

УДК 696.115

DOI 10.47049/2226-1893-2025-4-53-65

**СТІЙКІСТЬ МОРСЬКОГО ТРУБОПРОВОДУ
ПІД ДІЄЮ ХВИЛЬ ТА ТЕЧІЙ**

Н.Н. Хонелія

к.т.н., завідувач кафедри «Морське та цивільне будівництво і архітектура»
khonelianatela@gmail.com

С.В. Бугасва

к.т.н., доцент кафедри «Морське та цивільне будівництво і архітектура»
s.bugaeva2408@gmail.com

К.О. Лопатін

аспірант
SLodessa80@gmail.com

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

Анотація. При проектуванні та будівництві морських трубопроводів необхідно передбачити спеціальні заходи для забезпечення їхньої надійної безаварійної експлуатації. Вільно лежачі трубопроводи зазнають впливу потоку води як під час укладки, так і в період експлуатації, їхня стійкість визначається силою течії та негативною плавучістю. Морський трубопровід вважається стійким, якщо сумарна вага з продуктом перевищує підйомні сили води з достатнім запасом.

Обов'язковою умовою для морських трубопроводів є забезпечення їхньої стійкості під впливом різних навантажень, які можуть спричинити зсув або спливання. Пошкодження морських трубопроводів, спричинені якорями, хвильовим тиском і течіями, становлять значну частку випадків, тому необхідні ефективні заходи профілактики, щоб уникнути витоків, які шкодять навколишньому середовищу. Загальноприйнятою практикою для підвищення стійкості є нанесення обтяжувального покриття на зовнішню поверхню морського трубопроводу. Обтяження може бути у вигляді окремих чавунних або залізобетонних вантажів або як суцільне бетонне покриття. Це ускладнює монтажні роботи і створює додаткові труднощі при протягуванні трубопроводу, а суцільне бетонування є трудомістким і підвищує жорсткість трубопроводу. Аналіз літератури свідчить, що точна причина спливання морських трубопроводів наразі не з'ясована. Висуваються припущення про роль хвиль, сейсміки та течій, але остаточного висновку немає. Потрібні подальші експерименти та дослідження. У статті представлено теоретичні дослідження впливу хвиль, течій і геотехнічних властивостей ґрунту на стійкість морських трубопроводів.

© Хонелія Н.Н., Бугасва С.В., Лопатін К.О., 2025

Розглянуто ефективність застосування сучасних бетонних матраців для захисту морських трубопроводів від пошкоджень та для підвищення їхньої стійкості проти спливання та зсуву за рахунок додаткової ваги.

Ключові слова: морський трубопровід, стійкість, хвилі, течії, обтяжувальні елементи, бетонні матраци.

UDC 696.115

DOI 10.47049/2226-1893-2025-4-53-65

SUBMARINE PIPELINE STABILITY UNDER THE INFLUENCE OF CURRENTS AND WAVES

N.N. Khoneliia

PhD in Engineering, head of the Department
“Marine, Civil Engineering and Architecture”
khonelianatela@gmail.com

S.V. Bugaeva

PhD in Engineering, Associate Professor,
s.bugaeva2408@gmail.com

K.O. Lopatin

graduate student
SLodessa80@gmail.com

Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine

Abstract. *When designing and constructing submarine pipelines, special measures must be envisaged and implemented to ensure reliable, trouble-free operation for an extended period of time. The submarine pipelines lying loose on the bottom are subject to the influence of water flow both in the construction period (with different methods of laying) and in the period of operation. A submarine pipeline stability depends on the water flow force and the amount of negative buoyancy. An underwater pipeline will be stable against floating if its weight with the product is sufficiently higher than the ejective force of the water.*

The factors affecting pipeline stability must be considered when constructing submarine pipelines. The submarine pipeline must be stable under the influence of various loads tending to cause the pipeline to shift or float with inevitable damage.

Damage to submarine pipes caused by anchors, wave pressure, and bottom currents is quite a large percentage. Therefore, reasonable prevention efforts are needed so that leaks do not occur, negatively impacting the environment and economy.

To achieve stability, it is common practice to add weight coating to the outside surface of the pipeline. The pipelines are weighted with cast iron or reinforced concrete individual weights and in the form of a continuous concrete coating of the pipe. This complicates the work and creates additional difficulties when laying the pipeline. Solid

concreting is associated with significant labour intensity of its application, and also leads to an increase in the rigidity of the pipeline.

