

УДК 624.8

СУЧАСНИЙ СТАН РОЗВИТКУ ПОСТІЙНИХ НАПЛАВНИХ МОСТІВ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇХ БУДІВНИЦТВА В УКРАЇНІ

С.О. Бугаєвський,
д-р техн. наук, професор

Т.О. Ненастіна,
д-р техн. наук, професор

В.О. Бугаєвський,

Ю.В. Бугаєвська,
канд. пед. наук, доцент

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

DOI: 10.32347/2410-2547.2024.113.205-226

Розглянуто історію розвитку наплавних мостів, починаючи зі стародавніх часів та закінчуючи сучасними конструкціями. Систематизовані технічні вимоги до постійних наплавних мостів згідно зі світовим досвідом їх проектування, будівництва та експлуатації. Наведено класифікацію постійних наплавних мостів та варіанти схем компонування у залежності від їх особливостей конструкції, а також варіанти форми понтонів із описом особливостей їх застосування. У таблиці систематизовані основні технічні характеристики сучасних постійних наплавних мостів. Детально розглянуті сучасні проекти постійних наплавних мостів на прикладі прибережного маршруту E39 у Норвегії, зроблені висновки щодо подальшого розвитку конструкцій наплавних мостів у майбутньому.

Ключові слова: наплавні мости, понтони, пілони, вантовий міст, підвісний міст, опори мосту.

Наплавні мости будували у давнину і продовжують будувати на всіх континентах. У сучасному мостобудуванні цей вид мостів знаходить широке застосування в США, Норвегії та деяких країнах Азії [1-12]. У будівельній практиці України наплавні мости більш відомі як тимчасові споруди або як мости швидкого наведення під час проведення аварійно-рятувальних робіт в умовах надзвичайних ситуацій (стихійних лих) та військових дій. Також вважається за доцільне влаштування їх на автомобільних дорогах із низькою інтенсивністю руху транспортних засобів, тобто на дорогах нижчих категорій. У той час як за кордоном в останні 30-річчя намітилася тенденція спорудження наплавних мостів із термінами служби, що відповідають капітальним мостовим спорудам. Уже реалізовано кілька великих проектів, ведеться концептуальне проектування наплавних мостів нового покоління, але цей досвід мало відомий в Україні.

Історія розвитку наплавних мостів

Одні з перших стародавніх наплавних мостів були побудовані перськими царями для військових походів до Південної Європи [6]. У 480 р. до н.е. для перетину протоки Дарданелли армією Ксеркса був побудований наплавний міст із використанням близько 700 кораблів, заякорених спереду та ззаду в дві лінії. Уздовж кожної лінії кораблів були натягнуті шість канатів із льону та папірусу. Поверх канатів були покладені дошки, що утримуються другою лінією канатів. Дорога з огорожею була влаштована поверх дощок із використанням хмизу та землі. У трьох місяцях між кораблями були розриви, що дозволяли прохід маломірним суднам (рис. 1, а). Протока Дарданелли з'єднує Егейське та Мармурове моря. Довжина 120,5 км, ширина від 1,3 до 18,5 км, глибина 53-106 м (рис. 1, б).

У 1115 р. за великого князя Володимира Мономаха через р. Дніпро біля м. Київ було збудовано найбільший наплавний «живий» міст у Київській Русі (рис. 2).

Затока Золотий Ріг у м. Стамбул (Туреччина) була місцем спорудження наплавних мостів протягом багатьох століть. Перші наплавні мости були дерев'яними, нині – сталеві. Перший зареєстрований міст через затоку Золотий Ріг був побудований за правління Юстиніана Великого у VI столітті, неподалік стін Феодосії у західній частині м. Константинополь (рис. 3).

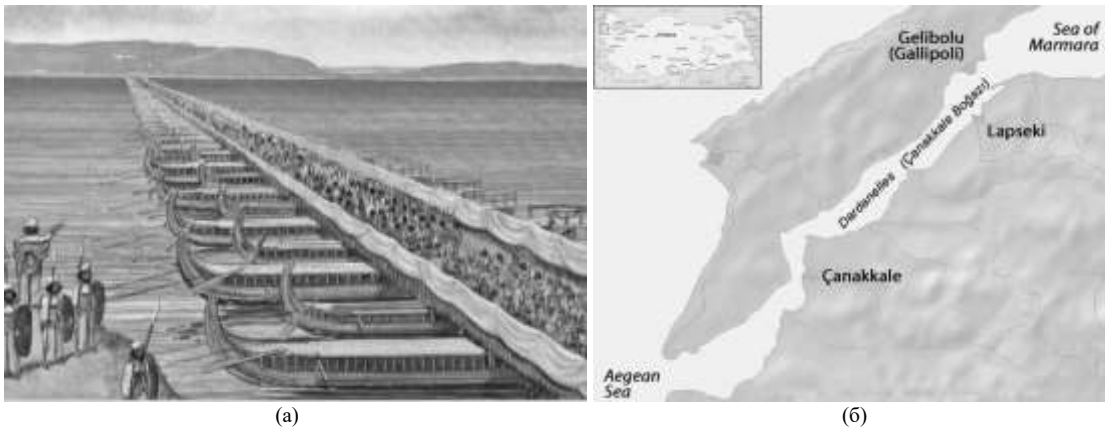


Рис. 1. Понтонний міст побудований армією Ксеркса у 480 р. до н.е. (а); протока Дарданелли (б)



Рис. 2. Приклад дерев'яного наплавного мосту в Середні віки [3]



Рис. 3. Перший міст через протоку на Золотому Розі, побудований за правління Юстиніана Великого у VI ст. (праворуч зверху) [13]

У 1453 р., перед падінням м. Константинополь, турки побудували пересувний міст, поставивши свої кораблі пліч-о-пліч на воді, щоб їхні війська могли переміщатися з одного берега Золотого Рогу на інший.

За наказом султана Махмуда II (1808-1839) 03 вересня 1836 р. побудували наплавний міст Хайратія (Благодійність) через Золотий Ріг, між районами Азапкапи та Ункапані. Проект був реалізований заступником лорда-верховного адмірала Февзі Ахмет-пашою з використанням робітників та об'єктів військово-морського арсеналу в сусідній Касимпаші. Міст складався з дерев'яних понтонів і мав довжину близько 500-540 м. У 1845 р. був побудований другий

дерев'яний наплавний міст – перший Галатський міст у гирлі водного шляху на прохання Валіді Султан, матері Абд-уль-Меджіда I (1839-1861). Він був відомий як Новий міст, щоб відрізнити його від більш раннього мосту, розташованого вище за Золотим Рогом, який став відомий як Старий міст. Він продовжував використовуватися протягом 18 років. У 1863 р. цей міст був замінений другим дерев'яним мостом, побудованим Етемом Пертев-пашою за наказом султана Абдулазіза (1861-1876) під час модернізації інфраструктури, що передувала візиту Наполеона III до м. Стамбул (рис. 4).



Рис. 4. Другий Галатський міст [13]

У 1870 р. було підписано контракт із французькою компанією *Forges et Chantiers de la Méditerranée* на будівництво третього мосту, але початок війни між Францією та Німеччиною затримав реалізацію проєкту, який натомість був переданий британській фірмі Г. Уеллса в 1872 р. Цей міст, збудований у 1875 р., мав довжину 480 м і ширину 14 м і спирався на 24 понтони (рис. 5). Він був побудований за 105000 золотих лір і експлуатувався до 1912 р. [13].



Рис. 5. Третій Галатський міст [13]

Четвертий Галатський міст був побудований у 1912 р. німецькою фірмою *Hüttenwerk Oberhausen AG* за 350000 золотих лір. Цей наплавний міст мав довжину 466 м та ширину 25 м. Міст складався з 12 окремих частин; 2 наземні частини – по 17 м, 9 частин довжиною близько 40 м і центральна частина довжиною 66,7 м, що робило міст рухомим. У 1992 р. один із старіших наплавних мостів через затоку Золотий Ріг – Галатський, збудований у 1912 р., був замінений на новий міст двоярусної конструкції з попередньо напруженого залізобетону на пальових фундаментах, із центральним розвідним прогоном 80 м у просвіті [13].

Наступний перелік стосується низки наплавних мостів, які були побудовані в різні роки: наплавний міст довжиною 305 м, що перетинає річку Рейн у м. Кобленц (Німеччина), експлуатувався з 1819 р. (рис. 6, а); автомобільний та залізничний наплавний міст довжиною 91,5 м перетинав Панамський канал у м. Параїсо (рис. 6, б); автомобільний наплавний міст довжиною 540 м перетинав річку Двіна в м. Рига, Російська імперія (рис. 6, в); у 1874 р. було збудовано наплавний міст через річку Хуглі в м. Калькутта, Індія (рис. 6, г).

