

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ГІДРОМЕХАНІКИ



МАРТИНОВСЬКИЙ Іван Михайлович

УДК 532.593:621.311.2

**РОБОТА ХВИЛЬОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕНЕРГІЇ В
НЕРЕГУЛЯРНОМУ ПОЛІ ВІТРОВИХ ХВИЛЬ У ШЕЛЬФОВІЙ ЗОНІ**

01.02.05 — механіка рідини, газу та плазми

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ — 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор
Сердюченко Анатолій Миколайович,
Національний університет кораблебудування імені адмірала
Макарова (м. Миколаїв), професор кафедри будівельної
механіки корабля.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Яковлев Віталій Васильович,
Інститут гідромеханіки НАН України (м. Київ), провідний
науковий співробітник відділу гідродинаміки хвильових
процесів;
кандидат технічних наук, доцент
Алексєєнко Сергій Вікторович,
Дніпропетровський національний університет імені Олеся
Гончара, доцент кафедри механотроніки фізико-технічного
факультету.

Захист відбудеться «2» лютого 2017 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої
вченої ради Д 26.196.01 Інституту гідромеханіки НАН України за адресою: вул.
Желябова, 8/4, м. Київ 57, 03680.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту гідромеханіки НАН
України.

Автореферат розісланий «28» грудня 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.196.01,
д.т.н., професор

 С. І. Кріль

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Загально визнано, що розвитку альтернативної енергетики сприяли поступове вичерпання традиційних запасів джерел енергії на Землі та негативний вплив від їх спалювання на атмосферу та клімат земної кулі. На даний час розробка альтернативних та екологічно чистих технологій отримання енергії ведеться у низці напрямів, та найбільш просунутими є вітрова та сонячна енергетики. Хвильова енергетика дещо відстає за рівнем розробок, хоч самі хвилі і є значно більш енергомісткими. Але, нажаль, морські хвилі є і значно більш агресивними ніж інші джерела. Виникають вагомні негативні чинники при експлуатації морських пристроїв для відбору енергії – хвильових перетворювачів енергії (далі ХвПЕ), які суттєво впливають на їх безпеку, тривалість та ефективність роботи.

Такі країни, як США, Великобританія, Австралія, Данія, Португалія та ін., завдяки своєму географічному розташуванню вже практично використовують ХвПЕ. До найбільш розвинених технологій перетворення енергії хвиль можна віднести розробки наступних компаній: Aquamarine Power, Ocean Energy Ltd, Ocean Power Techologies, Ocean Wave Energy Comp., Pelamis Wave Power та ін.

Дослідження роботи ХвПЕ вимагає: а) наявності даних зі статистики режимів хвиль та динаміки взаємодії пристроїв з хвилями при експериментальному дослідженні; б) застосування обчислювальних комплексів та чисельного аналізу рівнянь, що моделюють зазначені фізичні процеси. Все це є тривалим, трудомістким та коштовним процесом.

Сучасні дослідження у напрямку використання енергії хвиль пов'язані з розробкою більш ефективних принципів та схем, покращенням експлуатаційних характеристик ХвПЕ, збільшенням ефективності їх роботи, зменшенням витрат на їх обслуговування та здешевленням електроенергії до комерційного рівня. Дані характеристики залежать, зокрема, від навантажень на робочі елементи ХвПЕ, що визначаються їх взаємодією з хвильовим профілем, полями швидкості та тиску у вітрових хвилях. Основним інструментарієм в сучасних дослідженнях є: а) лінійні теорії регулярних хвиль та гідродинамічних (далі ГД) навантажень (Хаскінд М. Д.) на ХвПЕ та б) спектральні теорії нерегулярних та динамічних систем (Яглом А. И.), які також є лінійними, і тільки окремі роботи виходять за дані межі. У той же час вітрові хвилі у шельфовій зоні мають підвищені рівні крутості, а збудрені ними ХвПЕ можуть мати значні відхилення від стану рівноваги, що потребує нелінійних узагальнень для визначених вище моделей – лінійних за своєю суттю.

Тому розробка наближених моделей та методів для розв'язання нелінійних задач хвильової енергетики з метою досягнення більш високих показників ефективності роботи ХвПЕ у полі нерегулярних хвиль – **актуальна задача**, яка потребує вирішення у найближчі роки. Один із напрямків роботи на цьому шляху полягає у прямому ГД моделюванні нерегулярних вітрових хвиль у шельфовій зоні та ГД навантажень і динамічних реакцій ХвПЕ на дію хвиль з урахуванням нелінійних ефектів. Деякі аспекти досліджень, що мають відношення як до моделювання пристроїв перетворення хвильової енергії та аналізу їх роботи, так і до моделювання ГД полів у хвилях, викладені у роботах J. Huckerby, A. Babarit, A. H. Clement, J. Khan, M. F. P. Lopes, J. Dupuy, E. Bruneton, J. Falnes, D. V. Evans, J. N. Newman,

О. В. Осадчук, В. А. Савченко, А. М. Сердюченко, В. С. Блінцов та ін.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація відповідає основним напрямкам та програмам досліджень Науково-дослідного інституту підводної техніки Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова. Отримані результати відповідають вимогам Закону України «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні» №3715-VI від 08.09.2011 (редакція від 05.12.2012), ст. 4 «Стратегічні пріоритетні напрями інноваційної діяльності на 2011–2021 роки» (п. 1 «...впровадження енергоефективних, ресурсозберігаючих технологій, освоєння альтернативних джерел енергії»).

Мета і задачі дослідження. Метою даної дисертаційної роботи є дослідження динамічних реакцій та енергетичних показників ХвПЕ при взаємодії їх елементів з полями нерегулярних вітрових хвиль на воді з урахуванням нелінійних ефектів шляхом розробки фізико-математичних моделей і методів для ГД представлення морського нерегулярного хвилеутворення у шельфовій зоні.

Для досягнення поставленої мети потрібно було вирішити наступні задачі:

- провести огляд сучасних досліджень та досягнень у хвильовій енергетиці, обрати найбільш перспективні технології для подальших досліджень у даній роботі;
- виконати аналіз статистики вітро-хвильових режимів районів Чорного та Азовського морів щодо можливості розташування та використання ХвПЕ, а також виявити можливий негативний вплив зовнішнього середовища на їх роботу;
- розробити у лінійному та нелінійному наближеннях фізико-математичні моделі для чисельних розрахунків у часі і просторі ГД характеристик нерегулярного морського хвилеутворення у шельфовій прибережній зоні на інтервалах квазістаціонарності хвильового руху – 30...40 хв;
- розробити фізико-математичні моделі і методи для чисельних розрахунків у часовій області ГД навантажень на елементи ХвПЕ, динаміки їх руху та отриманої механічної енергії при дії нерегулярних хвиль з довільним спектром;
- чисельними дослідженнями з'ясувати найбільш ефективні схеми ХвПЕ, вплив нелінійних ефектів на їх динамічні та енергетичні показники, а також розробити у першому наближенні рекомендації щодо проектування перетворювачів, виходячи з району експлуатації, хвильових режимів та схем відбору енергії.

Об'єктом дослідження є ХвПЕ різних типів в полі нерегулярних вітрових хвиль у шельфовій зоні.

Предметом дослідження є гідродинамічні поля в нерегулярних вітрових хвилях, гідродинамічна взаємодія елементів ХвПЕ з даними полями та динамічні реакції і енергетичні показники роботи ХвПЕ.

Методи дослідження. Методи рейтингового аналізу, спектральні методи в лінійних моделях нерегулярних вітрових хвиль, наближені чисельно-аналітичні методи розв'язку нелінійних крайових задач теорії хвиль на воді, методи корабельної гідродинаміки та океанотехніки для розрахунку гідродинамічних навантажень на елементи ХвПЕ, чисельні методи інтегрування задач Коші при розрахунках динамічних реакцій перетворювачів за часом на короткотермінових інтервалах хвильових режимів, статистичні методи для оцінки коротко- і довготермінових розподілів для вітрових хвиль та реакцій ХвПЕ.

Наукова новизна одержаних результатів. У дисертації було отримано наступні нові наукові результати:

1. **Вперше** розроблено технологію прямого динамічного розрахунку за часом реакцій та енергетичних показників ХвПЕ при дії нерегулярних вітрових хвиль у шельфовій зоні з урахуванням нелінійних ефектів. Існуючі технології є здебільшого лінійними і ґрунтуються на використанні лінійних гідродинамічних моделей для регулярних хвиль, хвильових навантажень і реакцій ХвПЕ.

2. **Удосконалено** спектральну модель лінійних нерегулярних хвиль, зокрема: а) **використано** 2-х піковий 6-ти параметричний спектр Хассельмана; б) **впроваджено** дискретизацію спектру, яка, на відміну від існуючої, є нерівномірною; в) **вперше** отримано новий лінійний розв'язок крайової задачі теорії хвиль на воді.

3. **Вперше**, розроблений раніше для нерегулярних вітрових хвиль на глибокій воді, комплекс методів для нелінійного моделювання гідродинамічних полів **узагальнено** для нерегулярних хвиль з обмеженою глибиною моря.

4. Наближені нелінійні методи розрахунку хвильових навантажень, розроблені у корабельній гідродинаміці, при дії регулярних хвиль **узагальнено** шляхом врахування нелінійних ефектів на миттєвій зволоженій поверхні ХвПЕ та нерегулярності хвильових рухів і динаміки коливань пристроїв, а також **адаптовано** до розрахунку навантажень та динаміки коливань ХвПЕ різних типів при дії нерегулярних вітрових хвиль на воді з довільним спектром.

5. **Застосування** обчислювальної технології Time Domain Calculations дозволило **вперше** отримувати чисельні результати для ефективності ХвПЕ на інтервалах квазістаціонарності та визначати на їх основі короткотермінову статистику без прийняття гіпотез щодо лінійності та статистичної природи хвиль і динаміки коливань перетворювачів.

6. Порівняльними чисельними розрахунками 4-х базових типів ХвПЕ – кесона, коливальної пластини, поплавця на важелі і ланцюга плотів – **вперше** показано нові закономірності в характеристиках руху пристроїв на різних хвильових режимах, зокрема, для: а) енергетичних показників ХвПЕ при врахуванні нелінійних ефектів; б) базових схем перетворювачів, що є найбільш енергетично ефективними; в) параметрів, які визначають розміри та розташування елементів перетворювачів.

Практичне значення отриманих результатів. Основними практичними результатами роботи є:

1. Створений у роботі комплекс обчислювальних програм з розрахунку динамічних реакцій та статистичних характеристик ХвПЕ при заданих хвильових режимах може бути використано при проведенні варіантних розрахунків, виборі раціональних типів та співвідношень параметрів ХвПЕ в залежності від його типу, району розташування та статистики хвильових режимів.

2. Проведений у роботі аналіз довготермінової статистики вітрових та хвильових режимів на шельфах Чорного та Азовського морів може бути використано при вирішенні питань раціонального розміщення ХвПЕ та забезпечення надійності їх роботи.

3. Створена у роботі гідродинамічна модель нерегулярних вітрових хвиль може бути використана також у розрахунках за часом нелінійних та нерегулярних

динамічних реакцій суден (хитація, слемінг, хвильова вібрація) та засобів океанотехніки у штормових умовах (експлуатаційні режими, режими виживання).

4. Отримані у роботі конкретні кількісні залежності та закономірності у кінематиці та динаміці руху ХвПЕ формують вихідну базу інформації при їх проектуванні з оптимальними характеристиками та параметрами.

Теоретичні результати, здобуті в дисертації, а також розроблене на цій основі методологічне, алгоритмічне та програмне забезпечення застосовувались на лекційних та лабораторних заняттях при викладанні дисциплін «Моделювання виробничих процесів у суднобудуванні», «Математичне моделювання систем і процесів та методи оптимізації», «Автоматизовані системи моделювання» та ін. на кафедрі «Інформаційних управляючих систем та технологій» Національного університету кораблебудування (НУК) протягом 2014-2015 рр. Теоретичний та практичний матеріал, запропонований автором, використовувався при підготовці курсових та дипломних робіт зі спеціальностей Інформаційні управляючі системи та технології і Інформаційні технології проектування у НУК, а також при виконанні дипломного проектування зі спеціальності Розробка програмного забезпечення у Миколаївському будівельному коледжі КНУБА.

