

УДК 627.26:005.8

DOI 10.47049/2226-1893-2024-2-28-38

## НАДІЙНІСТЬ ПРОЄКТІВ МОРСЬКИХ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД

**С.І. Рогачко**

д.т.н., професор кафедри «Морські і річкові порти,  
водні шляхи та їх технічна експлуатація»

ORCID:0000-0001-5201-5368

rostasice@ukr.net

**В.Є. Калюжна**

доцент кафедри «Морські і річкові порти,  
водні шляхи та їх технічна експлуатація»

wave92@ukr.net

**В.В. Литвиненко**

старший викладач кафедри «Морські і річкові порти,  
водні шляхи та їх технічна експлуатація»

litkvictory0102@gmail.com

*Одеський національний морський університет, Одеса, Україна*

**Анотація.** Надійність морських гідротехнічних споруд багато в чому залежить від надійності їх проєктів, при розробці яких враховуються природно-кліматичні умови районів будівництва, їх інфраструктура, наявність місцевих будівельних матеріалів та багато інших факторів.

Морські гідротехнічні споруди під час експлуатації піддаються впливу трьох основних природних сил. До них відносяться: штормові вітрові хвилі; дрейфуючі льодові утворення у вигляді рівних крижаних полів, одиночних торосів та полів зрошення; сейсмічні навантаження.

Об'єктивне урахування цих факторів при проєктуванні ГТС є наважливішою складовою надійності майбутніх об'єктів за розрахунковий період їхнього терміну служби. Точність оцінки силового впливу природних сил залежить від достовірності вихідних даних та досконалості методів відповідних розрахунків, втілених у рекомендаціях нормативних документів.

Силові впливи уточнюються на всіх стадіях проєктування морських споруд, у тому числі й у процесі наукового супроводу. У цій роботі наведено аналіз основних причин, що впливають на надійність проєктів морських гідротехнічних споруд.

**Ключові слова:** морські гідротехнічні споруди, вітрові хвилі, дрейфуючі льодові утворення, сейсмічні навантаження, надійність проєктів.

UDC 627.26:005.8

DOI 10.47049/2226-1893-2024-2-28-38

## RELIABILITY OF MARINE HYDRAULIC STRUCTURES PROJECTS

**S. Rogachko**

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department  
«Sea and River Ports, Waterways and their Technical Operation»  
rostasice@ukr.net

**V. Kalyuzhna**

Associate Professor of the Department «Sea and River Ports,  
Waterways and their Technical Operation»  
wave92@ukr.net

**V. Litvinenko**

senior lecturer of the Department  
«Sea and River Ports, Waterways and their Technical Operation»  
litkvictory0102@gmail.com

*Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine*

**Abstract.** *The reliability of offshore hydraulic structures largely depends on the reliability of their designs, the development of which takes into account the natural and climatic conditions of the construction regions, their infrastructure, the availability of local building materials and many other factors. Marine hydraulic structures during exploitation are exposed to three main natural forces. These include: storm wind waves; drifting ice formations in the form of level ice, single hummocks and hummock fields; seismic loads. Objective consideration of these factors during design is the most important component of the reliability of future structures over the estimated period of their service. The accuracy of assessing the force influence of natural forces depends on the reliability of the initial data and the perfection of the methods of corresponding calculations embodied in the recommendations of regulatory documents. The values of natural loads and impacts are clarified at all stages of the design of offshore structures, including during the process of scientific support.*

*In this paper, an analysis of the reasons affecting the reliability of sea hydraulic structures projects is carried out.*

**Keywords:** *offshore hydraulic structures, wind waves, drifting ice formations, seismic loads, reliability of projects.*

**Вступ.** Кожна гідротехнічна споруда, в силу природно-кліматичних умов районів будівництва, її технічних характеристик та місця розташування є само по собі унікальною. Тому в процесі проектування враховується та уточнюється цілий комплекс питань як при розробці технічних завдань, так і на всіх стадіях проектування.

