# МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

На правах рукопису

## 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

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Науковий керівник

Сердюченко Анатолій Миколайович,

доктор фізико-математичних наук, професор

Миколаїв — 2017

## **3MICT**

ΠΕΡΕ.	лік у	МОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	6
всту	П		7
Розділ	1. <b>СУ</b>	ЧАСНИЙ СТАН РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЙ ВИ-	
	KO	РИСТАННЯ ЕНЕРГІЇ ХВИЛЬ ОКЕАНІВ ТА МОРІВ	14
1.1.	Перед	умови розвитку технологій альтернативної енергетики	15
	1.1.1.	Наслідки використання традиційних джерел енергії	15
	1.1.2.	Напрямки розвитку технологій видобутку і використання	
		альтернативних джерел енергії та їх порівняльний аналіз	23
1.2.	Розви	ток ХвПЕ та проблеми, пов'язані з їх дослідженням	26
	1.2.1.	Основні типи ХвПЕ, їх характеристика і порівняльний аналіз	26
	1.2.2.	Проблеми дослідження роботи ХвПЕ	31
	1.2.3.	Системи відбору енергії, їх конфігурація та налаштування .	34
1.3.	Огляд	, моделей та методів дослідження ХвПЕ	38
	1.3.1.	Моделі та методи у гідродинаміці вітрових хвиль	39
	1.3.2.	Моделі та методи у гідродинаміці судна та океанотехніці	43
	1.3.3.	Методи обчислювальної гідродинаміки	47
Висн	новки д	до Розділу 1	50
Розділ 2	2. ME	ТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ ГІДРОДИНАМІКИ ТА СТА-	
	ТИ	СТИКИ МОРСЬКИХ ВІТРОВИХ ХВИЛЬ ТА ХВПЕ	52
2.1.	Обґру	нтування напряму дослідження та постановка задачі	53
2.2.	Аналіз	з довготермінової статистики вітро-хвильових режимів	58
2.3.	Метод	и дослідження гідродинаміки нерегулярних та нелінійних ві-	
	трови	х хвиль у шельфовій зоні	60
	2.3.1.	Лінійне моделювання хвильової поверхні	61
	2.3.2.	Нелінійне моделювання хвильової поверхні	70

2.4.	2.4. Методи дослідження хвильових навантажень на елементи ХвПЕ		
2.4.1. Класифікація т		Класифікація та припущення для ХвПЕ	
	2.4.2.	Модифікація та спрощення розрахункових залежностей для	
		гідродинамічних сил	
	2.4.3.	Характеристики внутрішньої системи перетворення енергії . 88	
2.5. Порівняння методів чисельного дослідження динаміки ХвПЕ			
	2.5.1.	Чисельні методи для розв'язання початкових задач Коші 90	
	2.5.2.	Обґрунтування вибору методу для чисельного дослідження	
		початкової задачі Коші ХвПЕ	
2.6.	Прогр	амне забезпечення розрахункового проектування ХвПЕ 97	
	2.6.1.	Формування геометрії обчислювальних пристроїв 97	
	2.6.2.	Чисельні розрахунки параметрів досліджуваних пристроїв . 99	
	2.6.3.	Візуалізації результатів розрахунку	
Виси	новки Д	до Розділу 2	
Розліл	3. <b>PE</b>	ЗУЛЬТАТИ МОЛЕЛЮВАННЯ ГІЛРОЛИНАМІЧНИХ	
- 00,4-01			
	ПО	ЛІВ НЕРЕГУЛЯРНИХ ВІТРОВИХ ХВИЛЬ У ШЕЛЬ-	
	ПО ФО	ЛІВ НЕРЕГУЛЯРНИХ ВІТРОВИХ ХВИЛЬ У ШЕЛЬ- ВІЙ ЗОНІ НА ІНТЕРВАЛАХ КВАЗІСТАЦІОНАР-	
	ПО ФО НО	ЛІВ НЕРЕГУЛЯРНИХ ВІТРОВИХ ХВИЛЬ У ШЕЛЬ- ВІЙ ЗОНІ НА ІНТЕРВАЛАХ КВАЗІСТАЦІОНАР- СТІ ХВИЛЬОВИХ РЕЖИМІВ 103	
3.1.	ПО ФО НО Довго	ЛІВ НЕРЕГУЛЯРНИХ ВІТРОВИХ ХВИЛЬ У ШЕЛЬ- ВІЙ ЗОНІ НА ІНТЕРВАЛАХ КВАЗІСТАЦІОНАР- СТІ ХВИЛЬОВИХ РЕЖИМІВ 103 термінова статистика вітро-хвильових режимів Чорного та	
3.1.	ПО ФО НО Довго Азовс	ЛІВ НЕРЕГУЛЯРНИХ ВІТРОВИХ ХВИЛЬ У ШЕЛЬ- ВІЙ ЗОНІ НА ІНТЕРВАЛАХ КВАЗІСТАЦІОНАР- СТІ ХВИЛЬОВИХ РЕЖИМІВ 103 термінова статистика вітро-хвильових режимів Чорного та ького морів	
3.1.	ПО ФО НО Довго Азовс 3.1.1.	ЛІВ НЕРЕГУЛЯРНИХ ВІТРОВИХ ХВИЛЬ У ШЕЛЬ-         ВІЙ ЗОНІ НА ІНТЕРВАЛАХ КВАЗІСТАЦІОНАР-         СТІ ХВИЛЬОВИХ РЕЖИМІВ       103         термінова статистика вітро-хвильових режимів Чорного та         ького морів       104         Збір та аналіз даних вітро-хвильових режимів       104	
3.1.	ПО ФО НО Довго Азовс 3.1.1. 3.1.2.	ЛІВ НЕРЕГУЛЯРНИХ ВІТРОВИХ ХВИЛЬ У ШЕЛЬ-         ВІЙ ЗОНІ НА ІНТЕРВАЛАХ КВАЗІСТАЦІОНАР-         СТІ ХВИЛЬОВИХ РЕЖИМІВ         термінова статистика вітро-хвильових режимів Чорного та         ького морів       104         Збір та аналіз даних вітро-хвильових режимів       104         Апроксимація довготермінової статистики вітрових та хви-	
3.1.	ПО ФО НО Довго Азовс 3.1.1. 3.1.2.	ЛІВ НЕРЕГУЛЯРНИХ ВІТРОВИХ ХВИЛЬ У ШЕЛЬ- ВІЙ ЗОНІ НА ІНТЕРВАЛАХ КВАЗІСТАЦІОНАР- СТІ ХВИЛЬОВИХ РЕЖИМІВ 103 термінова статистика вітро-хвильових режимів Чорного та ького морів	
3.1.	ПО ФО НО Довго Азовс 3.1.1. 3.1.2.	ЛІВ НЕРЕГУЛЯРНИХ ВІТРОВИХ ХВИЛЬ У ШЕЛЬ-         ВІЙ ЗОНІ НА ІНТЕРВАЛАХ КВАЗІСТАЦІОНАР-         СТІ ХВИЛЬОВИХ РЕЖИМІВ       103         термінова статистика вітро-хвильових режимів Чорного та       104         абір та аналіз даних вітро-хвильових режимів       104         Апроксимація довготермінової статистики вітрових та хвильових режимів       104         наближення в моделюванні вітрових хвиль       113	
3.1. 3.2.	ПО ФО НО Довго Азовс 3.1.1. 3.1.2. Лінійн 3.2.1.	ЛІВ НЕРЕГУЛЯРНИХ ВІТРОВИХ ХВИЛЬ У ШЕЛЬ-         ВІЙ ЗОНІ НА ІНТЕРВАЛАХ КВАЗІСТАЦІОНАР-         СТІ ХВИЛЬОВИХ РЕЖИМІВ       103         термінова статистика вітро-хвильових режимів Чорного та       104         Збір та аналіз даних вітро-хвильових режимів       104         Збір та аналіз даних вітро-хвильових режимів       104         Апроксимація довготермінової статистики вітрових та хвильових режимів       111         наближення в моделюванні вітрових хвиль       113         Моделювання нерегулярної хвильової поверхні на інтерва-	
3.1.	ПО ФО НО Довго Азовс 3.1.1. 3.1.2. Лінійн 3.2.1.	ЛІВ НЕРЕГУЛЯРНИХ ВІТРОВИХ ХВИЛЬ У ШЕЛЬ-         ВІЙ ЗОНІ НА ІНТЕРВАЛАХ КВАЗІСТАЦІОНАР-         СТІ ХВИЛЬОВИХ РЕЖИМІВ       103         термінова статистика вітро-хвильових режимів Чорного та         ького морів       104         Збір та аналіз даних вітро-хвильових режимів       104         Апроксимація довготермінової статистики вітрових та хвильових режимів       104         наближення в моделюванні вітрових хвиль       111         поделювання нерегулярної хвильової поверхні на інтервалах квазістаціонарності       114	
3.1.	ПО ФО НО Довго Азовс 3.1.1. 3.1.2. Лінійн 3.2.1. 3.2.2.	ЛІВ НЕРЕГУЛЯРНИХ ВІТРОВИХ ХВИЛЬ У ШЕЛЬ-         ВІЙ ЗОНІ НА ІНТЕРВАЛАХ КВАЗІСТАЦОНАР-         СТІ ХВИЛЬОВИХ РЕЖИМІВ       103         термінова статистика вітро-хвильових режимів Чорного та         ького морів       104         Збір та аналіз даних вітро-хвильових режимів       104         Апроксимація довготермінової статистики вітрових та хвильових режимів       104         льових режимів       111         не наближення в моделюванні вітрових хвиль       113         Моделювання нерегулярної хвильової поверхні на інтервалах квазістаціонарності       114         Розрахунок полів швидкості та тиску з глибиною       118	
3.1. 3.2.	ПО ФО НО Довго Азовс 3.1.1. 3.1.2. Лінійн 3.2.1. 3.2.2. 3.2.3.	ЛІВ НЕРЕГУЛЯРНИХ ВІТРОВИХ ХВИЛЬ У ШЕЛЬ- ВІЙ ЗОНІ НА ІНТЕРВАЛАХ КВАЗІСТАЦЮНАР- СТІ ХВИЛЬОВИХ РЕЖИМІВ       103         стермінова статистика вітро-хвильових режимів Чорного та       104         ького морів       104         Збір та аналіз даних вітро-хвильових режимів       104         Апроксимація довготермінової статистики вітрових та хвильових режимів       104         льових режимів       111         наближення в моделюванні вітрових хвиль       113         Моделювання нерегулярної хвильової поверхні на інтервалах квазістаціонарності       114         Розрахунок полів швидкості та тиску з глибиною       118	
3.1.	ПО ФО НО Довго Азовс 3.1.1. 3.1.2. Лінійн 3.2.1. 3.2.2. 3.2.3.	ЛІВ НЕРЕГУЛЯРНИХ ВІТРОВИХ ХВИЛЬ У ШЕЛЬ-         ВІЙ ЗОНІ НА ІНТЕРВАЛАХ КВАЗІСТАЦЮНАР-         СТІ ХВИЛЬОВИХ РЕЖИМІВ       103         термінова статистика вітро-хвильових режимів Чорного та       104         Збір та аналіз даних вітро-хвильових режимів       104         Збір та аналіз даних вітро-хвильових режимів       104         Апроксимація довготермінової статистики вітрових та хвильових режимів       111         не наближення в моделюванні вітрових хвиль       113         Моделювання нерегулярної хвильової поверхні на інтервалах квазістаціонарності       114         Розрахунок полів швидкості та тиску з глибиною       118         Розрахунок локальних групових характеристик нерегулярних вітрових хвиль       121	

	4.3.2.	Визначення геометрії поплавця	3
	432	Визначення геометрії поплавия 146	, 1
		важелі	ĉ
	4.3.1.	Кінематика коливань поверхневого поплавця на зануреному	
4.3. Поверхневий поплавець на важелі		хневий поплавець на важелі	j
	4.2.3.	Розрахунок динаміки коливань пластини	L
	4.2.2.	Визначення геометрії пристрою         141	) 1
	4 2 2	Визначення геометрії пристрою 139	Ĵ
	4.2.1.	Системи координат та кінематика коливальних пластин 138	3
4.2. Занурені коливальні пластини			7
	4.1.3.	Розрахунок навантажень на кесон та динаміки руху 135	)
	4.1.2.		
	4.1.2.	Визначення геометрії пристрою	2
	4.1.1.	Системи координат та кінематика придонного кесону 132	2
4.1.	Занур	ені придонні кесони	L
	ХУ	НКУ ДИНАМІКИ ХВПЕ РІЗНИХ ТИШВ 131	L
гоздыл	т. <b>I IL</b> <b>VV</b>	III/N THILAMIUM VOTE DIDIHAV THTID	1
Розліл	4 PIF	ЗНЯННЯ КОЛИВАНЬ ТА РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРА-	
Вис	новки і	основні результати до Розділу З	)
	3.3.3.	Розрахунок полів швидкості та тиску	3
	3.3.2.	Оцінка точності розрахунків похідних за часом 128	)
3.3.1. Пелінійний розрахунок хвильової поверхні		ŧ	
	<b>991</b>	$\mathbf{U}_{0}$	1

	5.1.1.	Розрахункові параметри хвильових режимів	165
	5.1.2.	Розрахункові параметри ХвПЕ	166
	5.1.3.	Параметри внутрішньої системи відбору енергії	169
5.2.	Корот	котермінова статистика коливань та потужності ХвПЕ	170
	5.2.1.	Статистика нерегулярного хвилеутворення	170
	5.2.2.	Статистика гідродинамічних реакцій ХвПЕ	172
5.3.	Практ	ичні рекомендації щодо покращення експлуатаційних хара-	
	ктерис	стик ХвПЕ	186
Виси	новки і	основні результати до Розділу 5	187
висн	OBK	ſ	189
СПИС	OK B	ИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	195
СПИС	ок п	УБЛІКАЦІЙ АВТОРА	210
Додато	кА. Д	Іодаток до Розділу 1	214
A.1.	Порівн	няння характеристик сучасних ХвПЕ	214
A.2.	Експеј	ртний аналіз ХвПЕ	222
Додатов	кБ. Д	<b>І</b> одаток до Розділу 2	227
Б.1.	Технік	а багатопараметричного конформного відображення	227
Б.2.	Розра	кунок гідродинамічних коефіцієнтів поверхневих елементів	
	-		
	ХвПЕ		232
Б.3.	ХвПЕ Хвиль	ові навантаження на тонкі занурені елементи ХвПЕ	232 235
Б.З. Додатог	ХвПЕ Хвиль к В. Д	ові навантаження на тонкі занурені елементи ХвПЕ <b>Цодаток до Розділу 3</b>	<ul><li>232</li><li>235</li><li>239</li></ul>

### ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АМ – Азовське море;

ГД – гідродинаміка, гідродинамічний;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

МГЕЗК – міжурядова група експертів зі зміни клімату;

 $\mathbf{C}\mathbf{M}$  – спектральна модель;

ХвПЕ – хвильовий перетворювач енергії;

ЧМ – Чорне море;

**2D** – two-dimensional;

3D – three-dimensional;

CAD – computer-aided design;

**CFD** – computational fluid dynamics;

HN – Haskind-Newman (гідродинамічні сили Хаскінда-Ньюмана);

**IDE** – an integrated development environment;

**IEA** – international energy agency;

**JONSWAP** – joint north sea wave project;

**КF** – Krylov-Froude (гідродинамічні сили Крилова-Фруда);

**OES** – ocean energy systems;

**PTO** – power take-off system;

**STL** – stereolithography;

 $\mathbf{VTK}$  – the visualization toolkit.

#### вступ

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 вагомі 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 Techologics, 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, цо 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 збурені 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, O. B. Осадчук, B. A. Савченко, А. М. Сердюченко, B. 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 (хитавиця, 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<sup>a</sup>, 2<sup>a</sup>] опубліковано без співавторів. У наукових статтях, опублікованих у співавторстві, здобувачу належать наступні результати: [3<sup>a</sup>, 4<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup>] – 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<sup>a</sup>] – 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 науких конференціях НУК імені адмірала Макарова 2011-2015 pp.; Міжнародних конференціях з математичного моделювання, ХНТУ, Херсон, 2011-2013 pp.; щорічній науково-методичній конференції «Могилянські читання», ЧДУ ім. Петра Могили, Миколаїв, 2011 p.; 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 pp.

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<sup>a</sup>,8<sup>a</sup>,9<sup>a</sup>,10<sup>a</sup>,11<sup>a</sup>,12<sup>a</sup>,13<sup>a</sup>,14<sup>a</sup>] та всеукраїнських конференціях [15<sup>a</sup>, 16<sup>a</sup>, 17<sup>a</sup>, 18<sup>a</sup>, 19<sup>a</sup>, 20<sup>a</sup>, 21<sup>a</sup>, 22<sup>a</sup>]. У наукових фахових виданнях, що затверджені ВАК України, опубліковано 5 статей [1<sup>a</sup>, 2<sup>a</sup>, 3<sup>a</sup>, 4<sup>a</sup>, 6<sup>a</sup>]. Крім того 1 стаття [5<sup>a</sup>] 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.

**Подяка.** Здобувач висловлює глибоку подяку своєму науковому керівнику д.ф.-м.н., проф. Сердюченко А.М. за постійну підтримку та різноманітну допомогу у процесі написання та підготовки до захисту дисертаційної роботи.

#### РОЗДІЛ 1

## СУЧАСНИЙ СТАН РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЙ ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГІЇ ХВИЛЬ ОКЕАНІВ ТА МОРІВ

В оглядовому розділі дисертаційної роботи проведено аналіз причин появи і наслідків екологічних проблем у світі, які призводять до змін у кліматі. Зосереджено увагу на перспективних напрямках у вирішенні зазначених проблем за рахунок дослідження технологій використання альтернативних джерел енергії, зокрема, хвильової енергії, яка, у порівнянні з іншими, є найінтенсивнішої.

Зокрема, у підрозділі 1.1 виконано огляд літератури, основна увага якої зосереджена на аналізі негативного впливу на довколишнє середовище на глобальному та регіональному рівнях від використання традиційних джерел енергії, а також ознаках кліматичних змін на планеті та їх наслідках.

Огляд технологій використання альтернативних джерел енергії, які дозволять мінімізувати чинники, що призводять до екологічних змін, виконано у підрозділі 1.2. Тут увагу зосереджено на аналізі досліджень в області хвильової енергетики, що, за рахунок географічного розташування, є актуальним для України.

З метою проведення розрахунків ХвПЕ, у підрозділі 1.3 виконані: 1) огляд моделей та методів у гідродинаміці вітрових хвиль, теорії корабля, океанотехніці та 2) аналіз переваг і недоліків методів обчислювальної гідродинаміки.

Спираючись на огляд літературних та мережевих джерел, виокремлено ті проблеми, які залишаються ще не вирішеними у галузі дослідження та використання технологій перетворення хвильової енергії океанів та морів, що дасть змогу визначити напрямки подальшого дослідження у даній дисертаційній роботі.

#### 1.1. Передумови розвитку технологій альтернативної енергетики

Причини, через які спостерігається останнім часом стрімкий розвиток технологій використання альтернативних джерел енергії, до певної міри, пов'язані з кліматичними змінами на планеті, що відбуваються за останні 100 років. Відповідно до [47], розрізняють наступні обставини, при яких відбуваються подібні глобальні процеси. По-перше, клімат визначається радіаційним балансом на планеті, а по-друге, основні фактори, що його забезпечують, це:

- зміна об'єму сонячного випромінювання, що надходить до Землі;
- зміна частки сонячного випромінювання, що відбивається;
- зміна довгохвильової енергії, що випромінюється назад у космос.

Враховуючи, якими темпами відбувається індустріальний розвиток людства та, як результат, збільшення кількості викидів газів в атмосферу, можна з великою вірогідністю стверджувати, що останній з перелічених факторів є визначальним у сучасних змінах клімату.

Розпочнемо огляд з аналізу: сучасного екологічного стану на планеті; впливу на рівень викидів в атмосферу  $CO_2$  від використання традиційних джерел енергії; наслідків зміни клімату.

1.1.1. Наслідки використання традиційних джерел енергії. Розвиток технологій, особливо за останнє століття, дозволив людству видобувати та використовувати енергію з широкого спектру джерел, у результаті чого деякі з них стали традиційними, а деякі знаходяться тільки на стадії дослідження. Відомо, що в якості основних джерел енергії людство розпочало застосовувати деревину, вугілля, нафту, природній газ, атомну енергетику та т. ін. Стрімкий розвиток таких галузей, як машинобудування, кораблебудування, авіа– та ракетобудування обумовлює постійне зростання об'ємів енергоресурсів, що видобуваються людством. Але досвід показав, що, не зважаючи на високу популярність, використання традиційних джерел енергії не є безпечним для екологічного стану Землі, тому виникає низка проблем, які потрібно негайно вирішувати. 1.1.1.1. Обмеженість традиційних джерел енергії. Природній газ та нафта займають перше місце в об'ємі видобутку енергії та забезпечують майже 60% світового ринку первинних енергоносіїв [49]. Враховуючи, якими темпами зростає попит на виробництво енергії, природно стверджувати про необхідність збільшення темпів освоєння усіх економічно раціональних джерел енергії і, зокрема, не завжди екологічно безпечного обсягу видобутку нафти та газу. Поточна оцінка запасів найбільш популярних джерел енергії свідчить про наявність суттєвих неосвоєних об'ємів корисних копалин. Це дозволить задовольнити зростаючі темпи їх видобутку, які містяться у більшості прогнозів ринку енергоносіїв [47, 49]. Робота з даною групою джерел енергії супроводжується певними труднощами, які необхідно долати при їх освоєнні, транспортуванні споживачам з нових родовищ та використанні у постійно зростаючих масштабах.

Вугілля займає друге місце в об'ємі видобутку енергії, але при його спалюванні утворюється велика кількість вуглекислого газу  $CO_2$  на одиницю енергії, у порівнянні з використанням природного газу та нафти. Якщо не обмежуватись об'ємами викидів  $CO_2$ , то передбачається збільшення долі видобутку вугілля і разом з нафтою вона буде складати приблизно більше 80% світового об'єму енергоспоживання [49], ускладнюючи тим самим проблему зміни клімату. Не потрібно забувати також проблеми видобутку вугілля, які супроводжуються постійними аваріями у шахтах та, як результат, загибеллю працюючих там шахтарів.

Атомна енергетика складає приблизно 6% від світового видобутку енергії [49, 98]. Передбачається, що у майбутньому її частка буде збільшуватись. Проблеми у сферах промислової безпеки, поводження з радіоактивними відходами та їх ліквідація, необхідність обмеження викидів  $CO_2$ , а також проблема розповсюдження ядерної зброї, будуть впливати на розвиток атомної енергетики.

Доля традиційних гідроелектростанцій у загальному об'ємі виробництва енергії складає приблизно 2%. Значного зростання у використанні даного джерела енергії у цілому не очікується, оскільки найбільш придатні місця для будови гідроелектростанцій у розвинених країнах уже задіяні [49].

Зростання об'ємів виробництва енергії підтримується розвитком світової тор-

гівлі та, відповідно до прогнозів [49], енергоспоживання у розвинених країнах буде стрімко зростати, у той час як світові об'єми нафти, природного газу та вугілля будуть з часом зменшуватись. Прагнення обмежити викиди  $CO_2$  від використання традиційних джерел енергії, а також додаткові обмеження в області атомної енергетики, такі як скорочення часу експлуатації AEC та зменшення кількості нових енергоблоків, що проектуються, можуть сприяти збільшенню потреб в альтернативних джерелах енергії, а саме, сонячної, вітрової та хвильової енергії. Така тенденція потребує кардинальної зміни структури світового виробництва, нового підходу до видобутку та споживання енергії.

1.1.1.2. Кліматичні зміни на планеті. Як стверджує МГЕЗК<sup>1</sup>, говорити про зміни у кліматі слід тоді, коли спостерігається його перехід до іншого стану, що визначається через зміну його властивостей і зберігається на протязі тривалого періоду, наприклад, декількох десятиліть і більше [47]. Впливати на властивості клімату можуть будь які чинники, будь то наслідки звичайних природних змін або результати діяльності людини, що помітні на суші і морі, у льодовиках і снігах, що тануть та зникають, у спалахах засухи та спеки, в ураганах та б. ін. [14]. Щоб не впливало на зміну клімату, все одно у результаті людство отримує катаклізми, що відбуваються останнім часом все частіше і частіше, аварії на нафтовидобувних та атомних станціях, світову кризу, глобальне потепління та багато інших проблем [14].

У масштабах континентів, регіонів та океанів спостерігаються численні довгострокові зміни клімату, що включають зміни арктичних температур та льодових покриттів, широко поширені зміни кількості опадів, солоності океану, рози вітрів та екстремальних погодних умов, таких як засухи, сильні опади, гарячі хвилі та інтенсивність тропічних циклонів [24]. На рис. 1.1 [24] добре видно зміну середньої температури, рівня моря та зменшення снігового покрову за останні 150 років. Тому можна знайти підтвердження, якщо порівняти декілька фотографій (див. рис. 1.2) льодовиків [87], що були зроблені на початку XX сторіччя та у теперішній час. З рис. 1.2 добре видно, що льодові шапки та сніговий покрив у

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Міжурядова група експертів зі зміни клімату

горах зменшились, а подекуди взагалі зникли, через поширене танення, яке на додачу до всього призводить ще і до підняття рівня Світового океану.

У 50-х роках минулого сторіччя американський вчений професор Роджер Ревелл [139] сформулював гіпотезу, згідно якій глобальний економічний бум, що послідував за закінченням Другої світової війни і був спричинений демографічним вибухом та підживлювався видобутком нафти, вугілля та газу, призведе до безпрецедентного та небезпечного підвищення концентрації СО<sub>2</sub> в атмосфері Землі. Тому він запропонував науковий експеримент, який полягає у відбиранні проб повітря з високих шарів атмосфери для визначення концентрації вуглекислого газу у різних географічних точках кожен день на протязі багатьох років [14]. Розпочавши у 1957 році вимірювання та аналіз вмісту СО<sub>2</sub>, Ревелл продовжував своє дослідження разом з вченим Чарльзом Девідом Кілінгом, якого залучив до спостереження. На протязі декількох десятків років разом вони накопичили достатній масив даних, щоб побудувати графік, який показав загальну тенденцію зростання вмісту вуглекислого газу. Такі вимірювання продовжуються і сьогодні та згідно постійним звітам, які публікує National Oceanic Atmospheric Administration [132], в атмосфері відбувається систематичне зростання рівня  $CO_2$ . Накопичення рівня вуглекислого газу в атмосфері до 2012 року можна побачити на рис. 1.3, який було запозичено з [132].

Як видно з рис. 1.3, графік кожен рік має локальні коливання, піднімаючись вгору та опускаючись униз з деякою постійною амплітудою. Ревелл пояснював такий ефект тим, що навесні та влітку через нахил земної осі Сонце сильніше нагріває та освітлює Північну півкулю, у результаті виникає листяний покров і, поки листя поглинає  $CO_2$ , об'єм цього газу зменшується. Восени та взимку Сонце слабше нагріває Північну півкулю, тому відбуваються зворотні процеси і вміст газу в атмосфері збільшується. Таким чином Земля кожен рік робить один великий вдих і видих [14]. Ланцюжок впливу збільшення концентрації газів в атмосфері на кліматичні умови планети дуже простий: збільшується рівень  $CO_2 \Rightarrow$  збільшується кількість тепла на Землі  $\Rightarrow$  посилення парникового ефекту.

Якщо навіть людству вдасться стабілізувати викиди в атмосферу, то планеті



Рис. 1.1. Загальні тренди у зміні температури, рівня моря та снігового покрову північної півкулі Землі [24]





a











 $\epsilon$ 

Рис. 1.2. Порівняння льодовиків [87]: Маккарті у 1909 (a) та у 2004 (б) роках; Холгейт у 1909 (в) та у 2004 (г) роках; М'юр у 1941 (ґ) та у 2004 (д) роках; Боулдер у 1932 (е) та у 1988 (є) роках





знадобиться тривалий час, щоб повернутися до того рівня, який був у доіндустріальний період.

Згідно [98], у період з 1971 до 2009 року виробництво енергії збільшилось трохи більше ніж у 2 рази. А відношення таких джерел енергії, як традиційні та альтернативні, залишилось майже не змінним: 86% отримують з природних копалин та 14% з альтернативних джерел у 70-х роках проти 81% з природних копалин та 19% з альтернативних джерел у 2009 році. Вказані 81% енергії видобувають від переробки вугілля, торфу, палива та природного газу. Викиди від споживання зазначених ресурсів є найбільшими з існуючих. Це добре видно з рис. 1.4.



Рис. 1.4. Традиційні джерела енергії та відповідні викиди *CO*<sub>2</sub> від їх використання станом на 2009 рік [98]

Починаючи з 1987 року величина викидів в атмосферу з 0 тон до 29 гігатон виросла експоненціально. Звичайно, що зв'язок між кліматичними змінами та використанням енергоносіїв є дуже важливим на шляху розвитку будь-якого суспільства, а соціально-економічні та технологічні характеристики будуть дуже впливати на викиди газів, темпи і масштаби зміни клімату, здатність адаптуватися до змін та прагнення до зменшення викидів в атмосферу. 1.1.2. Напрямки розвитку технологій видобутку і використання альтернативних джерел енергії та їх порівняльний аналіз. Основні переваги використання альтернативних джерел енергії – це їх відновлюваність та екологічна безпечність. Відповідно до аналізу [98], частка видобутку енергії з альтернативних джерел становить 19% від загального об'єму енергії, виробленої у світі, і складається з таких джерел, як: енергія течій, воднева енергетика, виробництво біопалива, сонячна, вітрова, геотермальна та хвильова енергія.

Біомаса, яку переважно складають дерево та гній, спалюється у цілях отримання тепла та на сьогоднішній день є найбільшим невикопним джерелом енергії. Виробництво рідкого палива з біомаси, наприклад, біоетанолу із зернових культур і цукрового очерету, зростає в останні роки значними темпами, проте з урахуванням масштабів загального споживання нафти частка рідкого біопалива становить усього лише близько 1% від кількості енергії, виробленої з нафти [49]. Так само як і при розширенні освоєння будь-яких інших джерел енергії, налагодження виробництва біопалива у значних обсягах пов'язане з безліччю складних завдань, включаючи необхідність у підвищення пропускної спроможності залізничного, водного і трубопровідного транспорту, розвитку розподільних систем і формуванні збалансованого підходу до використання продовольчих культур і води у технічних цілях [98, 105].

Використання енергії вітру і сонячної енергії також зростає швидкими темпами і на сьогоднішній день складає близько 2% від загальносвітових обсягів виробництва енергії. Очікується подальше швидке розширення використання цих джерел енергії, проте воно пов'язане з такими труднощами, як економічні фактори, періодична недоступність, аспекти землекористування, необхідність підключення до розподільних мереж і будівництво ліній передачі електроенергії на великі відстані [105].

В останні десятиліття спостерігається підвищений інтерес до такого альтернативного джерела енергії, як енергія морських хвиль [71,73,74,75]. Причини, через які даний вид енергії, на думку автора, є перспективним можна сформулювати наступним чином. По-перше, географічне розташування України дозволяє досліджувати та використовувати даний вид енергії у акваторіях Чорного та Азовського морів. По-друге, із усіх альтернативних джерел енергії, енергія хвиль є найбільш інтенсивною у порівнянні з іншими [92,106], що можна побачити, якщо проаналізувати діаграму інтенсивності, яка показана на рис. 1.5.



Рис. 1.5. Порівняння інтенсивності енергії альтернативних джерел [92, 106]

Узагальнюючи опис джерел енергії у даному підрозділі, побудуємо схему (див. рис. 1.6), яка, хоч і стисло показує небезпеку та переваги використання тих або інших видів енергії, але дозволяє сформулювати подальший напрямок досліджень у даній дисертаційній роботі, який полягає у наступному. Враховуючи існуючу небезпеку з боку традиційних джерел енергії, видобуток яких необхідно якомога швидше зменшити, а у майбутньому взагалі припинити, потрібно продовжити активно вивчати та намагатися використовувати альтернативні джерела енергії.

Основні висновки, які можна зробити з даного підрозділу наступні. Існує велика ймовірність того, що при стійкому розвитку суспільства, яке зараз стрімко спостерігається, та сучасній політиці «зменшення» негативного впливу на властивості клімату у наступні декілька десятиліть глобальні викиди парникових газів будуть як і раніше збільшуватись. Однак, як це добре підкреслено у [14], поряд з небезпекою, викликаною глобальним потеплінням, криза таїть у собі небачені



Рис. 1.6. Традиційні та альтернативні джерела енергії

можливості, які сприятимуть створенню чистих двигунів, способів та технологій використання альтернативних джерел енергії, як на побутовому рівні, так і для великої промисловості. Це, у першу чергу, використання енергії сонця, вітру, морських приливів та хвиль у прибережних районах, термальних джерел, там де вони є, тощо.

## 1.2. Розвиток ХвПЕ та проблеми, пов'язані з їх дослідженням

Нагадаємо, що хвильова енергетика, подібно до енергії течій, припливів, температурного та солоного градієнтів, є одним з різновидів енергії океану. Як зазначено у роботі [88], що наводить OES<sup>2</sup>, якщо перетворити хоча б 0,1% відновлювальних джерел енергії океану в електричну, то можна було б задовольнити світові потреби в енергії більш ніж у п'ять разів. Завдяки своєму потенціалу, який представлено на рис. 1.7 (див. [133]), вивчення технологій перетворення хвильової енергії складає основний інтерес для дослідників та подальша робота у даному напрямі буде тільки посилюватись.

Продовжуючи огляд даного розділу, розглянемо коротко історичні етапи розвитку ХвПЕ, наведемо класифікацію та виконаємо порівняльний аналіз найбільш перспективних пристроїв, а також визначимо проблеми експериментального та теоретичного їх дослідження.

**1.2.1.** Основні типи ХвПЕ, їх характеристика і порівняльний аналіз. Ідеї створювати ХвПЕ не нові. Ще у далекому 1799 році французький інженер П'єр Симон Жирар (Pierre-Simon Girard) разом зі свої сином подав першу заявку на отримання патенту до пристрою перетворення хвильової енергії. У Великобританії патенти почали з'являтися починаючи з 1855 року. З того часу і до 70-х років минулого століття було отримано біля 340 патентів подібних пристроїв [79]. А починаючи з 80-х років, на даний час завдяки Японії, Північній Америці та країнам Європи чітко напрацьовано біля 1000 технологій отримання механічної та електричної енергії від руху морських вітрових хвиль [73,74,75,51,79,72,135,136]. Не

 $<sup>^{2}</sup>Ocean \ Energy \ Systems-http://www.ocean-energy-systems.org$ 



Рис. 1.7. Середньорічний рівень потужності у кВт/м для хвильового профілю у Світовому океані [133]

зважаючи на збільшення патентів перетворювачів, на жаль, перетворення енергії хвиль не є розповсюдженою практикою, і на теперішній час у світі проводяться здебільшого дослідження і тестування таких пристроїв, як осцилюючі стовпи чи поплавці, рухомі ланцюжки плотів, переливні басейни, занурені чи поверхневі коливальні важелі тощо [51, 106, 136]. Тому на майбутнє існує ціла низка задач, які потрібно вирішувати у даному напрямі, зокрема, це ґрунтовні наукові дослідження, аналіз проектування та виробництва перетворювачів хвильової енергії, їх транспортування, розміщення, налаштування, експлуатація, супроводження, утилізація та багато інших проблем, які будуть з'являтися при використання тієї або іншої технології. Всебічні й сучасні огляди історії розвитку ХвПЕ і поточні напрями розвитку можна знайти у роботах Hagerman (1995), Falcao (2010), Drew (2009) та ін. [51,97].

Розглянемо більш детально класифікацію та стан розвитку альтернативної гідроенергетики, зокрема енергію хвиль та способи її отримання. Причини, через які даний вид енергетики має таку слабку популярність, – економічні, наукові, фінансові. При розробці пристроїв перетворення енергії хвиль, науковці стика-

лями волны утишаются. Действие моторя основано на Под влиянием волнения она принимает такие и такие йсртом, что в сосуде\_с крышкой, но боз дня, или в кессо-MH /CM. MMF./ не, погругенном в волны, давление на воздух в нем то уменьшается волнении при 107 Т.е. петля периолически изгибается вокруг своей оси Gunufil Boda BOAMGe Этим мы и пользуемся для извлечения работы и укрощения Keccon На рисуние наглядно изображен такой прибор.Когда चो सामग्रहस्य से इन्द्रा व≛ इ волна б a

Рис. 1.8. Принципові схеми ХвПЕ запропоновані К. Е. Циолковським у 1934 році: осцилюючий стовп води (а) та плавучі ланцюги плотів (б) [69]

ються з багатьма проблемами. Як правило, вони складаються з наступних [79]: екстремальні режими хвилеутворення, складні погодні умови, агресивність середовища в якому працюють пристрої, відсутність досвіду створення подібних пристроїв та багато інших. Але не зважаючи на це, технології перетворення енергії хвиль розвиваються і вже можна дати їм певну класифікацію [71,93,97].

Цікаво відмітити, що у 1934 році видатний вчений Костянтин Едуардович Ціолковський опублікував статтю, що мала назву «Хвилелом та видобуток енергії з морських хвиль» та містила опис принципів відбору хвильової енергії, які зараз отримали широкого розповсюдження і входять до загально прийнятої класифікації. Це осцилюючий стовп води та плавучі плоти (див. рис. 1.8).

За певними ознаками перетворювачі енергії можна класифікувати [97]:

- За схемою перетворення хвильової енергії: а) плавучі рухомі ланцюжки плотів та поверхневі камери, що повторюють профіль морських хвиль; б) осцилюючий стовп води у зафіксованій або плавучій повітряній камері;
   в) осцилюючий поплавець; г) переливні пристрої; д) занурені коливальні важелі; е) занурені пристрої, ті що обертаються або осцилюють під дією тиску води.
- 2. За способом перетворення енергії: а) гідравлічний насос; б) гідротурбіна;
  в) повітряна турбіна; г) лінійний генератор.
- 3. За місцем розгортання: а) прибережні; б) плавучі на відстані декількох

кілометрів; в) занурені.

 За режимом роботи: а) точка поглинання (один перетворювач); б) лінія поглинання (група або масив перетворювачів); в) поле (кластер) поглинання.

Окрім теоретичного вивчення технологій отримання альтернативної енергетики, з'являються деякі практичні досягнення і слід зазначити, що їх кількість, сягнула за сотню [74, 75, 135].

На жаль, левова частка даних досягнень складають прототипи перетворювачів енергії хвиль, але є і повномасштабні розробки та виробництво. У додатку А приведена підсумкова таблиця характеристик сучасних енергетичних систем. Для ХвПЕ важливі наступні групи факторів, що визначають загальну ефективність їх роботи при виготовленні, розміщенні, експлуатації, обслуговуванні та багато іншого:

- загальні до якої принципової схеми роботи можна віднести пристрій, представник (компанії, заводи чи приватні особи), країна в якій виготовляють, рівень розробки пристрою (прототип, впровадження чи експлуатація), спосіб перетворення механічної енергії в електричну (які задіяні пристрої);
- *технічні* потужність, коефіцієнт корисної дії, де розташований генератор електроенергії (на пристрої чи віддалений від нього), місце розташування пристрою у шельфовій зоні, режим хвилеутворення для ефективної роботи пристрою (нижній або граничний поріг при якому можливі перетворення енергії хвиль);
- експлуатаційні здатність до занесення піском чи замулення, здатність до обростання ракушняком та водоростями, період часу між профілактичними роботами, розрахунковий термін експлуатації пристрою та термін відшкодування;
- що забезпечують безпеку варіанти утилізації, вплив роботи перетворювачів хвиль на довколишнє середовище, системи автоматизованого керування та стабілізації.