Обґрунтування і достовірність отриманих результатів ґрунтуються на використанні адекватних фізико-математичних моделей механіки рідини та твердого тіла, задовільним узгодженням результатів чисельних розрахунків з експериментальними та розрахунковими даними інших авторів.

Особистий внесок здобувача полягає: 1) у проведенні аналізу довго термінової статистики вітрових та хвильових режимів на шельфах Чорного та Азовського морів, 2) в узагальненні методу півзворотньої задачі на загальний випадок нерегулярних хвиль з довільним спектром у шельфовій зоні з обмеженою глибиною моря, 3) розробці комплексу обчислювальних програм, що реалізують гідродинамічну модель нерегулярних вітрових хвиль та дозволяють обчислювати динамічні реакції та статистичні характеристики ХвПЕ при заданих хвильових режимах, 4) тестуванні моделей, 5) проведенні чисельних розрахунків та 6) аналізі результатів.

Роботи [1, 2] опубліковано без співавторів. У наукових статтях, опублікованих у співавторстві, здобувачу належать наступні результати: [3, 4, 5] – розробка алгоритмів та програм, чисельні розрахунки морського хвилеутворення, навантажень на робочі органи ХвПЕ та їх динаміки, виконання аналізу і порівняння отриманих результатів з відомими експериментальними та розрахунковими даними, [6] – виконання аналітичного огляду сучасних досліджень та досягнень у хвильовій енергетиці, складання класифікації типів ХвПЕ та визначення їх оцінок, виконання експертного аналізу.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи, а також окремі її розділи доповідалися та отримали позитивні відгуки на науково-технічних конференціях, зокрема, на: міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях НУК імені адмірала Макарова 2011-2015 рр.; Міжнародних конференціях з математичного моделювання, ХНТУ, Херсон, 2011-2013 рр.; щорічній науково-методичній конференції «Могилянські читання», ЧДУ ім. Петра Могили, Миколаїв, 2011 р.; XVI International Conference «Dynamical

System Modelling and Stability Investigation», Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kiev, 2013; Акустичному Симпозіумі «КОНСОНАНС», Інститут Гідромеханіки НАН України, Київ, 2013 та 2015 рр.

Дисертаційна робота доповідалась і обговорювалась також на наукових семінарах, зокрема, у: Інституті гідромеханіки НАНУ, Київ, 2015, 2016 рр.; Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, 2015, 2016 рр.; Чорноморському державному університеті імені Петра Могили, Миколаїв, 2015 р.; Інституті транспортних систем і технологій НАНУ «Трансмаг», Дніпропетровськ, 2016 р.

Публікації. Результати дисертації опубліковано у 22 роботах: в 6 статтях (у тому числі 2 без співавторів), у 16 тезах міжнародних [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14] та всеукраїнських конференціях [15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22]. У наукових фахових виданнях, що затверджені ВАК України, опубліковано 5 статей [1, 2, 3, 4, 6]. Крім того 1 стаття [5] у науково-періодичному виданні Грузії.

Обсяг і структура роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, чотирьох додатків. Повний обсяг дисертації – 243 сторінки, у тому числі: обсяг основного тексту – 148 сторінки, 107 рисунків і 16 таблиць, 19 сторінок – список використаних джерел з 161 найменувань, додаток – 30 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** сформульовані мета та задачі роботи, відзначено актуальність, новизну, теоретичне значення та практичну цінність роботи. Сформульовано положення, що виносяться на захист.

У **першому розділі** представлено сучасний стан розвитку технологій використання енергії хвиль океанів та морів. Проведено аналіз причин появи і наслідків екологічних проблем у світі, які призводять до змін у кліматі, показано перспективні напрямки у вирішенні зазначених проблем за рахунок розробок технологій використання альтернативних джерел енергії, зокрема, хвильової енергії, яка, у порівнянні з іншими, є найбільш інтенсивною. Виконано огляд моделей та методів у гідродинаміці вітрових хвиль, теорії корабля та океанотехніці, а також проведено стислий аналіз переваг і недоліків сучасних засобів обчислювальної гідродинаміки.

Відзначено, що використання традиційних джерел енергії спричинило глобальні зміни на планеті і призвело до таких наслідків, як: 1) збільшення концентрації парникових газів в атмосфері, 2) посилення природних катаклізмів, 3) зростання техногенних аварій та катастроф, 4) танення крижаного покриву на полюсах Землі, 5) зростання середнього рівня температури на планеті, тощо.

Виконавши аналіз небезпечних факторів з боку традиційних джерел енергії, підтверджено напрям дослідження, який націлює на пошук способів та технологій використання альтернативних джерел енергії, у першу чергу, використання енергії сонця, вітру, морських припливів та хвиль у прибережних районах, термальних джерел, там де вони є, тощо.

Огляд останніх публікацій у даному напрямку показав, що з усіх альтернатив-

них джерел енергії, енергія хвиль є найбільш інтенсивною. Також відзначено, що для України, яка, завдяки своєму географічному розташуванню, межує з Чорним та Азовським морями, технології отримання енергії морських хвиль мають потенційно важливий інтерес.

Історичний огляд розвитку технологій перетворення хвильової енергії, а також літератури та Інтернет джерел показав, що на даний час завдяки Японії, Північній Америці та країнам Європи вже чітко напрацьовано біля 1000 технологій отримання механічної та електричної енергії від руху морських вітрових хвиль. Проте, поки що перетворення енергії хвиль не є розповсюдженою практикою, і на теперішній час у світі проводяться тільки дослідження і тестування таких пристроїв, як осцилюючі стовпи чи поплавці, рухомі ланцюжки плотів, переливні басейни, занурені чи поверхневі коливальні пластини тощо. Це пов'язане з тим, що існує ціла низка задач, які потрібно вирішувати у даному напрямі, зокрема, це ґрунтовні наукові дослідження, практика проектування та виробництва ХвПЕ, їх транспортування, розміщення, налаштування, експлуатація, захист, супроводження, утилізація та багато інших проблем, які будуть з'являтися з часом.

При моделюванні та дослідженні фізичних процесів взаємодії ХвПЕ з нерегулярними вітровими хвилями, важливою є проблема визначення навантажень на робочі органи енергетичних пристроїв, зокрема, з урахуванням нелінійних ефектів. У її розв'язку може допомогти спорідненість розрахунків навантажень, динаміки робочих органів ХвПЕ та морських плаваючих споруд, платформ, кораблів, тощо, що дозволяє, відштовхуючись від напрацьованих моделей та методів у гідродинаміці суден та океанотехніці (О. М. Крилов, М. Д. Хаскінд, Ю. В. Ремез, Бішоп, Д. Н. Ньюман, Бреббіа та інш.), досягти потрібних результатів.

Головний висновок щодо моделей хвиль та навантажень на ХвПЕ полягає у тому, що переконлива більшість сучасних досліджень ґрунтується на лінійних гідродинамічних та спектральних методах з добре відпрацьованими підходами та технологіями, які суттєвим чином ґрунтуються на принципі суперпозиції. І тільки відносно мало робіт пов'язані з аналізом роботи ХвПЕ при дії нелінійних періодичних хвиль Стокса. Тому одночасне врахування нелінійних та нерегулярних ефектів в гідродинаміці хвиль та навантажень на ХвПЕ потребує суттєвого доопрацювання існуючих технологій розрахунку.

Аналіз останніх публікацій також показав, що досягти потрібних результатів у чисельному моделюванні та дослідженні взаємодії ХвПЕ з гідродинамічними полями можна за допомогою CFD пакетів, які ґрунтуються на повних рівняннях Нав'є-Стокса. Але дана технологія поки є коштовною, потребує використання комп'ютерних систем з великою обчислювальною потужністю, і її доцільно застосовувати на подальших етапах досліджень, коли буде виокремлено найбільш перспективні типи ХвПЕ та схеми їх роботи.

Таким чином, формулювання та розв'язання крайових та початкових задач з нерегулярними процесами і полями у нелінійному наближенні, які суттєво виходять за межі принципу суперпозиції, потребує розробок нових підходів та методів, що і покладено в основу даної роботи.

За результатами оглядового розділу визначено мету роботи та сформульовані задачі дослідження.

Другий розділ дисертаційної роботи представляє математичні моделі та методи досліджень, розроблені та застосовані до розв'язання задач у даній роботі. При цьому задачі роботи було поділено на основні і підпорядковані. До основних належать: а) розробка фізико-математичних моделей та методів розрахунку гідродинамічних полів для нелінійних та нерегулярних вітрових хвиль у шельфовій зоні на інтервалах квазістаціонарності – це 35...40 хвилин; б) розробка методів розрахунку хвильових навантажень на елементи ХвПЕ з урахуванням нелінійних та нерегулярних ефектів при дії таких хвиль.

До підпорядкованих задач належать задачі: а) чисельного інтегрування за часом нелінійних рівнянь коливань ХвПЕ та б) розрахунку коротко- та довготермінової статистики для вітрових хвиль та реакцій ХвПЕ з метою прогнозування та оцінки показників енергетичної ефективності роботи ХвПЕ різного типу та в різних хвильових умовах.

Для аналізу довготермінової статистики вітро-хвильових режимів на шельфах Чорного та Азовського морів щодо можливості розташування та використання ХвПЕ було зібрано статистичні дані для інтенсивності та напрямку вітрів, висот $h_{3\%}$ та середніх періодів T_c хвиль, а для їх апроксимації застосовано залежності розподілів Вейбула $F(x) = 1 - \exp[-\exp(\alpha \ln x + \beta)]$, Гумбеля $F(x) = \exp[-\exp(-(x - \alpha)/\beta)]$, Парето $F(x) = 1 - \exp[-(\alpha \ln x + \beta)]$ та логістичний розподіл $F(x) = [1 + \exp(-(x - \alpha)/\beta)]^{-1}$. Для шельфу Чорного моря найкращі результати дає розподіл Вейбула, а для Азовського моря – розподіл Гумбеля. Дані апроксимації дозволяють прогнозувати на тривалий час експлуатації ХвПЕ (до 100 р.) найбільш характерні хвильові режими та, головним чином, оцінювати ризики при дії екстремальних штормових умов в режимах виживання.

Для отримання гідродинамічних моделей основного джерела збудження ХвПЕ – нерегулярних вітрових хвиль – розглянуто два наближення: лінійне та нелінійне. У першому наближенні застосовано спектральну техніку для плоских хвиль, відповідно до якої профіль $\zeta_w(x, t)$, проекції поля швидкостей $v_{wx}(x, z, t)$, $v_{wz}(x, z, t)$ та поля тиску $p_w(x, z, t)$ з глибиною визначаються за допомогою наступних виразів

$$\left. \begin{aligned} \zeta_w(x, t) &= \sum_{i=1}^N a_i \cos \theta_i, \quad N \sim (2 \dots 3) \cdot 10^3, \\ v_{w\{x,z\}}(x, z, t) &= \sum_{i=1}^N \delta_i c_i \frac{\{\cosh, \sinh\} [k_i(z + d)]}{\cosh k_i d} \{\cos, \sin\} \theta_i, \\ p_w(x, z, t) &= -\rho g \left[z - \sum_{i=1}^N a_i \frac{\cosh[k_i(z + d)]}{\cosh k_i d} \cos \theta_i \right], \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де $\theta_i = k_i x + \sigma_i t + \alpha_i$; a_i, k_i, σ_i – відповідно амплітуди, хвильові числа, колові частоти елементарних гармонік, що визначаються через апроксимацію енергетичного спектру $S(\sigma_i)$ двоіковим 6-параметричним спектром Хасельмана; $\delta_i = a_i k_i$, $c_i = \sigma_i / k_i$ – крутість та фазова швидкість i -ої елементарної гармоніки, а початкові фази елементарних гармонік α_i обираються як випадкові числа з рівномірним розподілом на інтервалі $[0; 2\pi]$.