Інженерний досвід проєктування морських споруд на всій території колишнього СРСР показав, що найбільш доцільним є наявність тристадійності цього процесу, тобто: техніко-економічне обґрунтування, технічний проєкт, робочий проєкт. Спроба прискорення процесу проєктування, з метою скорочення часу та фінансів, є основною причиною прийняття невірних рішень, що призводять зрештою до аварій споруд іноді навіть ще на стадії незавершеного будівництва.

**Постановка проблеми.** Варто згадати, що класи наслідків – це характеристика рівня можливої небезпеки для здоров'я та життя людей, які постійно або періодично перебувають на об'єкті або які будуть зовні такого об'єкта, матеріальних збитків або соціальних втрат, пов'язаних із припиненням експлуатації або втратою цілісності об'єкта. З цього визначення можна дійти невтішного висновку, основні ознаки якими визначаються класи наслідків: це характеристика рівня небезпеки життя людей, що є на об'єкті постійно чи періодично. До цих ознак ще належить матеріальні та соціальні збитки, які можуть бути заподіяні припиненням експлуатації об'єкта. Порядок визначення класів наслідків зазначений у ДСТУ-Н Б В.1.2.-16: 2013. [1] У ДСТУ вказано перелік характеристик можливих наслідків.

**Огляд останніх досліджень та літератури.** Усі гідротехнічні споруди, відповідно до вимог ДБН В.2.4-3: 2010 [2], належать до того чи іншого класу відповідальності з урахуванням наслідків у разі їх руйнувань під час експлуатації.

Так до найвищого класу відповідальності на морі ССЗ відносяться огорожувальні та морські нафтогазопромислові гідротехнічні споруди, які піддаються прямому впливу наведених вище природних факторів. Аварії таких споруд у процесі екстремальних природних впливів на них матимуть катастрофічні наслідки.

Навіть часткове руйнування огорожувальних споруд у період дії штормів невеликої повторюваності, може призвести до значних пошкоджень причалів і пришвартованих до них суден, а також інших типів портових споруд, що загрожує величезними фінансовими втратами. Однак, причини аварій мають не об'єктивний, а суб'єктивний характер. Причинами можуть бути помилки, допущені при пошукових роботах, проєктуванні, будівництві і експлуатації споруд. Недостатньо повне проведення пошукових робіт на місці експлуатації споруди в багатьох випадках призводить до пошкоджень і навіть до повного руйнування конструкції. Проводити пошукові роботи в морі набагато важче, ніж на суші. Якість проєктування гідротехнічних споруд у багатьох випадках залежить від можливостей, досвіду і добросовісності проєктувальника, від рівня науково-технічних знань. Відхилення від вимог проєкту в процесі будівництва можуть звести нанівець переваги навіть дуже гарної конструкції. Значна частина аварій споруд на морі пов'язана з помилками при експлуатації. Аварії споруд на шельфі, як на суші, можуть мати різні наслідки – від незначних до великих, з людськими жертвами і повним руйнуванням споруди. У світовій практиці аварії оцінюються за матеріальними втратами. Великими рахуються аварії з втратами від 1 млн дол. і більше.

В 1975 році у Мексиканській затоці перекинулась СПБУ, яка працювала на значно меншій, ніж була розрахункова, глибині (60 м замість 92 м). Причиною руйнування установки став викид газу, після якого на дні утворилась воронка глибиною 70 м і дві з трьох колон СПБУ попали у цю воронку.

У 1976 році на шельфі КНР затонула СПБУ і загинуло 72 чоловік через те, що не було прийнято до уваги штормове попередження. У 1979 р. в Мексиканській затоці перекинулась американська СПБУ з трьома опорними колонами, які були з'єднані внизу опорним матом. Причиною стало втомне руйнування однієї з колон.

Повних даних про аварії стаціонарних бурових платформ немає. Відомо, що в період з 1966 до 1977 рр. від великих аварій потерпіли 20 металічних платформ: у шести випадках причиною руйнування стали вибухи і пожежі; в п'яти – сильний шторм або ураганний вітер, у трьох – удари суден; у трьох – відмова окремих несучих елементів конструкції (втомне руйнування) тощо. Значна частка аварій пов'язана з процесами транспортування, монтажу, спуску опорних блоків на воду, постановки на ґрунт. Аварії стаціонарних платформ, викликані експлуатаційними навантаженнями, дуже рідкісні.