Країни лідери, які мають найбільшу кількість представників з виробництва альтернативної енергії – Австралія, Великобританія, Португалія, Канада. Звичайно цим країнам сприяє розвитку в області хвильової енергетики їх географічне розташування. Україна також має представників у даному напрямі досліджень, це, згідно аналізу патентів та публікацій [4, 42, 43, 45, 46, 60, 61], Овсянкін В. В., Овсянкін О. В., Слободюк В. О., Савченко В. А., Осадчук О. В. та Блінцов В. С. Багато інших пристроїв також мають перспективні технології, але, на жаль, відсутні досвід їх використання та отримання економічної вигоди. Загальні недоліки, які об'єднують розглянуті ХвПЕ, це агресивність морського середовища, постійна зміна хвильових режимів, що впливає на довжину, висоту та частотну смугу вітрових морських хвиль, також спрямованість роботи пристрою на окремий тип гідродинамічного поля.

Щодо останнього недоліку, то цікаво було б дослідити параметри роботи перетворювачів, комбінуючи їх схеми за різними принципами відбору енергії, що представлені у табл. 1.1 (наприклад, відбір енергії з поверхневого профілю морських вітрових хвиль та поля швидкостей часток рідини).

Тому доцільно проводити подальші дослідження, тестування та впровадження зазначених технологій перетворення хвильової енергії, зокрема, як показав експертний аналіз, що був виконаний у роботі [6<sup>a</sup>], використовуючи принципи роботи та результати, що були отримані найбільш перспективними представниками видобутку хвильової енергії, це:

- Pelamis (Великобританія) представляє з себе пристрій, що складається з ланцюга коливальних плотів, які з'єднані між собою гідравлічними насосами. Даний пристрій виготовляється на заводі і вже постачається в інші країни, зокрема, в Португалії експлуатується такий тип електростанції.
- Oyster (Великобританія) занурений пристрій у вигляді коливальної пластини, який діє від руху хвиль, що призводять до коливання основного органу перетворення енергії. Пристрій збирається на заводі Aquamarine Power Ltd, який приймає замовлення на повномасштабне виробництво.

Отже, у даному дисертаційному дослідженні зосередимо увагу на схемах Хв-

Тип Берегові Прибережні Плавучі Іереливні Осцилюючий стови води Поверхневі топлавці Коливальні пластини **h** 中 занурені Іоверхневі 巾 ಸ Принципи відбору енергії: — Геро- або пневмопривід; 🖂 – гідро- або аеротурбіна

Класифікація та принципові схеми ХвПЕ

ПЕ, що реагують на коливання вільної поверхні, поля тиску та швидкостей.

**1.2.2. Проблеми дослідження роботи ХвПЕ.** Для розрахункового проектування ХвПЕ можна застосовувати такі ж самі підходи і методи, що і для суден, морських споруд, засобів океанотехніки, тощо. Але на відміну від перелічених об'єктів, які повинні протистояти морському хвилеутворенню, ХвПЕ повинні, навпаки, взаємодіяти з гідродинамічними полями і тим самим утворювати

Таблиця 1.1

коливання для відбору перетворення енергії хвиль. Така вимога породжує низку принципових відмінностей, які повинні враховуватись при проектуванні, дослідженні та використанні ХвПЕ.

Отже, розглянемо спочатку які існують етапи у виробництві хвильових електростанцій. Відповідно до стандарту, що був розроблений Holmes та опублікований у 2009 році ЕМЕС [99], існує 5 етапів проектування ХвПЕ (див. табл. 1.2).

Таблиця 1.2

N⁰	Етап	Масштаб	Тривалість,	Витрати, у.о.
			міс.	
1	Розробка принципової схе-	1:25-1:100	2-6	50000-130000
	ми, що включає її кон-			
	цептуальне проектування,			
	перевірку ефективності та			
	оптимізацію			
2	Технічне та робоче прое-	1:10-1:25	6-12	50000-250000
	ктування			
3	Тестування у реальних	1:3-1:10	6-18	1–2,5 млн.
	умовах			
4	Розробка та тестування	1:1-1:1,25	12-36	5-10 млн.
	прототипу			
5	Підготовка до виробництва	1:1	12-60	2,5–7,5 млн.
	та введення в експлуатацію			

Етапи проектування ХвПЕ згідно [99]

Як показує досвід проектування та виробництво ХвПЕ займає багато часу та супроводжується великими витратами. На жаль, інколи такі витрати не виправдовуються і деякі проекти припиняють своє існування ще на перших етапах свого життєвого циклу. Так, за даними World Energy Concul [126], Ірландська компанія Wavebob, яка з 1999 року займалась розробкою та дослідженням власного пристрою перетворення хвильової енергії, у 2013 році припинила своє існування. Навіть такий лідер, як Pelamis Wave Power, у 2014 році перед завершальним 5 етап проектування, мав проблеми з інвесторами. Лише з 2016 року очікується поява проектів, які вийдуть на комерційний рівень і будуть забезпечувати мультимегаватні об'єми видобутку енергії хвиль.

З іншого боку, якщо повернутися до порівняння проектування ХвПЕ з проектуванням суден, морських споруд, тощо, то стає зрозуміло, що значний об'єм досліджень може бути проведено на завершальних етапах конструювання ХвПЕ. Пов'язано це з наступними проблемами. По-перше, через те, що для ХвПЕ відношення головного розміру до довжини хвиль менше ніж відношення головного розміру судна до довжини хвиль, і, відповідно, амплітуда коливань значно більша, то це породжує більше нелінійних ефектів, які можуть бути досліджені на реальній моделі. По-друге, на роботу ХвПЕ впливають засоби відбору енергії, що також може бути досліджено за допомогою реальних випробувань. По-третє, що притаманно лише ХвПЕ, це проектування пристрою кріплення, який не впливав би на коливання ХвПЕ і не погіршував би його експлуатаційних характеристик.

Проектування пристрою кріплення ХвПЕ виходить за рамки даного дисертаційного дослідження, а врахування нелінійних ефектів при роботі перетворювачів у реальному хвилеутворенні на ранніх етапах проектування – задача, яку ще потрібно досліджувати та розв'язати.

Розглянемо, які роботи виконуються на перших етапах проектування ХвПЕ. Відповідно до [112], перший етап проектування включає:

- дослідження роботи схем ХвПЕ при дії на них лінійних регулярних морських хвиль малої амплітуди;
- дослідження роботи схем ХвПЕ при дії на них регулярних морських хвиль скінченної амплітуди з урахуванням нелінійних ефектів;
- дослідження роботи моделі ХвПЕ у спеціалізованих басейнах та/або водоймах з реальним нерегулярним хвилеутворенням;
- дослідження показників відбору енергії.

Перелічені роботи показують, що на етапі розрахункового проектування не проводяться теоретичні дослідження з використанням фізико-математичних мо-

делей, що реалізують вітрові нерегулярні морські хвилі скінченої амплітуди. Застосування даних моделей на ранніх стадіях проектування ХвПЕ дозволить отримувати адекватні результати щодо їх роботи у реальному хвилуетворенні, а також скоротити час та витрати на більш пізніх етапах проектування. Тому у подальших дослідженнях слід розробляти та використовувати моделі нерегулярного нелінійного хвилеутворення для застосування їх на етапах розрахункового проектування ХвПЕ.

На підставі викладених положень можна сформулювати принципи розробки перспективних ХвПЕ, які слід дотримуватись при подальших дослідженнях, зокрема, у даній роботі. Отже, серед зазначених принципів виділимо наступні:

- максимальний відбір енергії у частотній смузі;
- відбір енергії з усіх полів (поверхневого, поля швидкостей та тиску з глибиною);
- використання масивів (кластерів) пристроїв;
- мінімізація негативних наслідків від експлуатації в агресивному середовищі;
- адаптація параметрів пристроїв до зміни режимів хвилеутворення.

# **1.2.3.** Системи відбору енергії, їх конфігурація та налаштування. Як було зазначено раніше, відбір первинної енергії хвиль може мати різноманітні форми (див. табл.1.1). Але досліджуючи роботу ХвПЕ, не можна обійти питання вивчення внутрішньої системи відбору енергії [86] (в англомовній літературі Power take-off system – PTO). Вибір її складових та налаштування – є однією з найскладніших задач, без вирішення якої, робота будь-якого перетворювача буде не ефективною.

Відповідно до [71,90], виділяють наступні способи перетворення механічної енергії в електричну (див. рис. 1.9): осцилюючий стовп води, коливальний елемент та переливний резервуар.

На шляху перетворення пристроєм енергії від хвиль до кінцевого енергонакопичувача можна виділити три етапи [86, 124]:



Рис. 1.9. Загальна класифікація ХвПЕ за способами перетворення енергії



Рис. 1.10. Етапи перетворення енергії хвиль в електричну

- Перший eman: потік енергії хвиль набігає на коливальний елемент ХвПЕ (інтерфейс) та спричиняє виникненню сили  $\vec{F}$  (1).
- Другий eman: система відбору потужності (2) перетворює енергію, отриману від інтерфейсу.
- *Третій етап*: система накопичення (3) отримує потік електроенергії (див. рис. що виробляє РТО.

Очевидно, що максимальне значення перетвореної енергії можна отримати тоді, коли частота власних коливань пристрою співпадає (або близька) з частотою проходження хвиль, тобто спостерігається резонанс. Якщо ж частота власних коливань ХвПЕ не налаштована на частоту проходження хвиль, то об'єм енергії, що поглинається, швидко спадає. Так склалося у природі, що частота хвиль із зміною часу постійно змінюється і, щоб досягати неперервного резонансного режиму роботи пристрою, частота його власних коливань також повинна змінюватись. Зміну частоти власних коливань ХвПЕ можна досягти за допомогою спеціальної процедури – налаштування пристрою або системи відбору енергії [86, 124], що включає в себе налаштування розмірів, форми, маси, жорсткості або демпфування пристрою. Тому, для складових елементів внутрішньої системи відбору енергії, що представлені на рис. 1.11 [86], застосовують різноманітні стратегії контролю та налаштування, які дозволяють забезпечити максимальні показники потужності, що перетворюється.

В залежності від того, коли і як швидко проводиться налаштування роботи ХвПЕ, розрізняють три стратегії контролю режимів роботи пристроїв [91,124].

Фіксоване налаштування – це налаштування, яке проводиться тільки на етапі проектування та виготовлення ХвПЕ. Параметри пристрою обираються у залежності від частотного спектру хвилеутворення району, де він буде використовуватись, і залишаються незмінними на весь період його експлуатації.

Адаптоване налаштування включає регулювання деяких властивостей пристрою у залежності від поточного режиму реального хвилеутворення на протязі від декількох хвилин до декількох годин. Прикладом повільного налаштування може служити перекачування рідини у або з резервуарів коливальних еле-




ментів, з метою зміни плавучості ХвПЕ і, відповідно, його маси та жорсткості. Зазвичай, повільне налаштування представляє з себе процес пошуку пікових параметрів хвилеутворення та дозволяє підвищити об'єми енергії, що перетворюється, у довготривалій перспективі.

Ідеальна система налаштування дозволяє передбачати висоту та період набігаючих хвиль до того моменту, коли вони досягають ХвПЕ, та наперед регулює його властивості, щоб отримати максимально можливе значення енергії хвиль. Таке налаштування має назву швидкого налаштування або конфігурації пристрою від хвилі до хвилі. На практиці, швидке налаштування складно реалізувати, частково через те, що складно передбачити хвильові характеристики, а також через те, що швидка зміна деяких властивостей ХвПЕ – складна процедура. Проте, швидке налаштування може дозволити відібрати більше енергії, ніж попередні два типи налаштування. Керування режимами роботою ХвПЕ повинно об'єднувати у собі як повільне налаштування, так і швидке.

Отже, складність та важливість процесу налаштування властивостей ХвПЕ очевидна. Виготовлення та використання ХвПЕ без врахування та реалізації ефективних стратегій контролю параметрів внутрішньої системи відбору енергії може виявитись даремною тратою коштів. Тому, створення математичних моделей, які дозволяли б на ранніх стадіях проектування досліджувати роботу ХвПЕ у нерегулярному полі вітрових хвиль, а також реалізовувати налаштування ХвПЕ на резонансні режими роботи – задача, яка потребує подальшого вирішення.

## 1.3. Огляд моделей та методів дослідження ХвПЕ

При моделюванні та дослідженні фізичних процесів, що відбуваються у результаті взаємодії ХвПЕ з хвильовим профілем, полями швидкості чи тиску, важливою постає проблема визначення навантажень на робочі органи енергетичних пристроїв. Ідеальним інструментом, який дозволить вирішити дану задачу, був і залишається натурний експеримент. Проте, подібні дослідження, з точки зору виготовлення та експлуатації моделей, є дуже коштовними. У світі існує обмежене число дослідних організацій, які можуть дозволити собі подібні витрати.

З іншого боку, розвиток комп'ютерної техніки та спорідненість розрахунків навантажень, динаміки робочих органів ХвПЕ та морських плавучих споруд, платформ, кораблів, тощо, дозволяють використовувати фізико-математичні моделі та методи у гідродинаміці хвиль, теорії корабля та океанотехніці. Це дає змогу проводити чисельні експерименти дослідження роботи ХвПЕ, отримувати задовільні результати і заощаджувати витрати.

Отже, задачі розробки та реалізації фізико-математичних моделей нерегулярного хвилеуторвення та методів розрахунку хвильових навантажень при дії морських хвиль потребують першочергового розв'язку у даній роботі.

**1.3.1.** Моделі та методи у гідродинаміці вітрових хвиль. Поверхневі морські хвилі виникають під дією на поверхню рідину таких сил, як сили вітру або судна, що деформують її, протидіючи силам тяжіння та поверхневого натягу. Складні процеси утворення та розповсюдження хвиль, які залежать від умов навколишнього середовища, зокрема, рельєфу дна, температури та щільності рідини, – породжують ланцюжок складностей на шляху теоретичного вивчення морського хвилеутворення [37, 70, 111].

У загальному випадку, при розрахунках основного впливу морського нерегулярного хвилеутворення на плавучі пристрої, користуються гідродинамічною теорією хвиль, у якій застосовується два основних підходи до вирішення граничної задачі [11,37,62]: лінійне та нелінійне наближення. Тому розглянемо більш детально кожен з цих підходів.

Регулярні пласкі хвилі у **лінійному наближенні**, які показано на рис. 1.12, мають сінусоїдальний профіль та такі параметри:  $a_w$  – амплітуда хвиль;  $\lambda$  – довжина хвиль;  $c_w$  – фазова швидкість руху хвиль; d – глибина води. Для визначення гідродинамічних характеристик регулярних хвиль малої амплітуди застосовуються вже добре відомі вирази [62, 63, 67], які будуть приведені у наступному розділі.

У реальному світі, хвилі є нерегулярними, тобто їх параметри змінюються із



Рис. 1.12. Регулярні пласкі хвилі відносно малої амплітуди

часом. Завдяки роботам [8,17,21,26,37], у середені минулого століття було поєднано лінійну гідродинамічну теорію хвиль з спектральним підходом, у результаті чого отримано нові спектральні моделі, які адекватно представляють нерегулярне (випадкоке) хвилеутворення як суперпозицію великої кількості гармонічних хвиль з малими амплітудами, довільними початковими фазами та певними коловими частотами [59]. Лінійні спектральні моделі є статистично стаціонарними, тобто їх перелічені параметри з часом не змінюються і залишаються весь час постійними [26], як, до речі, відносно постійним залишається і реальне хвилеутворення на інтервалах часу порядку 30–40 хвилин (інтервали квазістаціонарності) [21,59]. Враховуючи цю обставину, інтервали квазістаціонарності фактично визначають область застосування лінійних спектральних моделей за часом та, з іншого боку, вони є достатніми для отримання статистичних характеристик шляхом опрацювання реалізацій хвильових коливань.

Нарешті, завершуючи огляд спектрального лінійного підходу у теорії хвиль, відмітимо, що велике сімейство апроксимацій для частотних спектрів можна знайти у роботах А. І. Вознесенського, Ю. А. Нецветаєва, Пірсона, Московіца, В. А. Некрасова, А. М. Сердюченка та інших [10,22,41,59,113,123,134].

Коли розглядають хвилі скінченної амплітуди, то застосовують інший напрям у гідродинамічній теорії – **нелінійне наближення**, яке дозволяє якісно уточнити результати та змістовніше описати фізичні процеси хвильового руху. Дослідженню періодичних хвиль скінченої амплітуди присвятили свої роботи Дж. Стокс, Мітчел, лорд Релей, Леві-Чивіта, Дж.Стокер, А. І. Некрасов, М. А. Лаврентьєв, Н. Є. Кочін, Л. М. Сретенський, А. М. Сердюченко та ін. [32, 40, 55, 62, 63].

Хвилі скінченної амплітуди мають більші та більш загострені гребені, а також більш пологі підошви, у порівнянні з хвилями малої амплітуди. Усталені хвилі скінченної амплітуди на поверхні нескінченно глибокої рідини були вивчені Дж. Стоксом методами малого параметру [62]. Досліджуючи питання форми траєкторії часток рідини при розповсюдженні прогресивної хвилі скінченної амплітуди, Стокс прийшов до висновку, що при розповсюдженні такої хвилі частки рідини мають, окрім коливального руху, ще постійний рух у напрямі руху хвилі [35, 55, 62]. Стоксом було доведено, що зі збільшенням амплітуди хвилі існує гранична крутість хвиль, яка дорівнює 1/7 [62, 63].

Класифікацію морського хвилеутворення, згідно [55], визначено за наступними ознаками:

- «нелінійність» характеризується крутістю хвилі, яка визначається відношенням її висоти до довжини  $h_w/\lambda$ ;
- «нерегулярність» залежить від параметру відносної ширини енергомісткої частини частотного спектру;
- «дисперсія» визначається відношенням глибини рідини до довжини хвилі *d*/λ.

Для шкали оцінок «відсутність ознаки», «слабка», «помірна», та «сильна», автором роботи [55] було отримано досить широкий набір хвильових рухів, окремі з яких можна використовувати для аналізу роботи хвильових перетворювачів. У даній роботі на рис. 1.13 наведено дещо іншу класифікацію моделей хвиль з урахуванням методів їх розрахунку.

Підводячи риску в огляді гідродинамічних напрямів теорії хвиль, виділимо наступні основні методи, що знайшли застосування при розв'язку прикладних задач [55]:

- а) метод осередненого Лагранжіана;
- б) методи багатьох змінних (масштабів) та пов'язані з ними нелінійні рівня-





ння Шредінгера;

- в) нелінійні спектральні методи (у тому числі і метод зворотної задачі розсіяння) та пов'язані з ними нелінійні рівняння Захарова;
- г) числові методи на основі граничних інтегральних співвідношень (методи граничних елементів), скінченних елементів.

Отже, при виборі фізико-математичних моделей морського нерегулярного хвилеутворення для аналізу роботи хвильових перетворювачів, потрібно обирати ті, що дозволяють максимально проявити ознаки реального хвилеутворення, а саме: «нелінійність», «нерегулярність» та «дисперсію». Такі моделі можна отримати застосовуючи нелінійний підхід у гідродинамічній теорії хвиль, що і буде представлено у даній дисертаційній роботі.

1.3.2. Моделі та методи у гідродинаміці судна та океанотехніці. Основна мета моделювання гідродинамічної взаємодії ХвПЕ з полями нерегулярних вітрових хвиль – визначити навантаження, динамічні та енергетичні характеристики пристроїв. Теоретично, гідродинамічні сили, які діють на елементи ХвПЕ можуть бути отримані аналітично, емпірично або чисельно [111], у залежності від того, яку мету ставлять перед собою проектувальники. Як було зазначена на початку даного підрозділу, спорідненість у розрахунках навантажень, динаміки коливальних елементів ХвПЕ та морських плавучих споруд, тощо, дозволяє використовувати фізико-математичні моделі та методи у теорії корабля та океанотехніці.

**1.3.2.1.** Методи розрахунку зовнішніх сил. Спроби вивчення хитавиці корабля з'явилися у середині XVII століття у роботах Л. Єйлера, П. Бугера та Д. Бернулі [50]. Хоча запропоновані підходи ґрунтувались на хибних припущеннях, вони дозволили зробити основні висновки, які були використані Фрудом, Бертеном та Б. Сен-Венаном, і отримати нову більш якісну теорію. Така теорія була сформована видатним вченим О.М. Криловим [33] і отримала всебічного визнання і широкого застосування. В основі теорії Крилова було припущення про відсутність впливу судна на хвильовий профіль та поле тиску у хвилях, що

діють на судно і збуджують його хитавицю [67].

Наступні роботи, які з'явились у даному напрямі, належали Павленко, Жуковському, Басіну, Кочіну [1,32] і, нарешті, у 50-х роках минулого століття Макс Даниловичем Хаскіндом [67] було враховано вплив судна на гідродинамічні поля, через що лінійна теорія хитавиці була доведена до логічного завершення. Результати, отримані Хаскіндом, були використані у подальших дослідженнях багатьох вчених [5, 20, 50, 115] і завдяки роботі Ньюмана були підтвердженні та дещо доповнені у нелінійному наближенні [118].

Отже розглянемо основні положення та припущення у гідродинамічній теорії. Як було показано у попередньому пункті, поєднання ознак нерегулярності та нелінійності, які характеризують морське хвилеутворення і хитавицю суден, є доволі складним процесом і потребує відповідних моделей та методів у розрахунках [3,12,29,50,67].

Досліджуючи вплив на тверде тіло окремих гармонік та увесь спектральний набір хвилеутворення, можна знайти спектр коливань тіла, а також амплітудні та частотні характеристики [5, 37]. Однією з головних задач у даному напрямі є побудова залежностей для розрахунку енергетичних спектрів морського хвилеутворення у залежності від вітро-хвильового режиму того або іншого району океану чи моря та відповідно спектрів реакцій суден чи плавучих споруд на дію хвиль. Великого успіху у теоретичному дослідженні енергетичних спектрів досягли відомі вчені А.Я. Хінчін, Пірсон, Лонге-Хіггінс та інші [26, 37, 48, 15].

В англомовних публікаціях [94,111,125] застосування методів розрахунку реакцій суден у результаті дії нерегулярного хвилеутворення базується на підході Time Domain Calculation (розрахунок у часовій області).

М.Д. Хаскіндом було розроблену гідродинамічну теорію хитавиці суден на регулярних хвилях малої амплітуди, ґрунтуючись на лінійних припущеннях, які випливали з того, що нелінійність вважалась достатньо слабкою і у першому наближенні нею можна було знехтувати [67]. Це дозволило використати принцип суперпозиції і поділити хвилі на збуджуючі, дифракційні і випроміненні та, з іншого боку, представити нерегулярне вітрове хвилеутворення та процеси хитавиці судна чи інших плавучих платформ, як результат незалежної дії великої кількості гармонічних процесів малої амплітуди.

Припущення, які були запропоновані М.Д. Хаскіндом, ґрунтуються на наступних гіпотезах [55,67]:

- Довколишня рідини є ідеальною, її хвильові рухи є потенціальними, через що поле швидкості збуреного руху рідини може бути визначено через потенціал швидкості.
- 2. Доповнення головної частини збуджуючих сил О.М. Крилова, які виникають під дією хвильового тиску набігаючих на судно хвиль, збуреними судном інерційно-демпфіруючими та дифракційними силами.
- 3. Гіпотеза плоского обтікання контурів шпангоутів, згідно якої можна знехтувати рухом рідини уздовж ватерліній корпусу судна, що дає змогу перейти від тривимірних крайових задач до плоских крайових задач у площині шпангоутів з використанням методу плоских перерізав.
- 4. Корпус судна у районі змінної хвильової ватерлінії вважається прямостінним без врахування розвалів борту у кінцівках судна;
- 5. Процеси хитавиці судна на лінійних хвилях також мають малі амплітуди і тому квадратами та старшими ступенями амплітуд можна знехтувати, а відхилення судна від положення рівноваги на тихій воді буде малим без оголення чи повного занурення у хвилі суднових шпангоутів.

Підсумовуючи теорію М.Д. Хаскінда, можна стверджувати, що розрахунок збурених судном чи іншим плавучим тілом гідродинамічних сил звівся фактично до розрахунку так званих гідродинамічних коефіцієнтів корпусних контурів – прилучених мас та коефіцієнтів демпфування, підходи до знаходження яких можна знайти у роботах [20, 50, 55, 118].

**1.3.2.2.** Методи дослідження динаміки ХвПЕ. Для дослідження динаміки коливань ХвПЕ формулюються початкові задачі (або, іншими словами, задачі Коші), які у якості основної незалежної координати містять час t [13,57]. Тому в таких задачах рівняння руху доповнюється початковими умовами для переміщень та швидкостей руху розрахункової динамічної системи у початковий

момент часу. Як відомо, задачі Коші описуються звичайними диференціальними рівняннями другого порядку за часовою координатою. Зрозуміло, що для розв'язку задач механіки потрібно застосувати ті чи інші математичні методи, яких в обчислювальній математиці за останні роки було напрацьовано достатньо багато [31,64,65,68]. Наведемо певну класифікацію даним методам.

Якщо у якості ознак прийняти точність розв'язку, то у першу чергу усі методи можна розділити на дві множини:

- 1. Точні методи, які дають точні (замкнені) розв'язки задач у термінах елементарних аналітичних функцій, квадратур тощо.
- Наближені методи, які дають тільки певні наближені значення для розв'язків задач і які використовують чи спеціально розробляють, коли задачу не можливо розв'язати точно.

Через складність дослідження динаміки руху ХвПЕ точні методи загалом є не придатними і тому у даній роботі увагу зосередимо на наближених методах. Далі наближені методи за їх характером також можна розділити на дві великі множини:

- Аналітичні методи, для яких характерним є те, що основний обсяг роботи у розв'язанні задачі пов'язаний з аналітичними операціями, перетвореннями тощо, а обчислення виконуються тільки для отримання чисельних значень величин на завершальному етапі розв'язання задачі.
- 2. Чисельні (дискретні) методи, для яких зворотно характерним є те, що основний обсяг роботи у розв'язанні задачі пов'язаний із застосуванням чисельних операцій, процедур тощо на основі дискретизації (подрібнення за часом) розрахункової схеми, а аналітична частина розв'язку відіграє тільки допоміжну роль на початкових етапах розв'язання задачі. Крім того, сучасні чисельні методи пов'язані із опрацюванням величезних масивів дискретних величин та застосуванням достатньо потужної обчислювальної техніки.

Наближені аналітичні та чисельні методи далі також можна поділити на певні групи [38, 57]. Наприклад, наближені аналітичні методи включають три основні

групи:

- Прямі диференціальні методи, у яких працюють безпосередньо з вихідними диференціальними рівняннями задачі. Відомими представниками є методи Рунге-Кутта, Адамса-Бешфорта, Неймарка та інш.
- Варіаційні методи, у яких для розв'язання задачі використовують варіації певних функціоналів, тим чи іншими чином пов'язаних з даною задачею. Це методи найменших квадратів, Бубнова-Гальокіна та інш.
- Асимптотичні методи, іншими словами методи теорії збурень, методи малого параметру, у яких суттєвим є застосовування рядів за малими параметрами задачі та які дають асимптотичні наближення для розв'язків задачі.

Наближені чисельні методи включають наступні найбільш поширені методи:

- Метод скінченних елементів, який ґрунтується на дискретизації (розділенні) на відносно невеликі частинки скінченні елементи розрахункової схеми механічної конструкції.
- Метод скінченних різниць, який ґрунтується на дискретизації на відносно малі під області загальної координатної області, яку займає розрахункова схема механічної конструкції.
- 3. Метод граничних елементів [36], який ґрунтується на дискретизації тільки границі дво- чи тривимірної області, яку займає розрахункова схема конструкція, що дає змогу значно зменшити число точок дискретизації та відповідно й обсяг невідомих у задачі.

Для чисельного дослідження динаміки ХвПЕ застосовуються також засоби обчислювальної гідродинаміки для розв'язання базових рівнянь Нав'є-Стокса і деякі можливості таких систем розглянуто далі.

**1.3.3.** Методи обчислювальної гідродинаміки. Поява електронних обчислювальних машин у другій половині минулого століття стимулювала розвиток та використання чисельного моделювання досить складних фізичних процесів [7, 52]. Особливо стрімкий розвиток ЕОМ за останні роки, який призвів до

появи технічних засобів великої потужності, значно підвищує інтерес до різноманітних чисельних методів та алгоритмів у механіці суцільних середовищ [2].

Такий підрозділ механіки суцільних середовищ, як обчислювальна гідродинаміка (англ. Computational Fluid Dynamics, далі CFD), є одним зі складових процесу розрахунків у багатьох галузях машино-, корабле- та авіабудування. Даний попит зумовлений меншою вартістю чисельного моделювання фізичних процесів у порівнянні з їх модельними чи натурними дослідженнями.

Добре відомо [66], що використання засобів обчислювальної гідродинаміки тісно пов'язано з використанням суперкомп'ютерних систем з продуктивністю, яка дорівнює декільком сотням терафлопс (1 терафлопс = 10<sup>12</sup> операцій у секунду). І це зрозуміло тому, що потрібно враховувати тривимірність фізичного процесу, нестаціонарність гідродинамічних полів, в'язкі ефекти, включаючи турбулентність. Через такі вимоги час, який потрібний на подібні розрахунки при використанні CFD, може вимірюватись декількома годинами, а інколи досягати декількох тижнів [66]. На жаль, через брак суперкомп'ютерних систем, українські вчені не можуть дозволити собі проводити подібні розрахунки у повному об'ємі. Єдиним рішенням, поки що, залишається застосування низки спрощень, що дозволить отримати задовільні адекватні результати за значно менший час. Розглянемо далі більш детально методи та програмні пакети, що застосовуються в обчислювальній гідродинаміці з метою виявлення можливих спрощень у розрахунках ХвПЕ.

**1.3.3.1. Програмні пакети обчислювальної гідродинаміки**. Будь-які розрахунки із застосуванням обчислювальної гідродинаміки включають у себе три етапи [52,66]:

- 1 Етап. Препроцесор. На даному етапі формується геометрія обчислювального об'єкту, обирається сітка за допомогою якої виконується дискретизація об'єкту, визначаються початкові та граничні умови сформульованих задач.
- **2 Етап.** Процесор. Чисельний розрахунок фізичних параметрів основних рівнянь та збереження результатів для подальшого аналізу.

**3 Етап.** Постпроцесор. За допомогою засобів візуалізації (графіків, таблиць, полів) проводиться аналіз отриманих результатів розрахунків.

За останні 50 років вдалося напрацювати вагомий арсенал програмних засобів, який дозволяє значно полегшити перелічені вище етапи. Це вдалося досягти завдяки великим дослідницьким центрам, корпораціям, комерційним групам, університетам, інститутам та іншим організаціям по всьому світу. Окремі програми (наприклад, AutoCAD, Cadmech, CATIA, Proteus, SolidWorks, FreeCAD, GridGen, ParaView та ін.) дозволяють виконувати формування геометрії розрахункового об'єкту та проводити аналіз отриманих результатів за допомогою інструментів візуалізації. Більш розвинуті CFD пакети, такі як ANSYS Aqwa, OpenFOAM, FlowVision, STAR CD, CFX, FLUENT, FLOW 3D, SALOME, WAMIT та ін., дозволяють охопити усі етапи обчислювальної гідродинаміки [66, 76, 109]. Усі з цих програм відрізняються методами розв'язку, мають різну обчислювальну точність, різне коло вирішуваних задач, а також різну вартість. Зростання попиту на застосування пакетів такого рівня у практиці розрахунків за останні 10 років активно зберігає високі темпи і буде продовжуватися завдяки безперервному вдосконалюванню обчислювальної техніки.

1.3.3.2. Рівняння та методи, що застосовуються в обчислювальній гідродинаміці. Аналіз широкого кола рівнянь та методів, що застосовуються у моделюванні роботи ХвПЕ та входять у групу рівнянь CFD, був проведений у роботі [111]. Добре відомо, що найбільш точно відтворити фізичний процес із заданою точністю можна за допомогою рівнянь Нав'є-Стокса, які були відкриті більш ніж 150 років потому [7,52]. Відповідно до [66], дані рівняння використовують закони збереження маси, імпульсу, енергії в сполученні з основними термодинамічними й реологічними законами, містять мінімальну кількість вихідних припущень, що робить їх найповнішою й найбільш обґрунтованою системою рівнянь механіки рідини та газу. З іншого боку розв'язок таких рівнянь складає для науковців найбільшу проблему, вирішити яку можна тільки за допомогою чисельного моделювання та достатньо потужної обчислювальної техніки.

Інша група рівнянь, до якої відносяться рівняння потенціалу та Ейлера [55],

дозволяють моделювати фізичні процесу з деякими припущеннями та спрощеннями, що може призводити навіть до їх аналітичного розв'язку.

Чисельні методи, які використовуються в гідродинаміці для обчислення рівнянь Нав'є–Стокса, Ейлера, потенціалів, тощо, це – методи скінченних різниць, методи скінченних елементів, метод граничних елементів та метод скінченних об'ємів [2, 7, 25, 52]. Розвиток та застосування на практиці методів CFD разом з експериментальними дослідженнями, як показує сучасний досвід проектування та експлуатації суден, плавучих платформ та засобів океанотехніки, дозволяє зробити висновок про те, що фізичний експеримент потрохи витісняється сучасними чисельними моделями дослідження [83, 125]. Це досягається за рахунок високої точності та швидкості отримання результатів з мінімальними витратами на експеримент (чисельний).

## Висновки до Розділу 1

Подальше зростання енергоспоживання у більшості країн світу не може бути забезпечене світовими об'ємами нафти, природного газу та вугілля. З іншого погляду, слід очікувати посилення вимог на обмеження викидів *CO*<sub>2</sub> в атмосферу від використання традиційних джерел енергії, а також додаткові обмеження в області атомної енергетики. Все це сприяє **збільшенню потреб в альтернативних джерелах енергії**, а саме: енергії течій, водневій енергетиці, виробництві біопалива, сонячній, вітровій, геотермальній та хвильовій енергії.

Найбільша інтенсивність хвильової енергії, у порівнянні з іншими джерелами, робить її значно привабливішою для подальшого використання країнами, які межують з океанами чи морями. Аналіз сучасних розробок хвильових перетворювачів енергії показав, що найбільш цікавими є схеми, які перетворюють енергію зі зміни поверхневого профілю хвиль та зі зміни полів швидкості та тиску у хвилях. Незважаючи на велику кількість запропонованих проектів ХвПЕ, жоден з них, поки що, не пройшов усіх етапів життєвого циклу. До найбільш вдалих та перспективних проектів слід віднести Pelamis (Великобританія) та Oyster (Великобританія). Тому залишаються ще не вирішеними питання, пов'язані з дослідженням, тестуванням та впровадженням зазначених технологій видобутку та використання хвильової енергії, а також пошуком шляхів покращення їх експлуатаційних, технічних, екологічних і безпекових характеристик та в решті-решт здешевлення виробленої енергії.

Через схожість із суднами, морськими спорудами чи деякими засобами океанотехніки, при розрахунках та дослідженні ХвПЕ можна застосовувати методи гідродинаміки вітрових хвиль, теорії корабля, океанотехніки. Але разом з тим потрібно враховувати принципові відмінності, які пов'язані з появою нелінійних ефектів при дослідженні ХвПЕ через значну крутість вітрових хвиль у шельфових зонах, мале значення відношення головного розміру до довжини хвиль, значні амплітуди коливань ХвПЕ та реалізацію ефективних стратегій контролю параметрів внутрішньої системи відбору енергії РТО. Тому розробка та використання математичних моделей, що реалізують нерегулярні нелінійні хвилі з метою їх застосування як основного джерела збурення на перших етапах проектування ХвПЕ, зможуть значно скоротити час та кошти на розрахунки подібних пристроїв у майбутньому.

Досягти значних успіхів у чисельному моделюванні та дослідженні взаємодії ХвПЕ з гідродинамічними полями можна за допомогою CFD пакетів. Сучасний розвиток обчислювальної техніки дозволяє найбільш точно відтворювати фізичні процеси механіки рідини із заданою точністю за допомогою рівнянь Нав'є– Стокса. З іншого боку, такі рівняння вимагають використання суперкомп'ютерних систем з великою обчислювальною потужністю, що, при сучасних умовах праці більшості українських науковців, практично унеможливлює проведення процесу розрахунків та дослідження. Тому потрібно застосовувати деякі спрощення у моделюванні схем ХвПЕ, переходити від тривимірної задачі до двовимірної та застосувати більш прості рівняння (наприклад, рівняння відносно потенціалів) для представлення морського вітрового хвилеутворення та розрахунку гідродинамічних навантажень на елементи ХвПЕ і їх реакцій на дію хвиль.

#### РОЗДІЛ 2

## МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ ГІДРОДИНАМІКИ ТА СТАТИСТИКИ МОРСЬКИХ ВІТРОВИХ ХВИЛЬ ТА ХВПЕ

Другий розділ присвячено обґрунтуванню вибору напряму дослідження, розробці загального алгоритму його проведення та розгляду методів дослідження, що будуть застосовуватись при вирішенні поставлених задач.

Конкретно, у підрозділі 2.1 сформульовані мета дисертаційної роботи та задачі для її досягнення. На підставі цього сформульована постановка задачі проведення дослідження ХвПЕ, на основі якої проводилось розв'язання поставлених задач.

У підрозділі 2.2 розглянуто методи аналізу довготермінової вітрових хвиль. Наявність довготермінових розподілів вітрових та хвильових режимів за десятки і навіть сотні років дозволить обґрунтовано обирати райони акваторій з метою розгортання та експлуатації в них ХвПЕ.

Для дослідження ефективності роботи ХвПЕ з головним джерелом збудження – нерегулярним морським хвилеутворенням, у підрозділі 2.3 розроблено нелінійну гідродинамічну модель таких хвиль у шельфовій зоні, яка містить розрахунки профілю, полів швидкостей та тиску за глибиною для нерегулярних вітрових морських хвиль на інтервалах квазістаціонарності (30–40 хв).

У підрозділі 2.4 розглянуто методи для визначення хвильових навантажень на робочі елементи ХвПЕ, зокрема, розглянуто адаптацію та узагальнення: 1) теорії Морісона, яка дозволяє визначати навантаження на тонкі видовжені елементи, 2) теорії Фруда-Крилова, яка визначає гідродинамічні навантаження без урахування впливу ХвПЕ на хвильовий профіль та поле тиску у хвилях, та 3) теорії Хаскінда-Ньюмана, яка враховує збурення від ХвПЕ за рахунок дифракції та випромінення хвиль при роботі ХвПЕ. Узагальнення пов'язані з урахуванням нелінійних та нерегулярних ефектів у розрахункових залежностях для даної категорії сил.

Основу чисельного дослідження динаміки коливань ХвПЕ під дією хвиль складають розв'язки початкових задач Коші з диференціальними рівняннями за часом. Найбільш поширені методи чисельного інтегрування диференціальних рівнянь, зокрема, Рунге–Кутта, Адамса–Бешфорта та Неймарка, розглянуті у підрозділі 2.5. На основі тестових розрахунків було прийнято рішення щодо вибору найбільш оптимального методу для подальших розрахунків у даній роботі.

На завершення у підрозділу 2.6 приведено огляд та оцінку програмних рішень, які були використані на етапах основного алгоритму розрахунків та дослідження ХвПЕ. Отримані залежності утворили групу інструментів, які дозволять виконати дисертаційне дослідження ефективності роботи ХвПЕ.