Для визначення локальних значень колової частоти $\sigma(x, t)$, хвильового числа

$k(x, t)$, крутості видимих нерегулярних хвиль $\delta_w(x, t)$, які входять у нелінійні наближення, використано метод Гільберта, що дозволяє отримати обвідну амплітуду $a_w(x, t)$ та модуляцію фаз $\psi_w(x, t)$ для нерегулярних хвиль у вигляді

$$a_w = \sqrt{\xi_w^2 + \zeta_w^2}, \quad \theta_w(x, t) = \arctan(\xi_w, \zeta_w)|_{2\pi}, \quad \psi_w(x, t) = \theta_w(x, t) - \theta_0(x, t), \quad (2)$$

де $\zeta_w(x, t)$ та $\xi_w(x, t)$ є комплексно спряженими функціями перетворення Гільберта. Аналогічні характеристики отримують і для поверхневих значень потенціалу швидкості $\phi_w^s(x)$.

У нелінійному наближенні, по-перше, виконується перехід до крутості нелінійного хвильового профілю $\delta_w^{lin} \rightarrow \delta_w^{nl}$ за формулою для пакетів хвиль $\delta_w^{nl}(x) = \delta_w^{lin} \left(1 + \frac{1}{2}(\delta_w^{lin})^2 + \frac{7}{3}(\delta_w^{lin})^4\right)$, де $\delta_w^{lin} \equiv \delta_w(x, t) = a_w k$.

По-друге, у хвильовому профілі до основної гармоніки додаються зв'язані кратні гармоніки з певними амплітудами та фазами:

$$\zeta_w^{nl}(x, t) = a_w \cos(\theta_0 + \psi_w) + \sum_{n=2}^M a_n \cos(n\theta_0 + n\psi_w + \alpha_n), \quad M \sim 20 - 25, \quad (3)$$

де $\theta_0 = \langle k \rangle x + \langle \sigma \rangle t$ – середня фазова координата; $a_n(x, t)$, $\alpha_n(x, t)$ – амплітуди та збурення фаз кратних гармонік, для яких залежності від локальних характеристик хвиль a_w , σ , k , δ_w^{nl} було отримано на основі Фур'є-аналізу профілів укручених вітрових хвиль та розв'язків нелінійних рівнянь Шредінгера III порядку для хвильових пакетів.

По-третє, для розрахунку поверхневого поля швидкостей у нерегулярних хвилях з довільним спектром у шельфовій зоні було узагальнено метод півзворотньої задачі, згідно якому хвильовий профіль вважається відомим, а поверхневі проекції швидкостей $\mathbf{v}_{x,z}^s \equiv \mathbf{v}_{wx,z}(\zeta_w)$ визначаються з нелінійних граничних умов крайової задачі. При цьому похідна за часом від потенціалу швидкостей ϕ_w^s була визначена через похідну за координатою x : $\phi_{wt}^s = \langle c \rangle \mathbf{v}_x^s - \delta\phi$, де $\delta\phi$ – модуляційна складова. Тоді граничні умови перетворюються у два алгебраїчні рівняння відносно проекцій $\mathbf{v}_x^s$ та $\mathbf{v}_z^s$ і їх розв'язок має вигляд

$$\mathbf{v}_x^s = \left[\sqrt{\delta P^2 - P_+(\zeta_{wt}^2 + G)} - \delta P \right] / P_+, \quad \mathbf{v}_z^s = \zeta_{wt} + \mathbf{v}_{wx}^s \zeta_x, \quad (4)$$

де $\delta P = \langle c \rangle + \zeta_{wt} \zeta_{wx}$, $G = 2(g\zeta_w + \delta\phi)$, $P_+ = 1 + (\zeta_{wx})^2$.

На завершення за допомогою інтегралу Коші визначається поле швидкостей з глибиною рідини $\tilde{\mathbf{v}}_w$

$$\tilde{\mathbf{v}}_w(\tilde{z}) = \mathbf{v}_x - i\mathbf{v}_z = \frac{-i}{2\pi} \oint_{(z=\zeta_w, z=-d)} \frac{\mathbf{v}_x^s - i\mathbf{v}_z^s}{\tilde{\zeta} - \tilde{z}} d\tilde{\zeta}, \quad \tilde{z} = x + iz, \quad \tilde{\zeta} \in \zeta_w, \quad (5)$$

а поле гідродинамічного тиску p з глибиною визначається відомим інтегралом Коші-Лагранжа $p_w \approx -\rho[\langle c \rangle \mathbf{v}_{wx} + \delta\phi + \frac{1}{2}(\mathbf{v}_{wx}^2 + \mathbf{v}_{wz}^2) + gz]$.

Для розв'язку другої основної задачі нелінійного розрахунку хвильових навантажень на робочі елементи ХвПЕ безпосередньо при дії нерегулярних хвиль шляхом узагальнення та адаптації існуючих технологій було розроблено наступні методи. По-перше, виходячи з класифікації елементів ХвПЕ (поверхневі та занурені, об'ємні та видовжені, тонкі та масивні), для кожного типу було сформульовано припущення стосовно збуреного ними хвильового руху. Зокрема, основними є припущення про відносну малість збурень та нехтування нелінійними ефектами на хвильовій поверхні, але з їх урахуванням на миттєвій зануреній у хвилі поверхні елемента ХвПЕ.

По-друге, виокремивши у загальному потенціалі хвильового руху потенціал збурення Φ^0 : $\Phi = (\Phi - \Phi_w) + \Phi_w = \Phi_w + \Phi^0$, було переформульовано граничні умови відносно Φ^0 на незбуреній хвильовій поверхні $z = \zeta_w(x, t)$ та миттєвій зануреній у хвилі поверхні елемента ХвПЕ $S(t)$, а також розділено гідродинамічні сили на незбурені сили Крилова-Фруда і збурені за рахунок віддзеркалення (дифракції) і випромінення (радіації) хвиль сили Хаскінда-Ньюмана. При цьому задачу дифракції було наближено трансформовано до задачі випромінення хвиль шляхом осереднення поля хвильових швидкостей на миттєвому зволоженому контурі елемента $\langle \mathbf{v}_{wx,z} \rangle_{S(t)}$ та використання відносних швидкостей $\vec{\mathbf{v}}_b - \langle \vec{\mathbf{v}}_w \rangle_S = \vec{\mathbf{v}}_r$ на контурі.

Таким чином, тиск на контурі $S(t)$ представлено у вигляді $p^S = p_w^S + p^0 = p_w^S + (\bar{p}^0 + \Delta p^0)$, де $\bar{p}^0 = -\rho \partial \Phi^0 / \partial t$ – лінійна відносно потенціалу збурення складова, а Δp^0 – квадратична складова збуреного гідродинамічного тиску. Відповідно і для головного вектора $\vec{P}(t)$ маємо $\vec{P} = \vec{P}^{KF} + \vec{P}^{HN}$ з наступними формулами для розрахунку

$$\vec{P}(t) = \iiint_{V(t)} p \vec{n} dV = \int_L \int_{S(t)} p \vec{n} dS dL = \int_L \int_{\omega(t)} \nabla p d\omega dL, \quad (6)$$

де перший інтеграл застосовується для тривимірних елементів, другий – для видовжених масивних і третій – для видовжених тонких елементів ХвПЕ.

При обчисленнях хвильові сили Крилова-Фруда $\vec{P}^{KF}(t)$ розраховувались чисельним інтегруванням незбуреного тиску p_w^S на сітці трикутних скінченних елементів миттєвої зволоженої поверхні елемента ХвПЕ. Для збурених гідродинамічних сил Хаскінда-Ньюмана застосовано лінійну теорію Хаскінда із узагальненням на нерегулярні процеси коливань та нелінійні ефекти за рахунок зміни за часом зануреної у хвилі поверхні елемента ХвПЕ. Сили Хаскінда-Ньюмана суттєвим чином залежать від частоти гармонічних коливань елемента і тому перехід до нерегулярних коливань у нелінійному наближенні (без застосування спектрального аналізу) створив значні труднощі при їх отриманні. Дані труднощі було подолано застосуванням асимптотичних рядів за ступінню нерегулярності коливань і остаточно інтенсивність поперечних до осі елемента гідродинамічних сил Хаскінда-Ньюмана визначається наступним рядом (перший член ряду відповідає наближенню Хаскінда)

$$q_j^{HN}(x, t) = -\frac{\partial}{\partial t} \sum_{m,k} \frac{(-1)^m}{2m!} \left\{ \left[\frac{\partial^{2m} \mu_{jk}}{\partial \sigma^{2m}} \cdot \frac{\partial^{2m} \nu_{jk}}{\partial \tau^{2m}} + \frac{\partial^{2m} \lambda_{jk}}{\partial \sigma^{2m}} \cdot \frac{\partial^{2m} u_{jk}}{\partial \tau^{2m}} \right] + C.G. \right\}, \quad (7)$$

де $m, k = 2, 3, 4$ – індекси поперечних, вертикальних та кутових нахилів поперечного перерізу елементу ХвПЕ, $m = 0, 1, 2, \dots$; μ_{jk}, λ_{jk} – прилучені маси та коефіцієнти демпфування, визначені у кожен момент часу для миттєвої зануреної у хвилі частини контуру елементу, $v_{jk}, u_{jk} = \int_0^t v_{jk} dt$ – відносні швидкості та переміщення при коливаннях елементу і σ – частота коливань та τ – час зміни обвідної амплітуд та модуляції фаз у швидкостях v_{jk} , С.Г. – позначено спряжену за перетворенням Гілберта частину формули. Гідродинамічні характеристики μ_{jk}, λ_{jk} розраховувались із застосуванням методу Урсела (розташуванням M гідродинамічних особливостей у центрі одиничного кола, утвореного N -параметричним конформним відображенням реального контуру поперечного перерізу елементів у параметричну площину).

У другій підпорядкованій задачі нелінійні рівняння коливань ХвПЕ було отримано у формі Ньютона, а для їх чисельного інтегрування використано метод Адамса-Бешфорта. Метод було обрано шляхом тестування методів Рунге-Кутти, Адамса-Бешфорта та Неймарка на нелінійному осциляторі Дюфінга-Ван-дер Поля з порівнянням точності, стійкості та швидкодії кожного з перелічених методів.

Нарешті, відповідно до етапів, що входять в обчислювальну гідродинаміку, було обрано та розроблено пакети програм, які склали інструментальну базу даної роботи. Зокрема, для підготовчого етапу було обрано пакет FreeCAD з модулем Ship, який дозволяє швидко та ефективно формувати геометрію поверхні енергетичних пристроїв та зберігати її у форматі STL. Для другого розрахункового етапу, було розроблено власну обчислювальну програму за допомогою технології Java, інтегрованого середовища розробки NetBeans, розширеної бібліотеки для математичних обчислень Commons Math та модуля JFreeChart, який дозволяє швидко та зручно формувати діаграми та графіки. Для третього етапу аналізу результатів розрахунків, було обрано пакет ParaView, який дозволив вирішувати такі задачі, як: 1) візуалізація розрахункових сіток ХвПЕ, 2) візуалізація гідродинамічних полів, 3) кількісний аналіз даних та 4) створення анімацій, що демонструють динаміку руху хвиль та коливань ХвПЕ у часі.

У третьому розділі подано результати чисельного дослідження нерегулярних вітрових хвиль. По-перше, наведено дані стосовно довго термінової статистики вітрових та хвильових режимів на шельфах Чорного та Азовського морів і показано, що I-й та II-й райони зазначених морів мають досить енергоємні хвилі. По-друге, проаналізовано перешкоди, які можуть вплинути на тип та розташування хвильових перетворювачів – занадто високі літом або низькі зимою температурні умови та пов'язані з цим утворення крижаних полів чи наростання біомаси на робочих елементах; їх замулення чи заноси піском; хімічна корозія та надмірні навантаження в режимах виживання.