Аварії морських нафтогазопромислових гідротехнічних споруд призводять до екологічних катастроф в морях (відповідно аварії напівзануреної нафтової бурової платформи надглибокого буріння з системою динамічного позиціонування Deepwater Horizon, яка належала «British Petroleum», в Мексиканській затоці 20 квітня 2010 року). Це – за 80 кілометрів від узбережжя штату Луїзіана в Мексиканській затоці, і з часом переросла в техногенну катастрофу спочатку локального, потім регіонального масштабу, з негативними наслідками для екосистеми регіону на багато десятиліть вперед. Одна з найбільших техногенних катастроф у світовій історії за негативного впливу на екологічну обстановку. Визнана найбільшим витоком нафти у відкритий океан в історії США, і, ймовірно, в світовій історії. При цьому із 146 осіб екіпажу, 13 загинилих, постраждалих 17. Нафта фонтанувала зі свердловини до 19 вересня 2010 року. Наслідки: розлив нафти на Deepwater Horizon (дослівно «Глибоководний Горизонт»). За цей час у води затоки потрапило близько 780 000 м<sup>3</sup> сирої нафти. Пожежа на напівзануреній буровій платформі «Deepwater Horizon» у Мексиканській затоці (джерело: сайт <http://obogdanov.livejournal.com>)



*Рис. 1. Вибух нафтової платформи Deepwater Horizon*

Причина – недосконалість проєкту платформи, недосконалість технології буріння та халатність. На думку відомого економіста Роберта Каплана, однією з причин аварії стала хибна методика оцінення стратегічних ризиків [3].



*Рис. 2. Проведення робіт з очищення акваторії від розливу нафти – екологічна катастрофа; екологічний конфлікт*

*Джерело: сайт <http://obogdanov.livejournal.com>*

Згідно з доповіддю ВР причинами аварії стали людський фактор, зокрема неправильні рішення персоналу, технічні неполадки і недоліки конструкції нафтової платформи, всього було названо шість основних причин катастрофи.

Таким чином, відмова роботи морських гідротехнічних споруд вищого класу відповідальності в принципі є неприпустимим.

Згідно з доповіддю ВР причинами аварії стали людський фактор, зокрема неправильні рішення персоналу, технічні неполадки і недоліки конструкції нафтової платформи, всього було названо шість основних причин катастрофи.

Надійність таких споруд насамперед залежить від надійності їх проєктів. Якість гідротехнічних робіт та будівельних матеріалів, що використовуються в процесі будівництва генеральними підрядниками, контролюються замовниками та авторами проєктів. Проєктування, будівництво, приймання та подальша експлуатація морських споруд повинні здійснюватися у суворій відповідності до вимог нормативних документів.

З цієї причини вже в процесі їхнього проєктування питанням надійності приділяється першорядне значення. Об'єктивна оцінка силових впливів залежить своєю чергою від достовірності вихідних даних, що визначаються з урахуванням

аналізу результатів інженерних пошуків, виконуваних у відповідність до вимогами нормативних документів.

У поданій роботі проаналізовані основні фактори, що впливають на надійність проектів морських гідротехнічних споруд (МГТС) з урахуванням досвіду їх проектування та будівництва.

**Завдання досліджень – Постановка завдання.**

**Метою** цієї роботи є аналіз основних факторів, що впливають на якість та надійність проектів морських гідротехнічних споруд. Поставленої мети було досягнуто:

- аналізом процесу проектування таких споруд;
- аналізом аварій морських гідротехнічних споруд.