### 2.1. Обґрунтування напряму дослідження та постановка задачі

Обґрунтування напряму дослідження даної дисертаційної роботи зробимо на підставі огляду, що був виконаний у першому розділі. Як було зазначено, проводити модельні чи натурні експериментальні дослідження взаємодії ХвПЕ з гідродинамічними полями досить складно і коштовно, а чисельний аналіз загальних рівнянь з використанням CFD пакетів, які моделюють дані складні фізичні процеси, є досить трудомістким. Тому, розробка фізико-математичних моделей та методів розрахунку гідродинамічних полів для нелінійних та нерегулярних вітрових хвиль у шельфовій зоні та розробка методів розрахунку хвильових навантажень на елементи ХвПЕ з урахуванням нелінійних та нерегулярних ефектів при дії таких хвиль – актуальна та обґрунтована задача, яку потрібно буде розв'язати у даному дисертаційному дослідженні.

Відповідно до сформульованої задачі, з метою отримання гідродинамічних моделей основного джерела збудження ХвПЕ – нерегулярних вітрових хвиль – будемо розглядати два наближення: лінійне та нелінійне. Обмежимось розв'язком плоскої крайової задачі теорії хвиль, при цьому, рідину будемо вважати ідеальною, а її рух – безвихоровий та потенціальний. Основні характеристики хви-

леутворення, що потрібно визначати: профіль нерегулярних вітрових морських хвиль на воді  $\zeta_w(x,t)$ , поля проекцій швидкостей  $\mathbf{v}_{wx}(x,z,t)$ ,  $\mathbf{v}_{wz}(x,z,t)$  та поля тиску  $p_w(x,z,t)$  з глибиною. Межі значень просторових координат x, z визначаються з розмірів ХвПЕ та умов акваторії, в якій проводиться дослідження даного пристрою, і можуть дорівнювати  $z \in [-d \dots \zeta_w], x \in [x_{left} \dots x_{right}]$ , де d – глибина акваторії,  $x_{\{\substack{left\\right}}$  – горизонтальні границі координат, які повинні забезпечувати достатнє просторове вікно для розрахунку енергетичного пристрою. Для розв'язку поставленої задачі оберемо техніку Time–Domain Calculations, згідно якої нерегулярний випадковий коливальний процес можна досліджувати у реальному часі на так званих інтервалах квазі стаціонарності ( $30 \dots 40$  хвилин), на яких реальне хвилеутворення залишається статистично мало змінним. Відповідно, часова координата t буде перебирати значення з інтервалу  $t \in [0 \dots 30]$ хвилин з кроком  $\Delta t$ . Система координат та розрахункова схема гідродинамічних полів вітрових морських хвиль на воді представлена на рис. 2.1.

Як показав аналіз [6<sup>a</sup>], у даному дисертаційному дослідженні слід зосередити увагу на 4-х перспективних принципових схемах ХвПЕ, що представлені на рис. 2.2. Перший тип реагує на поле тиску, другий – на поле швидкостей, а останні – на коливання вільної поверхні.

Визначимо для коливального об'єкту локальну систему координат  $Gx_Gy_Gz_G$ , у якій точка G співпадає з його центром ваги. Тоді, поступальні горизонтальні та вертикальні переміщення точки G будемо позначати через  $\xi$  та  $\zeta$ , відповідно. Кут нахилу об'єкту відносно вісі  $Gy_G$  позначимо через  $\psi$  (див. рис. 2.3). За другим законом Ньютона диференціальні рівняння динамічної системи запишуться у наступній формі:

$$\begin{array}{c}
m\ddot{\xi} = F_x; \\
m\ddot{\zeta} = F_z; \\
I_G \ddot{\psi} = M_G;
\end{array}$$

$$(2.1)$$

де m – маса об'єкта;  $I_G$ ,  $M_G$  – момент інерції мас та головний момент гідродинамічних сил відносно вісі  $Gy_G$ ;  $\ddot{\xi}$ ,  $\ddot{\zeta}$  – проекції вектора лінійного прискорення точки G на вісі нерухомої системи координат Ox та Oz, відповідно;  $\ddot{\psi}$  – проекція



Рис. 2.1. Розрахункова схема гідродинамічних полів вітрових морських хвиль

на воді



Рис. 2.2. Принципові схеми хвильових перетворювачів енергії: взаємодіє з полем тиску з глибиною (a); взаємодіє з горизонтальним полем швидкостей (б); взаємодіють з вільною поверхнею (в) та (г) вектора кутового прискорення на вісь  $Gy_G$ ;  $F_x$ ,  $F_z$  – проекції головного вектора гідродинамічних сил на відповідні рухомі вісі.



Рис. 2.3. Постійно зв'язана з коливальним об'єктом система координат

У рамках лінійної гідродинамічної теорії хитавиці [50] вектор гідродинамічних сил  $\vec{F}$ , що діють на коливальний об'єкт у (2.1), поділяють на незбурені хвильовим перетворювачем сили  $\vec{F}^{KF}$ , збурені ХвПЕ гідродинамічні сили  $\vec{F}^{HN}$ та інерційні сили  $\vec{F}^S$ . Для елементів ХвПЕ виникає додаткова сила, яка залежить від внутрішньої системи перетворення енергії та позначається через  $\Delta \vec{F}$ . Враховуючи вище сказане, вектор гідродинамічних сил залежить від гідродинамічних навантажень, що діють на елементи ХвПЕ при дії нерегулярних хвиль, та має наступну структуру

$$\vec{F}(t) = \vec{F}^{KF}(t) - \vec{F}^{HN}(t) - \vec{F}^{S}(t) - \Delta \vec{F}(t), \qquad (2.2)$$

де  $\vec{F}^{KF}$ ,  $\vec{F}^{HN}$  – вектори збуджувавильних та інерційно-демпфуючих сил, що визначаються за відомими теоріями Крилова-Фруда та Хаскінда-Ньюмана [50], відповідно;  $\vec{F}^S$  – визначається у залежності від типу розрахункової схеми ХвПЕ (див. рис. 2.2);  $\Delta \vec{F} = \Delta m \ddot{\vec{x}} + \Delta \Lambda \dot{\vec{x}} + \Delta K \vec{x}$  – визначається із умов отримання максимальних показників потужності пристрою при налаштуванні вільних параметрів – інерційного коефіцієнту  $\Delta m$  та коефіцієнтів демпфування  $\Delta \Lambda$  та жорсткості  $\Delta K$ .

Значення коефіцієнтів внутрішньої системи перетворення енергії  $\Delta m$ ,  $\Delta \Lambda$ ,  $\Delta K$  для лінійного наближенні розрахунку динаміки коливань елементів Хв-ПЕ будемо шукати у наступному вигляді: знайти максимум цільової функції  $P(c, D) \rightarrow \max$ , за умови, що  $g(c) \ge 0$ , h(c) = 0, де  $c = (\Delta m, \Delta \Lambda, \Delta K) \in C$  – вектор незалежних коефіцієнтів системи відбору енергії; C – простір допустимих значень зазначених коефіцієнтів; P(c) – цільова функція, яка визначає середнє значення потужності пристрою у заданому інтервалі часу t;  $D(D_1, \ldots, D_m)$  – вектор геометричних параметрів пристрою;  $g(c) = \lfloor g_1(c), \ldots, g_p(c) \rfloor$  – обмеження у вигляді нерівностей,  $h(c) = \lfloor h_1(c), \ldots, h_q(c) \rfloor$  – обмеження у вигляді рівностей. Далі, отримані значення коефіцієнтів  $\Delta m$ ,  $\Delta \Lambda$ ,  $\Delta K$  застосовуємо для розрахунку потужності P пристрою при нелінійному наближенні та проводимо порівняння енергетичних показників при лінійному та нелінійному наближеннях.

Отже, мету дисертаційної роботи становитиме створення фізико-математичних моделей і методів для представлення морського нерегулярного хвилеутворення у шельфовій зоні та дослідження динамічних реакцій та енергетичних показників ХвПЕ при їх взаємодії елементів ХвПЕ з полями нерегулярних вітрових хвиль на воді з урахуванням нелінійних ефектів.

Для досягнення поставленої мети потрібно розв'язати наступні задачі:

- провести аналітичний огляд сучасних досліджень та досягнень у хвильовій енергетиці, обрати найбільш перспективні технології відбору енергії для подальших досліджень у даній роботі;
- провести статистичний аналіз вітро-хвильових режимів перспективних районів для Чорного та Азовського морів щодо можливості розташування та використання ХвПЕ, а також провести аналіз можливого негативного впливу зовнішнього середовища на хвильові перетворювачі енергії (фізичного, геологічного, біологічного і т. ін.);
- розробити у лінійному та нелінійному наближеннях фізико-математичні моделі для чисельних розрахунків у часі і просторі гідродинамічних характеристик нерегулярного морського хвиле утворення – хвильової поверхні, поля швидкостей та поля хвильового тиску з глибиною у шельфовій

прибережній зоні на інтервалах квазістаціонарності хвильового руху – 30-40 хв.;

- ґрунтуючись на принципах максимального відбору енергії з морських хвиль, розробити принципові схеми роботи ХвПЕ у різних гідродинамічних полях;
- розробити фізико-математичні моделі і методи для чисельних розрахунків у часовій області (Time Domain Calculation) гідродинамічних навантажень на ХвПЕ, динаміки їх руху та отриманої механічної енергії безпосередньо при дії нерегулярних хвиль з довільним спектром;
- чисельними дослідженнями з'ясувати найбільш ефективні схеми ХвПЕ, їх оптимальні параметри та розміри, розробити у першому наближенні розрахункову методику їх проектування, виходячи з району експлуатації, хвильових режимів та схем відбору енергії.

**Об'єкт дослідження** становитимуть хвильові перетворювачі енергії різних типів в полі нерегулярних вітрових хвиль у шельфовій зоні, а **предмет** – гідродинамічні поля в нерегулярних вітрових хвилях, гідродинамічна взаємодія елементів ХвПЕ з даними полями та динамічні реакції і енергетичні показники роботи ХвПЕ.

## 2.2. Аналіз довготермінової статистики вітро-хвильових режимів

Для обґрунтованого вибору акваторії моря з метою розгортання та ефективної експлуатації ХвПЕ, потрібно мати довготермінові розподіли вітрових та хвильових режимів за десятки і навіть сотні років. Тому розпочнемо з розгляду методів аналізу довготермінової статистики.

Довготермінові розподіли найбільш важливі головним чином для оцінки екстремальних значень характеристик природних явищ, і тому якість та надійність розподілів у першу чергу залежать від довго тривалості накопичення статистичних даних, на базі яких розподіли було отримано. Для проектування хвильових перетворювачів потрібно мати розподіли принаймні за 100 років, але такої статистики поки що не накопичено і тому користуються даними, які отримано за 30...50 років, що потім екстраполюють на термін у 100 років. Для одержання довготермінових розподілів будемо застосовувати метод, який полягає у апроксимації вже накопичених експериментальних розподілів певними теоретичними розподілами. Найбільшого поширення знайшли апроксимаційні формули Гумбела, Вейбула, Парето та логістичний розподіл [16, 56, 89].

Розглянемо спочатку апроксимацію за законом Вейбула, функція розподілу якого має вигляд

$$F(x) = 1 - \exp[-\exp(\alpha \ln x + \beta), \qquad (2.3)$$

де  $\alpha$  – параметр, що характеризує форму розподілу;  $\beta$  – масштабний множник. Після логарифмування (2.3) та заміни функції розподілу F(x) на забезпеченість G(x) = 1 - F(x), отримаємо наступний вираз

$$L = \ln(-\ln(G(x))) = \alpha \ln x + \beta.$$
(2.4)

Якщо позначити у (2.4)  $y' = \ln(-\ln(G(x))), x' = \ln x$ , то тоді отримаємо рівняння  $y' = \alpha x' + \beta$ , яке є рівнянням прямої. Якщо тепер зібрані у деякому районі акваторії статистичні дані у нових змінних утворюють графік, подібний до прямої, то це означає, що вони відповідають закону Вейбула. Якщо аналогічний підхід застосовувати для інших розподілів, то отримаємо остаточно:

— функція розподілу Гумбеля

$$F(x) = \exp[-\exp(-(x-\alpha)/\beta)],$$
  

$$L = -\ln(-\ln(1-G(x))) = (x-\alpha)/\beta;$$
(2.5)

— функція розподілу Парето

$$F(x) = 1 - \exp[-(\alpha \ln x + \beta)],$$
  

$$L = -\ln(G(x)) = \alpha \ln x + \beta;$$
(2.6)

— функція логістичного розподілу

$$F(x) = [1 + \exp[-(x - \alpha))/\beta]^{-1},$$
  

$$L = -\ln(G(x)/(1 - G(x))) = (x - \alpha)/\beta.$$
(2.7)

Результати апроксимації вітро-хвильових режимів за допомогою даних розподілів, що будуть одержані для районів Чорного та Азовського морів, дозволять із заданою забезпеченістю обирати довготермінові параметри реального хвилеутворення (значну висоту та середній період і довжину хвиль). Оцінка зазначених характеристик дозволить перейти до моделювання основного джерела збурення ХвПЕ – гідродинамічних хвильових полів для заданого режиму шторму.

# 2.3. Методи дослідження гідродинаміки нерегулярних та нелінійних вітрових хвиль у шельфовій зоні

У даному підрозділі представлено реалізацію гідродинамічних моделей – профілю нерегулярних вітрових морських хвиль на воді, полів швидкостей та полів тиску за глибиною з урахуванням нелінійних ефектів хвильового руху. Для розв'язку поставленої задачі оберемо техніку Time-Domain Calculations, згідно якої нерегулярний випадковий коливальний процес можна досліджувати у реальному часі на так званих інтервалах квазі стаціонарності (30...40 хвилин), на яких реальне хвилеутворення залишається статистично мало змінним. Щоб отримати статистично стаціонарні моделі для зазначеного проміжку часу, скористаємося на першому етапі спектральною лінійною теорією хвиль, яка дозволить представити нерегулярне хвилеуторвення як суперпозицію значної кількості регулярних гармонік з певними характеристиками. Для подальшої реалізації нелінійного нерегулярного наближення будуть використані результати досліджень періодичних хвиль Стокса та груп хвиль скінченної амплітуди та результати дослідження гідродинамічних полів у нелінійних хвилях. Отже, теоретичне представлення морського нерегулярного хвилеутворення буде включати у себе два етапи, які будуть розкриті у наступних підрозділах.

У підрозділі 2.3.1 реалізовано спектральну техніку моделювання нерегулярних вітрових морських хвиль. Основні проблеми, які було вирішено: 1) отримати залежності для енергетичних спектрів хвилеутворення та виконати їх дискретизацію на частотних інтервалах; 2) за допомогою спектрального додавання значної кількості  $N \sim 10^3$  кратних гармонік реалізувати залежності для профілю морських хвиль, полів швидкостей та полів тиску за глибиною; 3) застосувати метод Гільберта для отримання локальних пакетних характеристик нерегулярного хвилеутворення – обвідну амплітуд, модуляцію фаз, колову частоту, хвильове число та крутість хвиль. Розв'язання останньої проблеми дозволить сформулювати вхідні дані для подальшого нелінійного узагальнення нерегулярного хвилеутворення.

Нелінійний етап моделювання представлено у підрозділі 2.3.2, де спочатку було зосереджено увагу на насиченні хвильового профілю лінійного наближення високочастотними нелінійними кратними гармоніками, а далі використано метод пів-зворотньої задачі, розроблений у роботі [55], для отримання полів швидкостей на хвильовій поверхні та завершено розрахунком полів швидкостей та тиску за глибиною.

**2.3.1. Лінійне моделювання хвильової поверхні.** Спектральний підхід, завдяки своїй простоті у реалізації, став найбільш розповсюдженим інструментом моделювання хвильової поверхні, що представляє з себе нерегулярний коливальний процес, ординати якого змінюються з часом випадково. Відповідно до даного підходу, функцію для профілю пласких хвиль  $\zeta_w(x,t)$  можна отримати, застосувавши принцип суперпозиції значної кількості N регулярних гармонічних хвиль відносно малої амплітуди, що відносяться до лінійної гідродинамічної теорії [37, 62, 100]

$$\zeta_w(x,t) = \sum_{i=1}^N \zeta_{wi}(x,t) = \sum_{i=1}^N a_i \cos(k_i x + \mathbf{\sigma}_i t + \mathbf{\alpha}_i), \ N \sim (2\dots 3) \cdot 10^3, \qquad (2.8)$$

де  $a_i, k_i, \sigma_i, \alpha_i$  – відповідно амплітуди, хвильові числа, колові частоти та початкові фази елементарних гармонік (хвилі рухаються проти вісі Ox) і вказане значення N потрібно для моделювання на інтервалах квазістаціонарності 30...40 хв при рівномірній дискретизації за частотами  $\sigma_i$ .

Амплітуди хвиль  $a_i$  можна знайти через механічні енергії відповідних кратних

гармонік пласких хвиль  $E_i$  [37], які пов'язані наступним співвідношенням

$$E_i(x,t) = \frac{\rho g a_i^2}{2},\tag{2.9}$$

де  $\rho = 1025 \,\mathrm{kr/m^3}$  – густина води;  $g = 9,81 \,\mathrm{m/c^2}$  – прискорення вільного падіння. Якщо механічну енергію  $E_i$  визначити через спектральну щільність, як  $E_i = S(\mathbf{\sigma}_i)\Delta\mathbf{\sigma}_i$ , то можна отримати формулу для амплітуд елементарних гармонік  $a_i$  у вигляді

$$a_i = \sqrt{2S(\mathbf{\sigma}_i)\Delta\mathbf{\sigma}_i},\tag{2.10}$$

де  $S(\mathbf{\sigma}_i)$  – енергетичний спектр, що характеризує розподілення енергії по частотам  $\mathbf{\sigma}_i$ ;  $\Delta \mathbf{\sigma}_i$  – частотний інтервал дискретизації,  $i = 1, 2, \ldots, N$ .

Діапазон значень, у якому лежать значення частот хвиль  $\sigma_i$ , можна отримати, проаналізувавши експериментальні енергетичні спектри, наприклад, у роботі [128], а потім за отриманим діапазоном [ $\sigma_{min}$ ,  $\sigma_{max}$ ] можна знайти хвильові числа  $k_i$  застосувавши дисперсійне рівняння, яке має наступний вигляд [62, 100]

$$\sigma_i^2 = gk_i \tanh k_i d, \tag{2.11}$$

де d – глибина у районі хвилеутворення.

Крім того, відповідно до [59,96], початкові фази елементарних гармонік α<sub>i</sub> для (2.8), обираються як випадкові числа з рівномірним розподілом на інтервалі [0; 2π].

2.3.1.1. Математичне представлення енергетичного спектру нерегулярного хвилеутворення. Для реалізації формули лінійного спектрального додавання (2.8) потрібно побудувати енергетичний спектр хвилеутворення у залежності від заданого хвильового режиму, який визначається параметрами:  $h_s$  – значною висотою хвиль та  $T_{cs}$  – середнім спектральним періодом хвиль [59,120,128]. Значна висота хвиль пов'язана із значенням висоти хвиль з тривідсотковою забезпеченістю залежністю  $h_{3\%} = 1,32h_s$ . Значну висоту хвиль  $h_s$  також можна застосувати для наближеної оцінки значення середнього спектрального періоду хвиль  $T_{cs} \cong 6h_s^{0,3}$  [59], що фактично дозволяє використати апроксимацію вітро-хвильових режимів Чорного та Азовського морів, методику проведення якої було представлено нами у попередньому підрозділі 2.2. Це дасть змогу отримати значення значної висоти хвиль  $h_s$  у залежності від забезпеченості хвильового режиму, що моделюється.

Як показали дослідження, що проводились у роботах [17, 34, 114], при моделюванні реального хвилеутворення важливу роль відіграють спектри JONSWAP, які визначаються відомою формулою [120]

$$S(f) = \beta \frac{g^2}{(2\pi)^4} \frac{1}{f^5} \exp\left[-1.25 \left(\frac{f_c}{f}\right)^4\right] \gamma_H^{\exp\left[-0.5\frac{(f-f_c)^2}{(\tau f_c)^2}\right]},$$
(2.12)

де  $\beta$  – масштабний параметр; g – прискорення вільного падіння; f – колова частота;  $f_c = 1/T_{cs}$  – середня колова частота;  $\gamma_H$  – безрозмірний параметр Хасельмана, який збільшує гостроту піку та приблизно дорівнює  $\gamma_H \approx 1...6$ ; значення параметру  $\tau$  дорівнює 0,07, якщо  $f \leq f_c$  або 0,09, якщо  $f > f_c$ .

Детальний аналіз побудови спектрів JONSWAP, виконаний у роботі [120] показує, що параметри  $\beta$  та  $\gamma_H$  можуть бути визначені, як функції від різних аргументів: середньої швидкості вітру U, середньої фазової швидкості хвиль  $c_w$ , висоти хвиль  $h_s$  та періоду хвиль  $T_{cs}$ . Як зазначалось раніше, у даній роботі енергетичний спектр будемо визначати хвильовим режимом, а саме висотою  $h_s$ та періодом  $T_{cs}$  морських хвиль на воді. Тому, для визначення масштабного  $\beta$  та пікового  $\gamma_H$  параметрів, скористаємося наступними виразами [120]

$$\beta = 4.5 f_c^4 h_s^2; \, \gamma = 9.5 f_c h_s^{0.34}.$$
(2.13)

Далі підставимо (2.13) у (2.12), замінимо колові частоти f та  $f_c$  на кутові **о** та **о**<sub>c</sub> за формулою **о** =  $2\pi f$  і отримаємо остаточно вираз для визначення енергетичного спектру реального хвилеутворення

$$S(\mathbf{\sigma}) = \frac{4.5g^2 h_s^2}{T_{cs}^4 \mathbf{\sigma}^5} \exp\left[-1.25 \left(\frac{\mathbf{\sigma}_c}{\mathbf{\sigma}}\right)^4\right] \left(\frac{9.5}{T_{cs}} h_s^{0.34}\right)^{\exp\left(-0.5 \frac{(\mathbf{\sigma}-\mathbf{\sigma}_c)^2}{(\mathbf{\tau}\mathbf{\sigma}_c)^2}\right)}.$$
 (2.14)

**2.3.1.2.** Математичне представлення двопікового енергетичного спектру нерегулярного хвилеутворення. Тисячі прикладів частотних спектрів морського нерегулярного хвилеутворення у Північній частині Атлантичного океану та Північному морі показують, що абсолютна більшість з них є багатопіковими [17, 34, 128, 130], а при розрахунку взаємодії хвильових перетворювачів енергії чи засобів океанотехніки з гідродинамічними полями морських хвиль на воді основну роль відіграють піки у низькочастотній енергонесучій частині спектру. При моделюванні нерегулярної хвильової поверхні, яка відповідає реальному хвилеутворенню, застосування саме багатопікових спектрів має важливе значення для вирішенні задач даної дисертаційної роботи, і тому приведемо у даному підрозділі техніку аналітичного представлення двопікових частотних спектрів, запропоновану у роботах [59, 128], щоб покращити реалістичність результатів моделювання нерегулярного морського хвилеутворення.

Відповідно до [128], двопіковий енергетичний спектр представляється, як сума двох парціальних спектрів JONSWAP [17,56,101]. Таким чином, для повного частотного спектру  $S_w(\sigma)$  можна записати

$$S_w(\mathbf{\sigma}) = S_1(\mathbf{\sigma}) + S_2(\mathbf{\sigma}), \qquad (2.15)$$

де  $S_1(\sigma)$  – основний парціальний спектр, розташований на більш низьких частотах;  $S_2(\sigma)$  – менш енергоємний спектр – на більш високих частотах [34,128]. Парціальні спектри  $S_i(\sigma)$  визначаються формулою (2.14).

Скореговані значення висот хвиль  $\tilde{h}_{si}$  та середніх спектральних періодів парціальних спектрів  $\tilde{T}_{ci}$  визначаються виразами [128]

$$\tilde{h}_{si} = \frac{h_{si}}{\sqrt{F_{hi}}}, \, \tilde{T}_{ci} = \frac{T_{ci}}{F_{Ti}}, \, i = 1, 2,$$
(2.16)

де корегуючі величини  $F_{hi}$ ,  $F_{Ti}$  залежать від множників Хасельмана  $\gamma_{Hi}$  і з використанням їх табличних даних [128] та апроксимацій, отриманих у цитованій роботі, можуть бути представлені у вигляді (без індексу *i*)

$$F_h = 0,00053\gamma^3 - 0,01229\gamma^2 + 0,27115\gamma + 0,74123,$$
  

$$F_T = -0,00112\gamma^3 + 0,01607\gamma^2 - 0,08628\gamma + 1,07043.$$
(2.17)

Далі параметри парціальних спектрів  $h_{si}$  та  $T_{ci}$  у (2.16) визначаються через значну висоту хвиль та середній спектральний період хвиль повного спектру  $h_s$ 

та *T<sub>c</sub>* у вигляді [59, 128]

$$h_{s1} = \frac{h_s R_h}{\sqrt{1 + R_h^2}}, \quad h_{s2} = \frac{h_s}{\sqrt{1 + R_h^2}};$$
 (2.18)

$$T_{c1} = T_c T_{c0}, \quad T_2 = \frac{T_{c1}}{R_T}, \quad T_{c0} = \frac{R_T + R_h^2}{1 + R_h^2},$$
 (2.19)

де  $R_S = S_{1max}(\mathbf{\sigma})/S_{2max}(\mathbf{\sigma})$  – відношення максимумів парціальних спектрів, а  $R_T = T_{c2}/T_{c1}$  – відношення середніх спектральних періодів парціальних спектрів хвилеутворення. Фізично параметр  $R_S$  характеризує відношення інтенсивностей хвильових систем у зоні шторму, а параметр  $R_T$  – їх взаємне розташування на частотній смузі.

На завершення, показники ступеню  $\mathbf{v}_i(\mathbf{\sigma}), i = 1, 2$  у множниках Хасельмана  $\gamma_{Hi}$  у (2.12) дорівнюють [9,59]

$$\mathbf{v}_i(\mathbf{\sigma}) = \exp\left[-0.5\left(\frac{1.296\tilde{T}_{ci}\mathbf{\sigma} - 2\mathbf{\pi}}{2\mathbf{\pi}\mathbf{\tau}_i}\right)^2\right].$$
(2.20)

Таким чином, отримано залежності, що визначають двопіковий шестипараметричний спектр Хасельмана для морського нерегулярного хвилеутворення з додатковими параметрами  $\gamma_{H1}$ ,  $\gamma_{H2}$ ,  $R_S$ ,  $R_T$ , які слід розглядати як додаткові характеристики хвильового режиму, що деталізують розподіл енергії за частотами у низькочастотній області спектру [59]. Значення відношень  $R_S$  та  $R_T$  легко визначити, маючи експериментальні спектри для заданого хвильового режиму [128], які приблизно дорівнюють  $R_S \approx 1, 2...2, 0$  та  $R_T \approx 1, 2...1, 5$ .

2.3.1.3. Модифікація енергетичного спектру для шельфової зони з обмеженою глибиною моря. Залежності для енергетичних спектрів (2.14) (2.15) не враховують обмеженість глибини акваторії, яка, відповідно до [120], призводить до втрати енергії в елементарних гармоніках на низьких частотах і, як результат, до зміни самого спектру. Метод, який дозволяє трансформувати спектр, отриманий початково для глибокої води, до спектру з обмеженою глибиною моря, був розроблений у 1975 році групою науковців на чолі з С.О. Китай-городським. Суть даного методу полягає у тому, що спектр  $S(\mathbf{\sigma}, d)$  для хвиль на

воді з обмеженою глибиною d, зазвичай, записується як добуток спектру  $S(\sigma, \infty)$  для хвиль на глибокій воді  $(\infty)$  та корегуючого коефіцієнту [120]

$$S(\mathbf{\sigma}, d) = S(\mathbf{\sigma}, \infty) \cdot \phi(\mathbf{\sigma}_d), \qquad (2.21)$$

де  $\phi(\mathbf{\sigma}_d)$  – коефіцієнт Китайгородського, який дорівнює

$$\phi(\mathbf{\sigma}_d) = \frac{(k(\mathbf{\sigma}, d))^{-3} \frac{\partial k(\mathbf{\sigma}, d)}{\partial \mathbf{\sigma}}}{(k(\mathbf{\sigma}, \infty))^{-3} \frac{\partial k(\mathbf{\sigma}, \infty)}{\partial \mathbf{\sigma}}}.$$
(2.22)

У формулі (2.22)  $\sigma_d = \sigma \sqrt{d/g}$  – безрозмірна частота хвиль; d – глибина акваторії;  $k(\sigma, d)$  – хвильове число для хвиль на воді з обмеженою глибиною, що визначається з дисперсійного рівняння (2.11);  $k(\sigma, \infty) = \sigma^2/g$  – хвильове число для хвиль на глибокій воді.

2.3.1.4. Залежності для визначення полів швидкостей та тиску у нерегулярних вітрових хвилях. Наступними визначальними гідродинамічними характеристиками нерегулярного морського хвилеутворення є поля швидкостей  $\vec{v}_w(x, z, t)$  та поля тиску з глибиною  $p_w(x, z, t)$ . Для моделювання зазначених полів у першому наближенні продовжимо реалізацію спектральної техніки.

Згідно спектрального підходу [17] маємо послідовно для полів швидкостей та тиску такі залежності для хвиль на скінченій глибині d

$$\upsilon_{wx}(x,z,t) = \sum_{i=1}^{N} \delta_i c_i \frac{\cosh[k_i(z+d)]}{\cosh k_i d} \cos(k_i x + \sigma_i t + \alpha_i),$$

$$\upsilon_{wz}(x,z,t) = \sum_{i=1}^{N} \delta_i c_i \frac{\sinh[k_i(z+d)]}{\cosh k_i d} \sin(k_i x + \sigma_i t + \alpha_i),$$
(2.23)

$$p_w(x,z,t) = -\rho g \left[ z - \sum_{i=1}^N a_i \frac{\cosh[k_i(z+d)]}{\cosh k_i d} \cos(k_i x + \mathbf{\sigma}_i t + \mathbf{\alpha}_i) \right], \quad (2.24)$$

де  $z \leq 0$  – вертикальна координата заглиблення; N – число елементарних спектральних гармонік з амплітудами та фазами  $a_i$ ,  $\alpha_i$ ;  $\delta_i = a_i k_i$ ,  $c_i = \sigma_i / k_i$  – крутість та фазова швидкість елементарної гармоніки з коловою частотою  $\sigma_i$  та хвильовим числом  $k_i$ . **2.3.1.5.** Визначення локальних пакетних характеристик нерегулярних вітрових хвиль. Перш ніж перейти до реалізації нелінійного наближення, спочатку отримаємо локальні пакетні характеристики у хвильовій поверхні  $\zeta_w$  та поверхневого потенціалу швидкостей  $\phi_w^s$ : обвідну амплітуд  $a_w$  та модуляцію фаз  $\psi_{\phi}$  потенціалу швидкостей  $\phi_w^s$ : обвідну амплітуд  $a_{\phi}$  та модуляцію фаз  $\psi_{\phi}$  потенціалу швидкостей. Це дозволить визначити далі локальні значення колової частоти  $\sigma$ , хвильового числа k, крутості видимих хвиль  $\delta_w$ , які входять у нелінійні залежності для хвильового профілю [55], та перевизначити похідні за часом від поверхневого потенціалу швидкостей  $\phi_w^s$  та хвильового профілю  $\zeta_w$  через похідні за просторовою координатою x при нелінійному розв'язку крайової задачі теорії хвиль на воді.

Загальною методикою визначення обвідних амплітуд  $a_w(x,t)$ ,  $a_{\phi}(x,t)$ , фазових координат  $\theta_w(x,t)$ ,  $\theta_{\phi}(x,t)$  нерегулярних вітрових хвиль та потенціалу швидкостей є метод Гільберта [59, 103, 116], відповідно до якого фізичний процес  $\zeta_w(x,t)$  та скалярна функція  $\phi_w(x,t)$  є дійсними частинами комплексних функцій  $\eta(x,t) = [\zeta_w(x,t) + i\xi_w(x,t)]$  та  $\Phi^s(x,t) = [\phi_w(x,t) + i\phi_w(x,t)]$ , відповідно. Для визначення дійсних та уявних частин зазначених функцій скористаємось інтегральним перетворенням (Гільберта) для кожного фіксованого моменту часу t:

для хвильового профілю

$$\zeta_w(x,t) = \frac{1}{\pi} \mathbf{v}.\mathbf{\rho}. \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\xi_w(x,x')}{x'-x} \, dx' = \sum_{i=1}^{N} a_i \cos(\mathbf{\sigma}_i t + k_i x + \mathbf{\alpha}_i), \qquad (2.25)$$

$$\xi_w(x,t) = \frac{1}{\pi} \mathbf{v}.\mathbf{\rho}. \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\zeta_w(x,x')}{x'-x} \, dx' = \sum_{i=1}^{N} a_i \sin(\mathbf{\sigma}_i t + k_i x + \mathbf{\alpha}_i), \qquad (2.26)$$

та аналогічно для поверхневого потенціалу швидкостей

$$\phi_w(x,t) = -g \sum_{i=1}^N \frac{a_i}{\sigma_i} \sin(\sigma_i t + k_i x + \alpha_i), \qquad (2.27)$$

$$\varphi_w(x,t) = -g \sum_{i=1}^N \frac{a_i}{\sigma_i} \cos(\sigma_i t + k_i x + \alpha_i).$$
(2.28)

Тоді при визначені фізичного процесу **η** та скалярної функції **Ф** в амплітуднофазовому вигляді

$$\left\{ \begin{matrix} \zeta \\ \xi \end{matrix} \right\}_w (x,t) = a_w(x,t) \left\{ \begin{matrix} \cos \\ \sin \end{matrix} \right\} \mathbf{\theta}_w(x,t), \ \left\{ \begin{matrix} \phi \\ \varphi \end{matrix} \right\} (x,t) = -a_\phi(x,t) \left\{ \begin{matrix} \sin \\ \cos \end{matrix} \right\} \mathbf{\theta}_\phi(x,t), \quad (2.29)$$

обвідні амплітуд  $a_w(x,t)$ ,  $a_{\phi}(x,t)$  та повні фази  $\theta_w(x,t)$ ,  $\theta_{\phi}(x,t)$  будуть дорівнювати [59, 103]

$$a_w(x,t) = \sqrt{\zeta_w^2 + \xi_w^2}, \ \mathbf{\theta}_w(x,t) = \arctan(\xi_w, \zeta_w)|_{2\pi},$$
 (2.30)

$$a_{\phi}(x,t) = \sqrt{\phi_w^2 + \phi_w^2}, \ \theta_{\phi}(x,t) = \arctan\left(\phi_w, \phi_w\right)|_{2\pi}.$$
(2.31)

Розрахунки за формулами (2.29)–(2.31) можна виконувати при будь-яких значеннях просторової x та часової t координат.

Повна фаза, що визначається виразами (2.30) та (2.31), включає у себе значення середньої фази  $\theta_0 = \langle k \rangle x + \langle \sigma \rangle t$  та значення модуляції фаз  $\psi(x,t)$  і дорівнює  $\theta = \theta_0 + \psi$ . Це дозволяє представити локальні значення колової частоти  $\sigma(x,t)$  та хвильового числа k(x,t), що дорівнюють  $\sigma = \partial \theta / \partial t$  та  $k = \partial \theta / \partial x$ , як суму постійного середнього значення та флюктуаційної складової у вигляді  $\sigma(x,t) = \langle \sigma \rangle + \sigma_f(x,t), k(x,t) = \langle k \rangle + k_f(x,t), де \langle \sigma \rangle = 2\pi/T_c, \langle k \rangle = 2\pi/\lambda_c, \sigma_f = \partial \psi / \partial t, k_f = \partial \psi / \partial x$ . Залишається визначити локальне значення крутизни хвильового схилу  $\delta_w(x,t) = k_w(x,t) \cdot a_w(x,t)$  і відповідне його середнє значення  $\langle \delta \rangle = \langle k \rangle \langle a \rangle$ , де  $\langle a \rangle = 0,31h_s$ , а також визначити величини:  $a_{wx}, a_{\phi x}, a_{wt}, a_{\phi t}$  — похідні обвідної амплітуд за повздовжньою координатою x та часом t;  $\psi_{wx}, \psi_{\phi x}, \psi_{wt}, \psi_{\phi t}$  — відповідні похідні модуляційних складових фаз. Для визначення останньої групи локальних значень похідних обвідних амплітуд та модуляційних складових фаз потрібно продиференціювати вирази у (2.30) та (2.31), що дає остаточно

$$a_{wx,t}(x,t) = \frac{\zeta \zeta_{x,t} + \xi \xi_{x,t}}{a_w}, \quad k_w, \mathbf{\sigma}_w(x,t) = \frac{\xi_{x,t} \zeta - \xi \zeta_{x,t}}{a_w^2}, \\ \mathbf{\psi}_{wx,t} = k_w, \mathbf{\sigma}_w(x,t) - \langle k, \mathbf{\sigma} \rangle, \qquad \left. \right\}$$
(2.32)

де  $\zeta_x, \zeta_t, \xi_x, \xi_t, \phi_x, \phi_t, \phi_x$  та  $\phi_t$  — похідні складових комплексних функцій хвильового профілю та потенціалу швидкостей, які визначаються аналітичним диференціюванням (2.25)–(2.28) і мають вигляд

$$\begin{aligned} \zeta_{x,t} &\equiv -\sum a_i \left\{ k_i, \mathbf{\sigma}_i \right\} \sin \theta_i, \quad \xi_{x,t} \equiv \sum a_i \left\{ k_i, \mathbf{\sigma}_i \right\} \cos \theta_i, \\ \left\{ \mathbf{\varphi} \right\}_x &\equiv g \sum \frac{a_i k_i}{\mathbf{\sigma}_i} \left\{ \substack{\cos \\ \sin } \right\} \theta_i, \qquad \left\{ \mathbf{\varphi} \right\}_t \equiv g \sum a_i \left\{ \substack{\cos \\ \sin } \right\} \theta_i, \end{aligned} \end{aligned} \right\} \tag{2.34}$$

де  $\boldsymbol{\theta}_i = \boldsymbol{\sigma}_i t + k_i x + \boldsymbol{\alpha}_i.$ 

**2.3.1.6. Залежності для розрахунку переносу енергії хвиль.** Відомо, що потенціальна та кінетична енергія переноситься разом з хвилями під час їх руху. Залежності для такого переносу можна знайти у роботах у [62, 100], а у даній роботі приведемо тільки основні формули, які знадобляться нам у подальшому дослідженні енергетичних показників ХвПЕ під час їх взаємодії з гідродинамічними полями.

Для щільності потенціальної енергії  $E_p = \rho g z$  рідини, що знаходиться у просторовому вікні площини  $\Delta y \Delta z$  та рухається зі швидкістю  $\mathbf{v}_{wx}$  уздовж вісі Oxв одиницю часу  $\Delta t$ , перенесення буде дорівнювати  $\rho g z \mathbf{v}_{wx} \Delta z \Delta y \Delta t$ . Інтегруючи даний вираз за глибиною від дна акваторії d до поверхні хвильового профілю  $\zeta_w$ отримаємо інтеграл для переносу потенціальної енергії

$$f_1 = \int_{-d}^{\zeta_w} \rho g z \mathfrak{v}_{wx} dz \cdot \Delta y \Delta t.$$
 (2.35)

Аналогічно для щільності кінетичної енергії  $E_k = \frac{1}{2} \rho \upsilon^2$  можна отримати інтеграл переносу

$$f_2 = \int_{-d}^{\zeta_w} \left(\frac{1}{2}\rho v^2\right) v_{wx} dz \cdot \Delta y \Delta t.$$
(2.36)

Також перенесення енергії рідини відбувається за рахунок роботи, що виконує гідродинамічний тиск *p* у напрямі руху хвиль. Тоді третій інтеграл для переносу енергії буде дорівнювати

$$f_3 = \int_{-d}^{\zeta_w} p \mathbf{v}_{wx} dz \cdot \Delta y \Delta t = \int_{-d}^{\zeta_w} (-\mathbf{\rho} g z + p_w) \mathbf{v}_{wx} dz \cdot \Delta y \Delta t.$$
(2.37)

Загальне перенесення енергії  $P_e$  буде дорівнювати сумі інтегралів (2.35)–(2.37)

$$P_{e} = \int_{-d}^{\zeta_{w}} \rho g z \mathfrak{v}_{wx} dz + \int_{-d}^{\zeta_{w}} \left(\frac{1}{2}\rho \mathfrak{v}^{2}\right) \mathfrak{v}_{wx} dz + \int_{-d}^{\zeta_{w}} (-\rho g z + p_{w}) \mathfrak{v}_{wx} dz =$$

$$= \int_{-d}^{\zeta_{w}} \left(\frac{1}{2}\rho \mathfrak{v}^{2}\right) \mathfrak{v}_{wx} dz + \int_{-d}^{\zeta_{w}} p_{w} \mathfrak{v}_{wx} dz.$$
(2.38)

Перший інтеграл у правій частині рівняння (2.38) має третій порядок точності відносно нескінченно малих амплітуд і тому відкидається [100]. Розрахунок інтегралу, що залишився дає наступний вираз для переносу енергії хвиль в одиницю часу на одиницю довжини рідини

$$P_e = Ec_g, \tag{2.39}$$

де  $E = \frac{1}{2}\rho g a^2$ ,  $c_g = n\sigma/k$  – групова швидкість,  $n = \frac{1}{2}(1 + 2kd/\sinh(2kd))$  та  $\sigma$  і k колова частота та хвильове число, відповідно [100].