A literature review has shown that, to date, the exact cause of submarine pipeline surfacing has not been established. Some researchers suggest that wave, seismic and bottom current effects may be the causes, but there is no definite answer. Additional experiments and studies are required to resolve this issue.

The article discusses theoretical research results for assessing factors affecting submarine pipeline stability, such as wave, current, and geotechnical soil characteristics around the pipeline. The efficiency of applying modern concrete mattresses to protect submarine pipelines from damage and ensure their resistance to surfacing and shifting while creating additional weight is considered.

Keywords: *submarine pipeline, stability, waves, currents, weighting elements, concrete mattresses.*

Вступ. Світовий попит на енергію, зокрема на викопне паливо, продовжує розширювати межі офшорної інженерії. Найбільші нафтогазові компанії ведуть розвідувальні та видобувні роботи в віддалених районах і на глибинах понад 3000 метрів. Такі складні умови потребують удосконалених інженерних методів для протидії ризикам обвалів, виникнення втоми матеріалів і утримання тиску. Водночас морські споруди на мілководді потребують іншого спеціального підходу: вони менш схильні до нестабільних обвалів, але часто піддаються вищим швидкостям потоку, спричиненим течіями та хвилями.

Використання трубопровідних систем у нафто- і газовій промисловості як засобу транспортування нафтопродуктів і газу є ефективним та економічним, особливо на великі відстані порівняно з наземними чи повітряними шляхами. Однак існують потенційні загрози й ризики безпеки, такі як витіки, розливи, вибухи та забруднення довкілля. Витіки нафти й газу з морських підводних трубопроводів призводять до забруднення і становлять загрозу морським екосистемам. Тому необхідні належні запобіжні заходи для попередження витоків, що шкодять довкіллю та економіці.

Syeda Zohra Halim та ін. [1] зібрали широкий масив даних щодо надзвичайних ситуацій на трубопроводах, зокрема експлуатаційних умов, причин аварій та тяжкості їхніх наслідків. Набір даних включає значні аварії в США: витік на трубопроводі в басейні річці Каламазу (Kalamazoo), що спричинив розлив 20 000 барелів нафти; вибух трубопроводу в Сан-Бруно (San Bruno), унаслідок якого загинуло 8 осіб та розлив на трубопроводі Keystone (Carbone, Pastor, Casal та ін.), що призвів до викиду 5 000 барелів сирої нафти. Наявність таких масштабних аварій у світі свідчить, що проблеми безпечного транспортування нафти й газу трубопроводами залишаються надзвичайно актуальними.

Ключовими факторами, що призводять до аварій на трубопроводах, є відмови зварних швів, корозія, пошкодження внаслідок земляних робіт і зовнішніх впливів. Порівняння баз даних US PHMSA, Національної енергетичної ради Канади (NEB) та Європейської групи з даних про аварії на газопроводах (EGIG) показано на рис. 1.

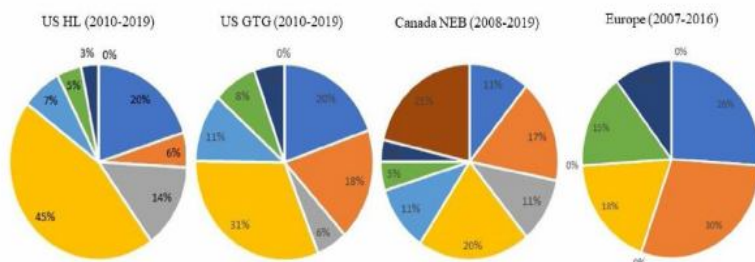


Рис. 1. Розподіл причинних факторів за даними PHMSA HL, PHMSA GTG, NEB та EGIG:

■ - корозія; ■ - відмова обладнання; ■ - зовнішні фактори;
■ - руйнування матеріалу; ■ - недотримання правил експлуатації;
■ - пошкодження, спричинені природними явищами; ■ - інші фактори

На наведеному вище зображенні показано, що пошкодження труб спричинені п'ятьма основними факторами: корозією, пошкодженнями внаслідок земляних робіт, недотримання правил експлуатації, відмовами обладнання та пошкодженнями внаслідок природних явищ. За даними EGIG, 15 % аварій підводних трубопроводів спричинені природними факторами, зокрема сильними приливними течіями та хвилями на мілководді.

