard of the reconstruction site of the compressor station «Orlovka-1» of the gas pipeline «Shebelinka-Dnepropetrovsk-Kryvyi Rih-Izmail» based on the data of seismic zoning and generation of calculated accelerograms. «Subsidiary enterprise «Seismobud» Institute of Geophysics named after S.I. Subbotin of the National Academy of Sciences of Ukraine. Kyiv-Odessa 2015. – 79 p.
5. RD 31.31.27-81 «Manual for the design of marine mooring structures». – M.: V/O «Mortechinformreklama», 1984. – 400 p.
6. RD 31.31.55-93 «Instructions for the design of marine mooring and shore fortification structures». – M, 1996. – 259 p.
7. RD 31.3.06-2000 «Guidelines for accounting for seismic effects in the design of marine hydrotechnical structures of the boll-work type». – M.: Ministry of Transport, 2001. – 68 p.
8. SNiP 2.06.04-82 «Loads and effects on hydraulic structures (wave, ice and other vessels)». – All-Union Scientific and Research Institute of Hydraulic Engineering named after B.E. Vedenev (VNIIG), 1984. – 46 p.
9. SNiP II-7-81* «Construction in seismic regions». – M.: FGUP TsPP. 1981. – 44 p..
10. Technical report on engineering and geological surveys at the facility «Detailed design for the construction of a universal berth on the territory of the MS on the site between two grain terminals»: TOV «LAKOSA». – Odessa, 2019.
11. Yegupov V.K. Methods for assessing the seismicity of the future and spores: abstract of the thesis. dis. ... PhD // V.K. Yegupov.. – Odesa, 2018. – 23 p.
12. Chopra, A.K. Capacity-Demand-Diagram Methods Based on Inelastic Design Spectrum / A.K. Chopra, R.K. Goel // Earthquake Spectra. – 1999. – Vol. 15. – № 4. – P. 637-656.

Стаття надійшла до редакції 00.00.2023

Посилання на статтю: Єгупов К.В., Войтюк А.В. Аналіз сейсмічного впливу на причальну споруду типу заанкерований больверк в складних інженерно-геологічних умовах // Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наук. праць, 2023. № 2 (69). С. 75-92. DOI 10.47049/2226-1893-2023-2-75-92.

Article received 00.00.2023

Reference a journalartic: Egupov K.V., Voitiuk A.V. Analysis of the seismic effect on an anchored sheet pile mooring structure in complex engineering and geological conditions // Herald of the Odesa national maritime university: Coll. scient. works, 2023. № 2 (69). 75-92. DOI 10.47049/2226-1893-2023-2-75-92.