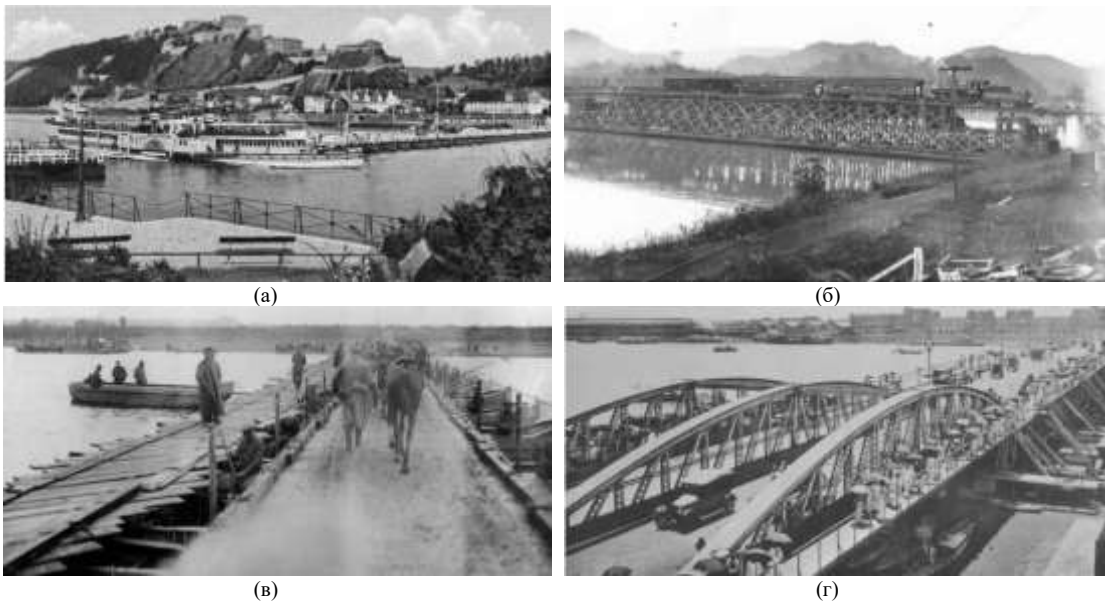


Рис. 6. Наплавні мости: (а) через р. Рейн у м. Кобленц, Німеччина; (б) через Панамський канал у м. Параїсо, Панама; (в) через річку Двіна в м. Рига, Російська імперія; (г) через річку Хуглі в м. Калькутта, Індія [3]

Дерев'яний наплавний залізничний міст через р. Міссісіпі у Прейрі-дю-Шьєн (шт. Вісконсін, США) був побудований у 1874 р. (рис. 7). Він перебудовувався кілька разів, поки не був закритий у 1961 р. Конструктивне рішення цього мосту було знайдено Майклом Спеттелем і Лоулером, які в 1874 р. запатентували постійну систему понтонних мостів, перекинутих через річку. Вона складалася з пальових естакад, побудованих на річці, та двох понтонів довжиною по 69 м. Кожен понтон був закріплений шарнірно на одному кінці, щоб дозволити йому відкриватися, і закривався за допомогою троса з паровим приводом. Це не тільки дозволило забезпечити рух річкою, але й дозволило крижам льоду в кінці зими пройти річкою без ризику пошкодити конструкцію. Понтони мали палубу з дерев'яним каркасом, яку можна було піднімати або опускати на цілих 5,5 м, щоб врахувати зміни рівня річки. Установка та підтримка настилу дерев'яними блоками була трудомістким процесом, який потребував великої кількості ручної роботи. На кожному кінці були передбачені короткі прогони з ухилом, що з'єднувалися з сусідніми естакадами. Швидкість руху потягу понтонним мостом була обмежена до 7 миль/год.



Рис. 7. Дерев'яний наплавний залізничний міст через р. Міссісіпі у Прейрі-дю-Шьєн (США) [3]

Перший у світовій практиці залізобетонний наплавний міст Lacey V. Murog, який названий на ім'я інженера, що його запроєктував, довжиною 2,4 км, через оз. Вашингтон (шт. Вашингтон, США) був побудований і відкритий для руху в 1940 р. Порівняння варіантів показало, що висоководний постійний міст із опорами на пальовій основі буде дорожчим у 5 разів. Після цього в штаті було збудовано ще три наплавні мости [8]: міст через канал Hood у 1961 р.; міст

Evergreen Point через оз. Вашингтон у 1963 р. (другий міст); міст Homer M. Hadley через оз. Вашингтон паралельно мосту Lacey V. Murrow у 1989 р. (третій міст).

Усі ці мости перебувають на основній транспортній мережі автомобільних доріг регіонального й міжрегіонального значення (рис. 8, а).

В історії експлуатації наплавних мостів відомі драматичні ситуації. Так, при штормі у 1990 р. міст Lacey V. Murrow частково затонув. Цього ж року було заплановано спорудження нового мосту замість нього (рис. 8, б). Новий постійний наплавний міст через оз. Вашингтон було відкрито у 1993 р. Вартість будівництва нового мосту склала 73,7 млн. дол. США (рис. 8, в). Проектом було передбачено влаштування 20 понтонів довжиною по 110 м, шириною 18,3 м та висотою 5,1 м, які виконані з попередньо напруженого залізобетону. Порівняно з раніше спорудженою конструкцією понтонів, яка затонула, було виконано попереднє напруження у трьох напрямках, збільшення проектної міцності бетону майже в 2 рази, збільшення маси анкерів у 4 рази, а також встановлення підвищених вимог до водонепроникності бетону понтонів.



Рис. 8. Мости через оз. Вашингтон, США (а); міст Lacey V. Murrow, який частково затонув на оз. Вашингтон (б); меморіальний міст Лейсі В. Мерроу (праворуч) та меморіальний міст Гомера М. Хедлі (ліворуч) у сучасних умовах експлуатації (в) [9]

Технічні вимоги до постійних наплавних мостів

Постійні наплавні мости мають особливі технічні характеристики, у порівнянні зі звичайними мостами або іншими плавучими спорудами. Більшість із них можна коротко перерахувати наступним чином [8]:

- використовується природний закон плавучості води;
- немає потреби у традиційних опорах або фундаментах;
- для підтримки поперечної та поздовжньої орієнтації мосту необхідна якірна або швартова система;
- міст створює перешкоду для морського руху, тому потрібний навігаційний отвір;
- міст повинен з'єднувати опори через коливання припливів та відливів протягом дня та зменшувати небажані поперечні сили, коли міст спирається безпосередньо на опору;
- необхідна стійка структурна система на обох кінцях мосту, щоб зменшити посилений відгук від відображення хвиль на вільному кінці;
- економічно ефективні рішення;
- аналіз більш жорсткого тіла має відносну перевагу для відповідності хвилювим навантаженням.

Причини вибору наплавних мостів мають бути досліджені з погляду економічних та технічних проблем. Наплавні конструкції краще стаціонарних за наступних умов [8]:

- на великих глибинах, де влаштування стаціонарного фундаменту дуже дороге або неможливе;
- у місцях із дуже слабким дном, де влаштування стаціонарних фундаментів неможливе;
- у віддалених місцях, де складно збудувати або виконати проєкт, у цьому випадку споруда може бути збудована в іншому місці, а потім перевезена на основне місце розташування;
- у тих портах, де спостерігаються сильні припливи та відливи, тому буде велика різниця між поверхнею палуби корабля та стаціонарного причалу в тимчасових проєктах і операціях, після яких споруда вже не стане в нагоді;
- у тих проєктах, в яких екологічні та біологічні умови не повинні сильно змінюватися;

- розумне рішення, коли звичайні постійні мости неможливі.

Сучасні постійні наплавні мости, як правило, складаються зі залізобетонних понтонів із надбудовою зі залізобетону або сталі, або без неї. Понтони можуть бути залізобетонними зі звичайного або з попередньо напруженого бетону, який напружений в одному або декількох напрямках.

Залежно від розташування понтонів, вимог до конструкції та будівництва, умов місцевості або типів перешкод, які необхідно подолати, наплавні мости поділяються на два типи: суцільно понтонний та роздільно понтонний тип. Отвори для проходу малих суден і рухомий прогін для великих суден можуть бути вбудовані до кожного з двох типів сучасних наплавних мостів.

Суцільний понтонний наплавний міст (CPFB) складається з окремих понтонів, з'єднаних між собою в суцільну конструкцію (рис. 9, а). Понтони можуть бути з'єднані в поздовжньому і поперечному напрямках. Розмір кожного окремого понтону визначається проектними вимогами, будівельними можливостями та обмеженнями, що накладаються транспортним маршрутом. Верхня частина понтонів може бути використана як проїзна частина, або проектується додаткова прогонова будова над понтонами. Усі існуючі наплавні мости у штаті Вашингтон відносяться до типу суцільних понтонних наплавних мостів.

Роздільний понтонний наплавний міст (SPFB) складається з окремих понтонів, розміщених поперечно до мосту і перекритих проговною будовою зі сталі або залізобетону (рис. 9, б). Прогонова будова повинна мати достатню міцність і жорсткість, щоб підтримувати відносно положення окремих понтонів. Два наплавні мости у Норвегії відносяться до типу роздільних понтонних наплавних мостів. Обидва типи наплавних споруд є технічно здійсненними та відносно простими для аналізу. Вони можуть бути безпечно спроектовані таким чином, щоб витримувати гравітаційні навантаження, сили вітру і хвиль, а також екстремальні події, такі як зіткнення суден і сильні шторми.



(а)



(б)

Рис. 9. Наплавні мости: Нордхордланд у Норвегії (а); через канал Худ у США (б) [8]

Варіанти схем суцільного та роздільного понтонного наплавного мосту наведено на рис. 10 та 11.

Опис особливостей схем суцільного та роздільного понтонного наплавного мосту наведено в табл. 1 та 2.