При спорудженні морських трубопроводів необхідно враховувати чинники, що впливають на стійке положення трубопроводу, прокладеного на дні моря. Обов'язковою умовою є забезпечення стійкості трубопроводу під дією різних навантажень, які можуть спричинити зсув або спливання та призвести до ушкоджень. Стійкість трубопроводу в прибережній зоні залежить від глибини укладання, рельєфу дна, параметрів хвилювання та придонних течій, а також від розташування трубопроводу на дні. У глибоководній зоні рельєф дна не впливає на основні характеристики хвиль, тоді як у мілководній зоні рельєф істотно впливає на розвиток хвиль і їхні характеристики. У прибійній зоні потік води зруйнованих хвиль періодично накопчується на берег. Для кожної з цих зон розрахунок трубопроводу на стійкість має свою специфіку. Трубопровід, розташований на дні моря, піддається дії хвильового тиску, який прагне підняти його та зрушити.

Вищесказане свідчить про необхідність впровадження ефективних заходів для забезпечення стійкості морських трубопроводів та недопущення їх пошкоджень, які можуть мати руйнівні наслідки для довкілля й економіки. Витоки з підводних нафтогазопроводів призводять до забруднення і загрожують морським екосистемам.

Постановка проблеми. При проєктуванні і будівництві морських трубопроводів повинні бути передбачені і виконані спеціальні заходи, які забезпечили б надійну, безаварійну його експлуатацію протягом тривалого часу. Зокрема слід усунути можливість впливу льоду та сторонніх предметів, захистити

ізоляцію від пошкоджень, забезпечити баластування або обтяжування трубопроводів з позитивною плавучістю та запобігти механічним ушкодженням від судових якорів і інших об'єктів.

Під час експлуатації морські трубопроводи постійно перебувають у напруженому стані через різні навантаження та впливи. Стійкість морського трубопроводу визначається силовим впливом течії та величиною негативної плавучості. Для нафтопроводів необхідну негативну плавучість зазвичай забезпечують вагою продукту та труб, тоді як у газопроводах її створюють вагою труб і штучно створюваним привантаженням у вигляді баласту. Обтяження трубопроводів виконують окремими чавунними або залізобетонними вантажами або шляхом суцільного бетонного покриття труби. Такі заходи ускладнюють виконання робіт, підвищують витрати та створюють додаткові труднощі під час прокладання трубопроводу. Суцільне бетонування характеризується значною трудомісткістю нанесення і призводить до збільшення жорсткості трубопроводу.

Будівництво трубопроводів на дні моря вимагає врахування багатьох зовнішніх факторів, що впливають на їхню стійкість, міцність і надійність. У глибоководній зоні основним чинником, що впливає на стійкість трубопроводу, є сила Архімеда. Нормативна документація [2] рекомендує компенсувати дію цієї сили додатковим обтяжуванням трубопроводу шляхом бетонування, що зазвичай достатньо для забезпечення стійкості на великих глибинах. У мілководних умовах суцільне бетонування не гарантує стійкості, втрата стійкості на мілководді проявляється в спливанні трубопроводу.

Ian Nash and Mark Haine [3] зазначили, що морський трубопровід має бути стійким до впливу хвиль і течій, тобто він повинен мати достатню вагу, щоб не спливати і не зазнавати пошкоджень унаслідок руху під дією хвиль та течій. Одним із методів підвищення стійкості морських трубопроводів є застосування сучасних обтяжувачів для створення додаткової ваги.

Аналіз досліджень та публікацій. Виконано огляд матеріалів різних досліджень, присвячених проблемі спливання морських трубопроводів, який показав, що прокладання трубопроводів по дну моря вимагає точного врахування зовнішніх факторів, таких як хвилювання і течії, що впливають на морські трубопроводи і впливають на їх стійкість.

Автори у своїй статті [4] зазначили, що хвилі, що виникають під час шторму, можуть викликати високоамплітудні коливання порового тиску, яке виникає в піщаних донних відкладеннях, що, в свою чергу, може збільшувати гідродинамічну підйомну силу, що діє на морський трубопровід, одночасно зменшуючи сили опору, тим самим впливаючи на можливість спливання трубопроводу.