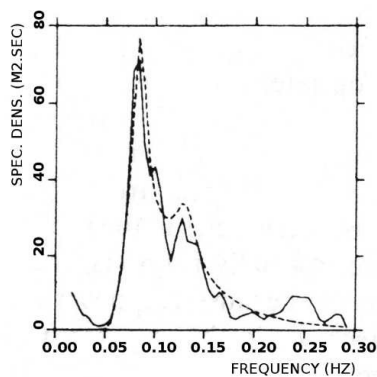
Для зручності проведення аналізу статистичних даних, було розроблено відповідне програмне забезпечення, яке реалізує створення на екрані монітора інтерактивних карт шельфових зон морів з відповідними «drop-down» таблицями та графіками статистичних даних. Зокрема, чисельні значення значних висот та середніх періодів хвиль h_s та T_{cs} , що визначають хвильові режими з урахуванням міжсезонної мінливості, представлено у табл. 1. Також, на рис. 1 подано приклад порівняння експериментального спектра та розрахункового двошкікового спектра.

Приклади розрахунку часових реалізацій нерегулярних хвиль (див. рис. 2) було

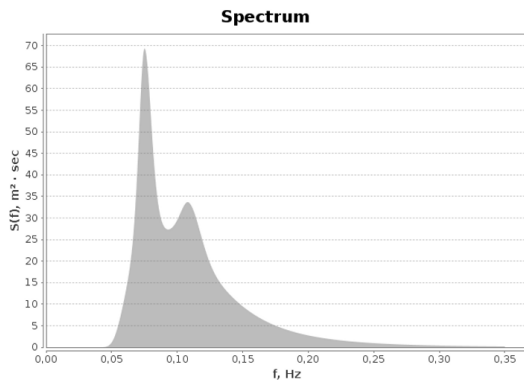
Наближені довготермінові оцінки параметрів хвильових режимів
 $h_s, \text{м} / T_{cs}, \text{с}$ із забезпеченістю 3%

Сезон	Чорне море, I район		Чорне море, II район		Азовське море	
	$h_s, \text{м}$	$T_{cs}, \text{с}$	$h_s, \text{м}$	$T_{cs}, \text{с}$	$h_s, \text{м}$	$T_{cs}, \text{с}$
Зима	3,07	8,4	2,84	8,2	2,39	7,79
Весна	3,07	8,4	2,88	8,24	2,32	7,72
Літо	2,72	8,1	2,22	7,62	1,92	7,3
Осінь	3,07	8,04	2,84	8,2	2,39	7,79

порівняно із записами в реальних штормах у Північно-Західній Атлантиці і було отримано добру узгодженість профілів за нерегулярністю.



а



б

Рис. 1. Приклад порівняння спектру отриманого експериментально (а) та його апроксимації двопіковим спектром (б)

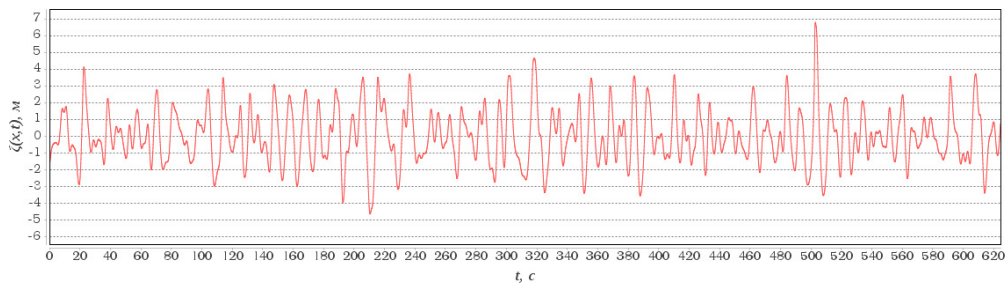


Рис. 2. Приклад розрахунку ординат хвильової поверхні у заданих просторовій точці $x = 300 \text{ м}$ та на інтервалі часу $t = 10 \text{ хв}$.

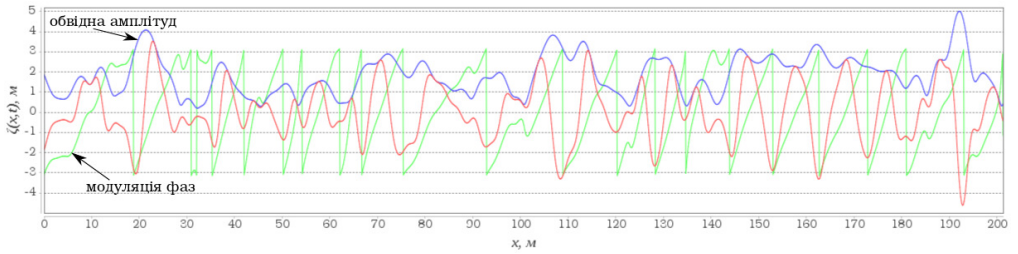


Рис. 3. Приклад розрахунку обвідної амплітуд і модуляції фаз

Проте розрахунки показали суттєві похибки спектральної моделі в гідродинамічних полях тиску та швидкостей у при поверхневому шарі рідини і для їх усунення було отримано новий розв'язок лінійної крайової задачі теорії хвиль на воді із обмеженою глибиною при збереженні граничних умов на вільній поверхні ζ_w . Нові скориговані вирази для потенціалу швидкостей та дисперсійного співвідношення мають вигляд

$$\Phi_w(x, z, t) = \sum_i \frac{a_i g}{\sigma_i} \frac{\cosh[k_i(z + d)]}{\cosh[k_i(\zeta_w + d)]} \sin \theta_i, \quad (8)$$

де величини σ_i та k_i тепер пов'язані формулою $\sigma_i^2 = g k_i \tanh[k_i(\zeta_w + d)]$.

Відповідно через потенціал Φ_w були скореговані і поля швидкостей і тиску в нерегулярних хвилях.

Приклад насичення хвильового профілю кратними нелінійними гармоніками показано на рис. 4. Загалом різниця між значеннями вертикальної координати ζ_w лінійного та нелінійного профілів в усій часовій реалізації за 30 хв. може змінюватись від декількох сантиметрів до одного метра і більше. Такі зміни у хвильовому профілі впливають на розрахунки навантажень на елементи ХвПЕ.

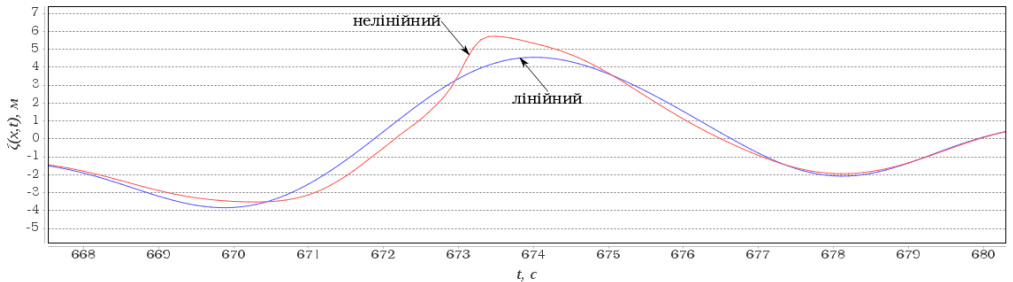


Рис. 4. Приклад порівняння хвильового профілю у лінійному та нелінійному наближеннях

Приклади розрахунку у нелінійному наближенні поверхневих швидкостей та полів швидкостей і тиску з глибиною показані на рис. 5. Порівняльний аналіз нелінійного та лінійного наближень було виконано на прикладі поверхневих швидкостей

(див. рис. 6) і було показано, що для нелінійних швидкостей величина відхилення від лінійних значень може досягати декількох десятків відсотків: 1) у бік збільшення при проходженні гребенів хвиль та 2) у бік зменшення при проходженні підшов хвиль.

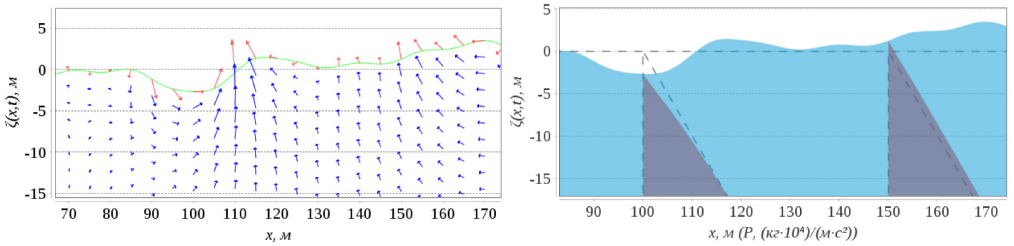


Рис. 5. Приклади розрахунку полів швидкостей та тиску з глибиною для хвильового режиму у нелінійному наближенні

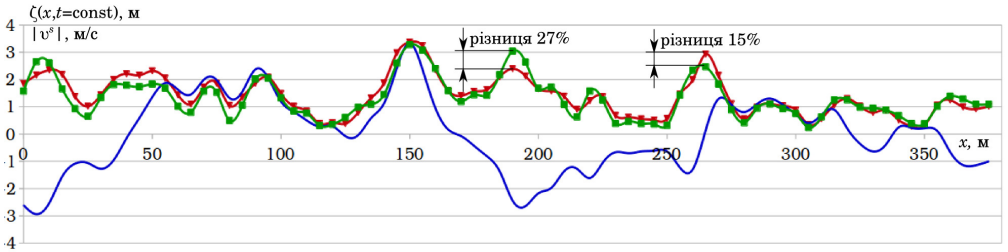


Рис. 6. Порівняння розрахованих поверхневих швидкостей у лінійному (■ — ■) та нелінійному наближеннях (▼ — ▼) для фрагменту $\zeta_w(x)$

Поля швидкостей також перевірялись порівнянням розрахункових даних з експериментальними результатами Melville та чисельними розрахунками Tanaka для укручених хвиль на воді.

У четвертому розділі представлено результати розробки моделей та чисельні розрахунки динаміки коливань ХвПЕ наступних типів: 1) зануреної коливальної пластини, що реагує на поле горизонтальних швидкостей рідини у хвилях, 2) придонного кесона, що реагує на зміни хвильового тиску з глибиною, 3) поверхневого поплавця на важелі та 4) поверхневого ланцюжка плотів, які реагують на коливання вільної поверхні. Відповідно до кожного типу ХвПЕ було виконано: 1) розробку принципової схеми пристрою, 2) визначення його кінематики та рівнянь коливань, 3) підготовка геометрії для розрахунку у пакеті FreeCAD, 4) визначення навантажень на робочі елементи пристроїв та чисельне інтегрування рівнянь коливань, 5) візуалізація та аналіз результатів розрахунку ХвПЕ у пакеті ParaView.

1. Заглиблений придонний кесон. Система координат та розрахункова схема кесона показані на рис. 7. Кесон може здійснювати тільки вертикальні коливання (пульсації) $\zeta_0(t)$ при зміні хвильового тиску. Для даного типу ХвПЕ знехтувано

наближено хвильовим демпфуванням на вільній поверхні.

Рівняння коливань за II-им законом Ньютона має остаточний вигляд

$$\ddot{\zeta}_0 = \frac{1}{M_G + \mu_{33} + \Delta M_G} \left[(P_z^{KF} + \mu_{33} \frac{\partial}{\partial t} v_{wz}^m) - (\Delta \Lambda \dot{\zeta}_0 + \Delta K(\zeta_0) \zeta_0) \right], \quad (9)$$

де M_G – маса кесону, ΔM_G , $\Delta \Lambda$ і $\Delta K(\zeta_0)$ – вільні інерційні, демпфуючі та жорсткісні параметри внутрішньої системи перетворювача енергії коливань у електричну енергію залежно від його конструкції. Зокрема, для кесона може бути використана решітка лінійних генераторів типу «рухомий магніт-котушка».