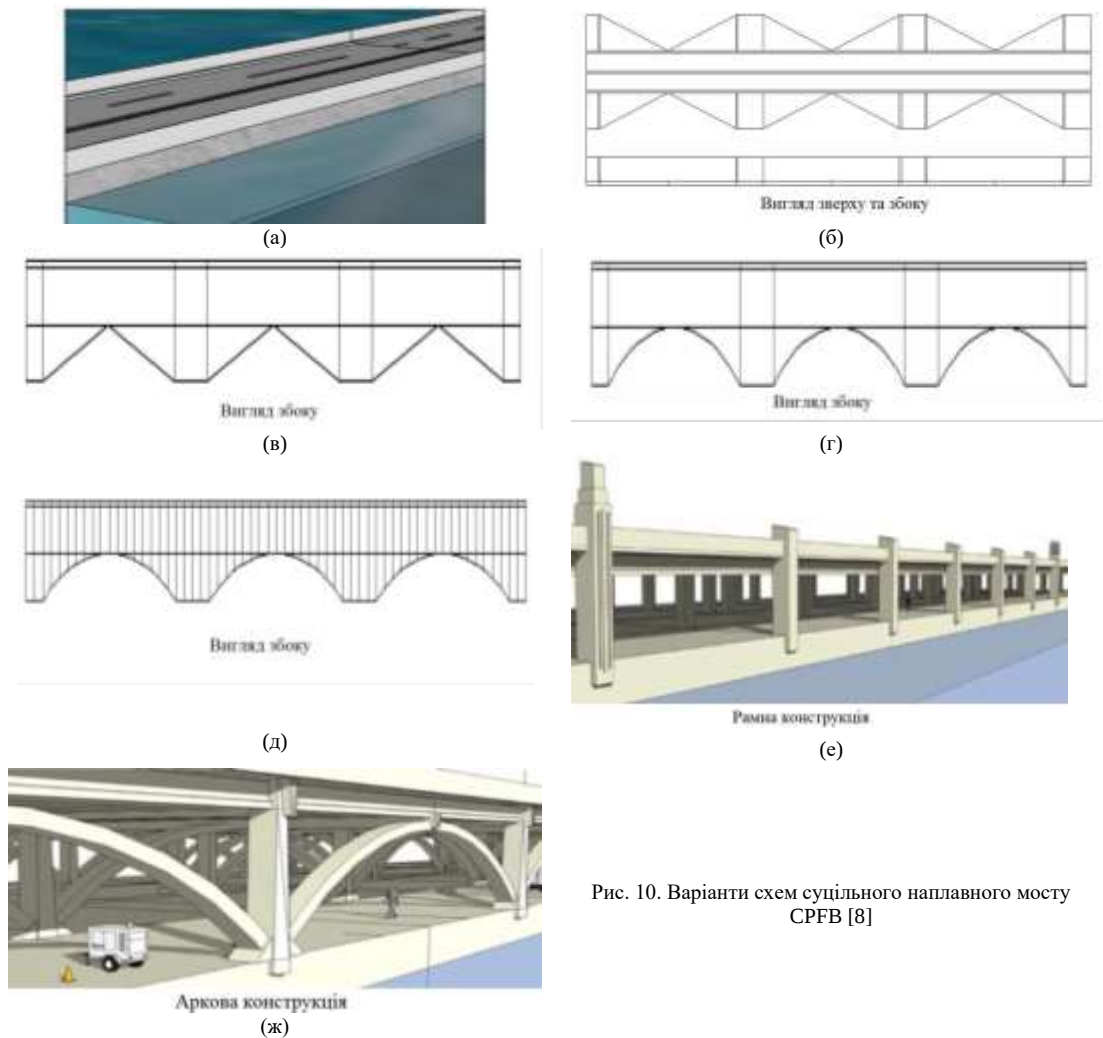


Рис. 10. Варіанти схем суцільного наплавного мосту CPFB [8]

Наплавний міст складається зі серії понтонів різних розмірів і форм, які розташовані в різний спосіб (суцільний – дискретний – поздовжній – поперечний), утворюючи різні типи наплавних мостів. Понтон може бути бетонним кесоном, сталевими трубами або виготовленим із композитного матеріалу та являти собою основу наплавного мосту. Понтон – це поплавков із плоским дном, який використовується для підтримки конструкції на воді й діє як еластична основа. Він може бути просто побудований із закритих циліндрів, таких як труби або бочки, або виготовлений у вигляді коробок із металу або бетону. Рис. 12 та 13 ілюструють різні варіанти форми понтону з функціональним описом кожного варіанту (табл. 3 та 4). Різні поперечні та поздовжні перерізи впливають на технічні властивості понтонів.

Наплавні мости добре виконують функції автодорожніх споруд із високоякісним покриттям проїзної частини для безпечного руху за більшості погодних умов. Вони мають унікальну привабливість та низький вплив на навколишнє середовище. Це дуже економічно вигідні типи мостів для водних переходів, де вода глибока (наприклад, понад 30 м) і широка (наприклад, понад 900 м), але течія не повинна бути дуже швидкою (наприклад, понад 6 вузлів), вітер не повинен бути занадто сильним (наприклад, середня швидкість вітру понад 160 км/год.), а хвилі не повинні бути занадто високими (наприклад, значна висота хвилі понад 3 м). У світі налічується трохи більше десятка діючих понтонних мостів. Сполучені Штати мають п'ять понтонних мостів, чотири з них у штаті Вашингтон і п'ятий на о. Гавайї. Інші мости розташовані по всьому світу в Норвегії, Канаді, Японії тощо.

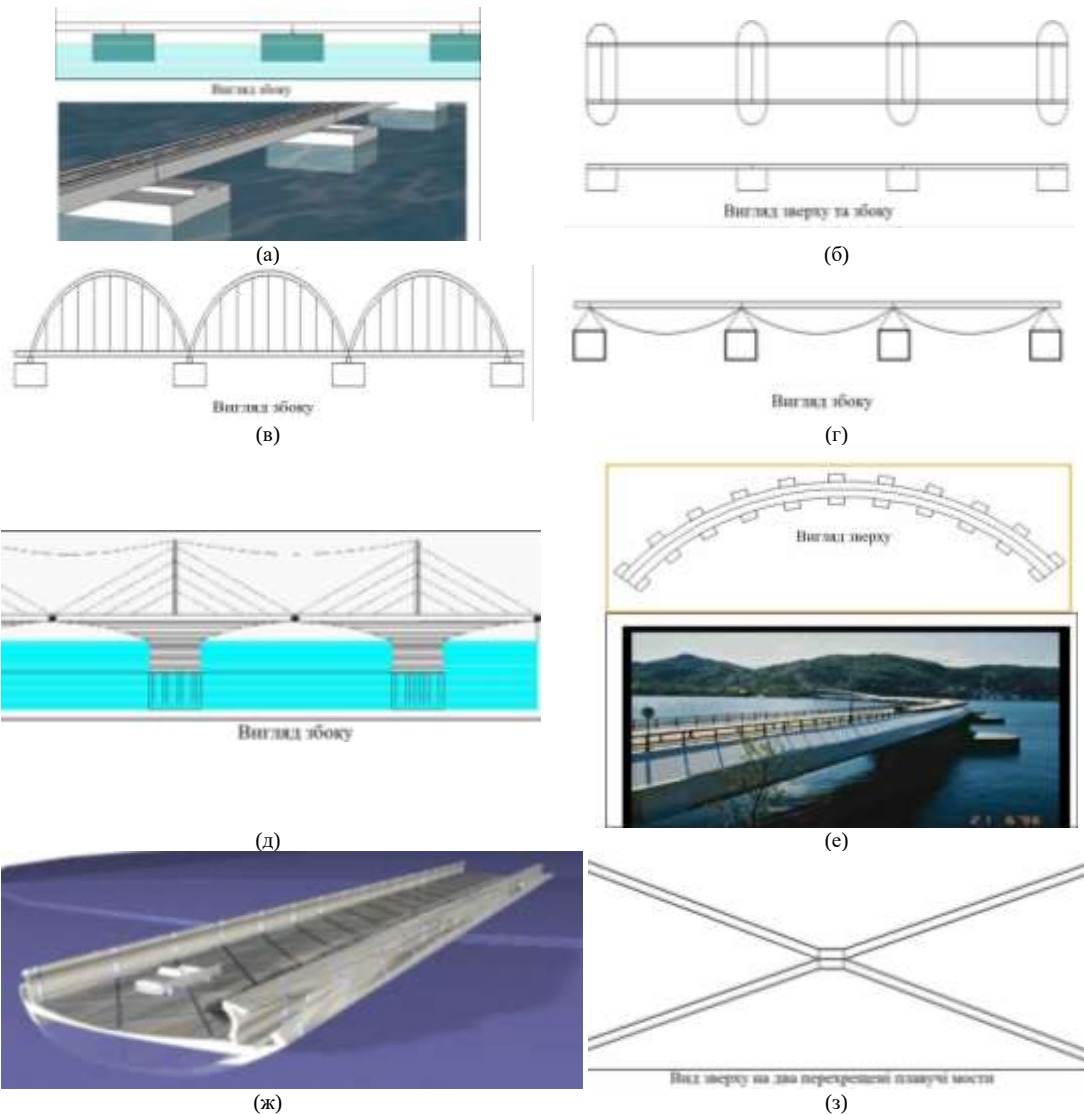


Рис. 11. Варіанти схем наплавного мосту SPFB [8]

Таблиця 1

Опис варіантів схем суцільного наплавного мосту CPFБ

Номер рисунок	Особливості конструкції
10 а	Найпростіший варіант суцільного розташування понтонів. Використовується в наплавному мості через канал Худ. Є простим і легким у зведенні та будівництві, його можна розглядати як найбільш економічний. Однакова конструкція прогонової будови може бути використана для всіх понтонів, будівництво може бути виконане за короткий час.
10 б	Звичайний розмір понтону зі змінною шириною для збільшення жорсткості від дії водного джерела. Змінність ширини створюється шляхом з'єднання додаткових бетонних крил з обох сторін. Збільшується проектна площа понтону, що збільшує тиск води під мостом під час вертикального руху. Тому він повинен бути укріплений, щоб протистояти тиску води та ефекту динамічного підсилення внаслідок реакції мосту на морські хвилі. Крила можуть бути з'єднані на різних

	рівнях осадки, що не тільки вплине на опір води, але й збільшить масу мосту за рахунок збільшення рухомої маси води (додана маса).
10 в, г	Понтонний міст зі змінною осадкою. Ця система забезпечує змінну жорсткість на вигин, що впливає на необхідну довжину понтона. Використовується, коли потрібен довгий понтон. З'єднання повинно бути розташоване на найменшій осадці. Зміна осадки може бути лінійною, як показано на (10в), або криволінійною, як показано на (10г). Тиск води під цим варіантом мосту не є рівномірним через зміну осадки, а максимальний тиск зосереджений під найглибшою частиною.
10 д	Великомасштабний арковий міст. Кожна смуга являє собою понтон призматичної форми. Різниця в глибині понтонів відіграє основну роль у структурній поведінці мосту. Коли ця різниця досить велика, це може призвести до часткового занурення, що означає, що деякі понтони закріплені над рівнем води. Таким чином, цей тип може забезпечити навігаційний отвір.
10 е	Базується на концепції стійок і балок для з'єднання мостового полотна з понтоном. Метод може бути модифікований до двоярусного наплавного мосту, якщо понтони залишатимуться частково зануреними у воду.
10 ж	Концепція аркового мосту є ще одним двоярусним плавучим мостом, що використовує арку для передачі навантаження з проїзної частини на понтон. Ця система має вищу здатність до зсуву між палубами, ніж концепція стійок і балок.