**Виклад основного матеріалу.** Аналіз аварій морських гідротехнічних споруд показав, що основними їх причинами були: необ'єктивна інформація про інженерно-геологічні, гідрологічні, природно-кліматичні, сейсмічні впливи та інші природні фактори в районах майбутнього будівництва, на підставі яких визначаються вихідні дані для проектування; недосконалість методів розрахунків природних навантажень та стійкості споруд на ґрунтовій основі від їх впливу; неправильний вибір найбільш не вигідного поєднання екстремальних значень зовнішніх та технологічних навантажень; видалення із процесу проектування наукового супроводу.

Як приклад можна навести аварію молу в нафтовій гавані Шесхаріс у Цемеській бухті Чорного моря у 1966 році. При оцінці його конструкції на стійкість на ґрунтовій основі, у розрахунках були використані завищені значення фізико-механічних характеристик ґрунтів, що залягають в основі споруди.

На початку нинішнього століття при проектуванні молу в порту, нафтопереробного заводу в провінції Куангнгай у В'єтнамі, в бухті Куангай, на узбережжі Південно-Китайського моря, в результаті незадовільної якості інженерно-геологічних вишукувань по всій довжині створу споруди, була прийнята конструкція у вигляді кам'яного накидання.

У процесі будівництва, при уточненні інженерно-геологічних умов, виявилось, що розглянуте в проекті тільки одне конструктивне рішення і було прийняте тільки для кореневої частини молу, оскільки між коренем і головою молу під двометровим шаром піску було виявлено 12-метровий шар мулистого ґрунту. Реалізація проекту призвела до суттєвого збільшення вартості споруди, термінів будівництва та, відповідно, окупності.

До матеріалів інженерних вишукувань для досліджень належать дані з:

- топографії донної поверхні в місцях будівництва споруд;
- дані швидкостей вітрів та напрямків вітрів у районах майбутнього будівництва;
- типів льодових утворень, їх метричних та міцних характеристик у суворі зими рідкісної повторюваності;
- сейсмічного районування;
- інженерно-геологічних умов;
- коливань рівня води;
- температурного режиму.

Дані за вітром та топографією дна у місцях будівництва споруд дозволяють, за рекомендаціями БНіП 2.06.04-82\* [4], з достатньою точністю визначати розрахункові параметри вітрових хвиль від різних для майбутніх споруд хвиле-небезпечних напрямків з урахуванням їхньої трансформації та рефракції. Знаючи розрахункові параметри вітрових хвиль, можна розрахувати значення хвильових навантажень, різні конструктивні варіанти проєктованих споруд, використовуючи той же БНіП [4]. Однак, у проєктній практиці були випадки, коли у нормативних документах відсутні рекомендації щодо розрахунку хвильових навантажень, наприклад, на споруди складних форм. Тоді, у процесі наукового супроводу вдаються до фізичного моделювання на плоских чи просторових моделях, відповідно, або у гідрохвильових лотках чи у водних басейнах.

Аналогічним чином, на підставі об'єктивних вихідних даних, здійснюються розрахунки льодових впливів на проєктовані об'єкти. При цьому особливе значення мають метричні характеристики міцності, характеристики розрахункових льодових утворень, отриманих у процесі польових пошуків у районах майбутнього будівництва. Слід зазначити, що льодові навантаження значно перевищують хвильові. До них відносяться навантаження від рівних крижаних полів, одиночних торосів і полів зрошення, а також локальний льодовий тиск, який проявляється в початковий момент контакту дрейфуючих льодових утворень із спорудами. При цьому на малих за площею контактах реалізуються екстремальні значення локальних тисків, які можна розрахувати відповідно до рекомендацій відомчих норм [5].

За допомогою обчислених максимальних значень локальних льодових тисків можна обґрунтовано призначити марку бетону, або інших будівельних матеріалів, що використовуються в спорудах в зонах змінного рівня води. Не менш важливим є також врахування стираючого впливу дрейфуючими льодовими утвореннями матеріалів конструкцій споруд в зоні їх контакту з гідротехнічними спорудами.

Вихідні дані щодо сейсмічності району будівництва дозволяють спрогнозувати поведінку проєктованих споруд, з урахуванням їх конструкцій, приєднаної маси води та інженерно-геологічних умов основ [6].