Проблема стійкості підводного трубопроводу на піщаних морських відкладеннях досліджувалась експериментально й теоретично такими вченими, як W. Magda, S. Maeno та ін. [5]. Автори робіт дійшли висновку, що гідродинамічна вертикальна сила виникає внаслідок змін порового тиску і має коливальний характер. Чим більшою є тривалість дії та амплітуда цієї сили, тим менший час необхідний для спливання трубопроводу.

F. Van den Abeele і J. Vande Voorde [6], D. Suresh Kumar, D. Achani та ін. [7] досліджували утворення потоків наносів на дні моря. Вони відзначили, що прибережна зона характеризується рухливістю донних ґрунтів під впливом хвиль, внаслідок чого утворюється осадовий шар. Переміщення цих відкладень може суттєво впливати на експлуатацію трубопроводу. При формуванні осадової товщі ґрунти частково втрачають міцність і переходять у зважений стан. Це змінює щільність середовища навколо трубопроводу, що призводить до зміни сили Архімеда і підвищує ризик його спливання. Для запобігання таким явищам широко застосовують методи баластування.

Fuad Mahfud Assidiq, Risal Risal [8] відзначили, що пошкодження підводних трубопроводів значною мірою спричиняються хвилювим впливом і течіями, тому необхідно вживати заходів для запобігання витокам, які негативно впливають на навколишнє середовище. Досліджували порівняльну стійкість труб з захисними бетонними матрацами та без них при ударі судових якорів. Результати показали, що бетонні матраци є економічно доцільним рішенням і їх можна легко встановлювати з використанням стандартних транспортних систем.

Проведений огляд літературних джерел показав, що на сьогоднішній день точна причина спливання морських трубопроводів не встановлена. Деякі дослідники припускають, що причинами цього можуть бути хвилюві, сейсмічні впливи, впливи течій, але точної відповіді немає. Для вирішення цього питання потрібні додаткові експерименти і дослідження. В даний час використовується метод баластування, що призводить до збільшення вартості трубопроводів. Завданням в цій області має бути визначення найбільш небезпечних зовнішніх впливів, що впливають на стійкість трубопроводів, і розробка найбільш економічних рішень, що забезпечують стійкість трубопроводів.

Ціль дослідження. Виконати розрахунково-теоретичні дослідження для оцінки стійкості морського підводного трубопроводу на спливання та на зсув під дією хвиль та течій.

Задачі дослідження:

- виконати розрахунки основних навантажень, що діють на трубопроводи різного діаметру і товщини стінок, покладених на дно моря;
- виконати розрахунки горизонтальної сили гідродинамічного тиску води, яка діє на незахищений трубопровід, при різних значеннях зовнішнього діаметру трубопроводу і швидкості обтікання його потоком води;
- провести огляд матеріалів різних досліджень, пов'язаних з проблемою спливання морських трубопроводів для оцінки ефективності застосування сучасних бетонних матраців для захисту морських трубопроводів від пошкоджень, а також для забезпечення їх стійкості до спливання і зсуву при створенні додаткової ваги.

Результати дослідження. На трубопровід, що укладається на дно моря буде діяти відштовхувальна сила води. Підводні трубопроводи піддаються впливу потоку води як у будівельний період при укладанні трубопроводу, так і під час його експлуатації. Вага витісненої води залежить від її щільності. Зі збільшенням щільності відштовхувальна сила зростає, а стійкість трубопроводу на дні зменшується. Стійкість положення трубопроводів, прокладених по дну, слід

перевіряти для окремих ділянок з урахуванням конкретних умов будівництва та експлуатації.

Залежно від характеру хвильових впливів трасу морського трубопроводу слід розділяти на такі ділянки: глибоководну, мілководну і прибережну. Для кожної з цих ділянок проводиться розрахунок стійкості трубопроводу.

Для розрахунку стійкості підводних трубопроводів особливе значення має точне визначення діючих сил під водою. На трубопровід, прокладений по дну без заглиблення, діють наступні сили: вага труби (вага трубопроводу без ізоляції, вага ізоляції, вага бетонного покриття, вага продукту); сила Архімеда (відштовхувальна сила, яка дорівнює вазі води, витісненої трубопроводом); динамічні навантаження (горизонтальна сила гідродинамічного тиску, вертикальна підйомна сила).