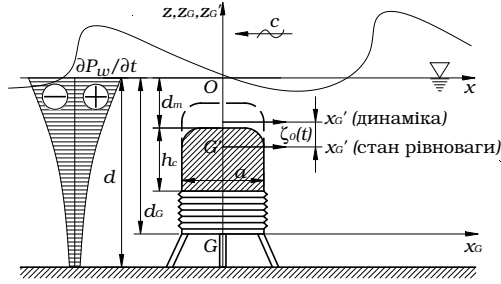


Рис. 7. Система координат, схема та розміри кесону

трикутними скінченими елементами. Тоді, інтеграл для трикутної комірки дорівнює

$$\int_{\Delta S_i} p_w \cos(n, z) dS \approx \Delta S_i \sum_{k=1}^n v_k p_{wi}(L_1, L_2, L_3) \cos(n, z)_i, \quad (10)$$

де ΔS_i – площа трикутного скінченного елемента, v_k – ваговий коефіцієнт та $L_{1,2,3}$ – L-координати точок інтегрування, n – кількість точок інтегрування.

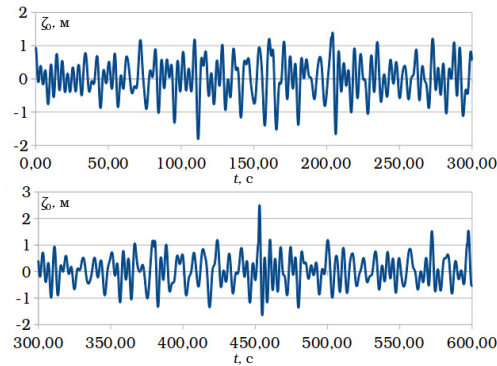


Рис. 8. Приклади графіків коливань кесона за часом

Для пластини, як і для кесону, у першому наближенні знехтувано хвильовими ефектами на вільній поверхні, але враховано квадратичні за швидкістю сили в'язко-вихорового опору смуг у складі поля пластини, як решітка видовжених тонких елементів.

Гідромеханічне навантаження P_z^{KF} визначається у рамках гіпотези Крилова-Фруда інтегруванням незбуреного тиску у хвилях $p_w^s(x, z, t)$ по миттєвій поверхні кесона, представлений сіткою із

Прилучені маси μ_{33} в рівнянні (9) розраховувались наближено без врахування частотної залежності за довідниковими матеріалами.

2. *Заглиблена коливальна пластина.* Системи координат та розрахункову схему пластини показано на рис. 9. Поле пластини складається із вертикальних смуг, які обертанням можуть змінювати свій кут атаки відносно горизонтального потоку рідини у хвилях і пластина може працювати, як решітка. Така конструкція поля пластин дає змогу адаптувати її коливальні характеристики до діючого хвильового

Рівняння кутових коливань пластини, записане у моментах сил відносно точки G , аналогічне за структурою рівнянню (9) і його чисельне інтегрування (див. рис. 10) також здійснювалось методом Адамса-Бешфорта.

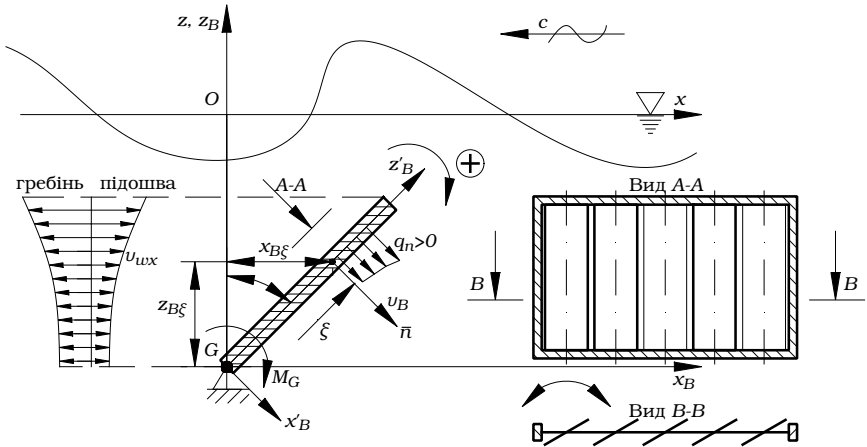


Рис. 9. Системи координат та розрахункова схема коливальної пластини

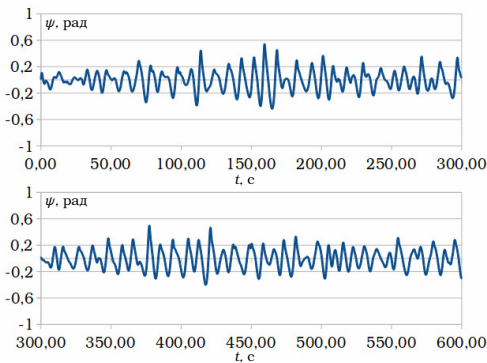


Рис. 10. Приклади графіків коливань пластини за часом

рахунок роботи важеля поплавець здійснює також плоскі поступальні рухи $\xi_G(t)$ та $\zeta_G(t)$. Кожне переміщення θ_0 , ψ_0 , u_0 передається на відповідні внутрішні перетворювачі енергії, робота яких породжує додаткові сили $\Delta M_\theta(t)$, $\Delta M_\psi(t)$ і $\Delta P_u(t)$, які, як і вище, мають структуру $(\Delta M_\alpha \ddot{\alpha} + \Delta \Lambda_\alpha \dot{\alpha} + \Delta K_\alpha(\alpha)\alpha)$, $\alpha = (\theta_0, \psi_0, u_0)$ з вільними параметрами інерції, демпфування і жорсткості відповідних пристроїв, наприклад гідропомп.

Для важеля гідродинамічні сили розраховувались як і для попередніх схем (тобто фактично у рамках відомої формули Морісона), а для поплавця – у рамках узагальненої у роботі теорії Хаскінда (див. розд. 2). При цьому гідродинамічні

Приклади графіків коливань пластини за часом подано на рис. 10.

3. Поверхневий поплавець на важелі. Схема поплавця із зануреним важелем представлена на рис. 11. У роботі також розглядалась і схема з надводним розташуванням важеля.

Поплавець розглядається як видовжене об'ємне поверхнєве тіло, а телескопічний важіль – як видовжене тонке занурене тіло. Коливальна система має три ступені вільності – кутові нахилання поплавця $\theta_0(t)$, кутові нахилання важеля $\psi_0(t)$ і повздовжні переміщення т. G у телескопічному важелі $u_0(t)$. За

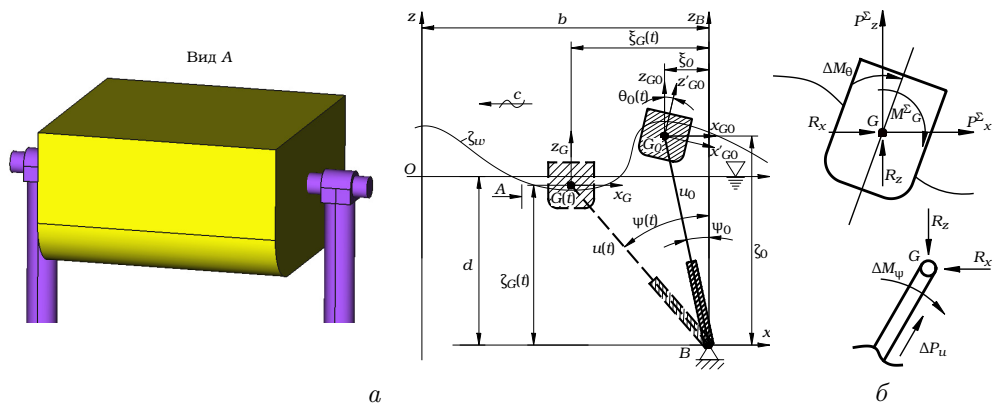


Рис. 11. Системи координат, розрахункова схема поверхневого поплавця на важелі (а) та схема дії сил (б); $P_{x,z}^{\Sigma} = P_{x,z}^{KF} + P_{x,z}^{HN}$, $M_G^{\Sigma} = M_G^{KF} + M_G^{HN}$; $R_{x,z}$ – реакції взаємодії важеля і поплавця в шарнірах

коефіцієнти μ_{jk} , λ_{jk} , $jk = 22, 23, 24, 33, 34, 44$ для миттєвого положення поперечних контурів поплавця на хвилях розраховувались інтерполяцією на масиві даних, попередньо нарахованих для серії миттєвих осадок і кутів нахилу поплавця. Це суттєво скоротило час інтегрування системи рівнянь.

Система рівнянь поплавця за II законом Ньютона має структуру

$$\left. \begin{aligned} I_G \ddot{\theta}_0 &= M_G(t) + \Delta M_{\theta}(t); \\ m_n \ddot{\xi}_G &= P_x^{\Sigma} - R_x; \quad m_n \ddot{\zeta}_G = P_z^{\Sigma} - R_z - m_n g; \\ I_0 \ddot{\psi}_0 &= M_{\Sigma 0}(t) + R_z u_0 \sin \psi_0 + P_z^{\Sigma} u_0 \cos \psi_0 + \Delta M_{\psi}(t); \\ m_p \ddot{u}_0 &= R_x \sin \psi_0 + R_z \cos \psi_0 + \Delta P_u(t); \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

де I_0 , m_p , m_n , I_G – інерційні характеристики коливальної системи.

Результати чисельного інтегрування системи диференціальних рівнянь коливань методом Адамса-Бешфорта подано на рис. 12.

4. *Ланцюг поверхневих плотів.* Розрахункова схема, системи координат та переміщення і сили для даного типу ХвПЕ показані на рис. 13. Вважається, що плоти є видовженими об'ємними тілами, їх довжини та кількість плотів є довільними та, крім того, шарніри можуть фіксуватися для адаптації довжин плотів до резонансних режимів у заданих хвильових умовах. Кореневий плот одним кінцем прикріплено до заякореного буя, щоб запобігти дрейфу плотів при дії хвиль. Реакція буя наближено не враховується.

Переміщення кожного плоту визначається двома зміщеннями центру ваги ($\xi_{Gi}(t)$, $\zeta_{Gi}(t)$) та кутом диференту $\theta_{0i}(t)$, або зміщеннями прикінцевих шарнірів $u_i^{L,R}(t)$, $w_i^{L,R}$, $i = 1, 2, \dots, N$. Кількість невідомих переміщень зменшується за рахунок умов сумісності переміщень для ланцюга в цілому.

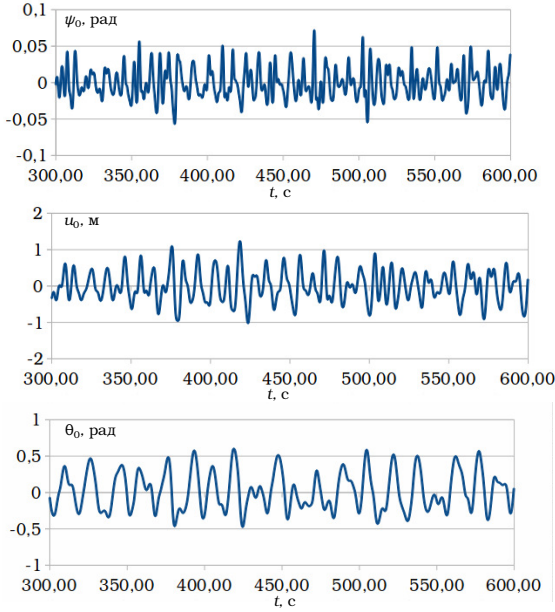


Рис. 12. Приклади графіків коливань елементів поплавця на важелі

Система рівнянь коливань i -го плоту має наступний вигляд ($i = 1, 2, \dots, N$)

$$\left. \begin{aligned} M_i \ddot{\xi}_{0i} &= P_{xi}^{KF} + P_{xi}^{HN} + R_{xi}^L - R_{xi}^R; \quad M_i \ddot{\xi}_{0i} = (P_{zi}^{KF} + P_{zi}^{HN}) + (R_{zi}^L - R_{zi}^R); \\ I_{0i} \ddot{\Psi}_{0i} &= (M_{0i}^{KF} + M_{0i}^{HN}) + (R_{zi}^L + R_{zi}^R) \frac{L_{xi}}{2} + \\ &+ (R_{xi}^L + R_{xi}^R) \frac{L_{zi}}{2} + (\Delta M_i^L + \Delta M_i^R); \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

де $R_{xi}^{L,R}$ – реакції взаємодії у лівому та правому шарнірах i -го плоту і, як і раніше, позначено гідромеханічні сили Крилова-Фруда і Хаскінда-Ньюмана та додаткові моменти сил у шарнірах $\Delta M_i^{L,R}$ від роботи внутрішніх агрегатів хвильового перетворювача, наприклад, pomp для перекачування робочої рідини до турбін на прибережній смузі.