Зовнішні навантаження від хвиль, вітру, течій і землетрусів можуть служити джерелами збудження динамічних навантажень. Ризик появи резонансу глобальних або локальних коливань засобів освоєння шельфу з енергетично потужними динамічними навантаженнями, а також ризик переміщень земної кори внаслідок землетрусів піддається ретельній оцінці на проєктній стадії.

Тому особливу значимість мають вихідні дані, які отримують у процесі інженерно-геологічних вишукувань по створах, що відповідають плановому положенню проєктованих об'єктів. Точність цих даних залежить від: кількості та глибини пробурених свердловин; якості відбору зразків ґрунтів за глибиною свердловин та лабораторних досліджень їх характеристик.

Зрештою, на точність вихідних інженерно-геологічних умов впливає кваліфікація та практичний досвід інженерно-технічного персоналу, а також досконалість рекомендацій нормативних документів [6], відповідно до яких виконуються перелічені роботи. Досвід проєктування морських гідротехнічних споруд у колишньому СРСР показав, що найефективнішим є розробка проєктів у три стадії.

Причому на кожній з них виробляється уточнення всіх вихідних даних, а, відповідно, і розрахунків. На рис. 3 представлена схема, що відображає стадії проектування морських гідротехнічних споруд з урахуванням наукового супроводу, яка апробована у проектній практиці.

Маючи необхідний набір вихідних даних, проєктувальники можуть приступати до розгляду кількох конструктивних варіантів споруди, що проєктується, з урахуванням усіх природних факторів, властивих району майбутнього будівництва. Кожен з варіантів проєктуємої споруди на стадії технічного проєкту розраховується на зовнішні навантаження, а потім, з урахуванням власної ваги, визначається її стійкість на ґрунтовій основі. Точність таких розрахунків повністю залежить від досконалості відповідних методів розрахунків, які як рекомендації включені до нормативних документів. У разі відсутності в нормах того чи іншого розрахункового сценарію, відповідно до вимог ДБН В.2.4-3:2010 [2], необхідно здійснювати науковий супровід проєктів фахівцями вищої кваліфікації, які представлятимуть академічні та галузеві інститути, а також науку ВНЗ.