Вертикальна підйомна сила є наслідком несиметричного обтікання трубопроводу потоком води, тому вона виникає тільки при розташуванні трубопроводу на дні. Підводний трубопровід буде стійкий на спливання, якщо його вага буде з достатнім запасом, який більше відштовхуючої сили води. При розрахунках стійкості підводних трубопроводів, які укладаються на дно вплив на них ваги ґрунту не враховується. При цьому передбачається, що трубопровід повинен зберігати стійке положення на дні.

Розглянемо стійкість морського трубопроводу проти спливання, прокладеного прямолинійно по дну. На трубопровід діють лише вертикальні сили. У напрямі зверху вниз діють: вага трубопроводу з ізоляцією та бетонним покриттям G , вага баласту G_b і продукту в трубопроводі $G_{пр}$. Знизу вгору – відштовхуюча Архімедова сила P_a і вертикальна підйомна сила P_v . Для трубопроводів, що укладаються на глибоководних ділянках траси, хвильові впливи можна не враховувати. Стійкість трубопроводу буде забезпечена, якщо його найменша вага підібрана відповідно до умови

$$K_v = \frac{G + G_b + G_{пр}}{P_a + P_v} \quad (1)$$

Ступінь стійкості підводного трубопроводу на спливання визначається коефіцієнтом запасу K_v . Коефіцієнт запасу стійкості на спливання K_v змінюється в межах від 1,15 до 1,20 залежно від гідрометеорологічних умов трасою трубопроводу. Підводний трубопровід буде стійкий на спливання, якщо $K_v \geq 1,15$. У цьому випадку трубопровід матиме негативну плавучість. При цьому, так як відштовхуюча сила води збільшується пропорційною квадрату діаметра трубопроводу, а вага його – пропорційна діаметру в першому ступені, то зі збільшенням діаметра трубопроводу вага баласту різко зростає і для трубопроводів великих діаметрів може в кілька разів перевищувати вагу самої труби.

Як приклад в табл. 1 наводяться розрахункові значення основних сил, що діють на порожні металеві трубопроводи різного діаметру і товщини стінок, покладених без ізоляції і обетонування на дно.

Таблиця 1

Розрахункові навантаження,
що діють на 1 пог. м трубопроводу, покладеного на дно

Зовнішній діаметр труби D_n , мм	630	720	820	1020	1220
Товщина стінки труби δ , мм	10 11 12	10 11 12	10 11 12	11 12 14	11 12 14
Вага 1 м порожньої труби $G_{тр}$, кН/м	1,58 1,72 1,82	1,8 2,12 2,43	1,96 2,34 2,73	2,44 2,92 3,40	4,08 4,41 4,76
Сила Архімеда P_a , кН/м	3,24	4,12	5,18	8,01	15,5
Підйомна сила P_b , кН/м	0,8	0,72	0,82	1,02	1,44
Необхідна вага баласту, G_b , кН/м при $K_b=1,2$	2,90 2,82 2,70	3,93 3,60 3,27	5,24 4,86 4,46	8,39 7,91 7,43	16,3 15,9 15,6

Як видно з табл. 1 для створення негативної плавучості трубопроводу з коефіцієнтом запасу стійкості на спливання $K=1,2$ необхідна досить велика вага баласту, що переважає вагу самого трубопроводу. Це ускладнює виробництво робіт, збільшує вартість, знижує надійність роботи і створює додаткові труднощі при протягуванні трубопроводу.

Стійкість трубопроводу, прокладеного по дну, на зсув забезпечується співвідношенням горизонтальної сили гідродинамічного тиску води P_z і сили тертя трубопроводу о ґрунт T . Сила тертя трубопроводу о ґрунт дорівнює добутку коефіцієнта тертя труби о ґрунт f_T на силу нормального тиску N . Для прямолінійного трубопроводу, покладеного на дно, сила нормального тиску визначатиметься вагою трубопроводу G , включаючи ізоляцію і обетонування, вагою продукту G_{np} , яким заповнюється труба, Архимедовою відштовхуючої силою P_a , підйомною силою P_b і вагою баласту G_b

$$N = G + G_{np} - P_a - P_b + G_b \quad (2)$$

Умова стійкості трубопроводу на зрушення в цьому випадку записується у вигляді

$$P_z \cdot K_c = f_T (G + G_{np} - P_a - P_b + G_b) \quad (3)$$

де K_c – коефіцієнт запасу стійкості на зсув, $K_c=1,15 \div 1,25$. Коефіцієнт тертя трубопроводу о ґрунт приймається для дрібнозернистих ґрунтів, рівним $\tan \varphi$.