**2.3.2. Нелінійне моделювання хвильової поверхні.** Лінійне наближення не враховує нелінійні ефекти, які властиві вітровим хвилям і які, принаймні візуально, призводять до асиметрії хвильового профілю, перевертання та руйнації гребенів крутих хвиль (див. рис. 2.4).



Рис. 2.4. Приклади профілів нелінійних хвиль; — хвиля Стокса, — вітрова хвиля

Для розробки моделі нелінійного наближення використаємо результати досліджень для періодичних хвиль Стокса і груп хвиль скінченої амплітуди [54,58,62] та сформулюємо послідовність дій при його реалізації. У початковий момент часу  $t_0$  приймається лінійна спектральна модель, з якої визначаються локальні значення крутості хвиль і розраховується нелінійний профіль хвиль. Потім розраховують поверхневе поле швидкості та його зміну за глибиною. Для наступного часу  $t_0 + \Delta t$  хвильовий профіль визначається чисельним інтегруванням рівняння  $\partial \zeta_w / \partial t = \partial / \partial x \int_{-d}^{\zeta_w} \phi_x dz$ , яке випливає з інтегрування рівняння нерозривності та кінематичних граничних умов на хвильовій поверхні. Далі обчислення повторюються у наведеному вище порядку для першого кроку за часом.

**2.3.2.1. Нелінійне моделювання нерегулярної хвильової поверхні.** Для перерахунку на нелінійний профіль, по-перше, виконується перехід до крутості повного хвильового профілю у нелінійному наближенні  $\delta_w^l \to \delta_w^{nl}$  за формулою [127]

$$\delta_w^{nl}(x) = \delta_w^l \left(1 + \frac{1}{2}\delta_w^{l\,2} + \frac{7}{3}\delta_w^{l\,4}\right),\tag{2.40}$$

де  $\delta^l_w = a_w \langle k \rangle$ ,  $a_w$  – обвідна амплітуд, що визначається з (2.30).

Далі, до основної гармоніки згідно (2.29) додаються зв'язані кратні гармоніки з певними амплітудами та фазами [55]:

$$\zeta_w^{nl}(x,t) = a_w \cos(\theta_0 + \psi) + \sum_{n=2}^M a_n \cos(n\theta_0 + n\psi + \alpha_n), \ M \sim 20 - 25, \qquad (2.41)$$

де  $\theta_0 = \langle k \rangle x + \langle \sigma \rangle t$  – середня фаза, визначена за середньою частотою  $\langle \sigma \rangle = 2\pi/T_c$ та хвильовим числом  $\langle k \rangle$ ;  $\psi$  – модуляція фази;  $a_n(x,t)$ ,  $\alpha_n(x,t)$  повільно змінні за часом та координатою амплітуди та збурення фаз кратних гармонік, що залежать від локальних характеристик хвиль у пакетах  $a_w, \sigma_w, k_w, \delta_w^{nl}$  крупно-масштабної компоненти хвильового поля.

Для амплітуд  $a_n$  і додаткових фаз кратних зв'язаних гармонік  $\alpha_n$  у (2.41) у роботі [55] були отримані наступні залежності

$$a_n = a_n^l \cdot a_n^r, \ \mathbf{\alpha}_n = \mathbf{\alpha}_n^l + \mathbf{\alpha}_n^r, \tag{2.42}$$

$$a_{n}^{l} = a_{w} \left(\boldsymbol{\delta}_{w}^{nl}\right)^{n-1},$$

$$a_{n}^{r} = \begin{cases} \mathbf{v}_{n}^{o} \left(1 + \mathbf{v}_{n}^{\prime} \left(\boldsymbol{\delta}_{w}^{nl}\right)^{2}\right), & npu \ n = 2, \dots, 4, \\ \exp \left(l^{o} + l'\hat{n} + l''\hat{n}^{2}\right), & npu \ n = 5, \dots, M, \end{cases}$$

$$l^{o} = 1,70 \left(1 - 1,5 \left(\boldsymbol{\delta}_{w}^{nl}\right)^{2} - 9,5 \left(\boldsymbol{\delta}_{w}^{nl}\right)^{4}\right), \quad l' = 14,5 \left(1 - 2 \left(\boldsymbol{\delta}_{w}^{nl}\right)^{2}\right), \\ l'' = 2,05 \left(1 - \left(\boldsymbol{\delta}_{w}^{nl}\right)^{2}\right), \quad \hat{n} = (n-5)/15, \end{cases}$$

$$(2.43)$$

де  $\{\mathbf{v}_n^o\}_2^4 = (\frac{1}{2}; \frac{3}{8}; \frac{1}{3})$  – базові стоксівські коефіцієнти [62], а для апроксимаційних множників  $\mathbf{v}_n'$  у [55] були отримані значення  $\{\mathbf{v}_n'\}_2^4 \sim (11,3; 22,6; 54,7)$ .

Фази кратних гармонік  $\alpha_n$  розраховуються за формулами [55]

$$\alpha_n^l \approx -(0, 2...0, 3), \ \alpha_n^r = (n-1)\alpha_n', \ \alpha_n' \approx (0, 7...0, 9), \ n = 2...M.$$
 (2.44)

Таким чином, дана модель повинна трансформувати лінійні нерегулярні хвилі у нелінійні з укрученим та асиметричним хвильовим профілем без ефектів перевертання та руйнування гребенів (див. рис. 2.4).

2.3.2.2. Метод півзворотньої задачі для нелінійних хвиль на воді. На наступному етапі нелінійного наближення потрібно розрахувати гідродинамічні поля швидкостей руху рідини на хвильовій поверхні. Для цього розглянемо метод пів зворотньої задачі, який було розроблено у роботі [55] для розрахунку зазначених полів швидкостей у сильно нелінійних пакетах хвиль на глибокій воді та узагальнимо його на загальний випадок нерегулярних хвиль з довільним спектром у шельфовій зоні з обмеженою глибиною моря.

В основі методу півзворотньої задачі лежить трансформація нелінійної крайової задачі теорії хвиль на воді, у результаті чого похідні за часом від потенціалу швидкостей  $\phi_w$  та хвильового профілю  $\zeta_w$  при нелінійному розв'язку враховуються перевизначенням відповідних похідних за просторовою координатою x. Це дає змогу розв'язати рівняння, які входять у кінематичні та динамічні граничні умови, відносно похідних  $\partial \phi_w / \partial x$  та  $\partial \phi_w / \partial z$ 

$$\frac{\partial \zeta_w}{\partial t} - \frac{\partial \phi_w}{\partial x} \frac{\partial \zeta_w}{\partial x} - \frac{\partial \phi_w}{\partial z} = 0, \ npu \ z = \zeta_w,$$

$$\frac{\partial \phi_w}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial \phi_w}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \phi_w}{\partial z} \right)^2 \right] + g\zeta_w = 0, \ npu \ z = \zeta_w,$$
(2.45)
та визначити поверхневі проекції швидкосте<br/>й $\mathbf{v}_x^s,\,\mathbf{v}_z^s.$ 

Відповідно до [55], після заміни незалежних фізичних змінних – повздовжньої координати x та координати часу t новими змінними – середньою фазою  $\theta_0(x,t)$ , повільною груповою повздовжньою координатою  $\xi(x,t) = \varepsilon(\langle k \rangle x + \frac{1}{2} \langle \sigma \rangle t)$  і повільним часом еволюції груп хвиль  $\tau(t) = \frac{1}{2} \varepsilon^2 \langle \sigma \rangle t$ , де  $\varepsilon \ll 1$  – параметр групової структури, похідні від потенціалу швидкостей будуть мати вигляд

$$\phi_{wx} = \langle k \rangle \left( \phi_{w\theta_0} + \epsilon \phi_{w\xi} \right),$$

$$\phi_{wt} = \langle \sigma \rangle \left( \phi_{w\theta_0} + \frac{1}{2} \epsilon \phi_{w\xi} + \frac{1}{2} \epsilon^2 \phi_{w\tau} \right) = \langle c \rangle \phi_{wx} - \frac{1}{2} \epsilon \langle \sigma \rangle \left( \phi_{w\xi} - \epsilon \phi_{w\tau} \right).$$
(2.46)

Розглянувши аналогічні похідні для хвильового профілю  $\zeta_w$ , можна перевизначити похідні за часом t від потенціалу  $\phi_w$  та хвильової поверхні  $\zeta_w$  у граничних умовах (2.45) через відповідні похідні за просторовою координатою x

$$\Phi_{wt}^{s} = \langle c \rangle \left( \Phi_{wx}^{s} - \frac{1}{2} \varepsilon \langle k \rangle \left( \left[ \Phi_{wa}^{s} a_{\phi\xi} + \Phi_{w\psi}^{s} \psi_{\phi\xi} \right] - \varepsilon \left[ \Phi_{wa}^{s} a_{\phi\tau} + \Phi_{w\psi}^{s} \psi_{\phi\tau} \right] \right) \right),$$

$$\zeta_{wt} = \langle c \rangle \left( \zeta_{wx} - \frac{1}{2} \varepsilon \langle k \rangle \left( \left[ \zeta_{wa} a_{w\xi} + \zeta_{w\psi} \psi_{w\xi} \right] - \varepsilon \left[ \zeta_{wa} a_{w\tau} + \zeta_{w\psi} \psi_{w\tau} \right] \right) \right),$$

$$(2.47)$$

де  $\langle c \rangle = \langle \mathbf{\sigma} \rangle / \langle k \rangle$ – середня фазова швидкість руху хвиль.

При переході до хвильового руху з довільним спектром далі визначимо потенціал за формулами (2.29), а похідні за повільними змінними від амплітуд та фази – за формулами

$$a_{\xi} = \frac{a_x}{\varepsilon \langle k \rangle}, \quad a_{\tau} = \frac{2}{\varepsilon^2 \langle \sigma \rangle} \left( a_t - \frac{\langle c \rangle a_x}{2} \right), \psi_{\xi} = \frac{\psi_x}{\varepsilon \langle k \rangle}, \quad \psi_{\tau} = \frac{2}{\varepsilon^2 \langle \sigma \rangle} \left( \psi_t - \frac{\langle c \rangle \psi_x}{2} \right).$$
(2.48)

Тоді вирази в (2.47) запишуться так

$$\phi_{wt}^{s} = \langle c \rangle \phi_{wx}^{s} - \left[ \phi_{wa}^{s} \left( \langle c \rangle a_{\phi x} - a_{\phi t} \right) + \phi_{w\psi}^{s} \left( \langle c \rangle \psi_{\phi x} - \psi_{\phi t} \right) \right] = 
= \langle c \rangle \phi_{wx}^{s} - \delta \phi, 
\zeta_{wt} = \langle c \rangle \zeta_{wx} - \left[ \zeta_{wa} \left( \langle c \rangle a_{wx} - a_{wt} \right) + \zeta_{w\psi} \left( \langle c \rangle \psi_{wx} - \psi_{wt} \right) \right] = 
= \langle c \rangle \zeta_{wx} - \delta \zeta,$$
(2.49)

де похідні  $\phi_{wa}^{s}, \phi_{w\psi}^{s}, \zeta_{wa}$  та  $\zeta_{w\psi}$  у (2.49) визначаються аналітичним диференціюванням виразів (2.29) і  $\delta \phi = \sin \theta_{\phi} (\langle c \rangle a_{\phi x} - a_{\phi t}) + a_{\phi} \cos \theta_{\phi} (\langle c \rangle \psi_{\phi x} - \psi_{\phi t}), \delta \zeta = \cos \theta_{w} (\langle c \rangle a_{wx} - a_{wt}) - a_{w} \sin \theta_{w} (\langle c \rangle \psi_{wx} - \psi_{wt})$  та  $\theta = \theta_{0} + \psi$ .

Якщо у граничних умовах (2.45) замінити похідну  $\phi_{wt}$  та визначити вертикальну проекцію швидкостей  $v_x^s$  з першої кінематичної граничної умови  $v_z^s = \zeta_{wt} + v_x^s \zeta_{wx}$ , підставити у другу динамічну граничну умову, то отримаємо наступне квадратне рівняння для горизонтальної проекції швидкості  $v_x^s$  [55] та його розв'язок

$$v_x^{s2} + 2pv_x^s + q = 0,$$
  
 $v_x^s = -p + \sqrt{p^2 - q},$ 
(2.50)

де позначено

$$p = \frac{\delta P}{P_+}, q = \frac{\zeta_{wt}^2 + G}{P_+},$$

$$\delta P = \langle c \rangle + \zeta_{wt} \zeta_{wx}, G = 2(g\zeta_w + \delta\phi), P_+ = 1 + \zeta_{wx}^2.$$
(2.51)

Остаточно залежності для проекцій швидкостей  $\mathbf{v}_x^s$  та  $\mathbf{v}_z^s$  на поверхні рідини можна розрахувати за допомогою наступних виразів

$$\mathbf{v}_x^s = \frac{\sqrt{\delta P^2 - P_+(\zeta_{wt}^2 + G)} - \delta P}{P_+},$$

$$\mathbf{v}_z^s = \zeta_{wt} + \mathbf{v}_x^s \zeta_{wx}.$$
(2.52)

2.3.2.3. Залежності для розрахунків полів швидкостей та хвильового тиску з глибиною у нелінійному наближенні. Отримані у попередньому підрозділі залежності у (2.52) для поверхневих проекцій швидкостей дозволяють представити комплексну швидкість на хвильовій поверхні як  $\tilde{v}_w^s = v_x^s - iv_z^s$ . Тоді, за допомогою інтегралу Коші [27,39], представимо поле швидкості з глибиною рідини  $\tilde{v}_w$ 

$$\tilde{\upsilon_w}(\tilde{z}) = \frac{-i}{2\pi} \oint_{\substack{(z=\zeta_w)\\(z=-d)}} \frac{\upsilon_x^s - i\upsilon_z^s}{\tilde{\zeta} - \tilde{z}} d\tilde{\zeta}, \quad \tilde{z} = x + iz, \quad \tilde{\zeta} \in \zeta_w,$$
(2.53)

де  $\tilde{z}$  – фіксована точка у воді,  $\tilde{\zeta} = \xi + i\zeta_w$  – поточна точка на хвильовій поверхні.

Для чисельного розрахунку інтегралу Коші (2.53) виконаємо деякі перетворення з його підінтегральним виразом. Якщо виокремити дійсну та уявну частину  $(\xi - x) + i(\zeta - z) = \Delta \xi + i\Delta \zeta$  у знаменнику, а потім помножити його та чисельник на відповідну комплексну спряжену змінну  $\Delta \xi - i\Delta \zeta$ , то після деяких перетворень можна записати проекції швидкостей у наступному вигляді

$$\mathfrak{v}_{wx,z} = \frac{1}{2\pi} \oint_{\substack{(z=\zeta_w)\\z=-d}} \frac{\mathfrak{v}_{wx}^s d_{Im,Re}^s \mp \mathfrak{v}_{wz}^s d_{Re,Im}^s}{\Delta r^2}, \qquad (2.54)$$

де позначено  $\Delta r^2 = \Delta \xi^2 + \Delta \zeta^2$ та

$$d_{Re}^{s} = \Delta \xi d\xi + \Delta \zeta d\zeta = (\xi - x)d\xi + (\zeta - z)d\zeta;$$
  

$$d_{Im}^{s} = \Delta \xi d\zeta - \Delta \zeta d\xi = (\xi - x)d\zeta - (\zeta - z)d\xi.$$
(2.55)



Далі з рис. 2.5 видно, що якщо за основу брати диференціал  $d\xi$ , то тоді на хвильовій поверхні маємо  $d\zeta$  =  $\zeta_{wx}d\xi$ . Дана формула не буде працювати при  $\zeta_{wx} \gg 1$  коли матиме місце сильне укручування гребенів хвиль.

Рис. 2.5. Диференціали  $d\zeta$  та  $d\xi$  в околі хвильового профілю  $\zeta_w$ тньої задачі, її значення знаходиться у діапазоні [-1; 1] (див. рис. 2.6) і тому

зазначена особливість не мала місця.

У той же час, як показали розрахунки похідної  $\zeta_{wx}$  у методі півзворо-

Wave Elevation (Non-Linear theory)



Рис. 2.6. Приклад хвильового профілю та його градієнту  $\zeta_{wx}$ 

Тому остаточно для проекцій швидкостей маємо залежності

$$\upsilon_{wx} = \frac{1}{2\pi} \oint_{\substack{z=\zeta_w\\z=-d}} [\upsilon_{wx}^s (\Delta\xi\zeta_x - \Delta\zeta) - \upsilon_{wz}^s (\Delta\xi + \Delta\zeta\zeta_x)] \frac{d\xi}{\Delta r^2}, \\
\upsilon_{wz} = \frac{1}{2\pi} \oint_{\substack{z=\zeta_w\\z=-d}} [\upsilon_{wx}^s (\Delta\xi + \Delta\zeta\zeta_x) + \upsilon_{wz}^s (\Delta\xi\zeta_x - \Delta\zeta)] \frac{d\xi}{\Delta r^2}.$$
(2.56)

Для інтегрування (2.56) була застосована схема, яка представлена на рис. 2.7. Відповідно до схеми шлях інтегрування проходив за годинниковою стрілкою. Загальний інтеграл  $\langle \cdots \rangle_S$  для відповідних проекцій швидкостей потрібно визначати, як суму інтегралів  $\langle \cdots \rangle_S = \langle \cdots \rangle_{S_w} + \langle \cdots \rangle_{S_d} + \langle \cdots \rangle_{S_{\infty}^+} + \langle \cdots \rangle_{S_{\infty}^-}$ . Для інтегралів  $\langle \cdots \rangle_{S_{\infty}^{\pm}}$  маємо  $1/\Delta r^2 \to 0$  і тому далі їх відкидаємо. Інтеграл  $S_d$  має  $d\xi < 0$  і тому остаточно запишемо загальний інтеграл як  $\langle \cdots \rangle_S = \langle \cdots \rangle_{S_w} - \langle \cdots \rangle_{S_d}$ .



Рис. 2.7. Схема розрахунку інтегралів для поверхневих проекцій швидкостей часток рідини

Поле гідродинамічного тиску p у хвилях визначається відомим інтегралом Коші-Лагранжа [62, 55]  $p = -\rho[\phi_{wt} + \frac{1}{2}(\nabla \phi_w \cdot \nabla \phi_w) + gz]$ , який, після заміни похідної за часом  $\phi_{wt}$  згідно з (2.49), може бути переписано у вигляді

$$p_w \approx -\rho[\langle c \rangle \mathbf{v}_x + \delta \phi + \frac{1}{2} \left( \mathbf{v}_x^2 + \mathbf{v}_z^2 \right) + gz].$$
 (2.57)

Таким чином, розроблено метод розрахунку динаміки руху хвильового профілю та полів швидкості і тиску крутих вітрових хвиль з невеликим числом вільних параметрів, що задають конфігурацію хвиль.

## 2.4. Методи дослідження хвильових навантажень на елементи ХвПЕ

На шляху розрахунків та аналізу роботи ХвПЕ наступною важливою задачею є визначення навантажень, які вони отримують при взаємодії з гідродинамічними полями у хвилях. Як було зазначено в оглядовому розділі, для її розв'язку може допомогти спорідненість методів визначення навантажень на робочі елементи Хв-ПЕ та суден, морських плавучих споруд, засобів океантотехніки, тощо. Зокрема, для дослідження роботи тонких елементів, будемо застосовувати теорію Морісона, а для визначення навантажень на плавучі поплавці, ланцюги плотів чи інші занурені коливальні пристрої – теорії Фруда–Крилова та Хаскінда–Ньюмана.

**2.4.1. Класифікація та припущення для ХвПЕ.** Розпочнемо з певної класифікації елементів, які входять до складу ХвПЕ, і далі на основі даної класифікації сформулюємо систему припущень та спрощень при формулюванні нелінійної крайової задачі про збурені хвильові рухи рідини та розрахункових залежностей для гідродинамічних навантажень на елементи ХвПЕ.

Загалом елементи ХвПЕ можна поділити у першу чергу на видовжені (один з розмірів – довжина, значно більший за два інші розміри у поперечному перерізі) та тривимірні елементи (усі три характерні розміри співставні). Далі, видовжені елементи у свою чергу можна поділити на тонкі (їх поперечні розміри значно менші за характерні параметри хвиль, наприклад, висоту та довжину хвиль) та розмірні, поперечні розміри яких співставні із параметрами хвиль. З іншого погляду, елементи ХвПЕ можна поділити на занурені у рідину та поверхневі (що перетинають хвильову поверхню). Загалом на множині занурених елементів додатково можна виділити приповерхневі (близькі до хвильової поверхні) та придонні (близькі до дна акваторії).

Таким чином, при подальшому розгляді кесона, коливальної пластини, поплавця на важелі та ланцюга плотів, кесон слід розглядати як тривимірний занурений придонний елемент, пластину – як занурена система пласких видовжених елементів, поплавець на важелі – як комбінація тонкого зануреного елемента та видовженого розмірного поверхневого елемента та, нарешті, ланцюг плотів – як систему видовжених розмірних поверхневих елементів.

Основною метою наведеної вище класифікації є те, що у рамках наближеного інженерного підходу до розрахунку гідродинамічних навантажень на елементи ХвПЕ неможливо розробити єдину для усіх типів ХвПЕ нелінійну гідродинамічну теорію. Потрібно для кожного типу елементу ХвПЕ, виходячи з його особливостей, приймати відповідні припущення та на їх основі розробляти адаптовані методи розрахунку гідродинамічних навантажень. Тому перейдемо далі до формулювання низки припущень та гіпотез стосовно характеру хвильового руху та ХвПЕ.

1. Як і при розробці гідродинамічних моделей для нерегулярних вітрових хвиль будемо вважати рідину ідеальною, а їх рух – безвихоровим та потенціальним. Тільки для тонких елементів додатково потрібно враховувати в'язковихорову складову гідродинамічних навантажень. Це дасть можливість фактично залишитися у рамках корабельної гідродинаміки з відповідними підходами та методами у розрахунку гідродинамічних навантажень [6,50,67].

2. Відштовхуючись від гіпотези Крилова-Фруда щодо незбуреного хвильового руху доцільно виокремити у потенціалі швидкостей сумарного руху рідини Ф потенціал швидкостей набігаючіх вітрових хвиль Ф<sub>w</sub> за схемою [55] Φ = (Φ - Φ<sub>w</sub>) + Φ<sub>w</sub> = Φ<sub>w</sub> + Φ<sup>0</sup>, де Φ<sup>0</sup> – потенціал збуреного хвильового руху рідини. Це дасть можливість поділити гідромеханічні сили на сили Крилова-Фруда та збурені дифракцією та коливанням ХвПЕ сили Хаскінда-Ньюмана з відповідними методами їх розрахунку.

3. При коливаннях рідини нелінійні ефекти головним чином мають місце в околі границь області руху – у першу чергу хвильової поверхні та зануреної поверхні елементів ХвПЕ. Оскільки у рамках наближеного підходу до розрахунку гідродинамічних навантажень коректно врахувати нелінійні ефекти на вільній поверхні практично не можливо і тому будемо нехтувати усіма нелінійними членами у граничних умовах на хвильовій поверхні. Слід зазначити, що врахування нелінійних ефектів на хвильовій поверхні призводить до укручування, перевертання і нестримного руйнування гребенів збурених хвиль, що дуже складно моделювати навіть в чисельних підходах [76,109]. Проте нелінійні ефекти на зануреній поверхні елементів ХвПЕ, пов'язані зі зміною за часом цієї поверхні, будуть відповідним чином враховані, виходячи з технологій розроблених у корабельній гідродинаміці [50,55,67].

4. Для занурених та тонких елементів ХвПЕ у першому наближенні можна знехтувати хвильовими ефектами на вільній поверхні від їх коливання і, таким чином, відкинути сили хвильового демпфування у загальному балансі гідромеханічних сил. Як відомо [5, 6, 50, 67], демпфуючі сили відіграють важливу роль тільки у досить вузькій резонансній частотні смузі вимушених коливань. З іншого погляду, коректна постановка крайових задач для врахування хвильових ефектів потребувала б значних зусиль з їх розв'язку, що є передчасним на першому етапі дослідження з метою виявлення перспективних подальших напрямків у дослідженні ХвПЕ.

5. Для видовжених елементів ХвПЕ очевидним є залучення гіпотези плоского їх обтікання у площині поперечних перерізів, яка добре себе зарекомендувала в корабельній гідродинаміці [50, 55, 67]. Тому гідродинамічні навантаження на такі елементи будуть розраховані інтегруванням за довжиною інтенсивностей навантажень на поперечні перерізи видовжених елементів ХвПЕ, що є суттєвим спрощенням у технології розрахунків.

2.4.2. Модифікація та спрощення розрахункових залежностей для гідродинамічних сил. Звернемося далі до базових залежностей, які визначають розрахунки гідродинамічних навантажень на елементи ХвПЕ і розпочнемо з аналізу гідромеханічного тиску у збуреній рідині. Для потенціального наближення тиск визначаємо інтегралом Коші-Лагранжа  $p = -\rho \left( \partial \Phi / \partial t + \frac{1}{2} |\nabla \Phi|^2 + gz \right)$ , який після підстановки залежності  $\Phi = \Phi_w + \Phi^0$  розщеплюється на дві складові  $p = p_w + p^0$ , де  $p_w$  – незбурений тиск у набігаючих на ХвПЕ вітрових хвилях та  $p^0$  – збурений тиск через ефекти дифракції та випромінення хвиль в околі ХвПЕ. Хвильову складову  $p_w$  було представлено вище, а збурений тиск у свою

чергу можна записати наступним чином

$$p^{0} = \tilde{p}^{0} + \Delta p^{0}, \qquad (2.58)$$

де  $\tilde{p}^0$  – лінійна відносно збуреного потенціалу  $\Phi^0$  складова тиску та  $\Delta p^0$  – відповідно нелінійна (квадратична) складова тиску, які визначаються залежностями (у змінних x, z площини руху пласких вітрових хвиль)

$$\tilde{p}^0 = -\rho \frac{\partial \Phi^0}{\partial t}; \qquad (2.59)$$

$$\Delta p^{0} = -\frac{1}{2} \rho \left[ \left( \frac{\partial \Phi^{0}}{\partial x} \right)^{2} + \left( \frac{\partial \Phi^{0}}{\partial y} \right)^{2} + \left( \frac{\partial \Phi^{0}}{\partial z} \right)^{2} \right] - \rho \left( \upsilon_{wx} \frac{\partial}{\partial x} + \upsilon_{wz} \frac{\partial}{\partial z} \right) \Phi^{0}. \quad (2.60)$$

У даній роботі елементи ХвПЕ розташовані за довжиною або у площині руху вітрових хвиль *Oxz* (плотики), або перпендикулярно до даної площини *Oyz* (поплавці), а інші більш загальні розташування не розглядаються. Далі при отриманні залежностей будемо розглядати тільки другий варіант розташування і тільки остаточні результати адаптуємо потім до першого більш простого варіанту.

В околі поперечного перерізу елементу ХвПЕ (у змінних x, z) квадрат модуля швидкостей у складовій  $\Delta p^0$  можна записати у локальних змінних (n, S) (див. рис. 2.8)

$$|\nabla\Phi^{0}|^{2} = \left[ \left( \frac{\partial\Phi^{0}}{\partial x} \right)^{2} + \left( \frac{\partial\Phi^{0}}{\partial z} \right)^{2} \right] = \left[ \left( \frac{\partial\Phi^{0}}{\partial n} \right)^{2} + \left( \frac{\partial\Phi^{0}}{\partial S} \right)^{2} \right], \quad (2.61)$$

де нормальна проекція збуреного поля швидкостей  $v_n^0 \equiv \partial \Phi^0 / \partial n$  визначається з граничних умов непротікання на контурі елемента S(t) (див. нижче), а поздовжия проекція  $\partial \Phi^0 / \partial S$  може бути оцінена наближено інтегруванням уздовж зануреного контура рівняння нерозривності, записаного у змінних  $(n, S) \ \partial^2 \Phi^0 / \partial n^2 + \partial^2 \Phi^0 / \partial S^2 = 0$ 

$$\mathbf{v}_{S}^{0} = \frac{\partial \Phi^{0}}{\partial S}(S) = \mathbf{v}_{S}^{0}(S_{0}) - \int_{S_{0}}^{S} \frac{\partial}{\partial n} \mathbf{v}_{n}^{0} dS.$$
(2.62)



Рис. 2.8. Локальна система координат на контурі елемента ХвПЕ

У даній формулі невідомими є початкова точка при інтегруванні  $S_0$ , початкове значення дотичної  $v_S^0(S_0)$  та градієнт у напрямку нормалі нормальної швидкості  $\partial v_n^0 / \partial n$ . Оцінка для даних величин буде розглянута нижче при аналізі роботи поверхневих поплавців.

Врахуємо ще наступний нелінійний ефект, пов'язаний з великими відхиленнями елемента ХвПЕ від положення рівноваги. Для схеми на рис. 2.8 дане відхилення визначається переміщеннями центру ваги точки G на величину  $\xi_G(t)$ . Тому далі будемо визначати потенціал  $\Phi^0$  у рухомій системі координат  $G\tilde{x}\tilde{z}$ , де  $\tilde{x} = x - \xi_G(t)$  і похідна за часом зміниться до вигляду  $\partial \Phi^0 / \partial t \to \partial \Phi^0 / \partial t + \xi_G \partial \Phi^0 / \partial \tilde{x}$ . Інші похідні залишаються незмінними.

Наступне питання пов'язане з трансформацією граничних умов для потенціалу  $\Phi^0$  на хвильовій поверхні і на зануреному у рідину контурі ХвПЕ. Для цього аналогічним чином визначимо збурення хвильової поверхні  $\zeta^0$  як суму  $\zeta(x,t) = (\zeta - \zeta_w) + \zeta_w = \zeta_w + \zeta^0$  з припущенням, що таке збурення є відносно малим, тобто  $|\zeta^0| \ll |\zeta_w|$ . Це дає змогу граничні умови на збуреній хвильовій поверхні  $\zeta^0(x,t)$  перенести на незбурену хвильову поверхню  $\zeta_w(x,t)$  та, згідно зробленим припущенням, відкинути у граничних умовах усі нелінійні члени. Тоді остаточно отримаємо добре відому [50, 67] лінійну форму запису граничних умов, проте на рухомій поверхні  $\tilde{z} = \tilde{\zeta}_w(x,t)$ 

$$\frac{\partial \tilde{\zeta}^0}{\partial t} - \tilde{\upsilon}_z^0 = 0, \ \frac{\partial \tilde{\Phi}^0}{\partial t} + g \tilde{\zeta}_0 = 0, \ \tilde{z} = \tilde{\zeta}_w,$$
(2.63)

або

$$\frac{\partial^2 \tilde{\Phi}^0}{\partial t^2} + g \tilde{\Phi}^0 = 0, \ \tilde{z} = \tilde{\zeta}_w.$$
(2.64)

Граничні умови непротікання на контурі поперечного перерізу елементу  $\partial \Phi / \partial n = \mathbf{v}_{bn}$ , де  $\mathbf{v}_{bn}$  – нормальна проекція швидкості коливань точок контуру, остаточно трансформуються до вигляду (у змінних  $G\tilde{x}\tilde{z}$ ).

$$\frac{\partial \Phi^0}{\partial n} = \sum_{j=1,3,4} \mathbf{v}_j C_j; \ C_1 = \cos(n, \tilde{x}), 
C_3 = \cos(n, \tilde{z}), \ C_4 = \tilde{z} \cos(n, \tilde{x}) - \tilde{x} \cos(n, \tilde{z})$$
(2.65)

і відносні швидкості  $v_j$  дорівнюють  $v_1 = \dot{\xi}_0 - (\zeta_0 + \zeta_{G0})\dot{\theta}_0 - v_{wx}; v_3 = \dot{\zeta}_0 - v_{wz};$  $v_4 = \dot{\theta}_0.$ 

Дані граничні умови повинні виконуватися загалом на зануреному у хвилі змінному за часом поперечному контурі поверхні елемента ХвПЕ. Таким чином, для занурених у рідину елементів ХвПЕ занурена поверхня залишиться практично незмінною, але зазнає коливань при роботі ХвПЕ. Для поверхневих елементів моє місце і зміна її зволоженої рідиною частини. Таким чином, зміна за часом зануреної у хвилі поверхні елементу ХвПЕ і є основним нелінійним ефектом, який буде враховано у даній роботі.

Нарешті, третє питання, яке потребує розгляду, це розрахункові залежності безпосередньо для гідродинамічних сил, що діють на елементи ХвПЕ. Загальні формули для головного вектору та головного моменту гідромеханічних сил мають вигляд [50]

$$\vec{P}(t) = -\iint_{S(t)} p\vec{n}dS, \ \vec{M}_0(t) = -\iint_{S(t)} p\left[\vec{r} \times \vec{n}\right] dS,$$
(2.66)

де  $\vec{n}$  – вектор зовнішньої нормалі до миттєвої зволоженої поверхні елементу S(t);  $\vec{r}$  – радіус вектор точки на поверхні S(t) у системі координат інтегрування відносно т. O. Зрозуміло, що для кожного типу ХвПЕ мають значення тільки певні проекції вказаних векторів сил. Наприклад, для придонного кесону потрібна тільки проекція  $P_z$ , а для поверхневого елементу на рис. 2.8 – тільки проекції сили  $P_x$ ,  $P_z$  і моменту  $M_{0y}$  і т. ін.

Підстановка тиску *p* як суми двох складових *p<sub>w</sub>* та *p*<sup>0</sup> породжує дві категорії сил – незбурені елементами сили Крилова–Фруда та сили Хаскінда–Ньюмана, що враховують збурення руху рідини елементами. Тоді відповідно

$$\vec{P} = \vec{P}^{KF} + \vec{P}^{HN}, \ \vec{M}_0 = \vec{M}^{KF} + \vec{M}^{HN},$$
(2.67)

де тепер

$$\vec{P}^{KF}(t) = -\iint_{S(t)} p_w \vec{n} dS, \ \vec{M}_0^{KF}(t) = -\iint_{S(t)} p_w \left[\vec{r} \times \vec{n}\right] dS, \vec{P}^{HN}(t) = -\iint_{S(t)} p^o \vec{n} dS, \ \vec{M}_0^{HN}(t) = -\iint_{S(t)} p^0 \left[\vec{r} \times \vec{n}\right] dS.$$
(2.68)

Для видовжених елементів ХвПЕ розрахунок сил зводиться до визначення вектору інтенсивності гідромеханічного навантаження у площині поперечного перерізу  $\vec{q}_{\perp}(x',t)$  і наступного його інтегруванню уздовж зануреної частини елементу l(t), тобто

$$\vec{P}(t) = \int_{l(t)} \vec{q}_{\perp}(x',t) dx', \ \vec{M}_0(t) = -\int_{l(t)} \vec{q}_{\perp}(x',t) x' dx', \tag{2.69}$$

де x' – поздовжня координата видовженого елементу ХвПЕ і вектор  $\vec{q}_{\perp}$  визначається формулою

$$\vec{q}_{\perp} = -\int_{s(t)} p \vec{n}_{\perp} ds = \vec{q}_{\perp}^{KF} + \vec{q}_{\perp}^{HN}, \qquad (2.70)$$

де  $\vec{n}_{\perp}$  – компонента вектора  $\vec{n}$  у площині поперечного перерізу елементу і також s(t) – миттєва зволожена частина контуру даного перерізу. У випадку виходу перерізу з хвиль (оголення)  $\vec{q}_{\perp} \equiv 0$ , а при повному зануренні інтегрування у (2.69) виконується уздовж повного контуру перерізу *s*.

Для тонких видовжених елементів площа поперечного перерізу є відносно малою і формулу (2.69) можна модифікувати, застосувавши теорему про градієнт [27], тоді

$$\vec{q}_{\perp} = -\iint_{A} \nabla_{\perp} p dA \approx +\rho \iint_{A} \nabla_{\perp} \frac{\partial \Phi}{\partial t} dA = +\rho \iint_{A} \frac{\partial}{\partial t} \vec{v}_{\perp} dA, \qquad (2.71)$$

де індекс " $\perp$ "вказує на компоненти у площині поперечного перерізу і тиск визначено у тільки лінійному наближенні  $p \approx -\rho \partial \Phi / \partial t$ . Через малість площі перерізу A формула (2.71) дає складову сили  $+\rho A \dot{\vec{v}}_{w\perp}$  у формулі Морісона [6].

Розділення гідромеханічних сил на хвильові сили Крилова-Фруда і гідродинамічні сили Хаскінда-Ньюмана має принципове значення, оскільки перші визначаються інтегруванням відомого хвильового тиску, тоді як другі потребують попереднього розв'язку крайової задачі для потенціалу збуреного хвильового руху  $\Phi^0$  щоб отримати відповідні значення збуреного тиску  $p^0$ . Деталі даних розрахунків будуть розглянуті у четвертому розділі даної роботи при аналізі роботи конкретних ХвПЕ, а нижче окреслимо тільки основні моменти на даному шляху.

По-перше, при розрахунках сил Крилова-Фруда можна скористатися як аналітичними підходами, так і чисельними процедурами. Аналітичні підходи у нелінійній задачі при врахуванні ефектів оголення та повного занурення поперечних перерізів ХвПЕ виявляються достатньо трудомісткими і тому у даній роботі інтегрування згідно (2.71) буде виконано чисельними методами у жорстко зв'язаній з елементом системі координат Ox'y'z'. При цьому відповідним чином і хвильовий тиск  $p_w(x, z, t)$  потрібно перевизначити у даній системі координат як  $p_w(x', z', t)$ .

По-друге, для визначення і розрахунку гідродинамічних сил Хаскінда-Ньюмана з урахуванням нелінійних ефектів зміни за часом зануреної у хвилі поверхні елементів ХвПЕ у корабельній гідродинаміці було розроблено методи, які призводять остаточно до оперування змінними за часом гідродинамічними коефіцієнтами – прилученими масами і коефіцієнтами демпфування суднових контурів [50,55]. Застосуємо даний підхід і до елементів ХвПЕ та розглянемо принципові моменти на даному шляху.