Дана коливальна система є $2(N-1)$ разів статично невизначеною і для її розкриття призначено основні невідомі – переміщення у шарнірах $(u_i, w_i)^{L,R}$, для визначення яких використано системи рівнянь (12) та умови рівності реакцій взаємодії у шарнірах $R_i^L = R_{i+1}^R$, $R_i^R = R_{i-1}^L$; $i = 2, 3, \dots, N-1$ та $R_{x,z1}^R = R_{x,zN}^L = 0$. При цьому реакції було визначено з умов динамічної рівноваги за формулами

$$R_{\{x,z\}i}^L = \sum_{j=i+1}^N \left(P_{\{x,z\}j} - M_j \left\{ \xi_0, \xi_0 \right\}_j \right); \quad R_{\{x,z\}i}^R = \sum_{j=1}^{i-1} \left(M_j \left\{ \xi_0, \xi_0 \right\}_j - P_{\{x,z\}j} \right). \quad (13)$$

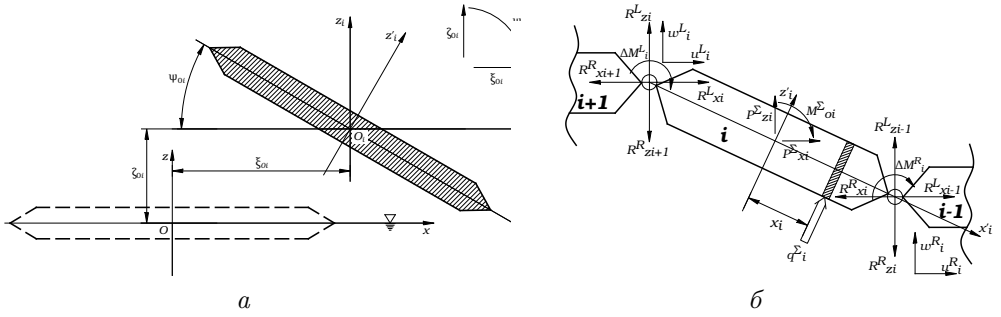


Рис. 13. Системи координат, розрахункова схема (а) та переміщення і силові фактори (б), що діють на i -й плот

Крім того, поступальні прискорення $\ddot{\xi}_{0i}, \ddot{\zeta}_{0i}, \ddot{\psi}_{0i}, i = 2, \dots, N-1$ було додатково перевизначено через прискорення першого плоту $\ddot{\xi}_{01}, \ddot{\zeta}_{01}$ та кутові прискорення $\ddot{\psi}_{0i}$ за виразами

$$\{\ddot{\xi}_0, \ddot{\zeta}_0\}_i = \{\ddot{\xi}_0, \ddot{\zeta}_0\}_1 + \sum_{j=1}^N \varepsilon(j, i) L_{\{z, x\}j} \cdot \ddot{\psi}_{0j}, \quad (14)$$

де множники $\varepsilon(i, j) = 0; 0,5; 1$ залежать від комбінацій індексів; $L_{\{z, x\}j}$ – приведені півдовжини плотів.

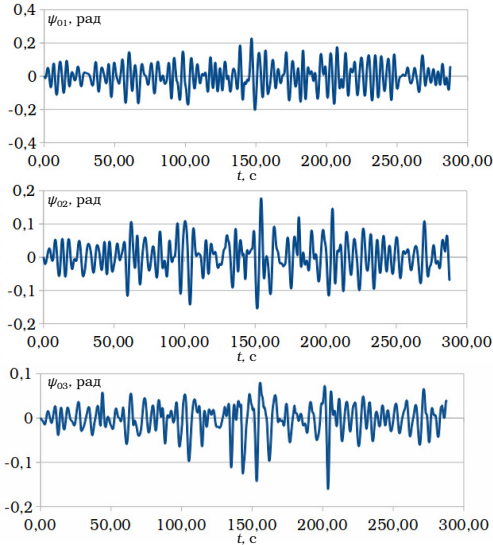


Рис. 14. Приклади графіків ординат кутових положень 3-х плотів відносно шарнірів з'єднання

та Oyster (коливальна пластина).

У результаті залишається $N+2$ невідомих переміщень $\xi_{01}, \zeta_{01}; \Psi_{01}, \Psi_{02}, \dots, \Psi_{0N}$ і результуюча система диференціальних рівнянь інтегрувалась чисельно методом Адамса-Бешфорта, див. приклад розрахунку на рис. 14.

Завершує роботу **п'ятий розділ**, у якому короткотермінову статистику коливань та енергетичних характеристик ХВПЕ отримано стандартним опрацюванням часових реалізацій на інтервалах квазістаціонарності заданих хвилових режимів. Чисельний експеримент виконано для пристроїв з параметрами, що подано у табл. 2 та обрано, спираючись на існуючі прототипи. При цьому, для кесону та коливальної пластини були виконані порівняння розрахункових даних з незалежними чисельними розрахунками А. Babarit (2012) аналогічних пристроїв Carnegie (занурений вертикально осцилюючий буй)

Значна висота хвиль h_s при розрахунках кесону та пластини змінювалась у діапазоні від 1 до 7 м з кроком 1 м, а середній період T_{cs} – від 7 до 11 с з кроком 2 с. Представлені нижче результати для поплавця та ланцюгів плотів стосуються хвильового режиму: значна висота $h_s = 4,15$ м, середній період $T_{cs} = 7,2$ с хвиль, а також інтервал часу розрахунку $T_{all} = 1800$ с (30 хв). При цьому, значення характеристик ΔK і $\Delta \Lambda$ внутрішніх систем підбирались так, щоб досягти максимальних амплітуд швидкостей коливань (для ΔK) та максимальних середніх потужностей пристрою (для $\Delta \Lambda$), що відповідає адаптивному контролю ХВПЕ.

Таблиця 2

Варіанти розрахункових параметрів

Придонний кесон						
Варіант	Глибина d , м	Діаметр D , м	Висота H_k , м	Маса m_G , т		
K ₁	-20	7	21,5	35		
Коливальна пластина						
Варіант	Глибина d , м	Висота h , м	Ширина B , м	Товщина D , м	Маса m_p , т	
Пл ₁	-17	16	26	2	150	
Ланцюг поверхневих плотів						
Варіанти	Висота D , м	Ширина B ,м	Довжини плотів, м			Маса m , т
			L_1 , м	L_2 , м	L_3 , м	
Л ₁	3,0	7,0	10,0	13,0	16,0	286,5
Л ₂	3,0	7,0	16,0	16,0	16,0	352,8
Поверхневий поплавець						
Варіанти	Висота D , м	Ширина B ,м	Довжина L ,м	Глибина d , м	Маса m_p , т	Маса m_b , т
П ₁	5,0	5,0	7,0	-20,0	61,5	$3,5 \times 2$
П ₂	5,0	5,0	7,0	5,0	61,5	$3,5 \times 2$
П ₁ – заглиблений важіль, П ₂ – поверхневий важіль						

Статистичне опрацювання реалізацій було обмежене отриманням середніх $\langle x \rangle$, дисперсій σ_x , гістограм розподілів та характеристик асиметрії та гостроти щільності розподілу A та ϵ , як показників нелінійності процесу (див. табл. 3).

Для кесону та коливальної пластини було проведено 3 варіанти розрахунків, при яких визначались: 1) лінійні навантаження при дії регулярних хвиль з амплітудами $\langle a \rangle = 0,315h_s$, 2) нелінійні навантаження при дії регулярних хвиль і 3) нелінійні навантаження при дії нерегулярних нелінійних хвиль.

Порівняння результатів першого та другого варіантів розрахунків для кесону з відповідними розрахунками Babarit (далі еталонними) показало, що зростання періодів хвиль до 11 с призводить до зростання показників середніх потужностей кесону по відношенню до еталонних (див. рис. 15). У першому випадку значення потужностей у порівнянні з еталонними були заниженими і різниця між ними становила близько 45 %, а у другому – завищеними і різниця з еталонними становила у середньому 90 %. Найкращі результати порівнянь були отримані при третьому варіанті розрахунків і вони показали, що на всьому інтервалі періодів хвиль значення середніх потужностей пристроїв знаходились у межах еталонних і у середньому їх різниця не перевищувала 30 %.

Порівняння результатів першого та другого варіантів розрахунків для коли-

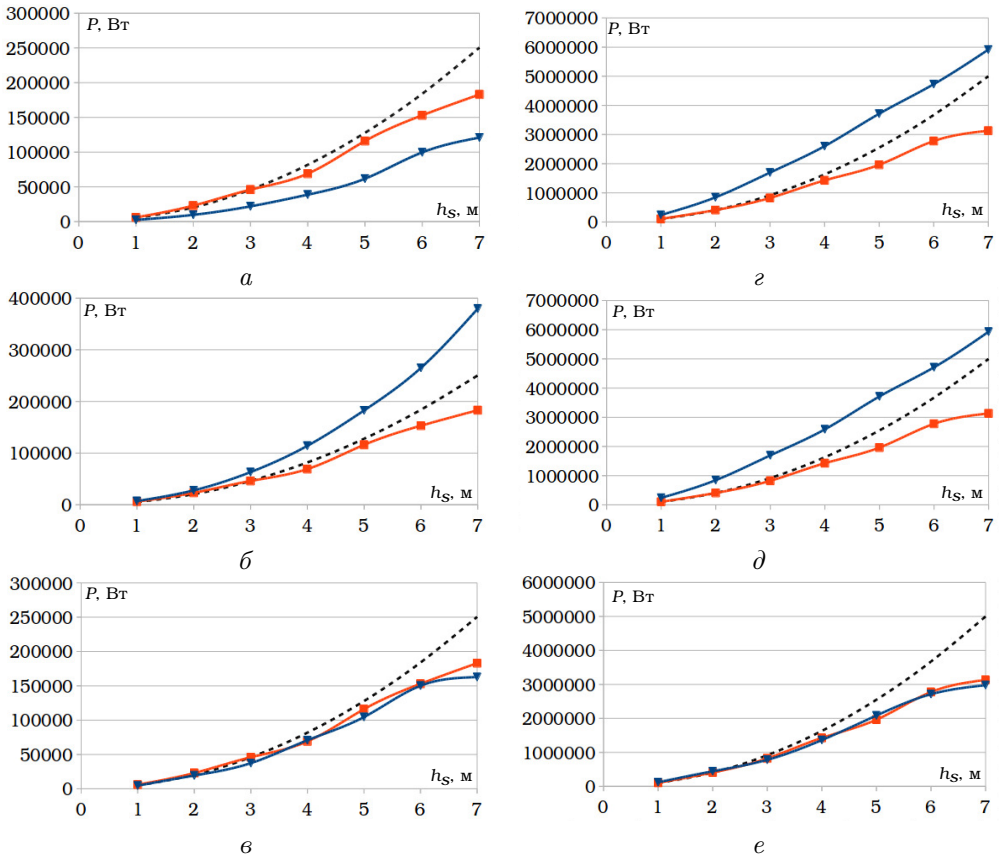


Рис. 15. Порівняння результатів розрахунку ▼ — ▼ кесону (а), (б), (в) та коливальної пластини (г), (д), (е) з чисельними розрахунками Babarit ■ — ■: (а), (г) — перший, (б), (д) — другий та (в), (е) — третій варіанти розрахунків; — — — екстраполяція у лінійному наближенні

вальної пластини з еталонними дали однакові результати і показали, що зростання періодів хвиль до 11 с призводить до зменшення показників середніх потужностей пластини по відношенню до еталонних, і при цьому значення потужностей у порівнянні з еталонними були завищеними до 130 %. Найкращі результати порівнянь, як і для кесона, були отримані при третьому варіанті розрахунків і вони показали, що значення середніх потужностей пластини знаходились у межах еталонних і у середньому їх різниця не перевищувала 35 %.