Результати розрахунку горизонтальної сили гідродинамічного тиску води, яка діє на незахищений трубопровід, при різних значеннях зовнішнього діаметру трубопроводу і швидкості обтікання його потоком води наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Розрахункове значення горизонтальної сили гідродинамічного тиску води на 1 м незахищеного трубопроводу (P_z , кН/м).

Зовнішній діаметр трубопроводу	швидкості течії води v , м/с							
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
630	0,087	0,346	0,780	1,38	2,17	3,12	4,25	5,54
720	0,099	0,396	0,892	1,59	2,47	3,57	4,86	6,34
820	0,113	0,451	1,02	1,81	2,83	4,06	5,52	7,22
1020	0,140	0,559	1,26	2,25	3,51	5,05	6,88	8,98
1220	0,168	0,667	1,51	2,69	4,20	6,04	8,22	10,7
1420	0,195	0,782	1,76	3,13	4,81	7,03	9,57	12,5

При розрахунках коефіцієнт лобового опору прийнятий, $C_x = 1,12$.

Як видно з таблиці горизонтальна складова сили гідродинамічного тиску води на незахищений трубопровід складає значну величину, збільшуючись зі збільшенням діаметру трубопроводу і зі збільшенням швидкості руху води. Так, наприклад, при збільшенні зовнішнього діаметру трубопроводу від 1220 до 1420 мм і швидкості течії води від 2 до 3 м/с горизонтальна сила, яка припадає на 1 м довжини трубопроводу збільшується від 2,25 до 7,03 кН. Для забезпечення стійкості трубопроводу на зрушення в цьому випадку буде потрібно його додаткове привантаження у вигляді баласту, що представляє собою окремі чавунні або залізобетонні вантажі. Необхідна вага баласту може бути визначена для незахищеного порожнього трубопроводу у воді за формулою

$$G_b = \frac{P_z K_c}{f_T} + P_a + P_v + G_{mp} \quad (4)$$

Як приклад в таблиці 3 наводяться розрахункові значення необхідної ваги баласту у воді для привантаження підводного трубопроводу при швидкості течії води $v=2$ м/с і коефіцієнту запасу стійкості на зсув $K=1,2$.

Як видно з таблиці 3 для забезпечення необхідної стійкості трубопроводу на зсув потрібна значна вага баласту, яка в кілька разів перевищує вагу самої труби. З порівняння таблиць 1 і 3 також видно, що необхідна вага баласту для забезпечення стійкості трубопроводу на зсув перевищує вагу баласту для забезпечення стійкості на спливання.

Таблиця 3

Розрахункові навантаження, що діють на 1 пог. м незахищеного трубопроводу, покладеного на дно, при швидкості течії $v=2$ м/с і необхідна вага баласту

Зовнішній діаметр труби D, мм	630	720	820	1020	1220	1420
Товщина стінки труби δ , мм	10	10	10	10	12	12
Горизонтальна сила P_2 , кН/м	1,38	1,59	1,81	2,25	2,69	3,13
Вага 1 м порожньої труби $G_{тр}$, кН/м	1,51	1,72	1,96	2,44	3,51	4,08
Сила Архімеда P_a , кН/м	3,06	3,99	5,18	8,01	11,5	15,5
Підйомна сила P_v , кН/м	0,629	0,720	0,820	1,02	1,22	1,42
Необхідна вага баласту, Гб, кН/м при $K_v=1,2$	4,84	6,04	7,49	10,9	14,3	18,9

Наразі для захисту оголених або недостатньо заглиблених підводних трубопроводів від механічних пошкоджень та запобігання розмиву ділянок дна течією, а також для привантаження трубопроводів застосовують сучасні захисні бетонні матраци (concrete mattresses). Concrete mattresses це конструкції, що являють собою тонкі, гнучкі, але міцні «матраци», наповнені бетоном, які використовуються для захисту від ерозії та для інших інженерних цілей. Їх створюють, наповнюючи спеціальні ткани оболонки (геотекстильні форми) бетоном на місці, де потрібне укріплення.

Призначення та застосування concrete mattresses: захист від ерозії (укріплення берегів річок, каналів, дамб та узбережжя від хвиль і течії води); захист підводних споруд: захист трубопроводів, кабелів та інших об'єктів на морському дні від пошкоджень; стабілізація: надання додаткової ваги та стабілізації для підводних конструкцій.