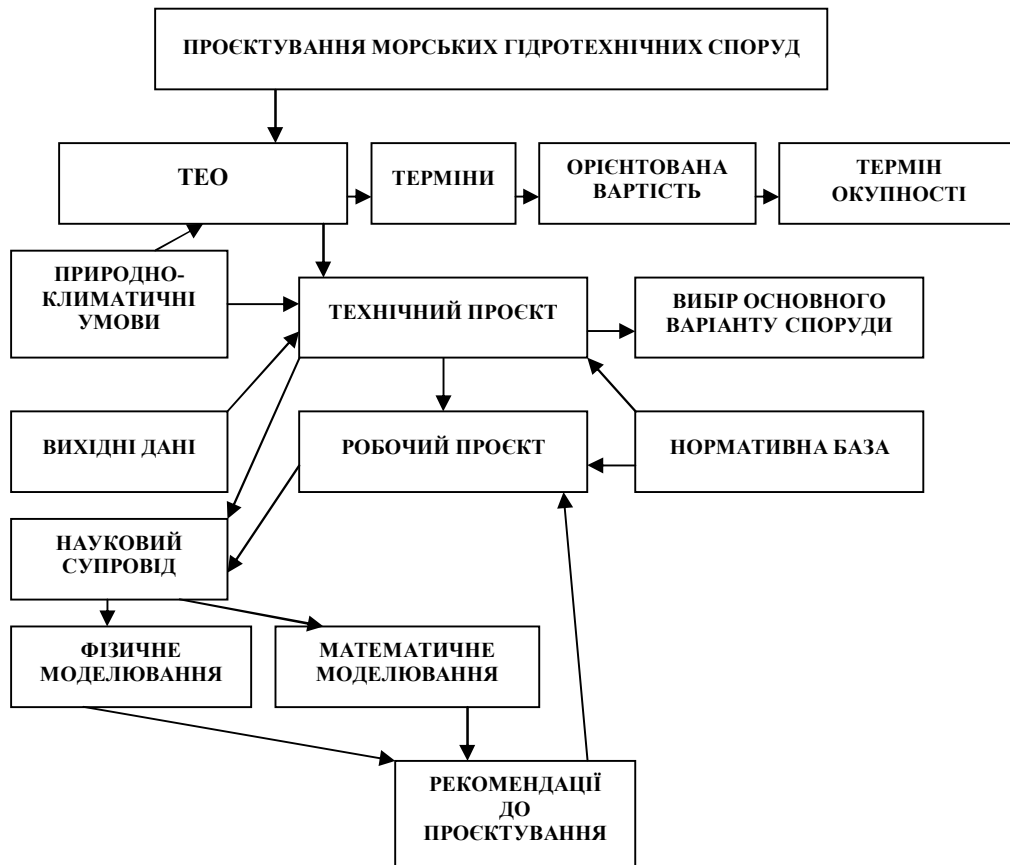


Рис. 3. Схема тристадійного проєктування морських гідротехнічних споруд з урахуванням наукового супроводу



Надійність рекомендацій щодо проектування у процесі наукового супроводу залежить від науково-технічної бази та точності вимірювальної апаратури наукового підрозділу. Не мало важливе значення має також досвід і кваліфікація науково-технічного персоналу.

На стадії технічного проекту проводиться вибір основного варіанта конструкції проектуємої споруди, з урахуванням інфраструктури району майбутнього будівництва та наявності місцевих будівельних матеріалів, які можуть використовуватися при реалізації проекту.

Вибір оптимального варіанта споруди здійснюється, виходячи з його вартості, терміну будівництва, окупності та надійності споруди у процесі розрахункового терміну експлуатації на підставі техніко-економічного порівняння. Крім того, на остаточний вибір впливають і ряд суб'єктивних факторів, пов'язаних із досвідом та кваліфікацією проектувальників.

Після завершення робочий проект повинен піддаватися всебічній експертизі, якість якої також залежить від кваліфікації та практичного досвіду експертів з різних наукових галузей. Після виправлення всіх зауважень експертів робочі проекти (робочі креслення) проходять обов'язкову процедуру затвердження.

### **Висновки**

1. Надійність морських гідротехнічних споруд залежить від надійності їх проектів, контролю за якістю гідротехнічних робіт і будівельних матеріалів при їх зведенні, а також дотримання правил експлуатації у процесі терміну служби.

2. Аналіз аварій морських гідротехнічних споруд вищого класу відповідальності показує, що в розрахунках їхньої стійкості були використані необ'єктивні вихідні дані. Насамперед це стосується фізико-механічних характеристик ґрунтів основ.

3. Досвід проектування морських гідротехнічних споруд довів, що найбільш надійним є тристадійне проектування, в якому вибір основного конструктивного варіанту відбувається на підставі техніко-економічного порівняння, розглянутих у технічному проекті конструкцій та їх планового розташування.

4. Порушення даної стадійності з метою економії коштів та часу на проекти, як показує практичний досвід, неминуче призводить до аварій споруд ще до завершення їх будівництва.

5. Відповідно до рекомендацій норм проектування всіх типів гідротехнічних споруд, у тому числі і морських, повинно здійснюватися за належним науковим супроводом фахівцями вищої кваліфікації.

6. Виходячи із світового досвіду проектування та будівництва морських нафтогазопромислових гідротехнічних споруд, вартість проектних робіт становить приблизно від 10 до 12 % від їх вартості. При цьому на науковий супровід проектів витрачають приблизно від 2 до 3 % від загальної вартості. Слід зазначити, що загальна вартість таких споруд, залежно від глибини води в місці встановлення, може коливатися від одного до кількох мільярдів доларів США.