Чисельні розрахунки для коливального поплавця на важелі показали, що заміна підводного розташування важеля на надводне дозволяє підвищити у 4 рази енерговідбір коливального поплавця.

Чисельні розрахунки для ланцюгів плотів показали високу ефективність пристроїв даного типу. Виявлено, що більше ніж у два рази зростає потужність лан-

цюжка плотів, якщо використовувати змінну довжину плотів уздовж ланцюга.

Таблиця 3

Статистичні характеристики для ХвПЕ

Характеристика	Варіант	$\langle x \rangle$	σ_x	A	ϵ
Поверхневий поплавець на важелі					
Потужність, МВт	хвиль	5,11	$5,04 \cdot 10^6$	2,1	5,67
	П ₁	0,03	$3,21 \cdot 10^4$	2,78	10,751
	П ₂	0,47	$5,83 \cdot 10^5$	3,29	18,491
Поверхневий ланцюг плотів					
Потужність, МВт	хвиль Л ₁	17,5	$1,85 \cdot 10^7$	2,046	4,666
	хвиль Л ₂	24,4	$2,57 \cdot 10^7$	2,046	4,666
	Л ₁	2,98	$3,48 \cdot 10^6$	2,225	6,809
	Л ₂	1,0	$1,38 \cdot 10^6$	2,861	9,881

Відповідно до проведеного дослідження роботи ХвПЕ чотирьох типів, були сформульовані практичні рекомендації щодо подальших досліджень покращення експлуатаційних характеристик ХвПЕ, зокрема: 1) організація роботи ХвПЕ у масивах; 2) застосування адаптивних схем ХвПЕ типу коливальних пластин із змінною прозорістю їх поля, змінних довжин плотів, кесонів зі змінними демпфуванням і жорсткістю тощо, що дозволяє налаштовувати пристрої на діючі хвильові умови.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове завдання, яке полягає у дослідженні ефективності ХвПЕ шляхом застосування нових гідродинамічних моделей для нерегулярних вітрових хвиль і навантажень, а також чисельних методів розрахунку динаміки коливачів елементів ХвПЕ з урахуванням нелінійних ефектів.

Головні наукові та практичні результати роботи:

1. **Вперше** розроблено у вигляді програмного забезпечення нову нелінійну технологію прямого гідродинамічного розрахунку ефективності ХвПЕ при дії нерегулярних вітрових хвиль у шельфовій зоні моря на часових інтервалах квазістаціонарності (30...40 хв), достатніх для статистичного опрацювання. Існуючі технології є здебільшого лінійними і ґрунтуються на використанні лінійних гідродинамічних моделей для регулярних хвиль, хвильових навантажень і реакцій ХвПЕ та спектральних моделей (СМ) і методів при переході до нерегулярних морських хвиль.

Програма дозволяє для будь-якої точки шельфів отримувати довготермінові статистичні розподіли та їх аналітичні екстраполяції для швидкостей вітру, значних висот та середніх періодів хвиль на терміни до 100 років. Для параметрів хвильового режиму h_s , T_c із заданою забезпеченістю можна отримати спектри, виконати їх дискретизацію та розрахувати чисельні реалізації нерегулярної хвильової поверхні за часом та отримати для неї стандартну короткотермінову статистику.

2. **Удосконалено** СМ лінійних нерегулярних хвиль, зокрема: а) **використано** 2-х піковий 6-ти параметричний спектр Хассельмана, який краще моделює розподіл енергії хвиль по частотам; б) **впроваджено** нерівномірну дискретизацію спектру,

на відміну від існуючої рівномірної, що дало змогу на порядок зменшити кількість елементарних гармонік; в) **вперше** отримано новий лінійний розв'язок крайової задачі теорії хвиль на воді із обмеженою глибиною, який, на відміну від існуючого, дозволяє усувати виявлені похибки СМ у розрахунках полів тиску та швидкостей.

3. В нелінійному наближенні метод півзворотньої задачі, розроблений для розрахунку поверхневих проекцій швидкостей u_{wx} , u_{wz} у нелінійних пакетах хвиль на глибокій воді, **узагальнено** для нерегулярних хвиль з обмеженою глибиною моря. Це дало змогу трансформувати граничні умови до алгебраїчних рівнянь відносно u_{wx} , u_{wz} , які розраховувались через характеристики хвиль, насичених кратними зв'язаними гармоніками із зсувами фаз. Використано інтегральну формулу Коші і інтеграл Коші-Лагранжа для розрахунку гідродинамічних полів з глибиною.

4. **Узагальнено** лінійну теорію Хаскінда для гідродинамічних навантажень на регулярних хвилях шляхом врахування: а) нелінійних ефектів на миттєвій зволоженій поверхні ХвПЕ та б) нерегулярності хвильових рухів і динаміки коливань пристроїв. Частотну залежність гідродинамічних коефіцієнтів (ГК) ХвПЕ **враховано** застосуванням асимптотичних рядів за параметрами модуляційних ефектів хвильових рухів, миттєвих значень ГК та їх похідних за частотним параметром.

5. **Застосування** обчислювальної технології Time Domain Calculations дозволило **вперше** отримувати чисельні результати для ефективності ХвПЕ на інтервалах квазістаціонарності та визначати на їх основі коротко термінові статистичні розподіли реакцій без прийняття гіпотез щодо лінійності та статистичної природи хвиль і динаміки коливань перетворювачів. Існуючі СМ дають змогу отримувати ймовірнісні характеристики тільки зі спектрів вихідних процесів без урахування нелінійних ефектів і сукупного аналізу множини вихідних характеристик.

6. Порівняльними та варіантними розрахунками ефективності кесона та пластини **вперше** показано, що: а) ефективність пристрою залежить від зміни характеристик його системи перетворення енергії; б) розраховані дані узгоджуються з даними розрахунків *A. Babarit* (із розбіжностями у межах 35%); в) лінійні оцінки у порівнянні з нелінійними дають завищені результати ефективності у межах 45...90% і, таким чином, не можуть дати адекватних оцінок для реальних штормових умов; г) збільшення глибини розташування у два рази призводить до зниження показників роботи кесона на один порядок, тоді як пластини усього на 50%.

7. Аналогічними розрахунками поплавця на важелі та ланцюга плотів **вперше** показано, що: а) у поплавця найбільш інтенсивними виявилися кутові коливання важеля, а заміна підводного розташування важеля на надводне збільшує його ефективність до 4 разів; б) застосування плотів різної довжини, на відміну від плотів однакової довжини, призводить до підвищення потужності пристрою з 1 до 3 МВт.

8. Накопичений у роботі досвід розрахунків показав, що підвищення ефективності роботи ХвПЕ можливе за наступними напрямками: а) **розташування ХвПЕ в кластерах** таким чином, щоб своїми хвильовими збуреннями вони підсилювали роботу один одного; б) розробка **комбінованих типів ХвПЕ**, які б своїми робочими елементами реагували одночасно на усі гідродинамічні поля; в) розробка пристроїв з **адаптивними параметрами** внутрішньої системи перетворення енергії, які у поточному нерегулярному процесі здатні змінювати параметри інерції, демпфування та жорсткості для налаштування на резонансні режими коливань.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Мартиновський І. М. Аналіз узбережжя Чорного та Азовського морів щодо використання хвильової енергії [Текст] / І. М. Мартиновський // Збірник наукових праць НУК. — 2011. — № 3(438). — С. 12–21. — (індексується Google scholar).
2. Мартиновський І. М. Комп'ютерна реалізація розрахунку характеристик нелінійних вітрових хвиль у часі і просторі [Текст] / І. М. Мартиновський // Управління розвитком складних систем. — 2011. — № 8. — С. 85–91. — (індексується Google scholar).
3. Мартиновський І. М. Чисельне модулювання нерегулярних вітрових хвиль в задачах хвильової енергетики [Текст] / І. М. Мартиновський, А. М. Сердюченко // Вісник ХНТУ. — 2011. — № 3(42). — С. 290–295.
4. Мартиновський І. М. Динаміка деяких перспективних типів перетворювачів хвильової енергії [Текст] / І. М. Мартиновський, А. М. Сердюченко // Вісник ХНТУ. — 2013. — № 2(47). — С. 210–214.
5. Martynovskiy I. M. Non-linear hydrodynamic modelling of the irregular wind generated water waves [Text] / I. M. Martynovskiy, A. M. Serdjuchenko // Black Sea Scientific Journal of Academic research. — 2016. — Vol. 27, no. 1. — P. 21–26. — (Georgia).
6. Мартиновський І. М. Експертний аналіз перетворювачів хвильової енергії [Текст] / І. М. Мартиновський, А. М. Сердюченко // Вісник ХНТУ. — 2012. — № 2(45). — С. 216–221.
7. Мартиновський І. М. Аналіз узбережжя Чорного та Азовського морів з погляду використання хвильової енергії [Текст] / І. М. Мартиновський, А. М. Сердюченко // Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні: Матеріали 6-ї Міжнародної науково-технічної конференції. — Миколаїв : НУК, 2011. — С. 42–45.
8. Сердюченко А. М. Реалізація паралельних розрахунків характеристик нерегулярних вітрових хвиль [Текст] / А. М. Сердюченко, Мартиновський І. М. // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали 2-ї Міжнародної науково-технічної конференції. — Миколаїв : НУК, 2011. — С. 497–501.
9. Мартиновський І. М. Вітрові нерегулярні хвилі, як один з найінтенсивніших джерел альтернативної енергії [Текст] / І. М. Мартиновський, А. М. Сердюченко // Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні: Матеріали 7-ї Міжнародної науково-технічної конференції. — Миколаїв : НУК, 2012. — С. 51–53.
10. Мартиновський І. М. Динаміка руху перспективних типів хвильових перетворювачів енергії [Текст] / І. М. Мартиновський, А. М. Сердюченко // Актуальні проблеми інженерної механіки: Матеріали II Міжнародної науково-технічної конференції. — Миколаїв : НУК, 2012.
11. Мартиновський І. М. Статистичні карти хвильових режимів океанів і морів для розміщення хвильових перетворювачів енергії [Текст] / І. М. Мартиновський, А. М. Сердюченко // Актуальні проблеми інженерної механіки: Матеріали II Міжнародної науково-технічної конференції. — Миколаїв : НУК, 2012.