Concrete Fleximats mattress (рис. 2) забезпечує високий ступінь гнучкості, як поперечної, так і поздовжньої, що дозволяє йому щільно прилягати до контурів трубопроводу і морського дна. Після установки матрац Fleximat може врізатися в морське дно для підвищення стабільності. Екстремальні умови морського дна, течії та хвилі можуть вимагати додаткової стабільності, що перевищує стандартну стабільність, яку забезпечує стандартний Fleximats. У цьому випадку використовуються Wedged (Tapered) Fleximats з розширеними клиновидними крайовими елементами.

Concrete Logmat mattress (рис. 3) є гнучким лише в одній площині. В умовах екстремальних навантажень навколишнього середовища, підвищеної плавучості або втрати ваги, підводні трубопроводи можуть потребувати додаткової ваги, що перевищує вагу, яку забезпечує Fleximat.



Fig. 2. Concrete Fleximats mattress



Fig. 3. Concrete Logmat mattress

У роботі Jol Godbold et al. [9] підтверджено економічну ефективність бетонних матраців. Наведено приклади проєктних рішень і запропоновано методологію їх проєктування. D. O'Brien та ін. [10] представили результати двох програм фізичного моделювання матраців з метою покращення розуміння їхньої стійкості під гідродинамічним навантаженням. Автори відзначили, що захист за допомогою Concrete mattresses суттєво знижує горизонтальну силу лобового опору трубопроводу та практично усуває вертикальну підйомну силу. Це зменшує ймовірність виникнення вібрацій підводного трубопроводу, які можуть призвести до його руйнування.

Висновки. Аналіз результатів проведених досліджень дає можливість зробити наступні висновки:

1. Для створення негативної плавучості морського трубопроводу необхідна досить велика вага баласту, що перевищує вагу самого трубопроводу. Це ускладнює виробництво робіт, збільшує вартість, знижує надійність роботи і створює додаткові труднощі при протягуванні трубопроводу.

2. Результати розрахунків показали, що зі збільшенням діаметру трубопроводу і швидкості обтікання його потоком води горизонтальна складова сили гідродинамічного тиску води, відштовхуюча сила і вага баластного вантажу значно зростають. Це свідчить про те, що при оцінці стійкості морських трубопроводів, які укладаються на дно особливе значення має точне визначення силового впливу потоку води, яке пов'язане з руйнуванням ділянок морських трубопроводів.

3. Для забезпечення необхідної стійкості трубопроводу на зсув потрібна значна вага баласту, яка в кілька разів перевищує вагу самої труби. При цьому необхідна вага баласту для зсувної стійкості більша, ніж вага, необхідна тільки для створення негативної плавучості.

4. Огляд результатів досліджень показав ефективність застосування Concrete mattresses у мілководних зонах моря. Використання Concrete mattresses для захисту морських трубопроводів забезпечує достатню міцність і стійкість при впливі потоку води, виключає необхідність влаштування підводних траншей і додаткового привантаження трубопроводу. На відміну від суцільного бетонного покриття, Concrete mattresses не підвищують жорсткість трубопроводу та усувають значну трудомісткість нанесення суцільного баластного покриття.