7. Удосконалення методів розрахунків, які як рекомендації включаються до нормативних документів, неможливе без цілеспрямованої державної фінансової підтримки.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ДСТУ-Н Б В.1.2-16:2013 *Визначення класу наслідків (відповідальності) та категорії складності об'єктів будівництва.*
2. ДБН В.2.4-3:2010. *ГІДРОТЕХНІЧНІ СПОРУДИ. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ.* Київ Мінрегіонбуд України 2010.
3. Роберт Каплан, Анетт Майкс. *Управління ризиками. Нова система // Управління ризиками. (Серія «Harvard Business Review: 10 найкращих статей») // Збірник., 2022. С. 7-28. ISBN 978-5-9614-8186-0.*
4. БНіП 2.06.04-82\*. *Навантаження та впливи на гідротехнічні споруди (хвильові, льодові та від суден).* – К.: 1995. 48 с. (діючий).
5. *Вказівки з розрахунку навантажень та впливів від хвиль, суден та льоду на морські гідротехнічні споруди.* Р. 31.3.07-01, К., 2001.
6. *Доповнення та уточнення СНіП 2.06.04-82\* «Навантаження та впливи на гідротехнічні споруди (хвильові, льодові та від суден)», К., 1995.*
7. ДБН В.1.1-12-2014. *Будівництво в сейсмічних районах України.* К. 2014.
8. ДБН В.1.2-14-2018. *Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд.* К, 2018
9. ДБН А. 2.1-1-2008. *Інженерні вишукування для будівництва.* К., 2008.
10. РД 31.31.38-86. *Інструкція з посилення і реконструкції причальних споруд (діючий).* К., 1986.
11. Боднарук В.Б. *Управління ризиком техногенних небезпек при розробці морських нафтогазових родовищ // журнал Техніка і технології. Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. 2014. № 4(53) ISSN 1993-9973.*

## REFERENCES

1. DSTU. N B V.1.2-16:2013. *For the value of the class of essentials (types of distance) and categories of complexity of budding objects*
2. DBN V.2.4-3:2010. *Hydrotechnical Units. Basic Positions. Kiev Ministry of Regional Development of Ukraine 2010.*
3. Robert Kaplan, Anette. *Mikes Risk management. New system // Risk management. (Harvard Business Review Series: 10 Greatest Articles): Collection, 2022. P.7-28. ISBN 978-5-9614-8186-0.*
4. *Building Regulations 2.06.04-82\*. Loads and impacts on hydraulic structures (wave, ice and from ships) K.: 1995. 48 p. (active).*
5. *Instructions for calculating loads and effects from waves, ships and ice on marine hydraulic structures. Guidance 31.3.07-01 K. 2001.*
6. *Addition and clarification of Building Regulations 2.06.04-82\* «Loads and effects on hydrotechnical structures (wave, ice and from ships)», K., 1995.*
7. DBN V 1.1-12-2014. *Construction in seismic regions of Ukraine.* K., 2014.
8. DBN V.1.2-14-2018. *The fundamental principles of ensuring reliability and constructive safety of life and disputes.* K., 2018.
9. DBN A. 2.1-1-2008. *Engineering searches for construction.* K., 2008.

10. *Guidance Document. 31.31.38-86. Instruction on strengthening and reconstruction of berthing structures (active). K., 1986.*
11. *Bodnaruk V.B. Managing the risk of man-made risks during the development of offshore oil and gas deposits // magazine Engineering and Technology Exploration and development of naphtha and gas deposits. 2014. No. 4(53). ISSN 1993-9973.*

*Стаття надійшла до редакції 10.05.2024*

**Посилання на статтю: Рогачко С.І., Калюжна В.Є., Литвиненко В.В.** Надійність проектів морських гідротехнічних споруд // *Вісник Одеського національного морського університету*: Зб. наук. праць, 2024. № 2 (73). С. 28-38. DOI 10.47049/2226-1893-2024-2-28-38.

*Article received 10.05.2024*

**Reference a journal artic: Rogachko S., Kalyuzhna V., Litvinenko V.** Reliability of marine hydraulic structures projects // *Herald of the Odesa national maritime university*: Coll. scient. works, 2024. № 2 (73). P. 28-38. DOI 10.47049/2226-1893-2024-2-28-38.