Таблиця 2

Опис варіантів схем роздільного наплавного мосту SPFB

Номер рисунок	Особливості конструкції
11 а, б	Звичайний просто розділений понтонний міст має понтони і балки, що спираються на них. Він зручний для простого легкого руху. Еліптична форма понтона (11б) полегшує рух води та зменшує бічний тиск водного потоку.
10 в, г	При великому навантаженні навколишнього середовища або при великому прогоні відповідним рішенням є застосування аркової або призматичної балки.
10 д	Для дуже довгого мосту потрібні великі прогони. Варіант 10д – це виняткове рішення. Застосовується дуже великий понтон, який може витримати загальну вагу мосту, що складається з понтона та двох консольних балок, побудованих разом із понтонами, що утворюють єдиний блок мосту. Пілони та натяжні троси можуть бути додатковими опорами для збільшення довжини консольної балки.
10 е	Крен роздільного понтонного наплавного мосту може бути дуже низьким через високе положення центру важкості та відносно низьке положення метacentру. Дугоподібна форма наплавного мосту забезпечує достатню опору для всієї конструкції. Опорою всієї конструкції можна вважати максимальну відстань між дугою та хордою. Ця відстань визначає ступінь кривизни. Дуга повинна бути спрямована у бік, протилежний напрямку течії води.
10 ж	Приливні ефекти можна вирішити за допомогою цього варіанту. Система працює наступним чином: у випадку повені баластна вода буде заливатися у резервуари всередині понтона. Таким чином, міст залишатиметься на тому ж рівні, що і в місці з'єднання з сушею. Під час припливу вода буде відкачуватися з баластних резервуарів, щоб підняти міст. Ця система споживає багато енергії, але не потребує під'їзного мосту.
10 з	Перетин двох безперервних понтонних мостів на середній відстані забезпечує бічну підтримку. Ефективність усієї геометричної форми залежить від кута нахилу опори переправи стосовно центральної лінії переправи. Чим більший кут нахилу, тим більша бічна підтримка.

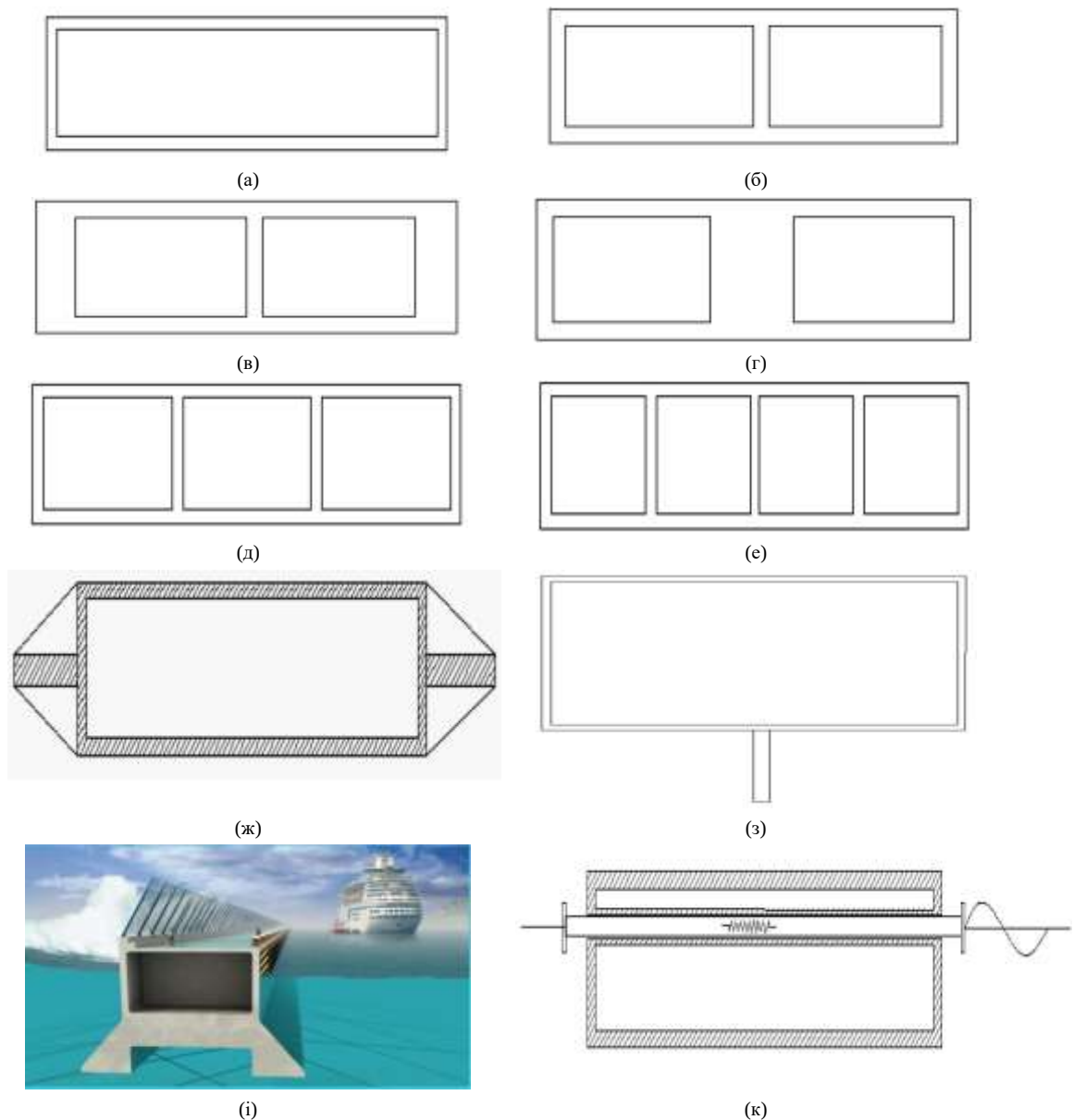


Рис. 12. Варіанти форми понтонів [8]

Плани на майбутнє для постійних наплавних мостів

Прибережний маршрут E39 розташований на заході Норвегії, на відстані 1100 км від м. Крістіансанд на півдні та до м. Тронхейм на півночі. На цій відстані маршрут E39 з'єднує найбільші міста, розташовані на західному узбережжі Норвегії, такі як м. Берген, м. Ставангер та м. Алесунд. Найшвидше через широкі й глибокі фіорди трасою E39 сьогодні можна переправитися на поромі, який, проте, вважається трудомістким і вимогливим до технічного обслуговування. Подорож прибережним маршрутом E39 сьогодні передбачає використання семи поромних переправ: Рогфаст, Бьорнефіорд, Согнефіорд, Нордфіорд, Сулафіорд, Ромсдальсфіорд і Хальсфіорд (рис. 14). Час у дорозі оцінюється у 21 годину, що передбачає середню швидкість близько 50 км/год. Дорожні умови вважаються недостатніми з огляду на очікувані майбутні обсяги перевезень [5].