12. Martynovsky I. M. Nonlinear hydrodynamic modelling of the irregular wind generated water waves [Text] / I. M. Martynovsky, A. M. Serdjuchenko // Акустичний Симпозіум «КОНСОНАНС-2013». Збірник праць. — Київ : Інститут Гідромеханіки НАН України, 2013. — С. 200–206.
13. Martynovsky I. M. Hydrodynamic modelling of irregular wind generated waves on the finite depth water including nonlinear effects [Text] / I. M. Martynovsky, A. M. Serdjuchenko // Dynamical system modelling and stability investigation: XVI International Conference: Modelling and stability: Abstracts of conf. Reports, Kiev, Ukraine, 29-31 may. — Kiev : Taras Shevchenko National University of Kyiv, 2013. — Р. 246.
14. Мартиновський І. М. Математичне моделювання динаміки коливань багатоланцюгових плотиків [Текст] / І. М. Мартиновський, А. М. Сердюченко // Акустичний Симпозіум «КОНСОНАНС-2015». Збірник праць. — Київ : Інститут Гідромеханіки НАН України, 2015.
15. Сердюченко А. М. Математичне модулювання гідродинамічних полів нерегулярних морських хвиль на інтервалах квазістаціонарності в умовах жорсткого шторму [Текст] / А. М. Сердюченко, І. М. Мартиновський // Могилянські читання – 2011. Досвід та тенденції розвитку суспільства в Україні: глобальний, національний та регіональний. Матеріали щорічної науково-методичної конференції. — Миколаїв : Чорноморський державний університет імені Петра Могили, 2011.
16. Мартиновський І. М. Деякі схеми комбінованих хвильових перетворювачів енергії [Текст] / І. М. Мартиновський, А. М. Сердюченко // Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю. — Миколаїв : НУК, 2012. — С. 165–168.
17. Мартиновський І. М. Розробка програмного забезпечення реалізації техніки багатопараметричного конформного відображення [Текст] / І. М. Мартиновський, Ю. П. Кучара // Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю. — Миколаїв : НУК, 2013. — С. 51–53.
18. Мартиновський І. М. Розрахунки полів швидкості та тиску нерегулярних хвиль у рамках лінійної спектральної моделі [Текст] / І. М. Мартиновський, А. М. Сердюченко // Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю. — Миколаїв : НУК, 2013. — С. 241–243.
19. Мартиновський І. М. Чисельний аналіз роботи хвильових перетворювачів енергії, які взаємодіють з різними гідродинамічними полями у вітрових хвилях [Текст] / І. М. Мартиновський, А. М. Сердюченко // Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю. — Миколаїв : НУК, 2013. — С. 208–210.

20. Мартиновський І. М. Математичне моделювання тривимірних нерегулярних вітрових хвиль на воді [Текст] / І. М. Мартиновський, С. О. Олексієнко // Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю. — Миколаїв : НУК, 2014.
21. Мартиновський І. М. Динаміка коливачів багато ланцюгових перетворювачів енергії вітрових хвиль [Текст] / І. М. Мартиновський, А. М. Сердюченко // Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю. — Миколаїв : НУК, 2014.
22. Мартиновський І. М. Чисельний аналіз роботи схеми поплавця на коливальному важелі [Текст] / І. М. Мартиновський, А. М. Сердюченко // Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю. — Миколаїв : НУК, 2015.

АНОТАЦІЯ

Мартиновський І. М. Робота хвильових перетворювачів енергії в нерегулярному полі вітрових хвиль у шельфовій зоні. — На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.02.05 — механіка рідини, газу та плазми. — Інститут гідромеханіки НАН України, Київ, 2017.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню ефективності роботи хвильових перетворювачів енергії (ХвПЕ) різних типів шляхом застосування інноваційної нелінійної технології прямого гідродинамічного розрахунку нерегулярних вітрових хвиль у шельфовій зоні моря та чисельного розрахунку динаміки ХвПЕ при дії хвиль на часових інтервалах квазістаціонарності в нерегулярному хвильовому полі.

У рамках зазначеної технології розглянуто лінійне і нелінійне наближення в гідродинамічному моделюванні характеристик нерегулярних вітрових хвиль – хвильової поверхні, полів швидкостей та тиску на часових інтервалах порядку 30...40 хв, достатніх для безпосереднього статистичного опрацювання. У лінійному наближенні застосовано удосконалену у роботі спектральну техніку, а для нелінійного узагальнення моделі хвиль використано метод півзворотньої задачі до вихідної нелінійної крайової задачі, сформульованої відносно поля швидкостей у хвилях.

Подано класифікацію існуючих типів та схем ХПЕ, проведено їх експертний аналіз та схеми з високим рейтингом: занурені – кесон та вертикальна коливальна пластина и поверхневі – поплавець на важелі і ланцюжок плотів, було обрано для подальших досліджень у роботі.

Розроблено наближені нелінійні методи розрахунку навантажень Крилова-Фруда та Хаскінда-Ньюмана на робочі елементи ХвПЕ з урахуванням нерегулярності дії хвиль та коливачів ХвПЕ, змінної зануреної геометрії та частотної залежності гідродинамічних коефіцієнтів ХвПЕ. Для чисельного інтегрування за часом диферен-

ціальних рівнянь коливань порівняльними тестовими розрахунками обрано метод Адамса-Бешфорта.

Розроблено алгоритми і пакет обчислювальних програм на ПК та серійними розрахунками досліджено динамічні та енергетичні показники роботи ХвПЕ при дії нерегулярних хвиль різної інтенсивності. Зокрема, з'ясовано вплив нелінійних та нерегулярних ефектів на роботу ХвПЕ та сформульовано певні рекомендації щодо вибору схем, розмірів та розташування ХвПЕ. Сформульовано напрямки подальших досліджень.

Ключові слова: нерегулярні вітрові хвилі на воді, спектральні моделі, хвилі скінченної амплітуди, рух нелінійних хвиль, хвильові перетворювачі енергії, навантаження Крилова-Фруда і Хаскінда-Ньюмана, коливання перетворювача, відбір енергії.

АННОТАЦИЯ

Мартыновский И. М. Работа волновых преобразователей энергии в нерегулярном поле ветровых волн в шельфовой зоне. — На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.05 — механика жидкости, газа и плазмы. — Институт гидромеханики НАН Украины, Киев, 2017.

Диссертация посвящена исследованию эффективности работы волновых преобразователей энергии (ВПЭ) различных типов путем применения инновационной нелинейной технологии прямого гидродинамического расчета нерегулярных ветровых волн в шельфовой зоне моря и численного расчета динамики ВПЭ при воздействии волн на временных интервалах квазистационарности в нерегулярном волновом поле.

В рамках указанной технологии рассмотрено линейное и нелинейное приближение в гидродинамическом моделировании характеристик нерегулярных ветровых волн – волновой поверхности, полей скоростей и давления на временных интервалах порядка 30...40 мин, достаточных для непосредственной статистической обработки. В линейном приближении применена усовершенствованная в работе спектральная техника, а для нелинейного обобщения модели волн применен метод полуобратной задачи к исходной нелинейной краевой задаче, сформулированной относительно поля скоростей в волнах.

Представлена классификация существующих типов и схем ВПЭ, выполнен их экспертный анализ и схемы с высоким рейтингом: погруженные – кессон и вертикальная колебательная пластина и поверхностные – поплавки на рычаге и цепочка плотов, были выбраны для дальнейших исследований в работе.

Разработаны приближенные нелинейные методы расчета нагрузок Крылова-Фруда и Хаскінда-Ньюмана на рабочие элементы ВПЭ с учетом нерегулярности действия волн и колебаний ВПЭ, переменной погруженной геометрии и частотной зависимости гидродинамических коэффициентов ВПЭ. Для численного интегрирования по времени дифференциальных уравнений колебаний сравнительными тестовыми расчетами выбран метод Адамса-Бешфорта.

Разработаны алгоритмы и пакет вычислительных программ на ПК и серийными расчетами исследованы динамические и энергетические показатели работы ВПЭ при воздействии нерегулярных волн различной интенсивности. В частности, установлено влияние нелинейных и нерегулярных эффектов на работу ВПЭ и сформулированы определенные рекомендации по выбору схем, размеров и расположения ВПЭ. Сформулированы направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: нерегулярные ветровые волны на воде, спектральные модели, волны конечной амплитуды, движение нелинейных волн, волновые преобразователи энергии, силы Крылова-Фруда и Хаскинда-Ньюмана, колебания преобразователя, отбор энергии.

ABSTRACT

Martynovskyi I. M. Operation of the wave energy converters in the irregular wind-generated wave's field on the shelf. — On the manuscript.

Candidate's thesis on technical sciences, speciality 01.02.05 — fluid mechanic. — Institute of hydromechanics of NAS of Ukraine, Kyiv, 2017.

Dissertation is devoted to the investigation the efficiency of different kinds of Wave Energy Convertors (WEC) by using the innovative nonlinear technology of the direct hydrodynamic calculation of irregular wind generated waves in shelf zone of the sea and numerical calculation of the WEC responses under the wave action on the temporal quasi stationary intervals in the irregular wave field.

The new innovative technology is based in the first of all on the elaboration of the hydrodynamic models for irregular waves in shelf zone of the sea which include linear and nonlinear approaches in the investigation. In the linear approach generalized by the author spectral technique (two-peak 6-parametric spectra, modified wave surface conditions in the linear boundary value problem, randomized discretization of the spectrum etc.) has been used for the hydrodynamic calculation of irregular wave surface, velocity and pressure fields in the waves on the temporal intervals of 30...40 min. These intervals supply adequate statistical estimations of the wave parameters by direct statistical analysis of the corresponding temporal realizations. In the more general nonlinear approach such effects as steepening and asymmetry in the wave profiles of wind generated irregular waves were included. Nonlinear generalization in the wave velocity and pressure fields were based on the using of half-inverse solution of the fully nonlinear boundary value problem to be reformulated in the terms of wave velocity components.

Extensive review, analysis and classification of the existing WEC has been done and in the framework of the formal expert analysis procedure four kinds of WEC were chose for the further processing in the work: underwater WEC – caisson interacting with wave pressure field and vertical plate interacting with horizontal wave velocity field; floating WEC – floats and chain of rafts interacting with wave surface oscillation. The main conclusion is that there are thousands of WEC projects now but the further improvement of the WEC efficiency related in general with the more detailed analysis of the most perspective existing kinds of WEC.

Approximate nonlinear techniques were elaborated for the calculation of Krylov-Froude wave loads and Haskind-Newman hydrodynamic loads acting on the WEC in irregular wave field. The majority problems here were related with the calculations of Haskind-Newman hydrodynamic loads which are strongly dependent on the frequency of oscillation of waves and WEC. Then to include the irregularity phenomenon of waves and WEC motion into the consideration of Haskind-Newman loads an approximate asymptotic technology were specially developed and applied. In addition nonlinear effects related with the temporal variation of wetted portion of the WEC surface were included into the calculation too by using the instant values of the hydrodynamic coefficients in Haskind-Newman loads. For the numerical integration of the differential equations of WEC motion in the technology of Time Domain Calculation Adams-Beshfort algorithm has been chosen. For this one four most popular numerical algorithms were specially tested in the integration of forced oscillator with nonlinear damping and restoring terms.

Statistical analysis of the problem in the dissertation work included consideration of the long-term distributions for significant wave heights and average wave periods (as wave regime parameters) and the short-term distributions for amplitudes of waves, WAC motion and extracted energy. Long-term distributions (on the period of dozen years) were extrapolated on the extreme regimes by using Gumball law but the short-term distributions and corresponding statistical characteristics (on the 30...40 min temporal intervals) were derived by using the technology of direct statistical analysis of the temporal realizations obtained in numerical calculations. Statistical map on PC for the Northern part of the Black sea with the interactive menu has been elaborated. The map may be used in the choice of the effective WEC positioning on the shelf.

As a result of the investigations special package of the algorithms and computer programs on PC were elaborated and testing and systematic numerical calculations have been carried out for the analysis of response and extracted wave energy of the four WECs to be operating in the irregular field of wind generated waves of finite amplitudes. Results obtained displayed that irregularity and nonlinear effects in waves and WEC motion play quite important role in the rate of extracted energy by WEC. Different results about influence of kinds, sizing, internal damping and restoring parameters, submerging and positioning of the WEC on the extracted energy have been obtained too. Finally some recommendations and further directions of the investigation based on the results obtained were formulated.

Key words: irregular wind generated waves, spectral models, finite amplitude waves, nonlinear wave motion, wave energy converters, Froude-Krylov and Haskind-Newman loads, converter motion, extracted energy.

Підписано до друку 16.11.2016.
Формат 60 × 84/16. Гарнітура Times
Ум. друк. арк. 0,9. Друк цифровий.
Зам. №342. Наклад 100 прим.

Друкарня видавництва Національного університету кораблебудування,
вул. Скороходова, 5, м. Миколаїв, 54002.
Свідоцтво держ. реєстру ДК № 2506 від 25.05.2006.