ЛІТЕРАТУРА

1. Syeda Zohra Halim, Harold Escobar «Towards a causal model from pipeline incident data analysis», *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 143, no. 4, P. 348-360, 2020. DOI:10.1016/j.psep.2020.06.047.
2. СНиП 2.05.06-85 Магістральні трубопроводи. [Чинний від 1998-01-03]. К.: Держбуд України. 1998. 35 с.
3. Ian Nash, Mark Haine, Offshore Pipeline Stability Analysis. Chapter in book: *Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering*, 2017. DOI:10.1002/9781118476406.emoe558.
4. K.P. Mordvintsev, A.G. Gogin, E.M. Korneeva, «Submarine pipeline stability under currents and waves action», *RUDN Journal of Engineering Researches*, vol. 22, no. 1, P. 113-121, 2021. DOI:10.22363/2312-8143-2021-22-1-113-121.
5. W. Magda, S. Maeno, H. Nago, «Floatation of buried submarine pipeline under cyclic loading of water pressure – Numerical and experimental studies», *Journal of the Faculty of Environmental Science and Technology*, vol 5, no. 1. P. 81-98, 2000.
6. F. Van den Abeele, J. Vande Voorde, «Stability of offshore structures in shallow water depth», *International Journal of Sustainable Construction and Design*, vol. 2, no. 2, P. 320-333, 2011. DOI:10.21825/scad.v2i2.20529.
7. D. Suresh Kumar, D. Achani, M. R. Sunny, T. Sahoo, «Influence of Wave-Induced Uplift Forces on Upheaval Buckling of Pipelines Buried in Sandy Seabeds», *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 141(4): 041701, 2019. DOI:10.1115/1.4042097.
8. Fuad Mahfud Assidiq, Risal Risal, «Analysis of the Effect of Using Concrete Mattresses on Subsea Pipelines», *Maritime Park Journal of Maritime Technology and Society*, vol. 3 (2), P. 98-107, 2024. DOI:10.62012/mp.v3i2.35390.
9. J. Godbold, N. Sackmann, L., Cheng, «Stability Design for Concrete Mattresses», *In Proceedings of the Twenty-fourth International Ocean and Polar Engineering Conference*, vol. 2, P. 302-308, 2014. ISOPE-I-14-287.
10. D. O'Brien, S. Draper, H. An, «Stability of Concrete Mattresses», *42nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, vol. 3, Article V003T04A022, 2023. DOI:10.1115/OMAE2023-106777.

REFERENCES

1. Syeda Zohra Halim, Harold Escobar «Towards a causal model from pipeline incident data analysis», *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 143, no. 4, P. 348-360, 2020. DOI:10.1016/j.psep.2020.06.047.
2. *Magistralnie truboprovodi* SNiP 2.05.06-85 from 03st January 1998.
3. Ian Nash, Mark Haine, Offshore Pipeline Stability Analysis. Chapter in book: *Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering*, 2017. DOI: 10.1002/9781118476406.emoe558.
4. K.P. Mordvintsev, A.G. Gogin, E.M. Korneeva, «Submarine pipeline stability under currents and waves action», *RUDN Journal of Engineering Researches*, vol. 22, no. 1, P. 113-121, 2021. DOI:10.22363/2312-8143-2021-22-1-113-121.
5. W. Magda, S. Maeno, H. Nago, «Floatation of buried submarine pipeline under cyclic loading of water pressure – Numerical and experimental studies», *Journal of the Faculty of Environmental Science and Technology*, vol 5, no. 1. P. 81-98, 2000.
6. F. Van den Abeele., J. Vande Voorde, «Stability of offshore structures in shallow water depth», *International Journal of Sustainable Construction and Design*, vol. 2, no. 2, P. 320-333, 2011. DOI:10.21825/scad.v2i2.20529.
7. D. Suresh Kumar, D. Achani, M. R. Sunny, T. Sahoo, «Influence of Wave-Induced Uplift Forces on Upheaval Buckling of Pipelines Buried in Sandy Seabeds», *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 141(4): 041701, 2019. DOI:10.1115/1.4042097.
8. Fuad Mahfud Assidiq, Risal Risal, «Analysis of the Effect of Using Concrete Mattresses on Subsea Pipelines», *Maritime Park Journal of Maritime Technology and Society*, vol. 3 (2), P. 98-107, 2024. DOI:10.62012/mp.v3i2.35390.
9. J. Godbold., N. Sackmann, L., Cheng, "Stability Design for Concrete Mattresses", *In Proceedings of the Twenty-fourth International Ocean and Polar Engineering Conference*, vol. 2, P. 302-308, 2014. ISOPE-I-14-287.
10. D. O'Brien, S. Draper, H. An, «Stability of Concrete Mattresses», *42nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, vol. 3, Article V003T04A022, 2023. DOI:10.1115/OMAE2023-106777.

Стаття надійшла до редакції 05.11.2025

Посилання на статтю: Хонелія Н.Н., Бугаєва С.В., Лопатін К.О. Стійкість морського трубопроводу під дією хвиль та течій // Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наук. праць, 2025. № 4 (78). С. 53-65. DOI 10.47049/2226-1893-2025-4-53-65.

Article received 03.0.2025

Reference a Journal Article: Khoneliia N.N., Bugaeva S.V., Lopatin K.O. Submarine pipeline stability under the influence of currents and waves // *Herald of the Odesa National Maritime University*: Coll. scient. works, 2025. № 4 (78). P. 53-65. DOI 10.47049/2226-1893-2025-4-53-65.