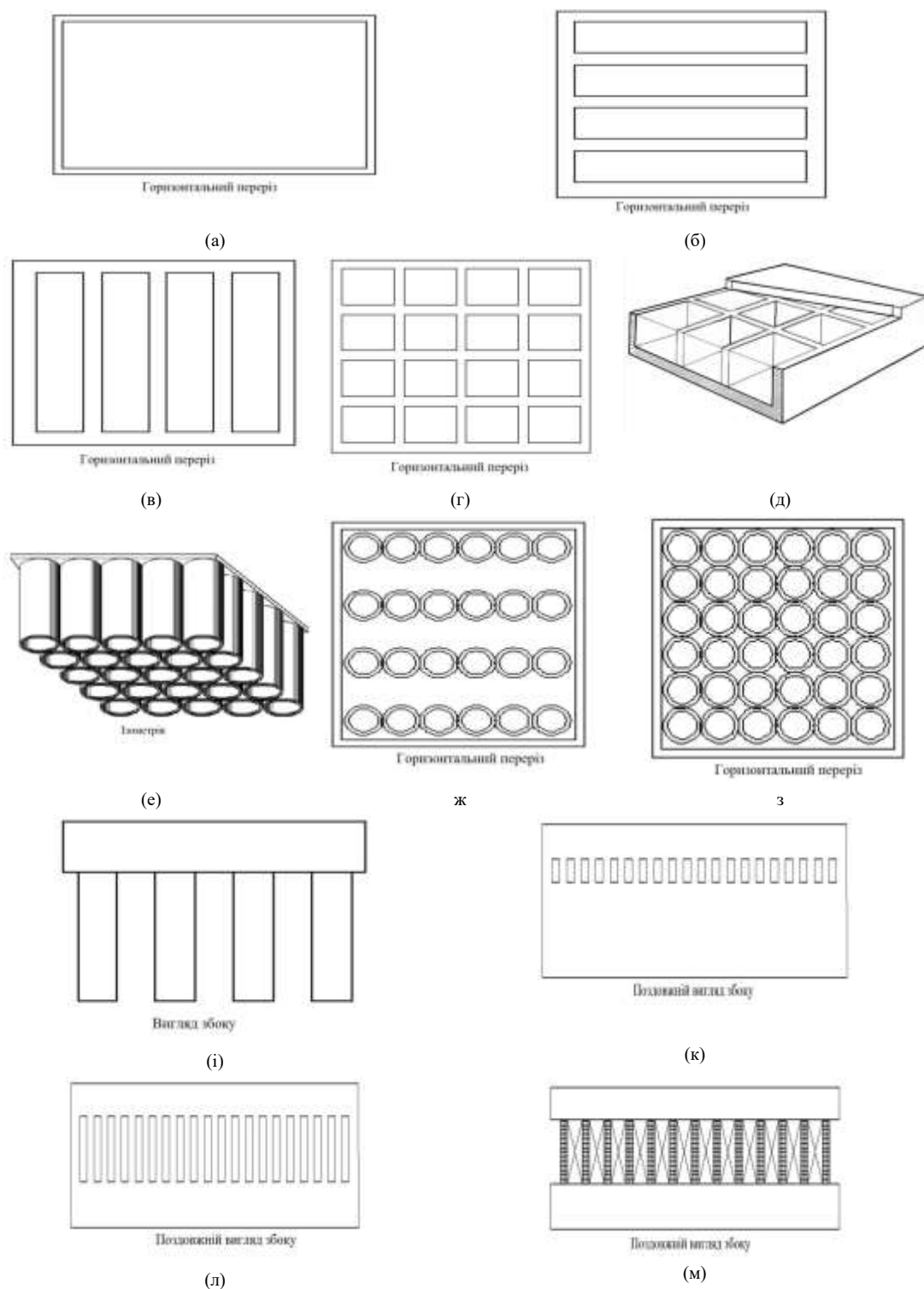


Рис. 13. Варіанти форми понтонів [8]

Таблиця 3

Опис варіантів форми понтонів

Номер рисунок	Особливості конструкції
12 а	Залізобетонний понтон у вигляді бетонної коробки з рівномірною товщиною стінок і перекриттів. Використовується при невеликих розмірах понтону і невеликому навантаженні.
12 б	Два об'єднані понтони, які забезпечують велику ширину понтону і використовується для невеликих навантажень.
12 в, г	Додаткова товщина зовнішніх стінок забезпечує додаткову поздовжню жорсткість на вигин, а також простір для можливого попереднього напруження після розтягування. Поведінка цього понтону в поздовжньому напрямку – це балковий елемент, в якому співвідношення довжина/ширина велике.
12 д, е	Додаткові стінки збільшують жорсткість на згин в обох напрямках. Поведінка понтону під навантаженням являє собою двосторонній ребристий елемент, який прогинається в двох напрямках. Співвідношення довжина/ширина відіграє важливу роль у цьому питанні.
12 ж	Перевагою варіанту 12ж є збільшення проектної площі, що забезпечує підвищення водонепроникності (модуля гідростатичної жорсткості) та збільшення додаткової маси, що підвищує стійкість мосту.
12 з	Кіль під секцією у варіанті 12з збільшує додаткову масу та стійкість мосту проти обертальних рухів та бокового навантаження (хвильових сил).
12 і	Варіант має два крила для збільшення проектної площі, що призводить до збільшення гідростатичної жорсткості. Нижнє розташування крил збільшує (у випадку динамічної поведінки) вагу конструкції на величину, що дорівнює масі води над крилами, а також збільшує додану масу в усіх напрямках. Другою перевагою низьких крил є збільшення осадки понтону, що призводить до збільшення відбитої хвилі по відношенню до хвилі, що проходить.
12 к	Варіант 12к має рухому в поперечному напрямку колону, яка з обох кінців з'єднана з бетонною або сталевую пластиною і з'єднана з мостом пружиною, що повертає її в початкове положення після руху. Колона рухається в порожнистій бетонній балці, яка з'єднує дві зовнішні стіни і забезпечує їм бічну підтримку. Положення колони повинно бути на рівні води, а висота плити повинна дорівнювати значній висоті хвилі. Перевагою є передача сили хвилі з однієї сторони мосту на іншу сторону, щоб зменшити хвильове навантаження на міст.

Таблиця 4

Опис варіантів форми понтонів

Номер рисунок	Особливості конструкції
13 а, б, в, г, д	Горизонтальні перерізи різних типів, які можуть бути використані для понтонів CPFB і SPFB.
13 е, ж, з, і	Варіанти використовуються тільки для SPFB. Вони виготовляються зі сталевих циліндрів, з'єднаних між собою у верхній частині бетонною плитою. Варіант 13ж та 13і дозволяє воді вільно проходити між циліндрами, щоб зменшити поточний тиск і хвильові сили.
13 к, л	Поздовжній вид понтону збоку має отвори в прямокутних трубах, які розташовуються в поперечному напрямку. Отвори запроектовані на рівні води. Розміри отворів залежать від проектної висоти хвилі. Система функціонує як поглинач енергії хвиль. Вона зменшує тиск морської хвилі на зовнішню стінку понтону і пом'якшує бічне хвильове навантаження на весь міст.
13 м	Варіант запозичений із проекту мобільної морської бази (ММБ). Він складається з двох паралельних бетонних плит, з'єднаних сталевими трубами. Сталеві труби розташовані між двома плитами на різних відстанях, у залежності від вертикального навантаження і властивостей хвиль.

Мости такі ж різні, як і країни, в яких вони знаходяться. Більшість із них зроблені зі залізобетону, але один міст зроблений здебільшого зі скловолокна. Кілька мостів все ще дерев'яні, а деякі – сталеві. Коротку характеристику сучасних наплавних мостів наведено в табл. 5.

Таблиця 5

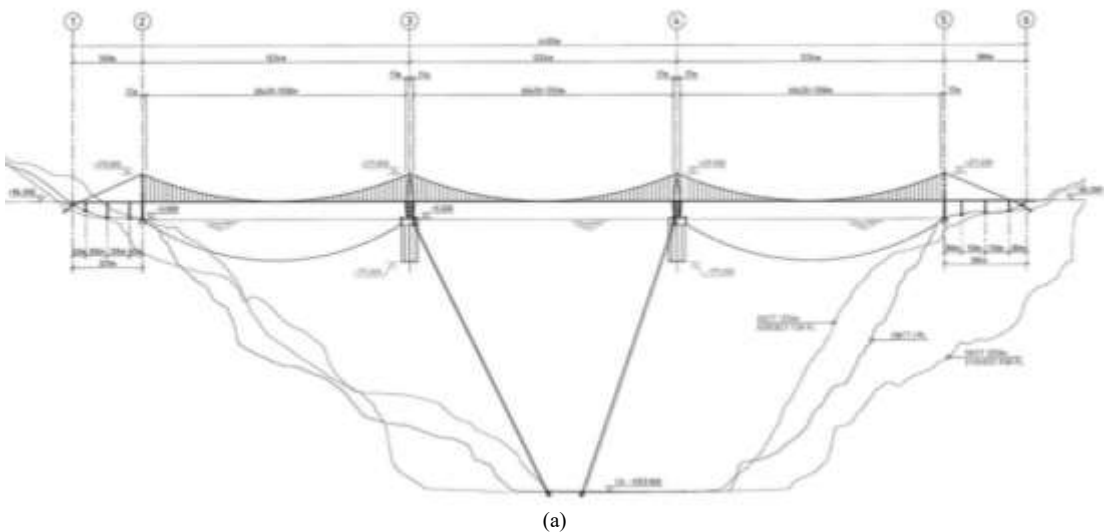
Відомі наплавні мости світу [8]

№	Роки експлуатації		Назва	Розміщення	Глибина води, м	Довжина мосту, м		Розмір понтону, м
	початок	кінець				загальна	понтонної частини	
1	1912	1992	Galata	Стамбул, Туреччина (гирло річки)	41	466		25×9×3,7
2	1940	1990	Lacey V Murrow	штат Вашингтон, США (озеро)	75	2018		107×18×4,4
3	1943	1964	Hobart	Тасманія, Австралія (гирло річки)	31	965		40×11×3,7
4	1957	2008	Kelowna	Британська Колумбія, Канада (озеро)	49	640		61×15×4,6
5	1961		Hood Canal Old (східна частина)	штат Вашингтон, США (озеро)	104	2398	1972	110×15×4,4
6	1963		Evergreen Point	штат Вашингтон, США (озеро)	61	2310	2310	110×18×4,5
7	1983		Hood Canal Новий (західна частина)	штат Вашингтон, США (озеро)	104	1972	1972	110×18×5,5
8	1989		Third Lake Washington / Homer M. Hadley	штат Вашингтон, США (озеро)	61	1771	1771	108×23×5,0
9	1992		Bergsoysund	Крістіансунд, Норвегія (фіорд)	300	934	934	34×20×6,0
10	1994		Nordhordland	Берген, Норвегія (фіорд)	500	1614	1246	42×12,5×6,8
11	1996		West India Quay пішохідний міст	Лондон, Великобританія (гирло річки)		94	94	d2,8×10
12	1996		Nagoya Fish Port Terminal	Нагоя, Сага, Японія (внутрішня гавань)	10	110		110×15×3,0
13	1998		Admiral Clarey	Гаваї, США (внутрішня гавань)	15	1424	310	93×15×5,1
14	2001		Yumemai	Осака, Японія (внутрішня гавань)	10	878	410	58×58×8,0
15	2008		William R. Bennett	Британська Колумбія, Канада (озеро)	49	1060	690	



Рис. 14. Маршрут прибережної траси E39 [5]

Компанія Aas-Jakobsen, John. Holt As, Cowi, NGI, та Skansk пропонує підвісний міст на наплавних опорах для перетину Согнефіорда шириною 3700 м і глибиною 1250 м. Концепція наплавного підвісного мосту складається з трьох мостових прогонів довжиною 1234 м. Загальна довжина мосту становить 4400 м (рис. 15).