У даному підході до уваги приймається тільки лінійна частина збуреного тиску  $\tilde{p}^0$  і підстановка даного тиску згідно (2.59) у формули типу (2.68) буде призводити до інтегралів від похідних за часом збуреного потенціалу  $\Phi^0$ . Принципово важливо винести дану похідну за знаки інтегралу  $\int_{(s)} \partial \Phi^0 / \partial t \cos(n, z) ds$  із застосуванням формули Ньютона–Лейбніца [27]

$$\int_{S(t)} \frac{\partial \tilde{\Phi}^{0}}{\partial t} \cos(n, z) ds = -\int_{b^{-}(t)}^{b^{+}(t)} \frac{\partial \tilde{\Phi}^{0}}{\partial t} d\tilde{x} =$$
$$= \frac{\partial}{\partial t} \int_{S(t)} \tilde{\Phi}^{0} \cos(n, z) ds - \left[ \tilde{\Phi}^{0}(b^{+}) \frac{\partial b^{+}}{\partial t} - \tilde{\Phi}^{0}(b^{-}) \frac{\partial b^{-}}{\partial t} \right],$$
(2.72)

де  $b^{\pm}(z,t)$  – миттєві значення півширин контуру на рівні незбуреної хвильової поверхні  $\tilde{z} = \zeta_w(\tilde{x},t)$ , див. рис. 2.9.



Рис. 2.9. Миттєве положення контуру елемента ХвПЕ на хвилі

Вираз у квадратних дужках формує нелінійну залежність на хвильовій поверхні, яку за прийнятими вище припущеннями слід відкинути і тому залишається тільки перший член у формулі (2.72). Аналогічним чином модифікують і інші інтеграли у виразах для гідродинамічних сил Хаскінда-Ньюмана. Для подальшого аналізу інтегралів по контуру від потенціалу  $\tilde{\Phi}^0$  до розгляду вводять одиничні потенціали  $\phi_j$ , j = 1, 3, 4,  $\nabla^2_{\perp} \phi_j = 0$  з граничними умовами на зануреному контурі

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial n_{\perp}} = \cos(n, \tilde{x}), \quad \frac{\partial \phi_3}{\partial n_{\perp}} = \cos(n, \tilde{z}), \\
\frac{\partial \phi_4}{\partial n_{\perp}} = \tilde{y} \cos(n, \tilde{z}) - \tilde{z} \cos(n, \tilde{y}),$$
(2.73)

та граничні умови виду (2.63) на хвильовій поверхні  $\zeta_w$  і умовами непротікання на дні акваторії ( $\partial \phi_j / \partial n_\perp = 0$ ). Тоді, застосувавши теорему Гріна [27] до потенціалів  $\tilde{\Phi}^0$  та  $\phi_j$ , отримаємо співвідношення

$$\int_{S(t)} \tilde{\Phi}^{0} \vec{n}_{\perp} dS = \int_{S(t)} \tilde{\Phi}^{0} \frac{\partial \phi_{j}}{\partial n_{\perp}} dS =$$

$$= \int_{S(t)} \phi_{j} \frac{\partial \tilde{\Phi}^{0}}{\partial n_{\perp}} dS + \frac{1}{g} \left[ \frac{\partial^{2} \tilde{\Phi}^{0}}{\partial t^{2}} \phi_{j} - \frac{\partial^{2} \phi_{j}}{\partial t^{2}} \Phi^{0} \right] \bigg|_{\tilde{z} = \zeta_{w}}.$$
(2.74)

Знову, відкинувши нелінійні члени на вільній поверхні у квадратних дужках, отримаємо добре відоме у лінійній гідродинаміці судна інтегральне співвідношення Хаскінда [50], яке, по-перше, містить похідну  $\partial \tilde{\Phi}^0 / \partial n_{\perp}$ , яка є відомою з граничних умов, та, по-друге, містить значно більш прості для розрахунків одиничні потенціали  $\phi_j$ .

У новому запису граничні умови на миттєвому зволоженому контурі запишуться так

$$\frac{\partial \tilde{\Phi}^0}{\partial n_\perp} = \mathfrak{v}_1 \frac{\partial \tilde{\phi}_1}{\partial n_\perp} + \mathfrak{v}_3 \frac{\partial \tilde{\phi}_3}{\partial n_\perp} + \mathfrak{v}_4 \frac{\partial \tilde{\phi}_4}{\partial n_\perp}.$$
(2.75)

Лінійність граничних умов (2.63) і (2.75) відносно потенціалу збурення  $\tilde{\Phi}^0$ дає змогу представити швидкості  $\mathbf{v}_j$  та потенціал  $\tilde{\Phi}^0$  рядами Фур'є виду  $\mathbf{v}_j = \sum_m \mathbf{v}_{jm} \exp i \mathbf{\sigma}_m t$ ,  $\tilde{\Phi}^0 = \sum_k \sum_m \Phi^0_{km} \exp i \mathbf{\sigma}_m t$ , k = 1, 3, 4, а одиничні потенціали  $\phi_k, k = 1, 3, 4$  визначати на частотах коливань  $\mathbf{\sigma}_m$ . Однак при цьому зміна зволоженого контуру елементу за часом вважається параметричною і не впливає безпосередньо на часові залежності  $\tilde{\Phi}^0$  і  $\phi_k$ .

Підстановка даних залежностей у інтеграли в (2.74) породжує інтеграли типу  $\int_{S(t)} \phi_{km} \frac{\partial \phi_{jm}}{\partial n_{\perp}} dS, \, k, j = 1, 3, 4,$  які визначають за М.Хаскіндом [67] гідродинамічні

коефіцієнти – прилучені маси  $\mu_{ij}$  та коефіцієнти демпфування  $\lambda_{ij}$ , які у нелінійному наближенні визначаються для миттєвого положення контуру на хвилях.

Якщо ще додаткового осереднити на миттєвому зволоженому контурі відносні швидкості  $\mathbf{v}_{km}$  за формулами

$$\mathbf{v}_{km} \approx \left\langle \mathbf{v}_{jkm} \right\rangle_{S(t)} = \frac{\int_{S(t)} \mathbf{v}_{km} \mathbf{\varphi}_{jm} \cdot C_j dS}{\int_{S(t)} \mathbf{\varphi}_{jm} C_j dS},\tag{2.76}$$

де у якості одиничних потенціалів  $\varphi_{jm}$  слід брати наближено потенціали швидкості при русі еліптичного контуру у безмежній рідині  $\varphi_{1S} \sim v_1 x$ ,  $\varphi_{3S} \sim v_3 z$ ,  $\varphi_{nS} \approx v_4 x z$  ( $v_k$  – сталі множники [28]), то задача дифракції зводиться фактично до більш простої задачі випромінення хвиль, а залежності для інтенсивностей сил Хаскінда-Ньюмана запишуться так

$$q_j(x,t) = -\frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1,3,4} \left\{ \sum_m \left[ \mu_{jkm} \left\langle \upsilon_{km} \right\rangle_S + \lambda_{jkm} \left\langle u_{km} \right\rangle_S \right] \exp i\sigma_m t \right\}, \qquad (2.77)$$

де  $\mu_{jkm}$ ,  $\lambda_{jkm}$  при k = 11; 13; 14; 33; 34; 44 – коефіцієнти прилучених мас та демпфування миттєвого зволоженого шпангоутного перерізу при коливаннях частотою  $\sigma_m$ ;  $\langle u_{km} \rangle_S = \frac{-i \langle v_{km} \rangle_S}{\sigma_m}$  – відносні переміщення і  $q_1 \equiv q_x, q_3 \equiv q_z, q_4 \equiv m_y$ .

Для згортання рядів Фур'є в (2.77) потрібно далі, згідно роботи [55], розкласти залежності  $\mu_{jkm}(\sigma_m)$  і  $\lambda_{jkm}(\sigma_m)$  у ряди Тейлора в околі середньої частоти  $\sigma_0$ , що остаточно призводить до залежності виду

$$q_{j}(x,t) = -\frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1,3,4} \left\{ \sum_{n=0,1,2\dots} \frac{(-1)^{n}}{2n!} \left[ \mu_{jk}^{(2n)} \cdot \frac{\partial^{2n}}{\partial \tau^{2n}} \langle \mathbf{v}_{jk} \rangle_{S} + \lambda_{jk}^{(2n)} \frac{\partial^{2n}}{\partial \tau^{2n}} \langle u_{jk} \rangle_{S} \right] + \sum_{n=0,1,2\dots} \frac{(-1)^{n}}{(2n+1)!} \left[ \mu_{jk}^{(2n+1)} \cdot \frac{\partial^{2n+1}}{\partial \tau^{2n+1}} \langle \mathbf{v}_{jk}^{\Gamma} \rangle_{S} + \lambda_{jk}^{(2n+1)} \frac{\partial^{2n+1}}{\partial \tau^{2n+1}} \langle u_{jk}^{\Gamma} \rangle_{S} \right] \right\}, \quad (2.78)$$

де позначено похідні  $\mu_{jk}^{(\alpha)} \equiv \partial^{\alpha} \mu_{jk} / \partial S^{\alpha}$  і значком «Г» вказано на спряжені за перетворенням Гільберта швидкості та осереднені переміщення, тобто, якщо  $\langle v_{jk} \rangle_S = a_{jk}(\tau) \cos[\theta_0(t) + \alpha_{jk}(\tau)]$ , то  $\langle v_{jk}^{\Gamma} \rangle_S = a_{jk}(\tau) \sin[\theta_0(t) + \alpha_{jk}(\tau)]$ , і  $\tau$  – час, у якому змінюються обвідна  $a_{jk}$  і модуляція фази  $\alpha_{jk}$ .

Залежність (2.78) узагальнює на нерегулярні коливання і хвилі результати, отримані у роботі [55] для пакетів хвиль. Методика розрахунку гідродинамічних коефіцієнтів  $\mu_{ij}$  і  $\lambda_{ij}$  стисло викладено у додатку Б і її сутність полягає у застосуванні методу Урсела у параметричній площині (розміщенні системи гідродинамічних особливостей у центрі одиничного кола, отриманого *N*-параметричним конформним відображенням з дубльованого відносно миттєвої ватерліній шпангоутного контуру елемента ХвПЕ) [55,80,138].

Конкретні залежності для гідродинамічних сил Хаскінда-Ньюмана будуть отримані у 4 розділі даної роботи для кожного типу ХвПЕ.

2.4.3. Характеристики внутрішньої системи перетворення енергії. Розглянемо залежності для визначення енергії, що отримує коливальна система під дією зовнішніх гідродинамічних навантажень рідини. Відповідно до основного диференціального рівняння динаміки другого порядку, що має структуру  $M\ddot{u} + 2\Lambda\dot{u} + Ku = f(t)$ , механічна потужність P визначається через перенесення зовнішніх сил, як  $P = f\dot{u}$  [91, 111], де u(t) – динамічне переміщення, M – інерційна маса,  $\Lambda$  – коефіцієнт демпфування, K – коефіцієнт жорсткості і  $f = (f_M - f_\Lambda - f_K)$  – навантаження, що діють на динамічну систему. Враховуючи структуру навантажень f, отримуємо вирази складових для потужності  $P = P_M + P_\Lambda + P_K$ 

$$P_{\Lambda} = -f_{\Lambda}\dot{u} = 2\Lambda\dot{u}^{2};$$

$$P_{M} = f_{M}\dot{u} = M\ddot{u}\dot{u} = \frac{d}{dt}E_{k};$$

$$P_{K} = -f_{K}\dot{u} = K\dot{u}u = \frac{d}{dt}E_{p};$$

$$(2.79)$$

де  $E_k, E_p$  – кінетична та потенціальна енергії динамічної системи.

Для відбору енергії, здебільшого, хвильові перетворювачі використовують поступальні рухи гідравлічних поршнів прикріплених до коливальних елементів [106], які утворюють додаткові навантаження  $f_{PTO}$  у внутрішній системі відбору енергії. Залежність для додаткового навантаження  $f_{PTO}$  має вигляд [111]

$$f_{PTO} = -\Lambda_{PTO}\dot{u} - \Delta Ku, \qquad (2.80)$$

де  $u, \dot{u}$  – відносні переміщення та швидкість елементів гідравлічного поршня;  $\Lambda_{PTO}, \Delta K$  – коефіцієнти демпфування і жорсткості після уточнення характери-

стик реальної коливальної системи. Тоді остаточно потужність  $P_{PTO}$ , що перетворює пристрій відбору енергії буде визначатися через коефіцієнт демпфірування  $\Lambda_{PTO}$  (або поглинання енергії, див. [111]) як

$$P_{PTO} = \Lambda_{PTO} \dot{u}^2. \tag{2.81}$$

#### 2.5. Порівняння методів чисельного дослідження динаміки ХвПЕ

Розв'язок задачі дослідження динаміки ХвПЕ пов'язаний з чисельним розв'язком початкової задачі Коші з диференціальними рівняннями за часом. В усіх чисельних методах, що дають змогу інтегрувати такі рівняння, проводиться дискретизація часової координати t на моменти часу  $t_k$ , k = 0, 1, 2, ... в основному з рівномірним кроком  $\Delta t$  [55,57] (тобто  $t_k = k\Delta t$ ). Іншим загальним положенням є те, що до моменту часу  $t_k$  розв'язок вважається відомим і потрібно його отримати для наступного моменту часу  $t_{k+1}$ . Різні чисельні методи як раз і відрізняються ідеями та обчислювальними алгоритмами для отримання наступного значення розв'язку при  $t_{k+1}$  (див. рис. 2.10).



Рис. 2.10. Дискретизація часової координати

Розглянемо стисло деякі характерні та найбільш поширені приклади таких методів, розпочавши з їх класифікації, а потім, на прикладі чисельного інтегрування нелінійного диференціального рівняння (комбінація осциляторів Ван-дер Поля і Дюффінга)

$$\ddot{u} + 2\lambda_1 \dot{u} + \lambda_2 \dot{u} |\dot{u}| + \omega_0^2 (1 + \alpha^2 u^2) u = \sum_{n=1}^N f_0 \sin \sigma_n t, \qquad (2.82)$$

приймемо рішення щодо вибору найбільш оптимального методу для подальших розрахунків у даній роботі.

# **2.5.1. Чисельні методи для розв'язання початкових задач Коші.** В науковій літературі [27] застосовується наступна класифікація: 1. Багато етапні чисельні методи, в яких отримання розв'язку при $t_{k+1}$ складається з декількох етапів – повторних розрахунків чи ітераційних обчислень на кожному кроці інтегрування за часом.

2. Багато крокові чисельні методи, в яких для отримання розв'язку при  $t_{k+1}$  потрібно використовувати значення розв'язків для декількох попередніх моментів часу  $t_k, t_{k-1}, t_{k-2}, \ldots$ 

3. Мінімізаційні чисельні методі, в яких для отримання розв'язку при  $t_{k+1}$ використовують не вихідні диференціальні рівняння, а умови мінімуму певних функціоналів, зв'язаних з даною задачею Коші.

Типовим диференціальним рівнянням у задачах Коші для механіки є наступне диференціальне рівняння другого порядку

$$M\ddot{u} + 2\Lambda\dot{u} + Ku = f(t), \qquad (2.83)$$

де u(t) – динамічне переміщення, M – інерційна маса,  $\Lambda$  – коефіцієнт демпфування, K – коефіцієнт жорсткості і f(t) – навантаження, що діють на динамічну систему.

Початкові умови на переміщення та швидкість динамічної системи формулюються при  $t = t_0$  як  $u(t_0) = u_0$ ,  $du/dt(t_0) = v_0$ . Часто у якості  $t_0$  приймають значення  $t_0 = 0$ .

Найбільш простий метод, що дозволяє розв'язувати диференціальні рівняння, був запропонований ще Л. Ейлером і, на жаль, його можна застосовувати тільки у випадку, коли функція  $\ddot{u} = F(t, u, \dot{u})$  є аналітичною і простою. У випадку дослідження рівнянь динаміки ХвПЕ, які є досить складними і не можуть бути представлені аналітичними функціями  $F(t, u, \dot{u})$ , застосування даного методу суттєво обмежено. Через це, а також через потреби досягнення якомога вищої точності, стійкості та ефективності обчислювальних алгоритмів, розглянемо інші методи, що були розроблені для задач Коші [27]. Для цього рівняння (2.83) перепишемо у вигляді

$$\ddot{u} = F(u, \dot{u}, t), \ F = \frac{1}{M} \left[ f(t) - 2\Lambda \dot{u} - Ku \right].$$
 (2.84)

Перша група таких методів відноситься до багато етапних методів і найбільш розповсюджені з них це – метод Неймарка і метод Рунге–Кутта. Для методу Неймарка розрахункові залежності мають вигляд [27,57]

$$u(t_{k+1}) = u(t_k) + \dot{u}(t_k)\Delta t + \frac{1}{2}[(1-\beta)F_k + \beta F_{k+1}]\Delta t^2, \dot{u}(t_{k+1}) = \dot{u}(t_k) + [(1-\gamma)F_k + \gamma F_{k+1}]\Delta t, \ddot{u}(t_{k+1}) = F_{k+1} = F(t_{k+1}, u(t_{k+1}), \dot{u}(t_{k+1})),$$

$$(2.85)$$

де інтерполяційні множники  $\beta$  та  $\gamma$  загалом є довільними. В практиці розрахунків конкретних задач їх потрібно підбирати тестовими розрахунками, але досить часто беруть значення  $\beta = \gamma = 0.5$ .

Як видно з формул (2.85), метод Неймарка можна реалізувати тільки у схемі повторних рекурентних розрахунків, оскільки значення переміщень, швидкостей та прискорень при  $t_{k+1}$  стоять як у лівій, так і у правій частині розрахункових формул і на першому етапі вони невідомі [57]. Якщо процес збігається, то повторні розрахунки припиняють і переходять до наступного моменту часу  $t_{k+2}$ .

У методі Рунге-Кутта 4-х етапна схема має вигляд [27]

$$u(t_{k+1}) = u(t_k) + \dot{u}(t_k)\Delta t + \frac{1}{6}(k_1 + k_2 + k_3)\Delta t^2,$$
  

$$\dot{u}(t_{k+1}) = \dot{u}(t_k) + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)\Delta t,$$
  

$$de \ k_1 = F(t_k, u(t_k), \dot{u}(t_k)),$$
  

$$k_2 = F(t_k + \frac{\Delta t}{2}, u(t_k) + \dot{u}(t_k)\frac{\Delta t}{2}, \dot{u}(t_k) + k_1\frac{\Delta t}{2}),$$
  

$$k_3 = F(t_k + \frac{\Delta t}{2}, u(t_k) + \dot{u}(t_k)\frac{\Delta t}{2} + \frac{k_1}{4}\Delta t^2, \dot{u}(t_k) + k_2\frac{\Delta t}{2}),$$
  

$$k_4 = F(t_k + \Delta t, u(t_k) + \dot{u}(t_k)\Delta t + \frac{k_2}{2}\Delta t^2, \dot{u}(t_k) + k_3\Delta t).$$
  
(2.86)

Особливістю даного методу є додаткові розрахунки у проміжних точках ( $t_k + \Delta t/2$ ).

З багато крокових методів вкажемо сімейство чисельних методів Адамса [27, 57], у яких використовується інтегральна версія вихідних диференціальних рівнянь (2.84) у вигляді

$$\begin{aligned} u(t) &= u(t_k) + \dot{u}(t_k)(t - t_k) + \int_{t_k}^t (t - \tau) F(\tau, u, \dot{u}) d\tau, \\ \dot{u}(t) &= \dot{u}(t_k) + \int_{t_k}^t F(\tau, u, \dot{u}) d\tau. \end{aligned}$$
(2.87)

Для розрахунку інтегралів у (2.87) підінтегральні вирази апроксимуються інтерполяційними поліномами «назад» для певної множини точок за часом  $t_k, t_{k-1}, t_{k-2}, \ldots, t_{k-s}, s = 1, 2, 3, \ldots$  Може бути задіяна для інтерполяції і точка  $t_{k+1}$ , але тоді, як і у методі Неймарка, потрібно застосовувати додатково рекурентні розрахунки на кожному кроці за часом. У якості прикладу наведемо розрахункові формули для явної схеми Адамса-Бешфорта з назвою «предиктор-коректор» [27]

$$\dot{u}(t_{k+1}) = \dot{u}_k + \frac{1}{24} (55F_k - 59F_{k-1} + 37F_{k-2} - 9F_{k-3})\Delta t, \text{ prediction}; \\
u(t_{k+1}) = u_k + \frac{1}{24} (9\dot{u}_{k+1} + 19\dot{u}_k - 5\dot{u}_{k-1} + \dot{u}_{k-2})\Delta t, \text{ evaluation}; \\
\dot{u}(t_{k+1}) = \dot{u}_k + \frac{1}{24} (9F_{k+1} + 19F_k - 5F_{k-1} + F_{k-2})\Delta t, \text{ correction.}$$

$$(2.88)$$

Як видно з розрахункових формул, у даному методі розрахунок виконується відразу за один етап, але при цьому потрібно мати розрахунки у попередніх точках за часом  $t_k$ ,  $t_{k-1}$ ,  $t_{k-2}$ ,  $t_{k-3}$  і це означає, що методи Адамса не можна використовувати, починаючи з граничних умов задачі.

Існують також мінімізаційні чисельні методи для задач Коші [57] (наприклад, сімейство методів найменших квадратів похибки розв'язку рівняння (2.84)). Практичне застосування даного алгоритму у задачах нелінійної хитавиці суден на хвилях [57] показало високий рівень стійкості результатів. Метод можна застосовувати, починаючи з граничних умов задачі, але через великий обсяг обчислень на кожному кроці за часом для задач дослідження динаміки ХвПЕ, розглядати дану групу методів ми не будемо. 2.5.2. Обґрунтування вибору методу для чисельного дослідження початкової задачі Коші ХвПЕ. Для обґрунтування вибору методу приведемо приклади чисельного інтегрування нелінійного диференціального рівняння (2.82) методами Рунге–Кутта, Адамса–Бешфорта та Неймарка. Приклади результатів розрахунків зазначеними методами на інтервалі часу до  $T_{all} = 1900$  с (~ 35 хв) з кроком зміни аргументу  $\Delta t = 0,1$  с показано на рис. 2.11 та 2.12.

Як видно з графіків коливань, розв'язки за усіма методами показують порівняльну точність та стійкість за амплітудно-фазовими показниками відносно один одного, але якщо говорити окремо про недоліки методів, то значний обсяг обчислень при можливій повільній збіжності результатів рекурентних розрахунків, а також невизначеність вагових множників, підбір яких вимагає наявність деякого розв'язку, робить метод Неймарка менш прийнятним для чисельного дослідження динаміки ХвПЕ. На відміну від методу Неймарка, метод Рунге-Кутта не вимагає підбору додаткових множників, і його можна застосовувати одразу з початкових умов, але він вимагає великого обсягу обчислень на кожному кроці за часом, що також дуже ускладнює розрахунки у задачах хвильової енергетики. Великий недолік методу Адамса-Бешфорта полягає у тому, що його не можна використовувати, починаючи з граничних умов задачі. Тому спочатку для перпих кроків за часом розрахунки виконувались за методом Рунге-Кутти, а потім проводився перехід до явної схеми «предиктор-коректор».

Важливою складовою для остаточного вибору оптимального методу дослідження динаміки ХвПЕ є його швидкодія. Порівняння показників витраченого часу, що був потрібен для інтегрування диференціального рівняння (2.82), показало (див. рис. 2.13), що найбільш швидким серед трьох методів виявився метод Адамса–Бешфорта. Тому остаточно визначаємо, що для чисельного дослідження динаміки ХвПЕ найбільш точним, стійким, швидким та ефективним буде метод Адамса–Бешфорта, а для початкового розрахунку перших декількох кроків слід застосовувати метод Рунге–Кутта.





Рис. 2.11. Порівняння чисельного інтегрування диференціального рівняння лінійного осцилятора методами

Рунге-Кутта ( $\blacksquare - \blacksquare$ ), Адамса-Бешфорта ( $\bullet - \bullet$ ) та Неймарка ( $\blacklozenge -$ 

$$\delta$$
 – розрахунок при  $\alpha = 0, \lambda_1 = 0, 1, \lambda_2 = 0, 2, \omega_0 = 1, f_0 = 1, \sigma = 0.9\omega_0, u_0 = 1$  та  $\upsilon_0 = 0$ 

١







Рунге–Кутта ( $\blacksquare - \blacksquare$ ), Адамса–Бешфорта (• – •) та Неймарка (• –

 $\delta$  – розрахунок при  $\alpha = 0, 5, \lambda_1 = 0.1, \lambda_2 = 0, 2, \omega_0 = 1, f_0 = 1, \sigma = 0, 9\omega_0, u_0 = 1$  та  $\upsilon_0 = 0$ 





Рунге-Кутта, Адамса–Бешфорта та Неймарка

#### 2.6. Програмне забезпечення розрахункового проектування ХвПЕ

Чисельна реалізація алгоритмів та методів, що були представлені вищі у даному розділі, вимагає використання спеціального програмного забезпечення, яке входить до групи CFD пакетів. Огляд засобів обчислювальної гідродинаміки, який було проведено у першому розділі, показав можливості сучасних комп'ютерів разом із спеціальними програмами відтворювати фізичні процеси механіки із заданою точністю та чисельно проводити дослідження роботи ХвПЕ. Хоча такий підхід у досліджені і вимагає менших фінансових витрат у порівнянні з натурними експериментами, для більшості вітчизняних науковців він залишається, поки що, недоступним. При виборі засобів для етапів розрахункового проектування ХвПЕ, будемо враховувати обмеженість матеріальної складової даного дисертаційного дослідження та обирати ті програмні рішення, що дозволять нам максимально швидко, точно та ефективно досягти поставленої мети.

Отже, відповідно до етапів, що входять в обчислювальну гідродинаміку, розглянемо програми, які дозволять формувати геометрію обчислювального пристрою, визначати початкові та граничні умови, проводити чисельні розрахунки, зберігати та аналізувати результати.

2.6.1. Формування геометрії обчислювальних пристроїв. Для проведенні чисельного дослідження динаміки ХвПЕ потрібно мати дані, що утворюють геометрію того чи іншого пристрою. Враховуючи той факт [99], що розрахункове проектування відноситься до першої фази виготовлення ХвПЕ і не вимагає високої деталізації геометрії елементів пристрою, можна зупинити вибір на САД-програмах із середньою функціональністю. Якщо обмежитись безкоштовним програмним забезпеченням та не розглядати комерційні рішення, то ідеально для задач першого етапу обчислювальної гідродинаміки підійде пакет FreeCAD [95].

FreeCAD – це вільна система автоматизованого проектування, яка призначена у першу чергу для моделювання в області машинобудування і промислового дизайну. Якщо порівнювати функції інструментів FreeCAD, то вони схожі на аналогічні функції таких пікетів, як CATIA, SolidWorks та ін.

До сильних сторін даного пакету слід віднести використання ним сторонніх відкритих бібліотек, які існують в галузі наукових обчислень, зокрема, Open CASCADE, Coin3D, Qt, і скриптова мова програмування Python. Даний набір інструментів дозволить з мінімальними зусиллями сформувати геометрію обчислювального пристрою перетворення хвильової енергії та перейти безпосередньо до чисельного дослідження його динаміки.

Не можна не звернути увагу на наявність у пакеті FreeCAD модуля Ship, який дозволяє автоматично формувати розрахункові лінії контурів заданих корпусів суден та навіть виконувати базові гідростатичні розрахунки. Як приклад, приведемо на рис. модель корпуса судна та автоматично згенеровані даним модулем контури шпангоутів та ватерліній. Даний функціонал модуля Ship буде використано при формуванні геометрії робочих елементів ХвПЕ у даній дисертаційній роботі.



Рис. 2.14. Приклад генерації ліній теоретичного креслення для тривимірної моделі корпуса судна у модулі Ship пакету FreeCAD

Для обміну даними між іншими пакетами, FreeCAD підтримує низку файлових форматів, зокрема, для збереження геометрії ХвПЕ та її використання у чисельних розрахунках динаміки можна використовувати формат STL. STL – це формат файлу, що використовується для зберігання тривимірних моделей у вигляді списку трикутних граней та їх нормалей [81]. 2.6.2. Чисельні розрахунки параметрів досліджуваних пристроїв. Однією з головних проблем, яку потрібно розв'язувати у даній дисертаційній роботі, є проблема представлення нерегулярного нелінійного хвилеутворення, як основного джерела збурення для ХвПЕ. Така задача у повному її розв'язку потребує налаштування та використання сучасних CFD програм разом із суперкомп'ютерами, що у рамках даної роботи реалізувати, на жаль, не можливо. Тому, єдиним рішенням на шляху досягнення мети даного дисертаційного дослідження залишається розробка програмного забезпечення, яке дозволить моделювати гідродинамічні поля та виконувати чисельні дослідження їх взаємодії з ХвПЕ.

Для розробки подібного програмного забезпечення існує низка інструментів. З метою вибору оптимальної мови програмування, за допомогою якої ми зможемо реалізувати другий етап в обчислювальній гідродинаміці, визначимо її критерії.

До основних критеріїв вибору мови програмування можна віднести наступні: вартість, здатність точно та ефективно виконувати математичні розрахунки, робота зі структурами даних, розпаралелювання, переносимість, можливість інтеграції з іншими програмами та т. ін. Відповідно до специфіки розрахунків, що будуть проводитись у даній роботі, розроблене програмне забезпечення повинно надавати можливість користувачу зручно здійснювати налаштування вихідних параметрів, змінювати параметри розрахунку, зберігати результати, тощо. Тому, при виборі тієї або іншої мови, потрібно врахувати наявність засобів зручної та швидкої розробки інтерфейсу користувача.

Відповідно до визначених критеріїв, найбільш цікавим рішенням у виборі засобів розробки програми для дослідження роботи ХвПЕ є технологія Java [85]. В основі платформи Java лежить мова програмування, яка є чисто об'єктноорієнтованою, безкоштовною, підтримує великий обсяг додаткових бібліотек, що дозволяють підсилити її функціональність, а також повністю задовольняє визначеним раніше критеріям. Інтегроване середовище розробки програмного забезпечення NetBeans IDE [117] допоможе прискорити процес розробки програми, а також задіяти низку додаткових інструментів відлагодження та тестування програми, що розробляється. Слід відмітити таку додаткову бібліотеку для Java, як Commons Math [77]. Дана бібліотека спеціально призначена для математичних обчислень і дозволяє розв'язувати такі задачі, як: пошук коренів рівнянь, інтерполяція функцій, наближене обчислення інтегралів, інтегрування диференціальних рівнянь, розв'язок систем алгебраїчних рівнянь, представлення та аналіз геометричних об'єктів, статистика та багато ін. Корисною також буде бібліотека JFreeChart [102], яка дозволяє зручно та швидко будувати різноманітні діаграми або графіки для аналізу результатів розрахунків.

Комплекс розглянутих програмних засобів, а саме, мови програмування Java SE, інтегрованого середовища розробки NetBeans, бібліотек Commons Math та JFreeChart, – дозволить розробити програму для виконання розрахунків другого етапу обчислювальної гідродинаміки.

**2.6.3. Візуалізації результатів розрахунку.** Важливим етапом у проведенні будь-якого дослідження є аналіз результатів. За допомогою спеціальних засобів на третьому етапі обчислювальної гідродинаміки можна вирішувати такі задачі:

- візуалізація розрахункових сіток, зокрема, для моделей ХвПЕ;
- візуалізація гідродинамічних полів, зокрема, хвильового профілю, полів швидкостей руху рідини та полів тиску;
- кількісний аналіз даних (амплітудно–частотні показники, знаходження екстремальних значень, статистика, та ін.);

— створення анімацій, що демонструють розвиток фізичного процесу у часі. Пакет ParaView [107] дозволяє найкраще вирішити перелічені вище задачі, є безкоштовним, розроблений на базі бібліотеки VTK [108], яка надає власний формат даних для обміну інформацією між додатками. Дана програма також підтримує формат файлів STL, які зберігають інформацію про геометрію об'єктів, що досліджуються. Застосування ParaView у даній роботі дозволить розв'язати завершальну частину задач на етапі розрахункового проектування ХвПЕ та виконати аналіз отриманих результатів чисельного моделювання.

#### Висновки до Розділу 2

Вище було показано актуальність розробки наближених чисельно-аналітичних, але нелінійних моделей та методів для розв'язання задач хвильової енергетики. Аналіз існуючого стану у розв'язанні проблеми дав змогу обґрунтувати **мету дисертаційної роботи**, яка полягає у розробці інноваційної технології дослідження роботи ХвПЕ шляхом прямого чисельного розрахунку за часом динаміки руху нерегулярних вітрових хвиль та реакцій ХвПЕ з урахуванням нелінійних ефектів. Дана технологія включає, зокрема: а) створення гідродинамічних моделей і методів для представлення морського нерегулярного хвилеутворення, як основного джерела збурення, б) розробка методів розрахунку навантажень на ХвПЕ у хвильових полях та в) оцінка енергетичного балансу у системі «хвилі-перетворювач». Для досягнення поставленої мети було сформульовано низку **задач**, які умовно можна поділити на основні та підпорядковані. До основних належать наступні задачі:

1) розробити у лінійному та нелінійному наближеннях гідродинамічні моделі для чисельних розрахунків у часі і просторі на коротко-термінових інтервалах характеристик нерегулярного морського хвилеутворення – хвильової поверхні, полів швидкостей руху рідини та хвильового тиску з глибиною у шельфовій зоні;

2) отримати гідродинамічні моделі і методи для розрахунку гідродинамічних навантажень на робочі елементи у типових схемах хвильових перетворювачів, динаміки їх руху та механічної енергії, яку будуть отримувати генератори, з урахуванням нелінійних ефектів.

Підпорядкованими є наступні задачі:

3) провести статистичний аналіз вітро-хвильових режимів перспективних районів для Чорного та Азовського морів щодо можливості розташування та використання пристроїв перетворення хвильової енергії, а також виконати аналіз можливого негативного впливу зовнішнього середовища на хвильові перетворювачі енергії (фізичного, геологічного, біологічного і т. ін.);

4) розробити методи чисельного дослідження динаміки коливань ХвПЕ та

отриманої ними механічної енергії при роботі у хвильовому полі;

5) розробити принципи максимального відбору енергії з морських хвиль та запропонувати на цій основі перспективні схеми ХвПЕ з різних гідродинамічних полів, зокрема, у вигляді комбінованих та адаптованих агрегатів.

Застосуванням перетворення Гільберта та врахуванням граничних умов на дні акваторії було узагальнено на довільно нерегулярні хвилі у шельфовій зоні моделі та методи розрахунків, розроблені раніше для пакетів нелінійних хвиль на глибокій воді. Дана технологія дає змогу розраховувати хвильову поверхню та поля швидкості і тиску у нерегулярних вітрових хвилях у часовій області на інтервалах квазістаціонарності.

Таким чином було узагальнено і методи розрахунку збурених роботою Хв-ПЕ гідродинамічних сил Хаскінда-Ньюмана з урахуванням нелінійних ефектів на миттєвій зволоженій поверхні елементів ХвПЕ. При цьому нелінійними ефектами на вільній поверхні було знехтувано, оскільки вони мало впливають на інтегральні значення сил, та, з іншого боку, призводять до руйнації хвильових збурень, що дуже важко враховувати в моделях. Остаточні залежності для даної категорії сил отримано у вигляді асимптотичних рядів за параметрами нерегулярності процесів коливань та частотної залежності гідродинамічних коефіцієнтів. Перший член ряду відповідає теорії Хаскінда-Ньюмана.

Для отримання довготермінових розподілів параметрів хвиль на часові терміни до 100 років було запропоновано алгоритм апроксимації відповідних статистичних даних законами Вейбула, Гумбеля, Парето і логістичним з оцінкою найкращого підбору тим чи іншим розподілом.

Для вибору оптимального методу чисельного інтегрування диференціальних рівнянь коливань ХвПЕ було проведено тестування трьох поширених алгоритмів – Рунге-Кутта, Адамса-Бешфорта і Неймарка на нелінійному осциляторі Дюффінга–Ван дер-Поля і обрано за показником точності та швидкодії метод Адамса-Бешфорта.

Таким чином, напрацьовані методи і складають основний інструментарій для розв'язання задач, визначених у даній дисертаційній роботі.

#### РОЗДІЛ З

# РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПОЛІВ НЕРЕГУЛЯРНИХ ВІТРОВИХ ХВИЛЬ У ШЕЛЬФОВІЙ ЗОНІ НА ІНТЕРВАЛАХ КВАЗІСТАЦІОНАРНОСТІ ХВИЛЬОВИХ РЕЖИМІВ

У третьому розділі представлено результати моделювання основного джерела збурення ХвПЕ – гідродинамічних полів нерегулярних вітрових морських хвиль у шельфовій зоні.

У підрозділі 3.1 проведено збір та аналіз даних щодо вітрових та хвильових режимів, рельєфу дна, флори і фауни та даних інших гідрологічних характеристик басейнів Чорного (ЧМ) та Азовського морів (АМ). З метою оцінки параметрів вітро-хвильових режимів зазначених районів розглянуто апроксимацію довготермінової статистики, що розширює область її застосування до 100 років.

У підрозділі 3.2 приведено результати лінійного моделювання гідродинамічних полів. Воно містить моделювання енергетичних спектрів та їх дискретизації для отримання амплітуд та початкових фаз елементарних гармонік у хвильовому полі, результати модифікованого лінійного розв'язку крайової задачі теорії хвиль для корекції залежностей для профілів швидкостей рідини та тиску з глибиною. На завершення лінійного наближення отримано локальні характеристики хвиль – обвідну амплітуд, модуляцію фази та крутість хвиль.

У підрозділі 3.3 реалізовано нелінійну гідродинамічну модель представлення реального морського хвилеутворення. Для цього, використовуючи результати з лінійного наближення, виконано перехід до нелінійного профілю морських хвиль. Потім, застосовано метод півзворотньої задачі для визначення поверхневих проекцій швидкостей руху рідини. Остаточним розрахунком визначено поля швидкостей рідини та тиску з глибиною.

### 3.1. Довготермінова статистика вітро-хвильових режимів Чорного та Азовського морів

ЧМ та АМ океанографами розділено на 5 районів [8]. Для аналізу узбережжя України цікавими є І та ІІ райони морів (див. рис. 3.1). У даному підрозділі приведено результати збору статистичних даних щодо вітро-хвильових режимів, а потім, застосовуючи закони розподілу з п. 2.2, виконано їх апроксимацію для оцінки зазначених режимів з метою отримання відповідних аналітичних залежностей [1<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>], придатних на тривалі терміни часу до 100 років.



Рис. 3.1. Райони ЧМ та АМ згідно [8]

**3.1.1. Збір та аналіз даних вітро-хвильових режимів.** Перед розгортанням та експлуатацією ХвПЕ у певних акваторіях, потрібно накопичити та проаналізувати дані щодо можливих вітрових, хвильових, температурних режимах, а також дослідити рельєф, шельф, флору та фауну районів, що розглядаються.

**3.1.1.1. Вітрові режими.** На ЧМ помітна сезонно-просторова зміна повторюваності швидкостей вітру згідно [8]. Сильні вітри можуть спостерігатися в усіх районах моря, однак їх повторюваність взимку найбільша і для вітру зі швидкістю  $v_{\rm B} \ge 14$  м/с перевищує 7%. Влітку повторюваність сильних вітрів значно менше. Приклад повторюваності  $P_{\%}$  та забезпеченості G (імовірність перевищення рівнів) швидкостей вітру для І району ЧМ показано на рис. 3.2 та 3.3. Забезпеченість G(x) показано у подвійно логарифмічному масштабі, який визначено за формулою  $L = -\ln(-\ln(1 - G(x)))$ , що відповідає закону Гумбела [16].



Рис. 3.2. Гістограми повторюваності швидкостей вітру у І районі ЧМ згідно [8]



Рис. 3.3. Приклад графіків забезпеченості швидкостей вітру у І районі ЧМ згідно [8]: –■– Зима; –♦– Весна; –▼– Літо; –▲– Осінь

З рис. 3.3 видно, що графіки для забезпеченостей не є прямими лініями у вище вказаному логарифмічному масштабі. Це означає, що закон Гумбеля, який добре апроксимує статистику для океанів та великих морів [56], має обмежені можливості апроксимації для забезпеченості у ЧМ та АМ.