(a)



(б)

Рис. 15. Концептуальний проєкт підвісного мосту на наплавних понтонах через Согнефіорд (а); візуалізація наплавного мосту через Согнефіорд (б) [5]

Сталеві пілони висячого наплавного мосту спираються на великі залізобетонні понтони та швартові кріплення. Висота пілонів складає 206 м над рівнем моря. Балка жорсткості для руху транспорту розташована на висоті близько 80 м над рівнем моря. Наплавні залізобетонні понтони закріплені до морського дна за допомогою анкерних якорів. Ця якорна система є технологією, що широко використовується в морському будівництві. Якорна система складається з восьми швартовних тросів, прикріплених до кожної бічної сторони понтону. Кожен понтон має діаметр 75 м і висоту 180 м. Дно понтону розташоване на 175 м нижче за рівень моря, залишаючи вільний борт близько 5 м, залежно від припливних коливань. Понтони баластовані олівіном (мінерал класу ортосилікат) [5].

Варіант наплавний міст із використанням технології TLP. Ще одна концепція, розглянута для проєкту траси E39 – багатопрогоновий висячий міст на плавучому фундаменті, що поєднує в собі висячий міст і технологію платформ із натяжними опорами (TLP). Технологія TLP часто використовується на великих платформах у морі (рис. 16).

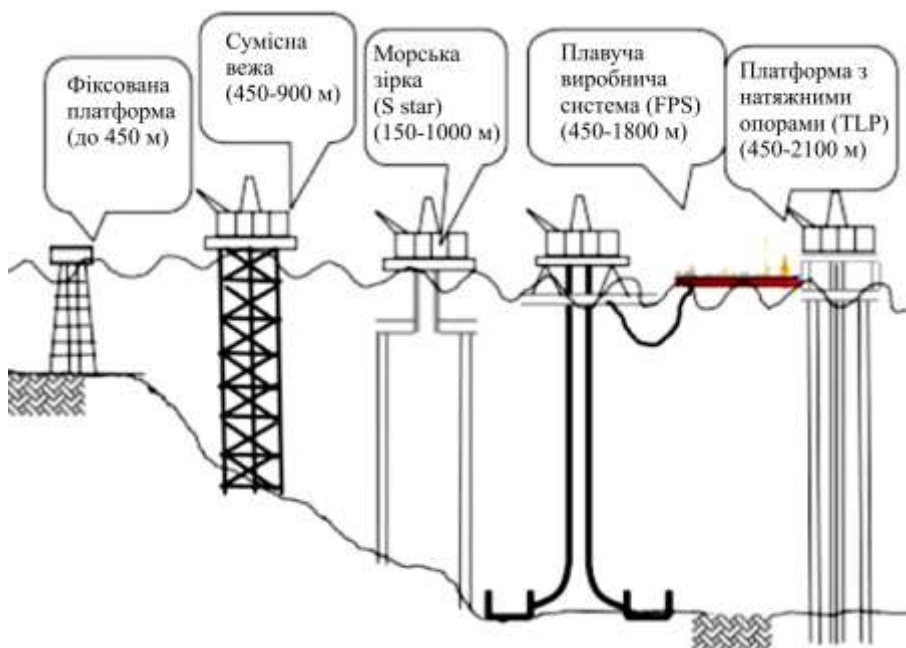


Рис. 16. Платформи TLP [15]

Морські споруди складаються з фундаментів надмірної плавучості, закріплених на морському дні за допомогою тросів високого натягу, які зазвичай встановлюються на кожному боці споруди. Це вертикально стабілізує конструкцію, забезпечуючи необхідну відновлювальну силу. За концепцією мосту жорсткість прогонів стабілізує горизонтальний рух. Ця концепція запропонована для перетину Бьорнафіорду та Хальсафіорду (рис. 17).



Рис. 17. Візуалізація наплавного мосту з використанням технології TLP через Хальсафіорд [5]

Для забезпечення судноплавства балка жорсткості мосту буде піднята на таку відстань над рівнем моря, щоб забезпечити прохід суден між плавучими опорами. Загальна довжина мосту становить 4185 м і спирається на один береговий пілон на кожній стороні суші та два фундаменти TLP, розташовані у фіорді. Відстань між береговими пілонами та плавучими фундаментами TLP однакова і становить 1395 м [5].

Варіант занурений наплавний тунель. Занурені наплавні тунелі (ЗНТ) є одним із розглянутих рішень для заміни поромних переправ на трасі E39. Концепція полягає у зануренні у воду трубчастої конструкції, яка вміщує транспортні та пішохідні смуги. Конструкція виготовляється зі залізобетону, а статична поведінка контролюється співвідношенням між власною вагою конструкції та наплавністю. Було розглянуто рішення для ЗНТ із однією та двома трубами. Рішення з однією трубою забезпечує меншу горизонтальну жорсткість. Ця концепція була визнана доцільною для перетину Согнефьордена, але через високі витрати на встановлення та обслуговування вона була відхилена. Запропонована концепція є підводним плавучим тунелем із двома паралельними трубами, пришвартованими до наплавних понтонів на рівні моря. Паралельні труби розташовані у вигляді дуги, горизонтальна довжина становить 4063 м. Тунель занурений на 12 м нижче за рівень моря, що забезпечує достатній зазор для проходу суден.

Типи ЗНТ різняться переважно системами якоріння. Якірні системи спираються на позитивну чи негативну наплавність і можуть підтримуватися понтонами, колонами, тросами, прикріпленими до морського дна, або не закріплені. Для конструкцій, в яких ЗНТ спирається на колони або з'єднаний із морським дном тросами, основним обмеженням для застосування цих конструкцій є глибина води у місці переходу. Довжина не має значення для доцільності. Різниця між цими двома системами кріплення полягає у тому, що колони працюють на стиск, а троси – на розтяг. Троси застосовуються при глибині води кілька сотень метрів, тоді як колони вимагають глибини води трохи більше кількох сотень метрів. У той час як колони повинні бути встановлені вертикально, троси допускають вертикальну та похилу установку.

Занурений наплавний тунель, що підтримується понтонами на поверхні, навпаки, не залежить від глибини води (рис. 18). Понтони на поверхні моря піддаються більш високим навантаженням від вітру, хвиль та течії, у порівнянні з колонами та тросами. ЗНТ, що підтримується плавучими понтонами, також більш схильний до зіткнень із суднами, що справедливо і для понтонних наплавних мостів. Четверте рішення – будівництво вільного тунелю без опор. Це рішення не залежить від глибини води, але дуже обмежене довжиною переправи [5].

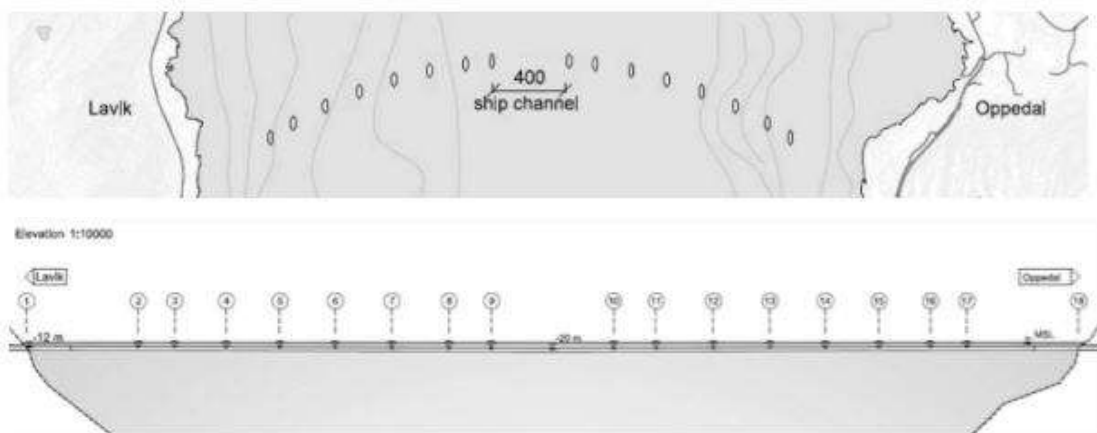


Рис. 18. План та профіль наплавного мосту через Согнефіорд із зображенням понтону та судноплавного прогону [5]

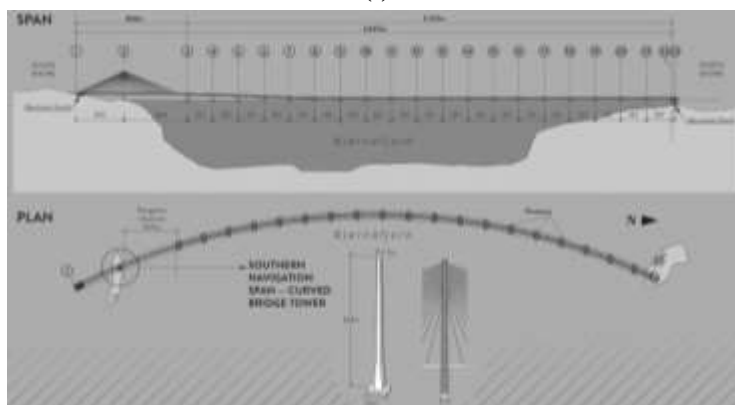
Варіанти перекриття Бьорнафіорда. У південній половині запланованої модернізації знаходиться Бьорнафіорд, на південь від м. Берген. При поперечнику 5 км це одна з найдовших ділянок, які потрібно перекрити з глибиною 600 м [14].

Консалтингова група, очолювана фахівцями Коуї з Данії та Аасом-Якобсеном і Йохсом Холтом із Норвегії, працює над розробкою одного з так званих «традиційних» варіантів. Головним є судноплавний прогін, який буде перекрито вантовою конструкцією, а інші прогони спиратимуться на наплавні понтони. Розглядаються два основних варіанти наплавного мосту: один із вигнутою балкою, яка сприймає бічні навантаження через арку, другий із прямою балкою, яка сприймає бічні навантаження через швартові троси, закріплені на морському дні. Для першого рішення буде закріплення з кожної сторони на дні фіорду, щоб забезпечити бічну стійкість, тоді як для другого буде закріплення тільки на кінцях. Наплавні понтони є ключовим фактором: для прямої балки ці великі залізобетонні платформи розташовуватимуться на відстані 200 м, а для вигнутого варіанту – близько 186 м (рис. 19, а).

Проїзна частина для наплавного мосту буде загальною шириною близько 60 м. Розташування судноплавного каналу також є предметом дискусій. Хоча центральний судноплавний прогін є одним із варіантів, зведення наплавного вантового мосту у фіорді буде дуже важким, тому судноплавний прогін поряд із одним із берегів дозволить встановити пілон на березі або на мілководді, що, у свою чергу, дозволяє використовувати традиційні методи будівництва (рис. 19, б).



(а)



(б)

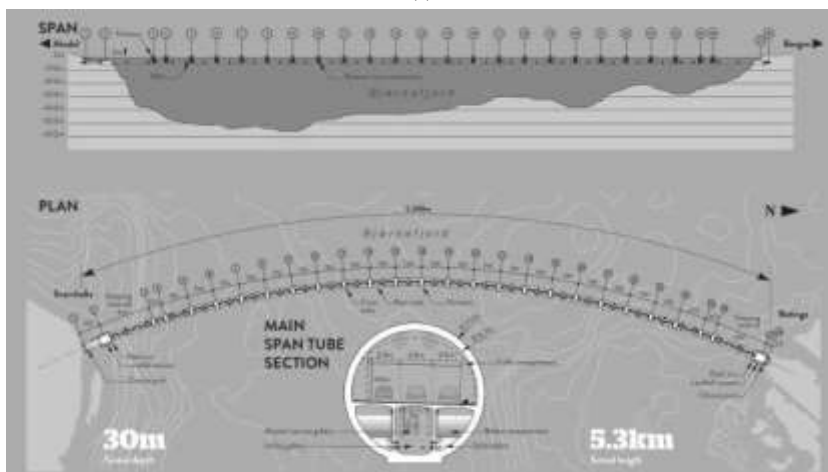
Рис. 19. Вигляд варіанту наплавного мосту (а);
профіль та план варіанту наплавного мосту з вантовою конструкцією (б) [14]

Інший варіант проекту розробляють норвезькі компанії Reinertsen, Dr. Techn Olav Olsen, Norconsult та інші. Ключова перевага полягає в тому, що цей міст практично буде прихований від очей. Різні поперечні перерізи були вивчені під час попереднього проектування, і при дослідженнях в аеродинамічній трубі варіант із двома трубами круглого перерізу перевершив варіант із прямокутним поперечним перерізом. Труби діаметром 15 м розташовуватимуться на відстані 40 м одна від одної та з'єднуюватимуться з інтервалом від 150 до 200 м поперечними розпірками (рис. 20, а). Міст вигнуто горизонтально, що разом із фіксованими торцевими

з'єднаннями забезпечує жорсткість споруди. Вертикальна стійкість забезпечується за допомогою наплавних понтонів у верхній частині споруди або за допомогою тросів, що з'єднують конструкцію з морським дном (рис. 20, б).



(a)



(б)

Рис. 20. Поперечний переріз наплавного мосту (а); орієнтовний проект підводного наплавного трубчастого мосту з плавучими понтонами (б) [14]

Норвезький консультант Teknisk Data очолює команду розробників цієї концепції – трипрогонової конструкції з двома традиційними фіксованими залізобетонними пілонами висотою 200 м на кожному березі та двома пілонами на понтонах, прикріплених до вертикальних колон за технологією платформ TLP (рис. 21).

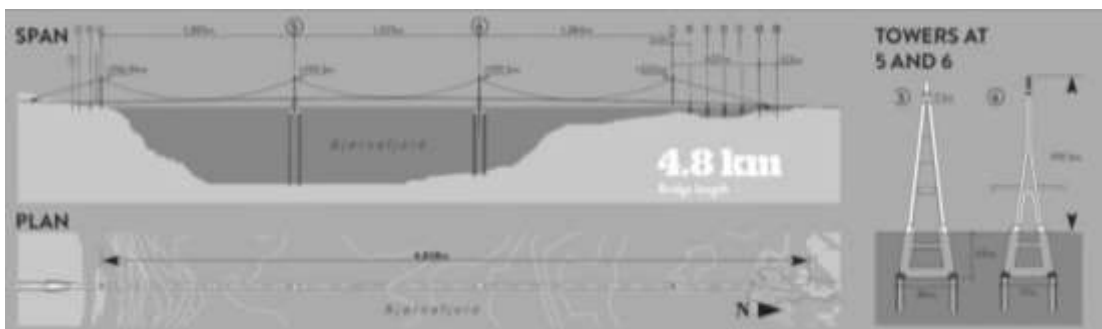
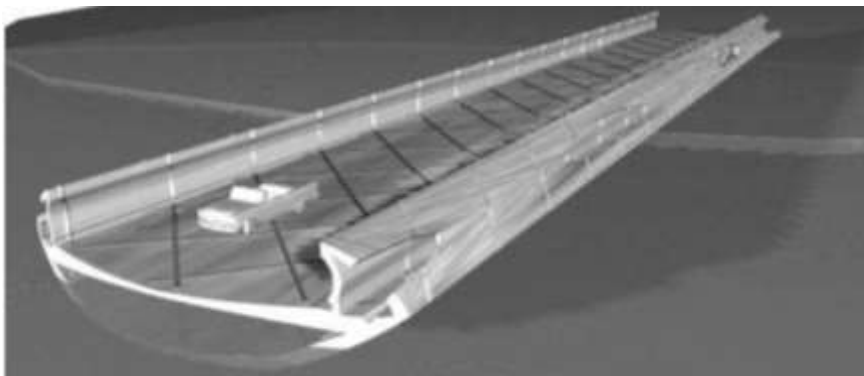


Рис. 21. Орієнтовний проект підвісного мосту [14]

Кожен головний прогін має довжину понад 1300 м та берегові прогони довжиною 300 м на південному і близько 600 м на північному березі відповідно. Одним із плюсів цієї споруди є те, що вона матиме лише два центральні пілони. Ширина балки жорсткості буде складати всього 33 м. Оскільки з моря виходять лише два пілони, це також означає, що є лише дві локації, які потрібно буде захищати від зіткнень кораблів.

Висновки

У проєктах найвинахідливіших архітекторів існує безліч нових ідей, серед яких ми можемо знайти нове натхнення для реалізації понтонних мостів майбутнього в Україні (рис. 22).



(a)



(б)



(в)

Рис. 22. Саморухомий збірний сегмент для наплавного мосту (а); залізничний перехід через Берінгову протоку (б); поєднання понтонного мосту з електрогенераторами (в) [9]

Наведемо кілька прикладів, які, звісно, є концепціями майбутнього [9]:

- ідея саморухомих залізобетонних збірних сегментів наплавного мосту, які повинні бути виготовлені на верфі, а потім перевезені морем і зібрані в обраному місці (рис. 22, а);
- ідея перетнути Берінгову протоку залізничною гілкою, що спирається на понтонний міст, (рис. 22, б);

- необхідність отримання дедалі більшої кількості енергії з чистих та відновлюваних джерел дозволяє об'єднати понтонний міст із електрогенераторами: гребні гвинти рухаються завдяки дії води – течії чи припливів (рис. 22, в).