Для АМ характерні слабкі і помірні вітри в усі сезони року. Вітри зі швидкістю  $v_{\rm B} \ge 14$  м/с мають повторюваність  $P_{\%} < 1\%$ . Режими вітрів в усі сезони достатньо однорідні, особливо близькі взимку та восени. Щодо інтенсивності вітрів, характерним є близькість між собою режимів осені й зими та весни і літа відповідно. Різниця ж між літом та зимою є помітною і стабільною у ЧМ для всіх режимів, а в АМ вона проявляється тільки при  $v_{\rm B} \ge 16$  м/с і більше.

Узимку та восени над морем дмуть переважно північні та північно–східні вітри. Улітку переважають змінні вітри. У табл. 3.1 рози вітрів показано за повторюваністю швидкостей та напрямками у І районі ЧМ.

#### Таблиця 3.1

$\upsilon_{\scriptscriptstyle B},{ m m/c}$	Зима	Весна	Літо	Осінь
<6	Пн Пн-3х 3х Лд-3х Пд-Сх Пд	Пн-Зх 12 Пн-Сх 3х 4 Сх Сх Пл-Зх Пл-Сх	Пн Пн-3х 3х Пд-3х Пд	Пн Пл-3х 3х Пд-3х Пд
612	Пн Пн-Сх 3х Сх Пд-Зх Пд Сх	Пн Пл-3х 8 Пн-Сх 3х 4 Пд-3х Пд-Сх Пл	Пн Пн-Зх 3х Пд-Зх Пд-Сх	Пн Пн-Зх Зх Пд-Зх Пд
1216	Пн-Зх Пл-Сх Пл-Сх Пл	Пн Пн-3х 3х Пд-3х Пл	Пн Пн-3х 3х 0 Пд-Сх Пд-Сх	Пн Пп-3х 3х Пд-3х Пд

Повторюваність швидкостей за напрямками для ЧМ

Упродовж року на АМ переважають північно-східні та східні вітри. Улітку та навесні помітно зростає повторюваність південно-західних та західних вітрів. З погляду використання ХвПЕ, більш значимими є ті вітри, які мають напрямок з півдня. Для морів, що розглядаються, це вітри: 1) весни та літа для I району ЧМ; 2) зими й весни для II району ЧМ; 3) весни та літа для АМ. Інші пори року також мають потрібний напрямок, але з меншою повторюваністю. **3.1.1.2. Температурні режими.** Однією з перешкод, які пов'язані з експлуатацією ХвПЕ, є температурні умови. Шельфова зона замерзає у сурові зими і очищення від льоду відкритих районів моря відбувається наприкінці лютого та початку березня. Дрейф криги може призвести до значного руйнування окремих елементів ХвПЕ та, як результат, до великих затрат на ремонт. Відповідно річний період роботи пристроїв зменшується.

Розташування AM у помірно низьких широтах обумовлює відносно високі температури повітря. Найменша температура води спостерігається у січні, коли на всьому морі вона наближується до 0°С. Крига в морі буває з листопада до квітня. Очищення моря від льоду відбувається у березні – на початку квітня.

Аналізуючи режими температури щодо використання ХвПЕ, можна дійти наступних висновків. Поява взимку криги впливає на розташування та роботу пристроїв. Отже, потрібно здійснювати заходи щодо захисту елементів ХвПЕ або організовувати їх роботу тільки у тих районах, де поява криги не спостерігається. З іншого боку, високі температури влітку та мілководні акваторії призводять до інтенсивного зростання флори у зазначених морях. Здебільшого це стосується АМ через його мілину та здатність води швидко прогріватися у теплі пори роки. Поява та інтенсивний розвиток водоростей також може засмічувати шарніри з'єднання і ускладнювати доступ до підводних елементів ХвПЕ, зокрема кабелів, кріплень, генераторів, тощо. Як результат, потрібно додатково залучати спеціалістів та спеціальне обладнання для очищення від заростання.

**3.1.1.3. Хвильові режими.** Відомо, що хвилі мають велику потужність. При висоті хвиль у 2 м потужність може досягати 70...80 кВт/м [106]. Значні розміри ЧМ, великі глибини, слабка зрізаність прибережної лінії сприяють розвитку великих хвиль, висота яких у І і ІІ районах може перевищувати 11 м [8]. Повторюваність сильного хвилеутворення на ЧМ невелика і, як правило, періоди хвиль становлять менше 9 с. На рис. 3.4 та 3.5 надано приклади повторюваності й забезпеченості висот хвиль районів ЧМ та АМ. Аналогічний підхід було застосовано для побудови й аналізу графіків повторюваності та забезпеченості періодів хвиль. Як видно з рис. 3.5 для хвиль також закон Гумбела не є придатним.



Рис. 3.4. Гістограми повторюваності висот хвиль h у ЧМ згідно [8]



Режими хвилеутворення AM починаючи з грудня по квітень обмежені появою криги. У штормові періоди відкритої частини AM хвилі не перевищують 3 м. Здебільшого переважають хвилі менш 2 м. У прибережній частині хвилі також зазвичай не перевищують 2 м. Хвилі AM відрізняються великою крутістю і, як правило, період хвиль складає менше 5 с.

В умовах ураганів чи достатньо жорстких та інтенсивних штормів можуть зустрічатися екстремальні хвилі. Проте вони можуть зустрічатися і в помірних штормових умовах. Сучасний космічний моніторинг поверхні Світового океану показує, що навіть на ЧМ були зафіксовані хвилі висотою до 15 м [19].

Як підсумок, було створено комп'ютерну інтерактивну карту шельфів ЧМ та AM, на якій «кліком» мишки у певній точці можна викликати динамічні меню з вибору статистичних даних району [1<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>]. Як зазначалося на початку розгляду
хвильових режимів, хвилі мають велику потужність і являють собою постійно поновлювальне джерело енергії. З іншого боку, екстремальні хвилі становлять серйозну небезпеку для ХвПЕ у морі. Раз на 20...30 років можуть з'являтися аномальні хвилі, які призводитимуть до повної руйнації пристроїв та всього іншого, що буде розташовано на шляху руху хвиль. Для того щоб запобігти небажаним наслідкам, слід постійно здійснювати моніторинг метеорологічних умов у зоні експлуатації електростанцій, передбачити їх захист або навіть спланувати дії щодо вчасної евакуації перетворювачів із зони очікуваного лиха.

**3.1.1.4.** Рельєф та шельф. Хвильові рухи з глибиною води поступово згасають, тому основна частина хвильової енергії зосереджена у приповерхневому шарі. Як відомо, вже на глибині, яка дорівнює половині довжини хвилі (або навіть 1/3), вплив хвиль практично не спостерігається. Маючи дані щодо режимів хвиль, можна виділити райони з тими глибинами, які можуть використовуватися для підводних перетворювачів енергії.

З іншого боку, величина ухилу дна у межах підводної берегової смуги визначає витрату енергії хвиль, а в залежності від цього берег розвивається або як абразійний (з обривами), або як акумулятивний (з шельфовою зоною). Для абразійних берегів можуть підійти берегові перетворювачі енергії, якщо ж береги мають акумулятивний тип, то – коливні на воді або занурені ХвПЕ.

Узбережжя сучасного ЧМ досить різноманітне і представлено різними геоморфологічними типами берегів. Вони показані на карті (див. рис. 3.6), з якої видно, що море оточують абразійні береги [18]. Значно рідше зустрічаються їх акумулятивні форми. Головна морфологічна особливість підводної частини чорноморської котловини – поєднання великої і досить глибокої западини з переважно крутими схилами та значного за площею мілководдя у північно–західній частині, яке фактично являє собою найбільший за розмірами шельф ЧМ.

На переважній частині моря великі глибини сконцентровані поблизу берегів, місцями підступаючи до них майже впритул (див. рис. 3.6). Відповідно і розташування ХвПЕ буде зосереджено впритул до берега, що не є нормою для заселених районів та районів з розвиненою курортно–рекреаційною інфраструктурою.



Шельф ЧМ – пологий підводний схил, фактично продовження берега під водою до глибини 100...150 м (не більше кількох кілометрів від берегової лінії). Винятком є мілководна північно–західна частина моря: вона вся належить до шельфової зони, і, фактично не є частиною чорноморської западини. Даний район ЧМ добре підходить для віддаленого розташування ХвПЕ.

АМ має порівняно простий обрис, відносно одноманітний берег и досить нескладний рельєф дна. Море переважно оточують абразійні береги, але поширені й акумулятивні берегові форми. Мілке побережжя переходить у рівне і плоске дно. Глибини повільно і плавно збільшуються при віддалення від берегів.

Донні відкладення морів в основному представлені глинистим мулом, мулистим піском і піском з гравієм. У процесі використання ХвПЕ можуть виникнути такі проблеми, як засмічення піском і мулом, утворення різних відкладень у рухливих елементах пристрою. Зазначені фактори при роботі можливо і потрібно виправляти, але це ще додаткові витрати на використання ХвПЕ.

**3.1.1.5.** Флора та фауна морів. Високу долю ризику експлуатації стаціонарних гідротехнічних споруд несе в собі їх обростання біомасою — ракушками та водоростями. Масовий розвиток обростання створює наступні біоперешкоди експлуатації платформ [23]:

- виникнення додаткового навантаження на опори від поступово зростаючої маси обростання;
- засмічення шарнірних з'єднань і зростання їх опору хвильовим навантаженням;
- неможливість виявлення дефектів міцності у конструкції опор.

Більш складні методи контролю (ультразвуковий, радіографічний, магнітних частинок) вимагають ретельної зачистки поверхні та є небезпечні для здоров'я персоналу. Таким чином, обростання опор морських стаціонарних платформ являє собою досить серйозну проблему і при тривалій експлуатації може сприяти виникненню аварійної ситуації.

Підводячи риску у даному пункті, зведемо усі ризики та загрози для ХвПЕ, які можуть виникати під час їх розгортання та експлуатації у районах ЧМ та AM, до табл. 3.2.

**3.1.2.** Апроксимація довготермінової статистики вітрових та хвильових режимів. Як було зазначено, для вибору вдалого місця розташування ХвПЕ потрібно мати довготермінові розподіли за десятки і навіть сотні років. Для їх отримання застосовано метод, представлений у підрозділі 2.2, та зібрані дані щодо вітрохвильових режимів.

Відповідно, було розроблено програмне забезпечення у середовищі розробки NetBeans IDE з використанням об'єктно-орієнтованої мови програмування Java [1<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>]. Аналіз було проведено для висот  $h_{3\%}$  та середніх періодів  $T_c$  хвиль для обох морів. Отримані залежності дозволили екстраполювати довготермінову статистику хвильових режимів для районів ЧМ та AM на тривалі інтервали часу. Значення параметрів  $h_s = h_{3\%}/1,32$  та  $T_{cs} \approx T_c$ , що визначають хвильові режими, представлені у табл. 3.3. Приклади апроксимації розподілів для  $h_{3\%}$  та  $T_c$ ЧМ наведено на рис. 3.7.

Отримані результати розрахунків дозволили зробити висновок, що для апроксимації статистики по  $h_{3\%}$  та  $T_c$  ЧМ слід використовувати розподіл Вейбула, а для АМ — розподіл Гумбела.

### Ризики та загрози для ХвПЕ у морі

N⁰	Фактори	Ризики	Подолання	
1	Інтенсивні	Пошкодження та	Занурення, спецзахист,	
	шторми	руйнування	транспортування в укриття	
2	Солоність води	Корозія та прискорене	Спецматеріали, антикорозійне	
		іржавіння	покриття	
3	Водорості	Обростання і засмічення	Спецпокриття, захисні кожухи	
		рухомих з'єднань		
4	Мікроорганізми,	Обростання, зміна	Спецпокриття, профілактичні	
	ракушки	характеристик	огляди, очищення	
5	Міграція донних	Замулення, занесення	Захисні засоби, відсипка гравію	
	мас	піском		
6	Механічні	Вихід з ладу, припинення	Підвищення надійності роботи	
	поломки	роботи	конструкції	
7	Зіткнення з пла-	Руйнування елементів,	Системи попередження і	
	вучими засобами	вихід з ладу	контролю судноплавства	

Таблиця 3.3

# Наближені довготермінові оцінки параметрів хвильових режимів $h_s, {f m}/T_{cs}, {f c}$ із забезпеченістю 3%

Сорон	ЧМ, І район		ЧМ, II район		AM	
Сезон	$h_s$ , м	$T_{cs}, c$	$h_s$ , м	$T_{cs}$ , c	$h_s$ , м	$T_{cs}, c$
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

Також зазначимо, що у роботах [1<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>, 11<sup>a</sup>] додатково висвітлені результати, що отримані у даному підрозділі.



Рис. 3.7. Приклад апроксимації статистичних даних швидкостей вітру: (a) – за розподілом Вейбула; (б) – за розподілом Гумбела; (в) – за логістичним розподілом; (г) — за розподілом Парето

#### 3.2. Лінійне наближення в моделюванні вітрових хвиль

Представлені нижче результати отримано за допомогою власно розробленого програмного забезпечення [2<sup>a</sup>, 3<sup>a</sup>, 8<sup>a</sup>, 9<sup>a</sup>, 12<sup>a</sup>, 13<sup>a</sup>, 15<sup>a</sup>, 18<sup>a</sup>, 20<sup>a</sup>].

3.2.1. Моделювання нерегулярної хвильової поверхні на інтервалах квазістаціонарності.

**3.2.1.1.** Розрахунок частотних спектрів. Для оцінки адекватності результатів розрахунку частотних спектрів за формулами (2.14) та (2.15), було проведено порівняння їх зі спектрами, що отримано експериментально у роботах [82,121], а також для Атлантичного океану у роботі [128]. Приклади порівняння однопікових спектрів подано на рис. 3.8, а двопікових спектрів – на рис. 3.10. Як видно, розрахункові формули дають добре узгоджені результати.

При апроксимації частотного спектру, додатково, було враховано обмеженість глибини *d* шельфової зони за допомогою корегуючого коефіцієнту Китайгородського  $\phi$  (2.21). Приклад модифікації спектру для хвиль на глибокій воді за допомогою коефіцієнту  $\phi$  представлено на рис. 3.9. З рисунку добре видно, що зменшення глибини шельфової зони призводить до втрати енергії хвиль на більш низьких частотах, що є важливим при розрахунках ефективності ХвПЕ.

3.2.1.2. Оптимізація процедури розрахунку просторово-часових реалізацій реальних хвиль. Щоб реалізувати розрахунки хвильової поверхні за часом на інтервалах квазістаціонарності  $30 \dots 40$  хвилин, потрібно для обраної частотної смуги [ $\sigma_{min}$ ;  $\sigma_{max}$ ] виконати дискретизацію з кроком  $\Delta \sigma$  і числом елементарних гармонік  $N \approx (2 \dots 3) \cdot 10^3$ . Практика подібних розрахунків показує [96], що при моделюванні нерегулярного хвилеутворення на часовому інтервалі 30 хвилин з кроком 0,5 секунд та на просторовому інтервалі 300 метрів з кроком 0,2 метри, потрібно у більш ніж 5 мільйонах точок брати суму N = 2000 кількості гармонік. Якщо розпирити розрахунки до полів швидкостей та тиску з глибиною, то отримати результати у реальному часі, навіть на сучасних комп'ютерах, буде проблематично. Тому, для скорочення кількості гармонік до значень  $N \sim 10^2$ , було застосовано прийоми, які запропоновані у роботах [59, 96] і які полягають у нерівномірній дискретизації частотного інтервалу  $\Delta \sigma_i$  з великою концентрацією частот  $\sigma_i$  в енергомісткій частині спектру, а також додатковій рандомізації частот  $\sigma_i$ , на яких потім формується лінійчатий спектр  $S_w(\sigma_i)$ . Від-



Рис. 3.8. Порівняння спектрів, отриманих експериментально [82,121] (a) та за розрахунками у даній роботі (б): хвильові режими згори донизу  $-h_s = 4$  м,

 $T_{cs} = 8 \text{ c}, \, \gamma_H = 3,3; \, h_s = 7 \text{ m}, \, T_{cs} = 10 \text{ c}, \, \gamma_H = 2,0$ 



Рис. 3.9. Приклад розрахунку спектрів для хвиль на воді з обмеженою глибиною d (a) за допомогою коефіцієнту Китайгородського  $\phi(\sigma_d)$  (б)



Рис. 3.10. Порівняння спектрів, отриманих експериментально у роботі [128] (a), та їх апроксимації за даними роботи (б): хвильові режими для верхньої частини спектрів –  $h_s = 8,02$  м,  $T_{cs} = 8,29$  с,  $R_S = 2,36$ ,  $R_T = 1,57$ ; для середньої частини –  $h_s = 7,22$  м,  $T_{cs} = 8,54$  с,  $R_S = 1,54$ ,  $R_T = 1,77$  та для нижньої частини –  $h_s = 7,01$  м,  $T_{cs} = 10,02$  с,  $R_S = 0,64$ ,  $R_T = 1,88$ 

повідний алгоритм [59], що представлено нижче, дозволяє отримати репрезентативні результати моделювання нерегулярних хвиль за часом t та координатою xвже при N = 150...200 (тобто без повторів хвиль, що не зустрічається в реальних умовах).

- Крок 1. Спочатку за допомогою виразу  $\Delta \sigma = (\sigma_{max} \sigma_{min}) / N$  розраховується рівномірний частотний інтервал при  $N \sim 10^2$ .
- Крок 2. Визначаються нерівномірні частотні інтервали  $\Delta \sigma_i$  за формулою  $\Delta \sigma_i = [\sigma'_{i+1} \sigma'_i], i = 0, 1, \dots, N-2$ , де  $\sigma'_0 = \sigma_{min}, \sigma'_1 = \sigma_{min} + \Delta \sigma$  і  $\sigma'_{i+1} = \sigma'_i \cdot C_N$  з множником  $C_N = \sqrt[N-1]{\sigma_{max}/\sigma'_1}$ .
- Крок 3. Виконується додатково рандомізація нерівномірних частот  $\sigma'_i$  у вигляді $\sigma''_i = \sigma'_i + rand[0, \Delta \sigma_i], i = 0, 1, \dots, N-2.$
- Крок 4. Остаточні значення дискретних частот та інтервалів визначаються у вигляді  $\sigma_i = (\sigma''_i + \sigma''_{i-1})/2$  і  $\Delta \sigma_i = (\sigma''_i \sigma''_{i-1}).$

Приклад розрахунку часових реалізацій нерегулярного хвильового поля відповідно до описаної вище схеми з використанням двопікового спектру наведено на рис. 3.11 (хвильові ординати визначено у просторовій точці x = 300 м та на інтервалі часу t = 10 хвилин).



Рис. 3.11. Результати розрахунку ординат хвильової поверхні у просторовій точці x = 300 м та інтервалі часу t = 10 хв. для параметрів спектру  $h_s = 7.22$  м,  $T_{cs} = 8.54$  с,  $R_S = 1.54$ ,  $R_T = 1.77$ 

Відповідні результати розрахунку амплітуд та початкових фаз елементарних гармонік показано на рис. 3.12.

З метою оцінки адекватності лінійної моделі були проведені порівняння хви-



Рис. 3.12. Результати розрахунку амплітуд (а) та початкових фаз елементарних гармонік (б) для хвильового режиму  $h_s = 7,22$  м,  $T_{cs} = 8,54$  с,  $R_S = 1,54$ ,

$$R_T = 1,77$$

льових профілів із записами реального хвилеутворення у Північній частині Атлантичного океану (див. рис. 3.13). Добра якісна узгодженість реалізацій за нерегулярністю говорить про відповідність змодельованого процесу реальній фізичній картині.

3.2.2. Розрахунок полів швидкості та тиску з глибиною. При детальному аналізі результатів розрахунку гідродинамічних полів за виразами (2.23) та (2.24) були виявлені значні похибки у приповерхневому шарі достатньо крутих



Рис. 3.13. Візуальне порівняння реального профілю з розрахованим у даній роботі при  $h_s=7,2\,{
m m},\,T_{cs}=8,5\,{
m c}$ 

хвиль (див. рис. 3.14). Швидкості перевищували фазову швидкість руху гребенів, а хвильові тиски не дорівнювали нулю на хвильовій поверхні. Для подолання даної проблеми було отримано скорегований розв'язок крайової задачі теорії хвиль на воді.

3.2.2.1. Лінійний розв'язок крайової задачі теорії хвиль на воді з модифікованими граничними умовами. Для отримання відповідного розв'язку в граничних умовах на хвильовій поверхні класичної крайової задачі теорії хвиль [37,50,62,100] відкинемо усі нелінійні члени, але залишимо формулювання граничних умов на хвильовій поверхні  $\zeta_w(x,t)$ .

Тоді останні мають вигляд

$$\frac{\partial \zeta_{w}}{\partial t} - \frac{\partial \phi_{w}}{\partial z} = 0, \ z = \zeta_{w}; 
\frac{\partial^{2} \Phi_{w}}{\partial t^{2}} + g\zeta_{w} = 0, \ z = \zeta_{w}.$$
(3.1)

Розв'язок для потенціалу швидкостей було отримано методом розділення змінних  $\Phi_w(x, y, t) = \sum_i X_i(x, t) \cdot Z_i(z)$  [37, 50, 62, 100], вважаючи змінність межі за часом  $z = \zeta_w(x, t)$  параметричною. Деталі розв'язку наведено у Додатку В, а остаточні результати мають вигляд





Рис. 3.14. Приклад появи похибок у приповерхневому шарі при розрахунках гідродинамічних полів у лінійному наближенні: швидкостей (а) та тиску (б) з глибиною для хвильового режиму  $h_s = 8,2$  м,  $T_{cs} = 8,0$  с

— потенціал швидкості

$$\Phi_w(x,z,t) = -g \sum_{i=1}^N \frac{a_i}{\sigma_i} \frac{\cosh[k_i(z+d)]}{\cosh[k_i(\zeta_w+d)]} \sin \theta_i(x,t);$$
(3.2)

— поле швидкостей

$$\upsilon_{wx}(x,z,t) = -\sum_{i=1}^{N} \delta_i c_i \frac{\cosh[k_i(z+d)]}{\cosh[k_i(\zeta_w+d)]} \cos \theta_i(x,t);$$
  

$$\upsilon_{wz}(x,z,t) = -\sum_{i=1}^{N} \delta_i c_i \frac{\sinh[k_i(z+d)]}{\cosh[k_i(\zeta_w+d)]} \sin \theta_i(x,t);$$
(3.3)

— хвильовий тиск

$$p_w(x,z,t) = -\rho g \left[ z - \sum_{i=1}^N a_i \frac{\cosh[k_i(z+d)]}{\cosh[k_i(\zeta_w+d)]} \cos \theta_i(x,t) \right]; \quad (3.4)$$

де  $\theta_i(x,t) = k_i x + \sigma_i t + \alpha_i$ , а  $\sigma_i$  та  $k_i$  зв'язані дисперсійним співвідношенням  $\sigma_i^2 = g k_i \tanh[k_i(\zeta_w + d)]; \, \delta_i = k_i a_i.$ 

Результати розрахунку гідродинамічних полів за даними виразами (3.3) та (3.4) представлені на рис. 3.15, з якого добре видно, що зазначені вище похибки, відсутні. Зауважимо, що з математичної точки зору даний розв'язок є коректним тільки з точністю до нелінійних членів другого і вище порядків.



Рис. 3.15. Скориговані результати розрахунку гідродинамічних полів, отримані у лінійному наближенні з модифікованими граничними умовами: для швидкостей руху рідини (ліворуч) та тиску з глибиною (праворуч) при

$$h_s = 8,2 \text{ M}, T_{cs} = 8,0 \text{ c}$$

**3.2.3.** Розрахунок локальних групових характеристик нерегулярних вітрових хвиль. Для подальшого моделювання у нелінійному наближенні, наведемо результати розрахунків локальних пакетних характеристик у хвильовій поверхні  $\zeta_w$  та поверхневому потенціалу швидкостей  $\phi_w$ : обвідні амплітуд  $a_w$ ,  $a_{\phi}$ , модуляції фаз  $\psi_w$ ,  $\psi_{\phi}$ , а також локальні значення колової частоти  $\sigma$ , хвильового числа k та крутості видимих хвиль  $\delta_w$ .

Результати розрахунку дійсної  $\zeta_w(x;t_0)$  та уявної  $\xi_w(x;t_0)$  частини можна побачити на рис. 3.16. Далі, приклади розрахунку обвідної амплітуд  $a_w(x;t_0)$  та повної фази  $\theta_w(x;t_0)$  для хвильового профілю показано на рис. 3.17.



Рис. 3.16. Результати розрахунку дійсної  $\zeta_w(x;t_0)$  та уявної  $\xi_w(x;t_0)$  частини комплексного процесу  $\mathbf{\eta}(x,t)$ 



Рис. 3.17. Результати розрахунку обвідної амплітуд  $a_w(x;t_0)$  та повної фази  $\theta_w(x;t_0)$  для хвильового профілю

Коректність розрахунку обвідної амплітуд та повної фази перевірено за допомогою зворотнього розрахунку дійсної  $\zeta_w(x,t)$  та уявної  $\xi_w(x,t)$  частини комплексного процесу  $\eta(x,t)$  за виразами (2.29). Результати на рис. 3.18, і їх порівняння з даними рис. 3.16 доводять адекватність отриманих результатів.

Приклади розрахунку локальних значень колової частоти  $\sigma(t; x_0)$ , хвильового числа  $k(t; x_0)$ , фазової швидкості  $c(t; x_0)$  та крутості видимих хвиль  $\delta_w(t; x_0)$ 



Рис. 3.18. Результати зворотнього розрахунку дійсної  $\zeta_w(x; t_0)$  та уявної  $\xi_w(x; t_0)$  частини комплексного процесу  $\eta(x, t)$  за відомими обвідною амплітуд  $a_w(x; t_0)$  та повною фазою  $\theta_w(x; t_0)$ 

представлені на рис. 3.19. Як видно з даного рисунка, мають місце різкі стрибки локальних значень колової частоти та хвильового числа, пов'язані з перебудовою фаз на межах груп хвиль, та відємні значення крутості хвиль.



Рис. 3.19. Локальні характеристики нерегулярних хвиль як функції часу: (a) колова частота  $\sigma$ , (б) хвильове число k, (в) крутість хвиль  $\delta_w$ 

Для подолання даної проблеми було запропоновано поточне значення крутості  $\delta_w$  замінити на наближене значення  $\delta_w \approx \langle k \rangle a_w$ . З рис. 3.20 добре видно, що різкі стрибки, які були пов'язані з перебудовою фаз на межах груп хвиль, зникли.



Рис. 3.20. Порівняння вихідних (а) та модифікованих (б) характеристик нерегулярних хвиль

#### 3.3. Нелінійне наближення в моделюванні вітрових хвиль

**3.3.1. Нелінійний розрахунок хвильової поверхні.** Результат насичення хвильового профілю нелінійними ефектами згідно виразу (2.41) показано на рис. 3.21, на якому добре помітні зміни у формі гребенів хвиль. Більш детально хвильові профілі показано на рис. 3.22, з якого видно, що відмінності тим більші, чим крутіші хвилі.

Розрахунки показали, що різниця між значеннями вертикальної координати



Рис. 3.21. Порівняння хвильових профілів у лінійному та нелінійному наближеннях

*ζ<sub>w</sub>* лінійного та нелінійного профілів в усій часовій реалізації може змінюватись від декількох сантиметрів та досягати значення більшого одного метру і це може привести до зміни динамічних та енергетичних характеристик ХвПЕ.



Рис. 3.22. Приклад порівняння змін у гребенях та впадинах хвильового профілю  $\zeta_w$  при нелінійному узагальненні

Крім, нелінійні ефекти були також враховані і при визначені локальної фазової швидкості руху хвиль за формулою  $c^{nl} = c_{lin}(x,t) \left(1 + \frac{1}{2} (\delta_w^{nl})^2 + \frac{7}{3} (\delta_w^{nl})^4\right).$ 

**3.3.2. Оцінка точності розрахунків похідних за часом.** Наступним після насичення хвильового профілю нелінійними ефектами є розрахунок поля швидкостей на хвильовій поверхні, у якому суттєвим моментом є заміни похідних за часом похідними за координатою *x*.

Тому перш ніж привести результати розрахунку поверхневих швидкостей,

порівняємо похідну за часом  $\zeta_{wt}$  за формулою (2.49) з їх оцінкою за допомогою скінченних різниць [27] (рис. 3.23).



Рис. 3.23. Порівняння похідних за часом від хвильового профілю  $\zeta_{wt}$ , що отримані через  $\zeta_{wx}$  та за допомогою скінчених різниць

З рисунку добре видно, що за фазовими характеристиками похідні повністю узгоджуються, а за амплітудними – помітні дещо більші значення у похідній  $\zeta_{wt} \sim c \zeta_{wx}$ . Аналогічні результати мають місце і для похідної для поверхневого потенціалу  $\phi_{wt}$ . Оскільки величини  $\zeta_{wt}$  і  $\phi_{wt}$  входять в поправки до основних залежностей, то даними відмінностями можна знехтувати.

**3.3.3.** Розрахунок полів швидкості та тиску. Приклад результатів розрахунку полів поверхневих швидкостей та швидкостей і тиску з глибиною у нелінійному наближенні показано на рис. 3.24.

Для оцінки впливу нелінійних ефектів було проведено порівняльний аналіз нелінійного та лінійного наближень на прикладі модулів поверхневих швидкостей, поданому на рис. 3.25. Як видно з рисунка, нелінійні швидкості в основному мають більші абсолютні значення, і величина відхилення від лінійних показників може досягати декількох десятків відсотків. Наприклад, на рис. 3.25 добре видно збільшення векторів нелінійних швидкостей на 15% та навіть на 27%.

Нарешті, з метою тестування алгоритму розрахунку було проведено порівняння поверхневих швидкостей з даними лазерних вимірювань з роботи [116], див. рис. 3.26. Також було проведено порівняння полів швидкостей з глибиною з чисельними розрахунками Tanaka [131], див. рис. 3.27. Як видно з рисунків,



Рис. 3.24. Приклади розрахунку полів швидкостей та тиску з глибиною у нелінійному наближені



Рис. 3.25. Порівняння розрахованих поверхневих швидкостей у лінійному (■ –
■) та нелінійному наближеннях (▼ – ▼)

результати порівняння можна вважати загалом добрими.

Таким чином, у даному розділі ми навели приклади чисельної реалізації та аналізу гідродинамічних моделей для нерегулярних вітрових хвиль у лінійному та нелінійному наближеннях.



Рис. 3.26. Порівняння поверхневих швидкостей (▼ — ▼) з даними лазерних вимірювань (■ — ■) з роботи [116]



Рис. 3.27. Порівняння полів швидкостей з глибиною з чисельними розрахунками Tanaka [131]

#### Висновки і основні результати до Розділу 3

На основі результатів дослідження, проведеного у даному розділі, можна виділити наступні основні результати і висновки.

1. За допомогою розробленого у роботі комплексу обчислювальних програм виконано апроксимацію вітро–хвильових режимів Чорного та Азовського морів, придатну для термінів часу до 100 років, з метою визначення вітрохвильових режимів із заданою забезпеченістю та сформовано відповідну інтерактивну комп'ютерну карту шельфів.

Ці інструменти можуть бути використані при вирішені питань раціонального розміщення ХвПЕ.

2. Розроблено та застосовано удосконалену спектральну технологію для моделювання нерегулярної хвильової поверхні у лінійному наближенні, зокрема використано більш загальний двох піковий шести параметричний спектр Хассельмана, який краще моделює розподіл енергії хвиль у частотній смузі. Також впроваджено нерівномірну та рандомізовану дискретизацію спектру, на відміну від звичайної рівномірної, що дало змогу без втрат у точності майже на порядок зменшити кількість елементарних спектральних гармонік (з тисяч до сотень), що є важливим при чисельних розрахунках роботи ХвПЕ в хвильових полях.

3. Для усунення суттєвих чисельних похибок спектральної моделі в гідродинамічних полях тиску та швидкостей у при поверхневому шарі рідини вперше отримано новий лінійний розв'язок крайової задачі теорії хвиль на воді із обмеженою глибиною при збереженні граничних умов на вільній поверхні. Даний розв'язок забезпечує розрахунки коректних чисельних значень хвильового тиску та швидкостей в околі гребенів нерегулярних хвиль великої крутості.

4. У нелінійному наближенні різниця між лінійними та нелінійними профілями хвиль тим більша, чим більша крутість хвиль. Розраховані нелінійні профілі хвиль мали більш високі та гострі гребені і більш пологі підошви хвиль із загальним укрученням профілю в сторону руху хвиль, що є характерним для вітрових хвиль. Відмінності в висотах гребенів можуть сягати до 30%. 5. Таким же чином спостерігаються відмінності і в полях швидкостей приповерхневому шарі рідини. В полях тиску нелінійне наближення дає менш помітні відмінності, але вони є суттєвими для розрахунків хвильових навантажень на ХвПЕ. Порівняння результатів для поверхневих швидкостей з незалежними лазерними вимірюванням у басейні, а також для полів швидкостей з глибиною з чисельними розрахунками інших авторів – виявилися добрими.

6. Розроблені лінійна та нелінійна моделі для нерегулярних вітрових хвиль можуть бути використані, як у розрахунках роботи ХвПЕ під дією таких хвиль (визначенні їх ККД, підбору оптимальних схем та конфігурацій тощо), так і у розрахунках нелінійних та нерегулярних динамічних реакцій суден (хитавиця, слемінг, хвильова вібрація) та засобів океанотехніки (наприклад, нафтовидобувних платформ) у штормових умовах.

#### РОЗДІЛ 4

## РІВНЯННЯ КОЛИВАНЬ ТА РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ ДИНАМІКИ ХВПЕ РІЗНИХ ТИПІВ

У даному розділі представлено результати дослідження динаміки руху ХвПЕ наступних типів: 1) придонного кесона, що реагує на зміни хвильового тиску з глибиною, 2) зануреної коливальної пластини, що реагує на горизонтальне поле швидкостей у хвилях, 3) поверхневого поплавця на важелі та 4) поверхневого ланцюжка плотів, які реагують на коливання вільної поверхні.

Відповідно до кожного типу ХвПЕ у підрозділах розглянуті наступні пункти: 1) розробка принципової схеми роботи пристрою, 2) визначення його кінематики руху, 3) підготовка геометрії поверхні ХвПЕ для комп'ютерного розрахунку, 4) визначення гідромеханічних навантажень на робочі елементи пристроїв з урахуванням нелінійних ефектів та створення рівнянь коливань, 5) чисельне інтегрування рівнянь коливань та розрахунки відповідних переміщень, 6) аналіз результатів розрахунку динаміки руху ХвПЕ у пакеті ParaView.

Припущення та теоретичні основи розрахунку гідромеханічних навантажень на робочі елементи ХвПЕ різного типу було розроблено у другому розділі роботи. Для складання рівнянь коливань застосовували формули другого закону Ньютону, а їх чисельне інтегрування виконувалось методом Адамса-Бешфорта.

З результатами, що отримані у даному розділі можна ознайомитись детально у роботах [17<sup>a</sup>, 16<sup>a</sup>, 10<sup>a</sup>, 6<sup>a</sup>, 4<sup>a</sup>, 19<sup>a</sup>, 21<sup>a</sup>, 22<sup>a</sup>, 14<sup>a</sup>].

#### 4.1. Занурені придонні кесони

Занурений придонний кесон – пристрій, що розміщується на глибині акваторії 10...20 метрів і реагує вертикальними коливаннями  $\zeta_0(t)$  на зміну хвильового тиску при проходженні хвиль (рис. 4.1). На рис. 4.1 представлена принципова схема зануреного кесону. Представимо розгляд із визначення системи координат,

кінематики та динаміки коливань кесона.



Рис. 4.1. Принципова схема роботи зануреного придонного кесону

**4.1.1. Системи координат та кінематика придонного кесону.** Серед геометричних елементів, які будуть визначати просторове положення даного типу ХвПЕ, слід виділити циліндричний кесон із закругленою вершиною та профіль нерегулярних вітрових хвиль на воді. Градієнт гідродинамічного тиску  $dP_{hd}/dz$  повинен давати вертикальну складову діючих сил і відповідно викликати вертикальні коливання  $\zeta_0(t)$ . Параметри, що визначають положення геометричних елементів: глибина акваторії d, глибина занурення основи кесону  $d_G$  ( $d_G \leq d$ ), заглиблення кришки  $d_m$ , діаметр D циліндру кесону, загальна висота пристрою  $h_c$  та маса коливального елементу  $m_G$ , див. рис. 4.2.

У глобальній системі координат xOz будемо визначати гідродинамічні поля, які утворюють основне джерело збурення для кесону. Для кесону визначимо дві локальні системи координат  $x_GGz_G$  та  $x'_GGz'_G$ , в яких будемо описувати його динаміку та геометрію, відповідно. Зв'язки між системами координат, розташування яких показано на рисунку 4.2, визначаються формулами  $x \equiv x_G \equiv x'_G$ ,  $z = z_G - d_G$  та  $z'_G = z_G - [d'_G + \zeta_0(t)].$ 

**4.1.2.** Визначення геометрії пристрою. Геометрію розрахункової моделі кесону було розроблено за допомогою пакету FreeCAD [95]. Послідовність дій при створенні геометричної моделі зводиться до наступного: 1) розробка ескі-



Рис. 4.2. Зв'язок між системами координат кесону

зу (скетч) елемента пристрою, 2) перетворення ескізу в об'ємний об'єкт та 3) збереження об'єкту у зовнішньому файлі формату STL [81].

Визначимо рухомі та нерухомі елементи кесону. До рухомих елементів відноситься тільки циліндр кесону, розділений на два елементи – пасивний бічний елемент циліндру та розрахунковий елемент – верхня кришка, яка і сприймає дію тиску.

Елементи рухомого циліндру. На рис. 4.3 представлено результат розробки ескізів рухомої та бічної частин кесону. На першому кроці створюються ескізи твірних рухомих елементів, а далі за допомогою обертання ескізів твірних навколо вертикальної вісі z, формують об'ємні об'єкти, які у сумі формують повний елемент.

*Основа та напрямний циліндр.* Для їх створення застосовують примітиви FreeCAD: «Create a cube solid» (прямокутний паралелепіпед) та «Create a Cylinder» (циліндр) для створення квадратного листа основи та напрямного циліндра (див. рис. 4.4).

На завершення створення геометрії кесону за допомогою команди FreeCAD «Create mesh from shape» створено сітки трикутних поверхневих скінченних елементів кришки кесону, збережено у бінарних файлах формату STL.



Рис. 4.3. Послідовність створення рухомих елементів кесон у пакеті FreeCAD



Рис. 4.4. Вигляд 3D моделі кесону у пакеті FreeCAD



Рис. 4.5. Розрахункова поверхня кесону у вигляді сітки трикутних скінченних .

елементів

**4.1.3.** Розрахунок навантажень на кесон та динаміки руху. Для розрахунку динаміки руху кесону застосуємо ІІ-й закон Ньютона, рівняння якого в проекції на вісь *Oz* має наступний вигляд:

$$m_G \ddot{\boldsymbol{\zeta}}_0 = P_z^{\Sigma}(t) + \Delta P_z(t), \qquad (4.1)$$

де  $m_G$  – маса кесону;  $P_z^{\Sigma} = P_z^{KF} + P_z^{HN}$  – сумарне гідромеханічне навантаження;  $\Delta P_z$  – додаткове навантаження від внутрішньої системи перетворення енергії записане у вигляді  $\Delta P_z = \Delta M \ddot{\zeta}_0 + \Delta \Lambda \dot{\zeta}_0 + \Delta K \zeta$ , де  $\Delta M$ ,  $\Delta \Lambda$ ,  $\Delta K$  – вільні параметри внутрішньої системи, приведені до переміщення  $\zeta_0(t)$ .