Наразі технологія будівництва сучасних постійних наплавних мостів дуже тісно починає поєднується з технологією морської нафтогазової розвідки, де нерідко доводиться закріплювати масивні бурові установки на глибині понад 300 м. Серед проєктів постійних наплавних мостів є такі, що мають перетнути протоку Джорджія, поблизу м. Ванкувера у Британській Колумбії; Гібралтарську протоку; а також між парами Гавайських островів, де глибина води може перевищувати 600 м. Такі амбітні переправи, скоріше за все, не будуть реалізовані в Україні в найближчому майбутньому, доки не виникне правильна комбінація обставин – технічних, економічних і політичних.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бугаєвський С.О. Бугаєвський С.О., Бережна К.В., Краснов С.М., Бугаєвська Ю.В. Відновлення мостів і труб після пошкодження : конспект лекцій (частина 1) – Харків: ХНАДУ, 2023. – 178 с.
2. Бугаєвський С.О., Ненастіна Т.О., Шеховцова Т.О., Штефан О.М., Мацій М.Є. Автодорожні тимчасові збірно-розбірні мости. – Вісник ХНАДУ. –2023. – Вип. 100.– С. 80-97.
3. List of pontoon bridges / https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_pontoon_bridges
4. Henry Petroski. Floating Bridges. 2003. P. 302-306.
5. Kristine Senderud. Modeling and analysis of floating bridge concepts exposed to environmental loads and ship collision. NTNU. 2018. 210 p.
6. Alfred Ring Mangus. Floating Bridges. Conference: DES Continuing Education Presentation at Caltrans. State of California. February 2007. https://www.researchgate.net/publication/321934060_Floating_Bridges
7. Jasen Neese, Merv Eriksson, Brian Vachowski. Floating trail bridges and docks. 2002. 31 p.
8. Ali Halim Saleh. Mega Floating Concrete Bridges. 2010. 229 p.
9. Sergio Tattoni. Pontoon Bridges. Conference Paper. May 2016. Politecnico di Milano. 26 p. https://www.researchgate.net/publication/303685309_Pontoon_Bridges
10. Knut Andreas Kvale, Ole Oiseth, Anders Ronnquist, Ragnar Sigbjornsson. Modal Analysis of a Floating Bridge With out Side-mooring. IMAC, 2015. 11 p. <https://www.researchgate.net/publication/280715260>
11. Lwin M.M. Floating Bridges. Chapter 22. Bridge Engineering Handbook. CRC Press, 2000. 24 p.
12. Ibrahim Osama. Dynamic Behaviour of Shortterm Floating Bridges. Ontario, Canada, 2011. 332 p.
13. Galate bridge. https://en.wikipedia.org/wiki/Galata_Bridge
14. Alexandra Wynne Floating Solutions / Norway's extraordinary bridges plan. 15 Apr, 2016. <https://www.newcivilengineer.com/archive/floating-solutions-norways-extraordinary-bridges-plan-15-04-2016/>
15. Tension-Leg Platforms. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/tension-leg-platforms>

REFERENCES

1. Buhaievskiy S.O. Buhaievskiy S.O., Berezhna K.V., Krasnov S.M., Buhaievskaya Yu.V. Vidnovlennia mostiv i trub pislia poshkodzhennia: konspekt lektsii (chastyna 1) (Restoration of bridges and pipes after damage: lecture notes (part 1)) – Kharkiv: KhNADU, 2023. – 178 s.
2. Buhaievskiy S.O., Nenastina T.O., Shekhovtsova T.O., Shtefan O.M., Matsyi M.Ye. Avtodorozhni tymchasovi zborno-rozbirni mosty (Road temporary prefabricated bridges) – Visnyk KhNADU. –2023. – Vyp. 100.– S. 80-97.
3. List of pontoon bridges / https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_pontoon_bridges
4. Henry Petroski. Floating Bridges. 2003. P. 302-306.
5. Kristine Senderud. Modeling and analysis of floating bridge concepts exposed to environmental loads and ship collision. NTNU. 2018. 210 p.
6. Alfred Ring Mangus. Floating Bridges. Conference: DES Continuing Education Presentation at Caltrans. State of California. February 2007. https://www.researchgate.net/publication/321934060_Floating_Bridges
7. Jasen Neese, Merv Eriksson, Brian Vachowski. Floating trail bridges and docks. 2002. 31 p.
8. Ali Halim Saleh. Mega Floating Concrete Bridges. 2010. 229 p.
9. Sergio Tattoni. Pontoon Bridges. Conference Paper. May 2016. Politecnico di Milano. 26 p. https://www.researchgate.net/publication/303685309_Pontoon_Bridges
10. Knut Andreas Kvale, Ole Oiseth, Anders Ronnquist, Ragnar Sigbjornsson. Modal Analysis of a Floating Bridge With out Side-mooring. IMAC, 2015. 11 p. <https://www.researchgate.net/publication/280715260>
11. Lwin M.M. Floating Bridges. Chapter 22. Bridge Engineering Handbook. CRC Press, 2000. 24 p.
12. Ibrahim Osama. Dynamic Behaviour of Shortterm Floating Bridges. Ontario, Canada, 2011. 332 p.
13. Galate bridge. https://en.wikipedia.org/wiki/Galata_Bridge
14. Alexandra Wynne Floating Solutions / Norway's extraordinary bridges plan. 15 Apr, 2016. <https://www.newcivilengineer.com/archive/floating-solutions-norways-extraordinary-bridges-plan-15-04-2016/>
15. Tension-Leg Platforms. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/tension-leg-platforms>

Бугаєвський С.О., Ненастіна Т.О., Бугаєвський В.О., Бугаєвська Ю.В.

СУЧАСНИЙ СТАН РОЗВИТКУ ПОСТІЙНИХ В. О. НАПЛАВНИХ МОСТІВ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇХ БУДІВНИЦТВА В УКРАЇНІ

Розглянуто історію розвитку найбільш відомих наплавних мостів, починаючи зі стародавніх часів та закінчуючи сучасними конструкціями. Систематизовані технічні вимоги до постійних наплавних мостів згідно зі світовим досвідом їх проектування, будівництва та експлуатації. Окреслено найбільш раціональну область їх застосування. Наведено класифікацію постійних наплавних мостів відповідно до суцільної та роздільної конструкції понтонів. Систематизовано варіанти схем компонування у залежності від особливостей їх конструкції, а також варіанти форми понтонів із описом особливостей їх застосування. В якості довідкової інформації у таблиці систематизовані основні технічні характеристики сучасних постійних наплавних мостів, розташованих по всьому світу. Детально розглянуті сучасні проекти постійних наплавних мостів на прикладі прибережного маршруту E39, який планується побудувати у Норвегії зі застосуванням різних схем мостів, у тому числі вантових та підвісних, а також у вигляді плавучого тунелю. Зроблені висновки щодо подальшого розвитку конструкцій наплавних мостів у майбутньому та перспективи їх будівництва в Україні.

Ключові слова: наплавні мости, понтони, пілони, вантовий міст, підвісний міст, опори мосту.

Buhaievskiy S.O., Nenastina T.O., Buhaievskiy V.O., Buhaievskaya Yu.V.

CURRENT STATE OF DEVELOPMENT OF PERMANENT PONTOON BRIDGES AND PROSPECTS FOR THEIR CONSTRUCTION IN UKRAINE

The history of the development of the most famous pontoon bridges, from ancient times to modern structures, is considered. The technical requirements for permanent pontoon bridges are systematized in accordance with the world experience in their design, construction, and operation. The most rational area of their application is outlined. The classification of permanent pontoon bridges according to the continuous and separate pontoon construction is presented. The variants of layout schemes depending on the peculiarities of their design, as well as variants of pontoon shape with a description of the peculiarities of their application are systematized. For reference, the table systematizes the main technical characteristics of modern permanent pontoon bridges located around the world. Modern projects of permanent pontoon bridges are considered in detail on the example of the coastal route E39, which is planned to be built in Norway using various bridge schemes, including cable-stayed and suspension bridges, as well as a floating tunnel. Conclusions are drawn regarding the further development of pontoon bridge structures in the future and the prospects for their construction in Ukraine.

Keywords: pontoon bridges, pontoons, pylons, cable-stayed bridge, suspension bridge, bridge piers.

УДК 624.21.033

Бугаєвський С.О., Ненастіна Т.О., Бугаєвський В.О., Бугаєвська Ю.В. Сучасний стан розвитку постійних наплавних мостів та перспективи їх будівництва в Україні // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2024. – Вип. 113. – С. 205-226.

Розглянуто історію розвитку наплавних мостів, систематизовані технічні вимоги до них та варіанти схем компонування, детально проаналізовано сучасні проекти, а також зроблені висновки щодо подальшого розвитку в Україні.

Табл. 1. Іл. 3. Бібліогр. 15 назв.

UDC 624.21.033

Buhaievskiy S.O., Nenastina T.O., Buhaievskiy V.O., Buhaievskaya Yu.V. Current state of development of permanent pontoon bridges and prospects for their construction in Ukraine // Strength of Materials and Theory of Structures. – 2024. – Issue 113. – P. 205-226. – Ua.

The article examines the history of the development of pontoon bridges, systematizes technical requirements for them and layout options, analyzes modern projects in detail, and draws conclusions about further development in Ukraine.

Tab. 1. Fig. 3. Ref. 15.

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): доктор технічних наук, професор, декан дорожньо-будівельного факультету, Бугаєвський Сергій Олександрович

Адреса робоча: 61002 Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25, Харківський національний автомобільно-дорожній університет.

Мобільний тел.: +38(050) 9379016

E-mail: bugaevskiysa@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2861-0268>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри хімії та хімічної технології, Ненастіна Тетяна Олександрівна

Адреса робоча: 61002 Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25, Харківський національний автомобільно-дорожній університет.

Мобільний тел.: +38(050) 9719415

E-mail: nenastina@ukr.net

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6108-4023>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): асистент кафедри мостів, конструкцій і будівельної механіки ім. В.О. Російського, Бугаєвський Володимир Олександрович

Адреса робоча: 61002 Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25, Харківський національний автомобільно-дорожній університет.

Мобільний тел.: +38(098) 4801562

E-mail: bugaevsky@ukr.net

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-3177-7998>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри українознавства Бугаєвська Юлія Володимирівна

Адреса робоча: 61002 Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25, Харківський національний автомобільно-дорожній університет.

Мобільний тел.: +38(050) 0816808

E-mail: bugaevskaylia@ukr.net

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9982-8526>