Сили Фруда-Крилова  $P_z^{KF}(t)$ . Гідромеханічне навантаження  $P_z^{KF}$  розраховується через незбурений тиск у хвилях  $p_w(x, z, t)$  [33] за формулою (2.68) дискретизованою на сітці скінченних елементів кришки кесону

$$P_{z}^{KF}(t) = -\iint_{(S)} p'_{w}(x, z', t) \cos(n, z') dS \approx -\sum_{i=1}^{N} \int_{S_{\Delta i}} p'_{w} \cos(n, z') dS_{\Delta i}, \qquad (4.2)$$

де  $p'_w$  – хвильовий тиск, визначений у зв'язаній з кесоном системі координат x'Gz';  $S_{\Delta i}$  – площа лінійного трикутного елементу сітки, N – кількість трикутників в сітці.

Найбільш розповсюдженою технікою реалізації чисельного інтегрування є квадратурні формули [25,53]. Відповідно до них, інтеграл для трикутної комірки можна наближено визначити за допомогою наступних залежностей

$$\int_{S_{\Delta i}} p'_w \cos(n, z') dS_{\Delta i} \approx \Delta S_{\Delta i} \sum_{k=1}^n \omega_k p'_w(L_1, L_2, L_3) \cos(n, z')_k, \tag{4.3}$$

де  $\omega_k$  – ваговий коефіцієнт та  $L_{1,2,3}$  – L-координати точок інтегрування, які залежать від обраного методу інтегрування [53], n – кількість точок інтегрування.

Для методу Гауса-3 при n = 3 маємо  $\omega_k = \left\{\frac{1}{6}; \frac{1}{6}; \frac{1}{6}; k = 1, 2, 3; L_{k1} = \left\{\frac{1}{6}; \frac{2}{3}; \frac{2}{3}\right\};$  $L_{k2} = \left\{\frac{1}{6}; \frac{1}{6}; \frac{1}{6}\right\}; L_{k3} = 1 - L_{k1} - L_{k2}.$ 

Застосувавши до тиску  $p'_w$  інтерполяційну формулу, остаточно отримаємо

$$P_{z}^{KF}(t) \approx -\sum_{i=1}^{N} \left[ \Delta S_{\Delta i} \sum_{k=1}^{n} \omega_{k} (p'_{wa} L_{k1} + p'_{wb} L_{k2} + p'_{wc} L_{k3}) \cos(n, z')_{k} \right], \quad (4.4)$$

де  $p'_{wa,b,c}$  – вузлові значення тиску.

Гідродинамічні сили Хаскінда-Ньюмана  $P_z^{HN}(t)$ . Через зануреність кесону у рідину у першому наближенні можна знехтувати хвильовими ефектами на вільній поверхні і тоді  $P_z^{HN}$  будуть визначати тільки сили інерційної природи, які, у свою чергу, визначаються прилученими масами  $\mu_{33}$  та відносними прискореннями при коливаннях кесона  $\ddot{\zeta}_0 - \dot{\mathbf{v}}_{wz}$ . У рамках даного припущення прилучена маса втрачає свою залежність від частоти коливань і тому загальна формула для сил Хаскінда-Ньюмана трансформується до вигляду

$$P_z^{i\mu}(t) \approx -\mu_{33} \left[ \ddot{\zeta}_0 - \dot{\mathfrak{v}}_{wz}^m \right], \qquad (4.5)$$

де  $\mathbf{v}_{wz}^m \equiv \mathbf{v}_{wz}(-d_m + \zeta_0)$  – значення хвильової швидкості на кришці кесону з урахуванням її вертикальних коливань;  $\boldsymbol{\mu}_{33}$  – прилучена маса заглибленого циліндру при вертикальних коливаннях, розрахована за рекомендаціями [28].

Остаточно диференціальне рівняння коливань кесону запишемо у вигляді

$$\ddot{\zeta}_{0} = \frac{P_{z}^{KF}(t) + \mu_{33}\dot{v}_{wz}^{m} - (\Delta\Lambda\dot{\zeta}_{0} + \Delta K\zeta_{0})}{m_{G} + \mu_{33} + \Delta M} = F(t, \zeta_{0}, \dot{\zeta}_{0}),$$
(4.6)

Дане рівняння інтегрується чисельно методом Адамса-Бешфорта і відповідні результати представлено нижче.

На рис. 4.6 показано фрагменти візуалізації розрахунку динаміки придонного кесону на інтервалі 6,1 секунди з параметрами хвиль та ХвПЕ: висота  $h_s =$ 4,15 м та період  $T_{cs} = 7,2$  с хвиль, глибина акваторії d = 20 м, висота кесону  $h_c = 21,5$  м, діаметр D = 4 м та маса рухомого циліндру  $m_G = 11$  т.

З рисунку 4.6 також добре видно, що розроблена у даній роботі модель динаміки кесона принаймні якісно відповідає фізиці явища при проходженні хвиль. У момент часу t = 54,8 с рухомий циліндр кесону знаходиться у верхньому положенні через відносно менший тиск при проходженні підошви хвилі.

Реалізації коливань кришки кесону  $\zeta_0$  при різних заглибленнях пристрою подані на рис. 4.16. З графіків добре видно, що при збільшенні рівня заглиблення пристрою амплітуди його вертикальних коливань  $\zeta_0$  різко зменшуються.





#### 4.2. Занурені коливальні пластини

Наступний тип ХвПЕ – це занурена коливальна пластина, що розміщується на глибині близько 10...20 м і реагує кутовими коливаннями на поле поздовжніх швидкостей при проходженні хвиль (див. рис. 4.8). Для прикладу, можна навести розробку компанії Aquamarine Power – Oyster [78], яка працює за подібною схемою.



Рис. 4.7. Результати розрахунку ординат вертикальних коливань  $\zeta_0$  кесону при різних варіантах заглиблення d



Рис. 4.8. Принципова схема роботи коливальної пластини

**4.2.1. Системи координат та кінематика коливальних пластин.** Серед геометричних елементів, які будуть визначати просторове положення дано-

го типу ХвПЕ, слід виділити прямокутну або еліптичну у перерізі пластину та поверхню нерегулярних вітрових хвиль на воді. Параметри, що визначають розрахункову модель (див. рис. 4.9): d – глибина акваторії, глибина розташування опорного шарніру  $d_G$ , висота пластини H та її ширина B (сторона, що паралельна фронту хвилі), товщина D та маса  $m_p$  пластини. У нерухомій системі координат xOz визначено характеристики хвиль, а у зв'язаній системі координат  $x_BGz_B$ описано геометрію пластини.



Рис. 4.9. Системи координат коливальної пластини

Рухома та нерухома системи координат зв'язані залежністю

$$x'_{B} = x_{B} \cos \psi_{0}(t) - z_{B} \sin \psi_{0}(t); z'_{B} = z_{B} \cos \psi_{0}(t) + x_{B} \sin \psi_{0}(t),$$

$$(4.7)$$

де  $\psi_0(t)$  – динамічний кут нахилу пластини і  $x_B \equiv x$ , а  $z_B = z + d_G$ .

Положення точки  $\xi$  ( $0 \leq \xi \leq H$ ), у якій обчислюється поточне значення інтенсивності гідромеханічного навантаження, визначається відповідно  $x_B(\xi) = \xi \sin \psi_0(t)$  та  $z_B(\xi) = \xi \cos \psi_0(t)$ .

**4.2.2. Визначення геометрії пристрою.** Для створення розрахункової моделі коливальної пластини було застосовано пакет FreeCAD [95] аналогічним чином, як і для кесону.

Визначимо рухомі та нерухомі елементи коливальної пластини. Рухомими елементами є пластина та петлі, за допомогою яких вона кріпиться в шарнірах до основи, яка є нерухомим елементом.

Пластина. На рисунку 4.10 представлено ескіз пластини у перерізі. Поле пластини створюють вертикальні смуги (4...6) з прямокутними перерізами, які можуть змінювати кут атаки до потоку рідини (рис. 4.14). Це дає змогу змінювати гідродинамічні параметри пластини, підлаштовуючи її динаміку під характеристики хвильового потоку.



Рис. 4.10. Вигляд скетчу коливальної пластини у пакеті FreeCAD

Далі, за допомогою команди FreeCAD «Pad» ескіз перетворюють в об'ємний об'єкт (рис. 4.13).

Петлі. Для петель пластини виконують аналогічні дії по створенню скетчу та його перетворення в об'ємну фігуру (див. рис. 4.11).



Рис. 4.11. Вигляд скетчу петлі (а) та її вигляд у 3D режимі (б)

*Основа*. Для створення основи також застосовано застосуємо декілька геометричних примітивів FreeCAD і остаточний вигляд основи представлено на рис. 4.12.



Рис. 4.12. Вигляд моделі основи для коливальної пластини

Повний вигляд тривимірної моделі коливальної пластини та її триангулярна дискретизація представлені на рис. 4.13.



Рис. 4.13. 3D модель коливальної пластини (а) та її триангуляція (б) у пакеті FreeCAD

**4.2.3.** Розрахунок динаміки коливань пластини. Для розрахунку динаміки руху коливальної пластини застосуємо ІІ-й закон Ньютона для рівнянь коливань та формули Морісона для розрахунку навантажень, які було розглянуто нами у 2.4 пункті та Додатку Б. Рівняння динаміки має наступний вигляд

$$I_G \ddot{\psi}_0(t) = M_G^{\Sigma}(t) + \Delta M_G(t) + \frac{1}{2} m_p g H \sin \psi_0, \qquad (4.8)$$

де  $M_G^{\Sigma} = M_G^{KF} + M_G^{HN}$  – загальний момент гідродинамічних сил відносно точки G;  $\Delta M_G$  – момент внутрішніх сил від роботи електрогенератора чи гідравлічного насоса з генератором;  $I_G = m_p H^3/3$  – момент інерції мас пластини;  $\psi_0(t)$  – динамічний кут нахилу пластини.



Рис. 4.14. Розрахункові параметри коливальної пластини

Моменти сил  $M_G$  визначаються інтегруванням уздовж поверхні пластини інтенсивності поперечних навантажень  $q_n(\xi, t)$  за формулою

$$M_G = \int_0^H \xi q_n(\xi, t) d\xi.$$
(4.9)

Оскільки коливальна пластина відноситься до класу занурених та тонких видовжених елементів, то для неї також у першому наближенні знехтувано хвильовими ефектами на вільній поверхні та додатково враховано сили в'язко-вихорової природи, пропорційні квадрату швидкості відносних коливань пластини [6]. Тоді момент  $M_G^{\Sigma}$  остаточно запишеться у вигляді  $M_G = M_{\mu A} + M_{\mu} + M_d$ , де складові визначаються формулами

$$M_{\mu A} = (C_M + C_A) \int_{0}^{H} \xi \dot{\mathbf{v}}_{nw} d\xi; \ M_{\mu} = -C_M \frac{H^3}{3} \ddot{\mathbf{\psi}}_0;$$
  

$$M_d = \frac{C_D \rho B_{\alpha}}{2} \int_{0}^{H} \xi \mathbf{v}_r |\mathbf{v}_r| d\xi, \ \text{ge } \mathbf{v}_r = \mathbf{v}_{nB} - \mathbf{v}_{nw} =$$
  

$$= \xi \dot{\mathbf{\psi}}_0 - (\mathbf{v}_{wx} \cos \mathbf{\psi}_0 - \mathbf{v}_{wz} \sin \mathbf{\psi}_0).$$
(4.10)

 $C_M = c_{\mu} \frac{\rho \pi B_{\alpha}^2}{4}; C_A = \rho A; C_D = \frac{c_d \rho B_{\alpha}}{2}$  – гідродинамічні коефіцієнти перерізу пластини,  $B_{\alpha}$  – приведена ширина пластини при куті атаки смуг  $\alpha$ ; A – площа перерізу.

Додатковий момент  $\Delta M_G$  має вигляд

$$\Delta M_G(t) = -\left[\Delta I \ddot{\psi}_0 + \Delta \Lambda \dot{\psi}_0 + \Delta K \psi_0\right], \qquad (4.11)$$

де  $\Delta I$ ,  $\Delta \Lambda$ ,  $\Delta K$  – коефіцієнти інерції, демпфування і жорсткості після приведення  $\Delta M_G$  до характеристик коливання пластини. Внутрішній момент  $\Delta M_G$ загалом визначається конкретною схемою пристрою відбору механічної енергії коливальної пластини, наприклад: а) поступальними рухами гідравлічного поршня, б) обертаннями колеса крильчастого насосу, в) поступальними рухами магніту в котушці, тощо. На даному етапі аналізу роботи ХвПЕ їх можна вважати вільними параметрами.

Диференціальне рівняння коливань остаточно можна записати у вигляді

$$\ddot{\psi}_0 = \frac{(M_{\mu A}(t) + M_d(t) - [\Delta \Lambda \dot{\psi}_0 + \Delta K(\psi_0)\psi_0]) + \frac{1}{2}m_p g H \sin \psi_0}{I_G + \Delta I_G + C_M H^3/3}.$$
(4.12)

Воно відповідає канонічній формі рівняння  $\ddot{\psi}_0 = F(t, \psi_0, \dot{\psi}_0)$  і його чисельне інтегрування виконувалось методом Адамса-Бешфорта.

На рис. 4.15 показано фрагменти візуалізації розрахунку динаміки коливальної пластини на інтервалі 8,2 секунди з параметрами хвиль та ХвПЕ: значна висота  $h_s = 4,15$  м та середній період  $T_{cs} = 7,2$  с, глибина акваторії d = 15 м, висота H = 14 м, ширина B = 10 м, товщина D = 2 м та маса пластини  $m_p = 90$  т. Ці дані відповідають прототипу Oyster [78]. З рисунку 4.15 добре видно, що отримана у даній роботі модель принаймні якісно відповідає фізиці процесу та дозволяє спостерігати за коливаннями пластини під час проходження хвиль.



Рис. 4.15. Фрагменти взаємодії коливальної пластини з полем швидкостей часток рідини

Реалізації коливань зануреної пластини  $\psi_0$  при різних заглибленнях пристрою подані на рис. 4.16. З графіків добре видно, що при збільшенні рівня заглиблення пристрою амплітуди його кутових коливань  $\psi_0$  зменшуються помірно.


Рис. 4.16. Результати розрахунку ординат кутових відхилень  $\psi_0$  коливальної пластини при різних варіантах заглиблення d

Порівняння динаміки коливальної пластини з динамікою подібного реального пристрою Oyster [78] дозволяє говорити про адекватність розробленої математичної моделі та відповідність отриманих результатів обчислень реальній картині фізичного процесу.

#### 4.3. Поверхневий поплавець на важелі

Коливальний поплавець представляє собою механічний пристрій, що реагує декількома видами коливань на коливання хвильової поверхні, а саме: 1) поверхневими кутовими нахилами на хвильовій поверхні, 2) зміною довжини телескопічного важеля від зміни положення поплавця та 3) кутовими нахилами самого важеля також від зміни положення поплавця. Можливі дві розрахункові схеми для поплавця: поплавець на а) зануреному та б) поверхневому важелях (див. рис. 4.17). Нижче розглянуто розрахункові залежності тільки для першої схеми із зануреним важелем. Схема (а) зазнає більше негативного впливу від морської води, тоді як схема (б) потребує додаткових опорних конструкцій.



Рис. 4.17. Розрахункові схеми роботи поплавця на зануреному (а) та поверхневому (б) важелях

**4.3.1.** Кінематика коливань поверхневого поплавця на зануреному важелі. Просторове положення у схемі визначається такими геометричними елементами, як донна шарнірна опора, телескопічний важіль, поверхневий поплавець та профіль нерегулярних вітрових хвиль на воді. Відповідні параметри: глибина акваторії d, глибина кріплення  $d_B$ , довжина важеля  $u_0$ , діаметр  $D_b$  та маса  $m_b$  важеля, висота D, ширина B, довжина L та маса  $m_p$  поплавця. У нерухомій системі координат xOz визначено гідродинамічні поля хвиль. Для телескопічного важеля та поверхневого поплавця визначимо, відповідно, локальні системи координат  $x_BBz_B$  та  $x_GGz_G$ , у яких буде описано їх положення рівноваги та зв'язану систему координат  $x'_GGz'_G$ , у якій буде описано геометрію поплавця. Зв'язки між даними системами координат, розташування яких показано на рисунку 4.18, мають вигляд:

$$x_{B} = x - b_{B}; \ z_{B} = z + d_{B} \ (d > 0); \ x_{G} = x_{B} + \xi_{0}(t); \ z_{G} = z_{B} + \zeta_{0}(t);$$

$$x'_{G} = x_{G} \cos \vartheta_{0}(t) - z_{G} \sin \vartheta_{0}(t); \ z'_{G} = z_{G} \cos \vartheta_{0}(t) + x_{G} \sin \vartheta_{0}(t),$$

$$(4.13)$$

де величини  $b_B$ ,  $d_B$  позначено на рис. 4.18, а зміщення поплавця  $\xi_0(t)$  та  $\zeta_0(t)$ зв'язані з поздовжніми переміщеннями  $u_0(t)$  формулами  $\xi_0(t) = u_0(t) \sin \psi_0(t)$  та  $\zeta_0(t) = u_0(t) \cos \psi_0(t)$ .

**4.3.2. Визначення геометрії поплавця.** Геометрію контуру поплавця було представлено, як контур типу симетричного суднового шпангоуту  $y'_G = Y(z'_G)$ . При розробці геометричної моделі, як і для попередніх пристроїв, був за-



Рис. 4.18. Зв'язок між глобальною та локальними системами координат поверхневого поплавця

стосований пакет FreeCAD [95]. Остаточно розрахункову модель пристрою представлено на рис. 4.18 зліва.

При цьому елементи поплавця експортувалися у зовнішні файли формату STL [81] та опрацьовувалися розробленим у даній роботі програмним забезпеченням [2<sup>a</sup>, 4<sup>a</sup>, 17<sup>a</sup>, 19<sup>a</sup>].

#### 4.3.2.1. Генерація розрахункових точок контурів шпангоутів поплав-

**ця.** Гідромеханічні сили, що діють на поплавець визначаються методами корабельної гідродинаміки [50, 67], тобто у рамках гіпотези плоского обтікання і розділено на дві категорії сил – Крилова-Фруда та Хаскінда-Ньюмана.

Оскільки у даній роботі було обрано модель пласких хвиль і поплавець є призматичним тілом, тому для визначення навантажень на поплавець достатньо розрахувати навантаження на один контур шпангоута, а потім проінтегрувати отримані значення уздовж усього корпуса поплавця. Точки контурів геометричної моделі поверхневого поплавця отримано за допомогою стандартного модулю Ship в пакеті FreeCAD [95]. Зокрема, за допомогою команди «Create a new ship instance on top of the hull geometry» модуля Ship конвертується модель корпусу поплавця у модель судна. Далі генеруються шпангоути корпуса за допомогою

команди «Plots the ship hull outline draw». Результат генерації розрахункових шпангоутів можна побачити на рисунку 4.20.





Рис. 4.19. Генерація розрахункових контурів шпангоутів поплавця за допомогою модуля Ship пакету FreeCAD

**4.3.3.** Розрахунок навантажень на елементи поплавця. Перейдемо до розрахунку навантажень на робочі елементи пристрою – важіль та поплавець. Важіль – занурений тонкий видовжений стержень, наприклад, круглого перерізу з діаметром  $D_b \ll u_0$ , а поплавець – поверхневе видовжене тіло із співставленими поперечними розмірами  $B \times D$  та довжиною L. Тому навантаження на важіль розраховуються аналогічно, як і для зануреної пластини, а навантаження на поплавець – за схемою, розробленою у п. 2.4 даної роботи. Зокрема, момент сил важелю  $M_B(t)$  відносно точки B утворюється інтенсивністю поперечних сил  $q_n(\xi, t)$  та має вигляд

$$M_B(t) = \int_{0}^{u_0(t)} \xi q_n(\xi, t) d\xi = -\frac{C_{\mu} u_0^3}{3} \ddot{\psi}_0 + \delta M^{MR}, \qquad (4.14)$$

де  $\delta M^{MR} = M_{\mu A} + M_d$  з формулами типу (4.10).

Сили Крилова-Фруда на поплавець, приведені до точки G у проекціях  $P_x^{KF}(t)$ ,  $P_z^{KF}(t)$  і  $M_G^{KF}(t)$ , визначаються загальними формулами (2.68) і для їх чисельного розрахунку інтеграли трансформуються до жорстко зв'язаної системи координат  $x'_G G z'_G$  з визначенням хвильового тиску  $p_w$  у даній системі координат  $p'_w(x'_G, z'_G, t)$ . Спочатку виконується інтегрування уздовж миттєвого зволоженого контура за схемою (4.4), а потім інтегрується уздовж поплавця. Сили Хаскінда-Ньюмана. Для збурених поплавцем гідродинамічних навантажень (через радіацію та дифракцію хвиль) застосуємо залежності отримані у п. 2.4 даної роботи. При цьому, для спрощення розрахунків, утримаємо в асимптотичних рядах тільки перший член, тобто без урахування похідних за частотами від гідродинамічних коефіцієнтів  $\mu_{jk}$  і  $\lambda_{jk}$ , але з їх визначенням для миттєвих колових частот, що частково компенсує вказане спрощення. Тоді будемо мати

$$P_{x}^{HN}(t) = -\mu_{22}\ddot{\xi}_{0} + \mu_{24}\ddot{\theta}_{0} + \delta P_{x}^{HN};$$

$$\delta P_{x}^{HN} = \mu_{22} \left\langle \dot{\upsilon}_{wx} \right\rangle_{s} - \lambda_{22} \left( \dot{\xi}_{0} - \left\langle \upsilon_{wx} \right\rangle_{s} \right) - \lambda_{24} \dot{\theta}_{0}; \qquad (4.15)$$

$$P_z^{HN}(t) = -\mu_{33}\ddot{\zeta}_0 + \delta P_z^{HN}; \ \delta P_z^{HN} = \mu_{33} \left\langle \dot{\mathfrak{v}}_{wz} \right\rangle_s - \lambda_{33} (\dot{\zeta}_0 - \left\langle v_{wz} \right\rangle_s); \tag{4.16}$$

$$M_{G}^{HN}(t) = -\mu_{44}\ddot{\theta}_{0} + \mu_{24}\ddot{\xi}_{0} + \delta M_{G}^{HN};$$
(4.17)

$$\delta M_G^{HN} = \mu_{24} \left\langle \dot{\mathfrak{v}}_{wx} \right\rangle_s - \lambda_{24} \left( \dot{\xi}_0 - \left\langle \mathfrak{v}_{wx} \right\rangle_s \right) - \lambda_{44} \dot{\theta}_0; \quad \mathbf{j}$$

де  $\mu_{jk}$ , jk = 22, 24, 33, 44 – прилучені маси поплавця у його миттєвому положенні,  $\lambda_{jk}$  – відповідні коефіцієнти демпфування, визначені при миттєвому значенні колової частоти хвиль. Якщо в останніх залежностях для гідродинамічних навантажень (4.15)–(4.17) замінити  $\dot{\xi}_0$ ,  $\dot{\zeta}_0$ ,  $\ddot{\eta}_0$  та  $\ddot{\zeta}_0$  через відповідні похідні  $\dot{u}_0$  та  $\ddot{u}_0$ , то отримаємо наступні вирази (для скорочення запису відкинемо індекс 0)

$$P_{x}^{HN}(t) = -\left(\mu_{22}\sin\psi\ddot{u} + \mu_{24}\ddot{\theta}\right) + \delta P_{x}^{HN}; \qquad (4.18)$$

$$\delta P_{x}^{HN} = \mu_{22}\left(\langle\dot{\upsilon}_{wx}\rangle_{s} - 2\dot{u}\dot{\psi}\right) - \lambda_{22}\left(\dot{u}\sin\psi + u\dot{\psi} - \langle\upsilon_{wx}\rangle_{s}\right) - \lambda_{24}\dot{\theta}; \qquad (4.18)$$

$$P_{z}^{HN}(t) = -\left(\mu_{33}\cos\psi\ddot{u} - \mu_{33}u\psi\ddot{\psi}\right) + \delta P_{z}^{HN}; \qquad (4.19)$$

$$\delta P_{z}^{HN} = \mu_{33}\left(\langle\dot{\upsilon}_{wz}\rangle_{s} + 2\dot{u}\psi\dot{\psi}\right) - \lambda_{33}\left(\dot{u}\cos\psi - u\psi\dot{\psi} - \langle\upsilon_{wz}\rangle_{s}\right); \qquad (4.19)$$

$$M_{G}^{HN}(t) = -\left(\mu_{44}\ddot{\theta} + \mu_{24}\sin\psi\ddot{u} + \mu_{24}u\ddot{\psi}\right) + \delta M_{G}^{HN}; \qquad (4.20)$$

$$\delta M_{G}^{HN} = \mu_{24}\left(\langle\dot{\upsilon}_{wx}\rangle_{s} - 2\dot{u}\dot{\psi}\right) - \lambda_{24}\left(\dot{u}\sin\psi + u\dot{\psi} - \langle\upsilon_{wx}\rangle_{s}\right) - \lambda_{44}\dot{\theta}. \qquad (4.20)$$

При приведені до опорного шарніру, будемо мати наступну залежність для моменту сил важеля

$$M_{\Sigma 0}(t) = M_B(t) + M_G^{\Sigma}(t) - R_z u_0 \sin \psi_0 + R_x u_0 \cos \psi_0, \qquad (4.21)$$

де покажчик  $i^{\Sigma}$  вимагає суми сил  $i^{KF} + i^{HN}$  Крилова–Фруда та Хаскінда–Ньюмана,  $R_x, R_z$  – реакції взаємодії поплавця та важеля у т. G.

Рівняння коливань відносно точок B і G за II-м законом Ньютона

$$I_{0}\ddot{\psi}_{0} = M_{B}(t) - R_{z}u_{0}\sin\psi_{0} + R_{x}u_{0}\cos\psi_{0} + \frac{1}{2}m_{b}gu_{0}\sin\psi_{0} + \Delta M_{\psi};$$

$$m_{b}\ddot{u}_{0} = (P_{x}^{\Sigma} - R_{x})\sin\psi_{0} + (P_{z}^{\Sigma} - R_{z})\cos\psi_{0} + \Delta P_{u};$$

$$I_{G}\ddot{\theta}_{0} = M_{G}(t) + \Delta M_{\theta};$$
(4.22)

де  $I_0$ ;  $I_G$  – моменти інерції мас важеля і поплавця;  $m_p$  – маса поплавця;  $m_b$  – рухома маса важеля;  $\Delta M_{\alpha} = -(\Delta I_{\alpha}\ddot{\alpha} + \Delta \Lambda_{\alpha}\dot{\alpha} + \Delta K_{\alpha}\alpha) = -(\Delta I_{\alpha}\ddot{\alpha} + \delta M_{\alpha}), M_{\alpha} = (M_{\Psi}, M_{\theta}, P_u), \alpha = (\Psi_0, \xi_0, \zeta_0, \theta_0)$  – додаткові моменти та сила, що визначаються конкретною схемою пристрою відбору механічної енергії у кожному рухомому елементу ХвПЕ. Після виключення реакцій рівняння коливань перепишуться так:

$$I_{0}\ddot{\Psi}_{0} = M_{\Sigma0}(t) + \Delta M_{\Psi}; I_{G}\ddot{\Theta}_{0} = M_{G}(t) + \Delta M_{\theta};$$

$$m_{p}\ddot{u}_{0} = P_{x}^{\Sigma}\sin\psi_{0} + P_{z}^{\Sigma}\cos\psi_{0} +$$

$$+ \frac{2(M_{B}(t) + M_{G}^{\Sigma}(t))}{u_{0}}\sin\psi_{0}\cos\psi_{0} - \Delta P_{u};$$

$$(4.23)$$

$$(4.24)$$

де  $M_{\Sigma 0}(t) = M_B(t) + M_G^{\Sigma}(t) - P_z^{\Sigma} u_0 \sin \psi_0 + P_x^{\Sigma} u_0 \cos \psi_0.$ 

Після перенесення усіх членів з прискореннями  $\ddot{u}_0$ ,  $\ddot{\theta}_0$  і  $\ddot{\psi}_0$  у ліву частину (4.23) систему диференціальних рівнянь у матричному вигляді

$$\mathbf{M} \cdot \vec{\mathbf{a}} = \vec{\mathbf{f}},\tag{4.24}$$

де вектор невідомих прискорень має структуру  $\vec{\mathbf{a}} = \{ \ddot{\psi}_0; \ddot{u}_0; \ddot{\theta}_0 \}$ , а компоненти інерційної матриці **M** та вектора навантажень  $\vec{\mathbf{f}}$  визначаємо за допомогою насту-

пних виразів

$$M_{11} = m_p (r_p^2 + u_0^2) + \frac{(m_b + C_M)u_0^3}{3} + \mu_{24}u_0 + \mu_{22}u_0^2 \cos \psi_0 + \\ + \mu_{33}u_0^2\psi_0 \sin \psi_0 + \Delta I_b;$$

$$M_{12} = \mu_{24}\sin\psi_0 + (\mu_{22} - \mu_{33})u_0 \sin\psi_0 \cos\psi_0 + \Delta I_u;$$

$$M_{13} = \mu_{44} + \mu_{24}u_0 \cos\psi_0 + \Delta I_G;$$

$$M_{21} = (\mu_{22}\sin\psi_0 - \mu_{33}\psi_0\cos\psi_0)u_0 + \\ + \left(\frac{2}{3}C_Mu_0^2 + 2\mu_{24}\right)\sin\psi_0\cos\psi_0;$$

$$M_{22} = m_p + \Delta I_u + \mu_{22}\sin^2\psi_0 + \mu_{33}\cos^2\psi_0 + \frac{2}{u_0}\mu_{24}\sin^2\psi_0\cos\psi_0;$$

$$M_{23} = \mu_{24}\sin\psi_0 + \frac{2}{u_0}\mu_{44}\sin\psi_0\cos\psi_0;$$

$$M_{31} = \mu_{24}u_0; M_{32} = \mu_{24}\sin\psi_0; M_{33} = m_p r_p^2 + \mu_{44} + \Delta I_G.$$

$$f_1 = M^{\Sigma MR} + M_G^{\Sigma} + P_x^{\Sigma}u_0\cos\psi_0 - P_z^{\Sigma}u_0\sin\psi_0;$$

$$f_2 = P^{\Sigma}\sin\psi_0 + P^{\Sigma}\cos\psi_0 + 2(M^{\Sigma MR} + M_{\Sigma}^{\Sigma})\sin\psi_0\cos\psi_0/\mu_0;$$

$$f_{3} = M_{G}^{\Sigma};$$

$$M^{\Sigma MR} = \delta M^{MR} - \delta M_{\Psi}; \ M_{G}^{\Sigma} = M_{G}^{KF} + \delta M_{G}^{HN} - \delta M_{\theta};$$

$$P_{x}^{\Sigma} = P_{x}^{KF} + \delta P_{x}^{HN} - \delta P_{\xi}; \ P_{z}^{\Sigma} = P_{z}^{KF} + \delta P_{z}^{HN} - \delta P_{\zeta}.$$

$$(4.26)$$

**4.3.4.** Аналіз результатів розрахунку динаміки руху поверхневого поплавця. Важливою складовою у розрахунках гідродинамічних навантажень Хаскінда-Ньюмана є визначення гідродинамічних коефіцієнтів  $\mu_{jk}$ ,  $\lambda_{jk}$  для контурів поплавця при миттєвому положенні на хвилях. Для їх розрахунку було реалізовано метод Урсела (див. Додаток Б) разом з багато параметричними конформними відображеннями фізичного контуру у параметричну площину. Такий підхід дозволив ще на підготовчому етапі розрахувати для різних комбінацій кута нахилу та осадки контурів поплавця нарахувати гідродинамічні коефіцієнти. Потім у кожен момент часу визначають параметри кута нахилу  $\theta_0$  та осадки  $d_p$ 

поплавця, а також локальне значення хвильового числа k і за допомогою нарахованої бази гідродинамічних коефіцієнтів проводилась інтерполяція їх миттєвих значень.



Рис. 4.20. Результати конформного відображення одиничного кола на контур шпангоута поплавця при різних значеннях осадки та кута нахилу

Приклади порівняння результатів апроксимації фізичного контуру за допомогою конформного відображення одиничного кола на фізичний контур шпангоута поплавця показано на рис. 4.20 [17<sup>a</sup>]. На рисунку показані найбільш складні випадки положення змоченого контура шпангоута поплавця.

Далі, розрахунки  $\mu_{jk}$ ,  $\lambda_{jk}$  показали, що отримані результати практично повністю співпали із результатами, отриманими у роботі [50], що можна побачити на рис. 4.21 та 4.22. Середні відхилення складають близько 3%, що цілком припустимо при подібних розрахунках.



Рис. 4.21. Порівняння результатів розрахунку коефіцієнтів прилучених мас  $\mu_{ij}$  для контура поплавця отриманих у даній роботі (—) із даними [50] ( $\blacklozenge \blacklozenge$ )



Рис. 4.22. Порівняння результатів розрахунку коефіцієнтів демпфірування  $\lambda_{ij}$  для контура поплавця отриманих у даній роботі (—) із даними [50] ( $\blacklozenge \blacklozenge$ )



Рис. 4.23. Фрагменти взаємодії коливального поплавця на зануреному важелі з гідродинамічними полями

Розглянемо тепер результати чисельних розрахунків поверхневого поплавця на занурених важелях за методикою, що була розглянута у даному підрозділі. На рис. 4.23 показано фрагменти візуалізації розрахунку динаміки поплавця на інтервалі 8,3 секунди з параметрами хвиль та ХвПЕ: висота h = 4,15 м та період  $T_{cs} = 7,2$  с хвиль, глибина акваторії d = 15 м, висота  $D_p = 5$  м, ширина B = 5 м та маса поплавця  $m_p = 61$  т, діаметр  $D_b = 0,5$  м та маса телескопічного важеля  $m_b = 2,7$  т. З рисунку 4.23 добре видно, що отримана у даній роботі модель якісно відповідає фізиці процесу та дозволяє спостерігати за коливаннями поплавця під час проходження хвиль.

Реалізації коливань поверхневого поплавця  $\psi_0$ ,  $u_0$ ,  $\theta_0$  на зануреному важелі подані на рис. 4.24. Проведений аналіз результатів розрахунку гідродинамічних коефіцієнтів коливального поплавця, динаміки його руху дозволяють стверджувати про адекватність розробленої математичної моделі та відповідність отриманих результатів обчислень реальній картині фізичного процесу. Чисельні розрахунки динаміки руху поплавця на поверхневому важелі аналогічні тим, що були проведені у даному підрозділі. Відмінність полягає тільки у зміні початкового розташування елементів кріплення поплавця та нехтуванням силами, що діють на телескопічні важелі за формулою Морісона.



Рис. 4.24. Результати розрахунку ординат зміни положення коливальних елементів поверхневого поплавця

## 4.4. Багато-ланцюгові поверхневі плоти

Ланцюжок плавучих плотів. ХвПЕ даного типу реагує на проходження хвильового профілю морських вітрових хвиль. За рахунок зміни взаємного кутового положення шарніри з'єднання приводять у дію гідравлічні насоси, які забезпечують роботу внутрішніх генераторів (див. рис. 4.25). Такий принцип перетворення хвильової енергії отримав розвитку у дослідженнях та розробках компанії Pelamis Wave Power [122].



Рис. 4.25. Принципова схема роботи багато-ланцюгових плотів

**4.4.1. Системи координат та кінематика руху.** Просторове положення даного типу ХвПЕ визначають ланцюжки плотів з еліптичним контуром шпангоута у перерізі. Параметри, що визначають габарити *i*-го плотика: висота h, ширина B, довжина  $L_i$  та маса  $m_i$  *i*-го плотика (домовимось, що висота h та пирина B в усіх плотах однакова та  $h/L_i \ll 1$ ). Визначимо наступні системи координат: Oxyz – нерухома система координат для визначення хвильового руху;  $O_i x_i y_i z_i$  – рухома система координат для *i*-го плоту;  $O' x'_i y'_i z'_i$  – жорстко зв'язана з *i*-м плотом система координат для визначення його геометрії. Кінематика руху плаского плоту визначається поступальними переміщеннями  $\xi_{0i}$ ,  $\zeta_{0i}$  середньої точки та кутовим нахилом  $\psi_{0i}$  об'єкту відносно зазначеної точки. Їх позитивні напрямки показано на рисунку 4.26 (а).



Рис. 4.26. Системи координат, розрахункова схема (а) та переміщення і силові фактори (б), що діють на *i*-й плотик

Зв'язки між системами координат мають вигляд

$$x_{i} = x - \xi_{0i}; \quad x'_{i} = x_{i} \cos \psi_{0i} - z_{i} \sin \psi_{0i}; z_{i} = z - \zeta_{0i}; \quad z'_{i} = x_{i} \sin \psi_{0i} + z_{i} \cos \psi_{0i}.$$

$$(4.27)$$

Поступальні переміщення шарнірів *i*-го плоту  $u_i^{L,R}$ ,  $w_i^{L,R}$  (див. рис. 4.26 (б)) повинні задовольняти умовам сумісності переміщень сусідніх плотів

$$u_i^L = u_{i+1}^R; w_i^L = w_{i+1}^R; u_i^R = u_{i-1}^L; w_i^R = w_{i-1}^L.$$
 (4.28)

Враховуючи умови (4.28) можна пов'язати переміщення двох суміжних плотів через наступні залежності

$$\xi_{0i+1} = \xi_{0i} - (L_{xi} + L_{xi+1})/2; \ \zeta_{0i+1} = \zeta_{0i} + (L_{zi} + L_{zi+1})/2; \ (4.29)$$

де  $L_{\{\frac{x}{2}\}i} = L_i \{ \sup_{\sin} \} \psi_{0i}$  – горизонтальна та вертикальна проекції довжини  $L_i$  та  $\psi_{0i}$  – кут нахилу *i*-го плотику. Неважко побачити, що залежності (4.29) дозволяють визначити поступальні переміщення усіх плотів через відповідні переміщення  $\xi_{01}$ ,  $\zeta_{01}$  першого плоту та їх нахили  $\psi_{0i}$ . Це дозволить у подальшому скоротити кількість невідомих у рівняннях динаміки ланцюгів плотів. Отже, приведемо залежності для переміщень  $\xi_{0i}$ ,  $\zeta_{0i}$ , а також для їх перших  $\dot{\xi}_{0i}$ ,  $\dot{\zeta}_{0i}$  та других похідних за часом  $\ddot{\xi}_{0i}$ ,  $\ddot{\zeta}_{0i}$ , при цьому врахуємо той факт, що плоти не зможуть сильно нахилятися і тому можна прийняти у слабко нелінійному наближенні

 $\cos \Psi_{0i} \simeq \left(1 - \frac{1}{2} \Psi_{0i}^2\right)$ і  $\sin \Psi_{0i} \simeq \Psi_{0i}$ . Тоді маємо

$$\begin{cases} \xi \\ \xi \\ \xi \\ 0i \end{cases} = \xi \\ \xi \\ 0i \end{cases} = \frac{\xi}{\zeta} \\ 0i \end{cases} = \frac{\xi}{\zeta} \\ 0i \end{cases} = \frac{\xi}{\zeta} \\ 0i \end{cases} + \sum_{j=1}^{i} \varepsilon(j, i) L_{\{\frac{z}{x}\}j} \cdot \dot{\psi}_{0j}; \\ \frac{\xi}{\zeta} \\ 0i \end{cases} = \frac{\xi}{\zeta} \\ 0i \end{cases} + \sum_{j=1}^{i} \varepsilon(j, i) L_{\{\frac{z}{x}\}j} \cdot \ddot{\psi}_{0j}; \end{cases}$$

$$(4.30)$$

де у сумах значення функції  $\mathbf{\epsilon}(i,n)$  визначається, як

$$\varepsilon(i,n) = \begin{cases} 0, \ i = n = 1; \\ \frac{1}{2}, \ (i = 1) \lor (i = n); \\ 1, \ i \text{ harme.} \end{cases}$$
(4.31)

Також розглянуто силові фактори, що діють на *i*-ий поплавець. Сумарне гідромеханічне навантаження у перерізі  $x'_i$  позначено  $q_{zi}^{\Sigma}(x'_i, t)$ ,  $R_{xi,zi}^{L,R}$  – реакції взаємодії у лівому та правому шарнірах *i*-го плоту (див. рис. 4.26 (б)).

**4.4.2. Визначення геометрії пристрою.** Аналогічно поплавцю геометрію контурів плотиків було представлено, як контур симетричного суднового шпангоуту y' = Y(z'). Для конструювання розрахункової моделі також застосовано пакет FreeCAD [95] Ship та додатково розроблений модуль експорту точок контурів.

Основні елементи, які складають ланцюжки плотів: 1) лівий, правий шарніри, та 2) циліндричний плотик. Вигляд розробленого у даній роботі шаблону розрахункової моделі поплавця представлено на рисунку 4.27 (показано ланцюг з 3-х плотів).

Результат генерації розрахункових шпангоутів можна побачити на рисунку 4.28.



Рис. 4.27. Розрахункова модель ланцюгів плотів



Рис. 4.28. Генерація розрахункових контурів шпангоутів плотика за допомогою модуля Ship пакету FreeCAD

**4.4.3.** Розрахунок динаміки руху. Диференціальні рівняння коливань *i*-го плоту мають за другим законом Ньютона наступний вигляд

$$M_{i}\ddot{\xi}_{0i} = (P_{xi}^{KF} + P_{xi}^{HN}) + (R_{xi}^{L} - R_{xi}^{R});$$

$$M_{i}\ddot{\zeta}_{0i} = (P_{zi}^{KF} + P_{zi}^{HN}) + (R_{zi}^{L} - R_{zi}^{R}) - M_{i}g;$$

$$I_{0i}\ddot{\psi}_{0i} = (\Delta M_{i}^{L} + \Delta M_{i}^{R}) + (R_{zi}^{L} + R_{zi}^{R})\frac{L_{xi}}{2} + (R_{xi}^{L} + R_{xi}^{R})\frac{L_{zi}}{2} + (M_{0i}^{KF} + M_{0i}^{HN});$$

$$(4.32)$$

де  $M_i$ ,  $I_{0i}$  – маса та момент інерції мас відносно середини *i*-го плоту;  $R_{xi,zi}^{L,R}$  – реакції взаємодії у лівому та правому шарнірах *i*-го плоту і, як і раніше, позначено гідромеханічні сили Фруда-Крилова і Хаскінда-Ньюмана та додаткові сили від роботи внутрішніх агрегатів хвильового перетворювача  $\Delta M_i^{L,R}$ .

Дана коливальна система є багато разів статично невизначеною і для її розкриття потрібно призначити основні невідомі – переміщення чи реакції у шарнірах. Застосувавши метод переміщень і прийнявши за основні невідомі переміщення  $w_i^{L,R}$ , отримаємо додаткові умови для їх визначення – рівняння рівності реакцій взаємодії у вузлах  $R_i^L = R_{i+1}^R$ ,  $R_i^R = R_{i-1}^L$ , i = 1, 2, ..., N. Послідовно визначаємо реакції через зовнішні сили з рівнянь динамічної рівноваги (4.32), при цьому для першого плоту  $R_{x,z1}^R = 0$  і для останнього *n*-го плоту  $R_{x,z,N}^L = 0$ . Реакції для *i*-го плоту визначаються, як

$$R_{z}^{L}_{0i} = \sum_{j=i+1}^{N} \left( P_{z}^{\Sigma}_{j} - M_{j} \left\{ \ddot{\xi} \right\}_{0j}^{\xi} - \left\{ \begin{matrix} 0 \\ 1 \end{matrix}\right\} M_{j}g \end{pmatrix}; \\ R_{z}^{R}_{0i} = \sum_{j=1}^{i-1} \left( M_{j} \left\{ \ddot{\xi} \right\}_{0j}^{\xi} - P_{z}^{\Sigma}_{j}^{\Sigma} - \left\{ \begin{matrix} 0 \\ 1 \end{matrix}\right\} M_{j}g \end{pmatrix}.$$

$$(4.33)$$

Підставляємо реакції (4.33) у систему (4.32) і отримуємо у загальному вигляді для N плотів наступну систему рівнянь

$$\sum_{i=1}^{N} M_{i} \ddot{\xi}_{0i} = \sum_{i=1}^{N} (P_{xi}^{KF} + P_{xi}^{HN});$$

$$\sum_{i=1}^{N} M_{i} \ddot{\zeta}_{0i} = \sum_{i=1}^{N} (P_{zi}^{KF} + P_{zi}^{HN} - M_{i}g);$$

$$I_{0i} \ddot{\psi}_{0i} + L_{zi} \sum_{j=i+1}^{N} M_{j} \ddot{\xi}_{0j} + L_{xi} \sum_{j=i+1}^{N} M_{j} \ddot{\zeta}_{0j} =$$

$$= M_{0i}^{\Sigma} + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{N} \operatorname{sgn}(j-i) \left[ (P_{xj}^{\Sigma} - M_{j} \ddot{\xi}_{0j}) L_{zi} + (P_{zj}^{\Sigma} - M_{j} \ddot{\zeta}_{0j}) L_{xi} \right];$$

$$(4.34)$$

де для рівнянь моментів i = 1, 2, ... N. Остання система диференціальних рівнянь (4.34) містить N + 2 рівняння та 3N невідомих і тому не може бути розв'язана. Для її розв'язку потрібно виконати наступні маніпуляції. Підставити у систему (4.34) вирази навантажень Хаскінда–Ньюмана (4.15)–(4.17) та перенести усі члени з прискореннями  $\ddot{\xi}_{0i}$ ,  $\ddot{\zeta}_{0i}$  та  $\ddot{\psi}_{0i}$  у ліву частину. Далі виконати заміну у (4.34) усіх поступальних прискорень  $\ddot{\xi}_{0i}$  та  $\ddot{\zeta}_{0i}$  через прискорення першого плоту  $\ddot{\xi}_{01}$ ,  $\ddot{\zeta}_{01}$ , а також відповідні кутові прискорення  $\ddot{\psi}_{0i}$  за виразами (4.29). У результаті 2N - 2 невідомих прискорення у системі (4.34) зникне.

Два рівняння для переміщень  $\xi_{01}$  та  $\zeta_{01}$  приймуть наступний вигляд

$$\sum_{i=1}^{N} \left[ \left( \mu_{24i} + \epsilon(i, N) L_{zi} \sum_{j=i+1}^{N} (M_j + \mu_{22j}) \right) \ddot{\psi}_{0i} + (M_i + \mu_{22i}) \ddot{\xi}_{01} \right] = \\ = \sum_{i=1}^{N} (P_{xi}^{KF} + \delta P_{xi}^{HN}); \\ \sum_{i=1}^{N} \left( \epsilon(i, N) L_{xi} \sum_{j=i+1}^{N} (M_j + \mu_{33j}) \ddot{\psi}_{0i} + (M_i + \mu_{33i}) \ddot{\zeta}_{01} \right] = \\ = \sum_{i=1}^{N} (P_{zi}^{KF} + \delta P_{zi}^{HN} - M_i g);$$

$$(4.35)$$

та відповідні рівняння моментів

$$\mu_{24i} \sum_{j=1}^{i} \varepsilon(j,i) L_{zj} \ddot{\psi}_{0j} + (I_{0i} + \mu_{44i}) \ddot{\psi}_{0i} + +\frac{1}{2} \sum_{j=1}^{N} \varepsilon(j,N) \times \\ \times \left[ \sum_{k=j+1}^{N} \operatorname{sgn}(j-i) \left( L_{zi} L_{zj} (M_k + \mu_{22k}) + L_{xi} L_{xj} (M_k + \mu_{33k}) \right) \right] \ddot{\psi}_{0j} + \\ + \mu_{24i} \ddot{\xi}_{01} + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{N} \operatorname{sgn}(j-i) \left[ L_{zi} (M_j + \mu_{22j}) \ddot{\xi}_{01} + L_{xi} (M_j + \mu_{33j}) \ddot{\zeta}_{01} \right] = \\ = \left( M_{0i}^{KF} + M_{0i}^{HN} \right) + \\ + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{N} \operatorname{sgn}(j-i) \left[ (P_{zj}^{KF} + \delta P_{zj}^{HN}) L_{xi} + (P_{xj}^{KF} + \delta P_{xj}^{HN}) L_{zi} \right].$$

$$(4.36)$$

Отримана система диференціальних рівнянь розв'язується чисельно за методами, що були розглянуті у підрозділі 2.5.

Покажемо також результати чисельного обчислення динаміки руху багатоланцюгових плотів за представленою технікою. На рис. 4.29 показано фрагменти візуалізації розрахунку динаміки коливальних пристроїв на часовому інтервалі 16,5 секунди з параметрами хвиль та ХвПЕ: висота  $h_s = 4,15$  м та період  $T_{cs} =$ 



Рис. 4.29. Фрагменти взаємодії багато-ланцюгових плотів з профілем морських

ХВИЛЬ

7,2 с хвиль, глибина акваторії d = 15 м, висота h = 3 м, ширина B = 7 м, довжини плотів  $L_1 = 10$  м,  $L_2 = 13$  м,  $L_3 = 16$  м та  $L_4 = 19$  м, а також маси відповідних плотів  $m_1 = 105$  т,  $m_2 = 136$  т,  $m_3 = 168$  т та  $m_4 = 200$  т.

Як можна побачити на рисунку 4.29, отримана у даній роботі модель дозволяє чисельно моделювати коливання багато-ланцюгових плотів на поверхні морських хвиль. Адекватність розробленої моделі та відповідність отриманих результатів обчислень реальній картині фізичного процесу засвідчує виконане у даній роботі порівняння динаміки ланцюгів плотів з динамікою подібного реального пристрою Pelamis WEC [122].

## Висновки і основні результати до Розділу 4

Представлені вище результати розрахунку та дослідження динаміки руху Хв-ПЕ наступних типів: 1) придонного кесона, 2) зануреної коливальної пластини, 3) поверхневого поплавця на важелі та 4) поверхневого ланцюжка плотів дають підстави сформулювати наступні результати і висновки.

1. Розроблені у розділі 2 загальні залежності для гідромеханічних сил було адаптовано до кожного типу ХвПЕ з урахуванням його особливостей. Зокрема, при розрахунках сил Крилова-Фруда для кесона, як 3D елементу, було застосовано загальну формулу чисельного інтегрування на поверхневій сітці трикутних скінченних елементів, а для важеля поплавця і смуг у коливальній пластині, як тонких видовжених елементів, сили Крилова-Фруда було проінтегровано по площі поперечних перерізів, тобто фактично визначено за формулою Морісона. Для поплавця і плотиків, як видовжених елементів, сили Крилова-Фруда розраховувались чисельно на сітці у поперечних перерізах, а потім інтегрувались уздовж елементів.

2. Таким же чином було розроблено адаптовані алгоритми розрахунку і сил Хаскінда-Ньюмана. Зокрема, для занурених елементів було знехтувано хвильовими ефектами (хвильовим демпфуванням), оскільки вони є відносно малими, але їх урахування суттєво ускладнює розрахунки. Проте для занурених видовжених і тонких елементів (важеля і смуг пластин) було враховано сили в'язковихорової природи, які квадратично залежать від відносної швидкості набігаючого потоку. Найбільш загальними випадками є поплавець і плотики. Для них, як видовжених елементів, було застосовано гіпотезу плаского обтікання. Отримані у другому розділі роботи загальні залежності для інтенсивностей сил Хаскінда-Ньюмана є достатньо трудомісткими для чисельних розрахунків і тому було застосовано їх спрощені варіанти з утриманням тільки першого члену асимптотичних рядів, але, для часткової компенсації похибок, з урахуванням залежності гідродинамічних коефіцієнтів від миттєвого значення колової частоти.

3. Диференціальні рівняння коливань ХвПЕ було отримано із застосуванням ІІ закону Ньютона з урахуванням додаткових сил, які виникають при роботі внутрішніх елементів, що безпосередньо перетворюють енергію коливань ХвПЕ у електричну енергію. Проте характеристики інерції, демпфування і жорсткості у даних додаткових силах у даній роботі залишені, як вільні параметри при розрахунках. Крім того, для поплавця на важелі і ланцюга плотиків, які є статично невизначеними механічними системами, було враховано умови силової і кінематичної сумісності роботи їх окремих елементів. Якщо для кесона і пластини структура диференціальних рівнянь була більш простою, то для поплавця і особливо для ланцюжка плотів диференціальні рівняння уже суттєво ускладнилися і потребували матричної форми запису.

4. Диференціальні рівняння інтегрувались методом Адамса-Бешфорта, обраним у другому розділі роботи, з кроком за часом 0,1 с та інтервалах часу у 30 хв (1800 с). Досвід розрахунків показав, що розрахунок одного варіанту для кесону складав 50 хв, для пластини – 30 хв, для поплавця – 70 хв, а для плотиків – 9 год. Таким чином, ускладнення типу ХвПЕ призводить до суттєвого збільшення часу на проведення розрахунків. Результати також показали, що при вказаних параметрах  $\Delta t$  і  $T_{all}$  випадках метод забезпечував обрану якість за точністю і стійкістю розрахунків. Обчислено часові реалізації коливань хвильової поверхні та ХвПЕ у порівнянні принаймні на якісному рівні відповідають фізичній картині процесів.

## РОЗДІЛ 5

# ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ХВПЕ

У даному (заключному) розділі представлено результати проведення низки чисельних експериментів з дослідження енергетичних показників обраних схем ХвПЕ. Була застосована обчислювальна технологія Time Domain Calculations, яка дозволила отримувати чисельні результати розрахунків динамічних реакцій та механічної енергії перетворювачів за часом та визначати коротко термінові статистичні розподіли реакцій опрацюванням часових реалізацій.

Конкретно у підрозділі 5.1 описано техніку проведення чисельного експерименту обчислення енергетичних показників ХвПЕ за різними параметрами та типами, розглянутими у роботі.

Результати чисельних розрахунків представлено у підрозділі 5.2. Отримана короткотермінова статистика енергетичних показників ХвПЕ дозволила виявити найбільш енергетично ефективні пристрої, їх характеристики для заданих режимів роботи. У результаті отриманих даних було сформульовано у підрозділі 5.3 практичні рекомендації щодо покращення експлуатаційних характеристик ХвПЕ, які досліджувались у даній роботі.

#### 5.1. Опис чисельного експерименту

З метою проведення чисельного експерименту (систематичних чисельних розрахунків), у даній роботі були визначені розрахункові параметри для хвильових режимів та ХвПЕ 4-х типів, а також варіанти дослідження впливу певних параметрів на показники роботи ХвПЕ.

5.1.1. Розрахункові параметри хвильових режимів. Інтервали часу  $T_{all}$ , в яких будуть проводитись експериментальні обчислення характеристик ре-

ального морського хвилеутворення, повинні лежати у межах інтервалів квазі стаціонарності для вітрових хвиль, які забезпечують статистичну незмінність реального хвилеутворення і дорівнюють 30...40 хвилинам. Тому інтервал часу  $T_{all}$  для моделювання характеристик реальних морських хвиль було обрано рівним 30 хвилинам.

Відповідно до підрозділу 2.3, вхідною характеристикою, що визначає режим реального хвилеутворення, є енергетичний одно- або двопіковий спектр. Для обчислення енергетичного спектру потрібно задати шість параметрів:  $h_s$  – значну висоту хвиль,  $T_{cs}$  – середній спектральний період хвиль і додаткові параметри Хасельмана  $\gamma_{H1}$ ,  $\gamma_{H2}$ ,  $R_S$ ,  $R_T$ . Використавши апроксимацію вітрохвильових режимів Чорного та Азовського морів, було визначено низку значень висоти  $h_s$  та періоду хвиль  $T_{cs}$  у залежності від забезпеченості хвильового режиму:  $h_s = 1; 2; ...; 7$ м та  $T_{cs} = 7; 9; 11$  с,  $\gamma_{H1} = 3$ ,  $\gamma_{H2} = 2$ ,  $R_S = 0,77$ ,  $R_T = 1,59$ , інтервал часу  $T_{all} = 1800$  с. На заданих висотах  $h_s$  та періодах хвиль  $T_{cs}$  були проведені чисельні розрахунки енергетичних показників ХвПЕ у роботі А. Ваbarit [119], результати яких застосовувались для перевірки достовірності розрахунків відповідних характеристик ХвПЕ аналогічних типів у даній роботі.

Для гідродинамічного дослідження та порівняння реакцій ХвПЕ різних типів при дії нерегулярних хвиль доцільно обрати один загальний хвильовий режим та район розташування перетворювачів, а потім для нього нарахувати масив даних для короткотермінової статистики і порівняти отримані результати. Найбільш перспективним для України, з точки зору розгортання ХвПЕ та наявності шельфової зони (див. [1<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>]), — є І район Чорного моря.

Рекомендації щодо вибору додаткових параметрів налаштування моделі нерегулярних хвиль (наприклад, кількість кратних гармонік, межі частотної смуги, тощо) були розглянуті нами у 3 розділі даної дисертаційної роботи.

**5.1.2.** Розрахункові параметри ХвПЕ. При виборі розрахункових параметрів ХвПЕ, що досліджуються у даній роботі, будемо ґрунтуватися на параметрах та характеристиках їх реальних прототипів або пристроях [119], що працюють за схожим принципом. Також будемо враховувати при варіативних розрахунках комбінацій схем сформульовані у роботах [6<sup>a</sup>, 16<sup>a</sup>] принципи розробки перспективних ХвПЕ.

Придонний кесон. Даний пристрій розміщується на глибині акваторії і реагує вертикальними коливаннями  $\zeta_0(t)$  на зміну хвильового тиску при проходженні хвиль. Спираючись на параметри пристрою Carnegie [119] (див. рис. 5.1), що працює за подібною кесону схемою, були обрані наступні розрахункові параметри та їх значення:  $d_m$  – заглиблення кришки, D = 7 м – діаметр кесона,  $h_c = 21,5$  м – загальна висота (без урахування дії сили ваги),  $m_G = 35$  т – маса коливальної частини, на якій визначають величину сили від тиску та інтенсивність коливань кесона. До хвильових умов віднесено характеристики спектра  $h_s$ ,  $T_{cs}$  і параметри двопіковості, а також глибину акваторії d = 20 м і довжину вікна спостереження  $L_w$ .



Рис. 5.1. Чисельні розрахунки зануреного коливального пристрою виконані у роботі А. Babarit [119]

Занурена коливальна пластина. Даний пристрій також розміщується на глибині і реагує кутовими коливаннями на дію поля поздовжніх швидкостей при проходженні хвиль. Як і для попереднього типу ХвПЕ, будемо орієнтуватися на параметри аналогічного пристрою, а саме – пристрою Oyster [119] (див. рис. 5.2). Відповідні розрахункові параметри та їх значення: глибина розташування опорного шарніру  $d_G = -17$  м, висота пластини H = 16 м та її ширина B = 26 м (сторона, що паралельна фронту хвилі), товщина D = 2 м та маса  $m_p = 150$  т пластини, а також кількість рухомих смуг на полі пластини – 4.



Рис. 5.2. Чисельні розрахунки коливальної пластини Oyster виконані у роботі А. Babarit [119]

Поверхневий поплавець на важелі. Як було визначено у пункті 4.3, коливальний поплавець реагує декількома видами коливань при взаємодії з хвилями, а саме: 1) поверхневими кутовими нахилами поплавця, 2) зміною довжини телескопічного важеля та 3) кутовими нахилами самого важеля від зміни положення поплавця.

Проведемо два розрахунки для обраного та змодельованого вітро-хвильового режиму, а саме: для поплавця на 1) зануреному та 2) поверхневому важелях. Це дасть змогу виявити найбільш перспективну розрахункову схему коливального поплавця на важелі.

У табл. 5.1 представлені розрахункові параметри для поплавця з наступними позначеннями: глибина акваторії d, довжина важеля  $u_0$  ( $d = u_0(t_0)$ ), діаметр  $D_b$  та маса  $m_b$  важеля, висота D, ширина B, довжина L та маса  $m_p$  поплавця (хвильове вікно, як і для попередніх пристроїв,  $L_w$ ).

Таблиця 5.1

Варіанти розрахункових параметрів поверхневого поплавця

Позначення варіанту	D, M	B, M	L, M	$D_b,$ м	$d_G$ , м	$m_p$ , т	$m_b,{ m T}$
$\Pi_1$	$5,\!0$	$^{5,0}$	7,0	0,5	-20,0	61,5	$3,5 \times 2$
$\Pi_2$	$5,\!0$	$^{5,0}$	7,0	0,5	$^{5,0}$	$61,\!5$	$3,5 \times 2$

Поверхневі ланцюжки плотів. Пристрій даного типу реагує на проходження хвильового профілю морських вітрових хвиль зміною взаємного кутового положення з'єднаних у довгі ланцюги плотів. Продовжуючи дотримання сформульованих принципів розробки ХвПЕ, проведемо два розрахунки для даної схеми: розрахунок динаміки коливань ланцюгів плотів 1) з однаковими та 2) різними довжинами головних елементів. Це дасть змогу дослідити один з принципів розробки ХвПЕ – максимальний відбір енергії у частотній смузі.

У табл. 5.2 представлені розрахункові параметри для варіантів ланцюгів плотів з наступними позначеннями: висота *h*, ширина *B*, довжина *L<sub>i</sub> i*-го плотику та *m* – загальна маса усього ланцюга плотів.

**5.1.3. Параметри внутрішньої системи відбору енергії.** Ефективність роботи ХвПЕ залежить від вдалого налаштування внутрішньої системи відбору

Позначення варіанту	h, м	B, M	<i>L</i> <sub>1</sub> , м	$L_2$ , M	$L_3, M$	т, т
$ \Pi_1 $	$_{3,0}$	$7,\!0$	10,0	$13,\!0$	16,0	286,5
$ \Pi_2 $	$_{3,0}$	7,0	16,0	16,0	16,0	352,8

Варіанти розрахункових параметрів схеми поверхневих плотів

енергії. Як було зазначено в оглядовому розділі існує чи мало стратегій контролю роботи ХвПЕ, які дозволяють досягати їх максимальних енергетичних показників [91,124]. У даній роботі обмежимось стратегією повільного налаштування [124], відповідно до якої налаштування параметрів пристрою, у залежності від режиму реального хвилеутворення, відбувається на протязі від декількох хвилин до декількох годин. У рамках даної стратегії потрібно визначити пікові параметри хвилеутворення та, відповідно до них, налаштувати характеристики системи відбору енергії на резонансний режим. Значення характеристик  $\Delta K$  і  $\Delta \Lambda$  внутрішніх систем відбору енергії підбирались так, щоб досягти, з початку, максимальних амплітуд швидкостей коливань (див. алгоритм на рис. 5.3 (а)), а потім максимальних середніх потужностей пристрою (див. рис. 5.3 (б)).

#### 5.2. Короткотермінова статистика коливань та потужності ХвПЕ

Відповідно до обраних у попередньому підрозділі параметрів чисельного експерименту послідовно наведемо результати комп'ютерного розрахунку для часових реалізацій процесів коливань та потужності ХвПЕ та їх опрацювання у термінах короткотермінової статистики. При цьому, для перевірки хвильових режимів отримаємо спочатку статистичні характеристики хвиль і порівняємо їх із заданими при визначені спектрів.

**5.2.1. Статистика нерегулярного хвилеутворення.** На рисунку 5.4 показано фрагмент півгодинної реалізації нерегулярних вітрових морських хвиль на воді у нелінійному наближенні. Для опрацювання реалізацій було залучено стандартні алгоритми отримання основних статистичних характеристик режи-



Рис. 5.3. Алгоритм налаштування характеристик  $\Delta K$  (a),  $\Delta \Lambda$  (б) на резонансні режими роботи ХвПЕ при дії регулярних хвиль

му:  $\langle \zeta_w \rangle$  – оцінка математичного сподівання;  $\sigma_w$  – оцінка дисперсії ординат; A – числова характеристика симетрії розподілення;  $\varepsilon$  – коефіцієнт ексцесу куртозіса розподілення (див. табл. 5.3).

Аналіз щільностей розподілу на рис. 5.5 та статистичних характеристик ординат хвильового профілю для лінійного та нелінійного наближень показав відносно однакові результати при порівнянні середніх значень та дисперсій випадкових величин. Числова характеристика симетрії розподілення та ненульове значення кумулянти 3-го порядку показали наявність відмінностей у другій моделі та під-

Модель	$\langle \zeta_w  angle$	$\sigma_w^2$	A	3	<b>K</b> 3	$\kappa_4$
Лінійна	0,00028	0,73557	0,00729	-0,03559	0,00669	-1,6588
Нелінійна	0,00035	0,73924	0,21093	0,01729	0,21015	-1,62241
Амплітуди	1,08542	0,29142	0,71388	0,54987	2,1212	-7,01237

Порівняння статистичних характеристик для хвильового профілю

твердили наявність більшої кількості нелінійних ефектів.



Рис. 5.4. Результати розрахунку ординат хвильової поверхні за часом для параметрів  $h_s = 4,15$  м та  $T_{cs} = 7,2$  с

Також на інтервалах квазістаціонарності нараховувались потужності у хвилях, фрагмент розрахунку яких подано на рис. 5.6. Середнє значення потужностей для заданого режиму хвилеуторвення на інтервалі розрахунку було отримано на рівні  $\langle P_w \rangle = 56$  кВт, що добре узгоджується з відповідними середньорічними рівнями потужностей для хвильових профілів у Світовому океані [133].

**5.2.2. Статистика гідродинамічних реакцій ХвПЕ.** Послідовно у порядку опису чисельного експерименту розглянемо результати обчислень статистики гідродинамічних реакцій ХвПЕ. Відмітимо, що для кесону та коливальної



Рис. 5.5. Щільності розподілів ординат хвильового профілю у лінійному (a) та нелінійному (б) наближеннях для параметрів  $h_s = 4,15$  м та  $T_{cs} = 7,2$  с



Рис. 5.6. Результати розрахунку потужностей у хвилях за часом для параметрів $h_s=4,15$  м та  $T_{cs}=7,2$  с ( $\langle P_w 
angle=56~{
m kBt/m}$ )

пластини було проведено 3 варіанти розрахунків, при яких визначались: 1) лінійні навантаження при дії регулярних хвиль, 2) нелінійні навантаження при дії регулярних хвиль і 3) нелінійні навантаження при дії нерегулярних нелінійних хвиль.

Придонний кесон. Для даного пристрою порівняння отриманих результатів

першого та другого варіантів розрахунків з відповідними розрахунками Babarit (далі еталонними) показали, що зростання періодів хвиль до 11 с призводить до зростання показників середніх потужностей кесону по відношенню до еталонних. У першому варіанті значення потужностей у порівнянні з еталонними були заниженими і різниця між ними становила близько 45 % (див. рис. 5.7–5.9 (а)), а у другому – завищеними і різниця з еталонними становила у середньому 90 % (див. рис. 5.7–5.9 (б)). Найкращі результати порівнянь були отримані при третьому варіанті розрахунків і вони показали, що на усьому інтервалі періодів хвиль значення середніх потужностей пристроїв знаходились у межах еталонних і у середньому їх різниця не перевищувала 30 % (див. рис. 5.7–5.9 (в)).



Рис. 5.7. I (а), II (б) та III (в) варіанти розрахунку потужностей кесону  $\mathbf{V} - \mathbf{V}$ , а також чисельні розрахунки Babarit  $\mathbf{I} - \mathbf{I}$  при періоді хвиль  $T_{cs} = 7$  с

Серії варіативних розрахунків придонного кесону дозволили зробити висновок про його малу ефективність. Аналіз залежності середнього значення перетвореної пристроєм потужності від положення рівноваги циліндру кесону показав, що пристрій реагує значними вертикальними коливаннями на зміну градієнту гідродинамічного тиску  $dP_{hd}/dz$  практично на рівні близькому до рівня незбуре-



Рис. 5.8. I (а), II (б) та III (в) варіанти розрахунку потужностей кесону  $\mathbf{v} - \mathbf{v}$ , а також чисельні розрахунки Babarit  $\mathbf{I} - \mathbf{I}$  при періоді хвиль  $T_{cs} = 9$  с



Рис. 5.9. I (а), II (б) та III (в) варіанти розрахунку потужностей кесону  $\mathbf{\nabla} - \mathbf{\nabla}$ , а також чисельні розрахунки Babarit  $\mathbf{\Box} - \mathbf{\Box}$  при періоді хвиль  $T_{cs} = 11$  с

ної рідини. Занурення циліндру кесону на декілька метрів одразу зменшує його ефективність на один порядок.

Занурена коливальна пластина. Порівняння результатів першого та другого варіантів розрахунків для коливальної 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 і різниця між ними становила близько 130 % (див. рис. 5.10–5.12 (а) та (б)). 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 % (див. рис. 5.10–5.12 (в)).



Рис. 5.10. I (а), II (б) та III (в) варіанти розрахунку потужностей пластини  $\mathbf{\nabla}$ , а також чисельні розрахунки Babarit  $\mathbf{\Box} - \mathbf{\Box}$  при періоді хвиль  $T_{cs} = 7$  с

Також було виявлено, що як і у випадку придонного кесону, ефективність роботи коливальної пластини залежить від рівня її заглиблення. Це пояснюється тим, що із збільшенням глибини величина швидкостей часток рідини зменшую-



Рис. 5.11. I (а), II (б) та III (в) варіанти розрахунку потужностей пластини ▼ – ▼, а також чисельні розрахунки Babarit ■ — ■ при періоді хвиль  $T_{cs} = 9$  с



Рис. 5.12. I (а), II (б) та III (в) варіанти розрахунку потужностей пластини ▼ – ▼, а також чисельні розрахунки Babarit ■ – ■ при періоді хвиль  $T_{cs} = 11$  с

ться і, тим самим, це призводять до зменшення навантажень на елементи ХвПЕ та, як результат, їх коливань.

Поверхневий поплавець на важелі. Короткотермінова статистика динаміки руху поверхневого поплавця на телескопічному важелі представлена у табл. 5.4. Для даного пристрою отримані та представлені наступні результати:

- щільність розподілу потужності хвиль у просторовому вікні перетворення енергії L<sub>w</sub> = 12,9 м, див. рис. 5.13;
- щільності розподілів перетвореної пристроєм потужності хвиль для визначених варіантів обчислень, див. рис. 5.14;
- щільності розподілів ординат кутових нахилів важеля ψ<sub>0</sub>, поверхневих кутових нахилів поплавця θ<sub>0</sub> та зміни довжини телескопічного важеля u<sub>0</sub> відповідно до визначених варіантів розрахункової схеми: (a), (b), (ґ) для Π<sub>1</sub> та (б), (г), (д) для Π<sub>2</sub>, див. рис. 5.15;
- результати розрахунку ординат кутових нахилів важеля  $\psi_0$ , поверхневих кутових нахилів поплавця  $\theta_0$  та зміни довжини телескопічного важеля  $u_0$ , див. рис. 5.16.

Таблиця 5.4

## Порівняння статистичних характеристик для хвильового профілю та поверхневого поплавця

Варіант	$\langle x \rangle$	$\sigma_x$	A	ε	$\kappa_3$	$\kappa_4$
Потужність хвиль	$5,\!11\cdot 10^6$	$5{,}044\cdot10^{6}$	$2,\!095$	$5,\!67$	$O(10^{20})$	$O(10^{27})$
Потужність $\Pi_1$	$2,8\cdot 10^4$	$3{,}2153\cdot10^4$	2,7765	10,75078	$O(10^{19})$	$O(10^{25})$
Потужність $\Pi_2$	$4,\!6475\cdot 10^5$	$5{,}8265\cdot10^5$	3,2901	18,4911	$O(10^{17})$	$O(10^{23})$

Для першого варіанту розрахункової схеми поверхневого поплавця  $\Pi_1$  були отримані відносно низькі показники ефективності, а саме на рівні 1 %. Як видно з рис. 5.15 та 5.16, дисперсія для ординати кутових нахилів важеля  $\psi_0$  має значення  $\sigma_{\psi} = 0,021$ , для поверхневих кутових нахилів поплавця  $\theta_0 \ \sigma_{\theta} = 0,259$  та для величини зміни довжини телескопічного важеля  $u_0 \ \sigma_u = 0,43$ . Зрозуміло, що для такого габаритного пристрою такі значення динамічних показників є замалими





поплавця на тросі згідно з [119].

і тому його ефективність також мала.

Якщо порівняти показники ефективності отримані для даної розрахункової схеми із показниками аналогічного пристрою [119], то можна знайти для однакових режимів хвилеутворвення приблизно схожі значення перетвореної пристроями потужності: 28 кВт для розрахункової схеми поплавця на зануреному важелі та 15 кВт для

Другий варіант, який було обчислено та досліджено у даній роботі, при зміні положення шарнірної опори показав збільшення ефективності роботи пристрою на один порядок (до  $O(10^5)$  Вт). Перенесення опори кріплення важеля з дна акваторії до рівня декількох метрів над рівнем незбуреної рідини дозволяє трансформувати пристрій та отримати покращені показники його роботи. Така конфігурація важеля та поплавця, як видно з рис. 5.15 та 5.16, збільшує при роботі пристрою його оцінку дисперсії для ординати кутових нахилів важеля  $\psi_0$  до  $\sigma_{\psi} = 0,11$  та для величини зміни довжини телескопічного важеля  $u_0$  до  $\sigma_u = 1,98$ , що призводить, відповідно, і до збільшення потужності пристрою.



Рис. 5.14. Щільності розподілів перетвореної поплавцем потужності хвиль для варіантів П<sub>1</sub> (а) та П<sub>2</sub> (б)



Рис. 5.15. Щільності розподілу ординат кутових нахилів важеля  $\psi_0$ , поверхневих кутових нахилів поплавця  $\theta_0$  та зміни довжини телескопічного важеля  $u_0$  відповідно до обраних розрахункових варіантів: (a), (b), (ґ) для  $\Pi_1$ та (б), (г), (д) для  $\Pi_2$ 

Порівняння показників другої розрахункової схеми із показниками аналогічного пристрою WaveStar (див. [119, 137]), також засвідчило про адекватність отриманих результатів ефективності роботи поплавця на поверхневому важелі та перспективність даного типу ХвПЕ у подальших дослідженнях. Крім того,


варіантів (а) –  $\Pi_1$  та (б) –  $\Pi_2$  (дви. табл. 5.1)

якщо важіль знаходиться на поверхні і на нього не діє рідина, то відповідні його чисельні розрахунки навантажень на елементи та їх динаміки руху спрощуються.

Поверхневі ланцюжки плотів. Результати статистичних розрахунків для двох схем поверхневих ланцюгів плотів представлені у такому порядку:

- статистичні характеристики для хвильового профілю та поверхневих ланцюгів плотів приведені у табл. 5.5;
- щільності розподілів потужності хвиль у просторових вікнах перетворення енергії, відповідно для схем Л<sub>1</sub> та Л<sub>2</sub>, L<sub>w1</sub> = 40,0 м та L<sub>w2</sub> = 48,0 м, див. рис. 5.17;
- щільності розподілу перетвореної пристроєм потужності хвиль для визначених варіантів обчислень, див. рис. 5.18;
- щільності розподілів ординат кутових нахилів \u03c6<sub>0i</sub>: (a), (b), (f) для *i*-х плотів схеми Л<sub>1</sub> та (б), (г), (д) для відповідних плотів схеми Л<sub>2</sub>, див. рис. 5.19;
- результати розрахунку ординат кутових нахилів  $\psi_{0i}$  у шарнірах з'єднань ланцюгів плотів, див. рис. 5.20.

Таблиця 5.5

# Порівняння статистичних характеристик змодельованих хвилеутворення та поверхневих ланцюгів плотів

Варіант	$\langle x \rangle$	$\sigma_x$	A	ε	$\kappa_3$	$\kappa_4$
Потужність хвиль для Л <sub>1</sub>	$1,75\cdot 10^7$	$1,\!847\cdot 10^7$	2,0455	4,6658	$O(10^{22})$	$O(10^{29})$
Потужність хвиль для Л <sub>2</sub>	$2,\!44 \cdot 10^{7}$	$2,5701 \cdot 10^{7}$	2,0455	4,6658	$O(10^{22})$	$O(10^{30})$
Потужність Л <sub>1</sub>	$2,984 \cdot 10^{6}$	$3,4782 \cdot 10^{6}$	2,2246	6,80865	$O(10^{20})$	$O(10^{26})$
Потужність Л <sub>2</sub>	$0,996 \cdot 10^{6}$	$1,384 \cdot 10^{6}$	2,86133	9,88133	$O(10^{18})$	$O(10^{24})$

Нагадаємо, що пріоритетним напрямом у даній роботі є дослідження схем, які максимально відповідають усім принципам розробки ХвПЕ. Тому, для реалізації принципу максимального відбору енергії у частотній смузі, першою була обрана розрахункова схема ХвПЕ із ланцюгом, що складається з плотиків різної довжини (від меншого до більшого у напрямі набігання хвиль).

Для розрахункового варіанту Л<sub>1</sub> (див. табл.5.2) отримано достатньо високі



Рис. 5.17. Щільності розподілів потужностей хвиль у просторових вікнах перетворення енергії  $L_{w1} = 40,0$  м для ланцюга зі змінними довжинами плотів (a) та  $L_{w2} = 48,0$  м для ланцюга однакових плотів (б)



Рис. 5.18. Щільності розподілу перетвореної плотиками потужності хвиль для варіантів Л<sub>1</sub> (а) та Л<sub>2</sub> (б)

показники потужності  $P_{WEC} \sim 3$  МВт (у порівнянні з показниками аналогічного пристрою компанії Pelamis [122], які складають  $P_{WEC} \sim 2,5$  МВт). Позитивною складовою є те, що пристрій реагує на проходження хвильового профілю морських вітрових хвиль зміною взаємного кутового положення з'єднаних у довгі ланцюги плотів і при цьому знаходиться повністю на поверхні (окрім пристрою кріплення). Це дає змогу використовувати комбіновано деякі занурені ХвПЕ.

Інший розрахунковий варіант  $\Pi_2$  з ланцюгом плотів однакової довжини показав дещо гіршу ефективність у порівнянні з  $\Pi_1$ , а саме, на рівні  $P_{WEC} \sim 1$ MBT. Така конфігурація плотів з однаковими параметрами налаштовує роботу





Рис. 5.19. Щільності розподілів ординат кутових нахилів  $\psi_{0i}$  у шарнірах з'єднань ланцюгів плотів схеми  $\Pi_1$  (a), (b), (ґ) та  $\Pi_2$  (б), (г), (д) (див. табл. 5.2)

пристрою тільки на вузький діапазон хвиль (рівної довжини). Використання у ланцюгу ХвПЕ елементів різної довжини у порядку від коротшого до довшого у напрямі набігання хвиль дозволить взаємодіяти з хвилями більшого діапазону їх довжини.

Отже, отримані результати для ланцюгів плотів показують, що даний тип ХвПЕ дозволяє реалізувати сформульований принцип максимального відбору





енергії у частотній смузі та показують його перспективність у подальших теоретичних та практичних дослідженнях.

# 5.3. Практичні рекомендації щодо покращення експлуатаційних характеристик ХвПЕ

Відповідно до останніх робіт [129], що з'являються у напрямі дослідження ХвПЕ, зокрема, покращенні їх експлуатаційних характеристик, вже чітко помітний напрям підвищення ефективності технологій перетворення хвильової енергії за рахунок використання декількох десятків, навіть сотень ХвПЕ одного типу об'єднаних у масиви (кластери). Тому природно, для усіх розглянутих розрахункових схем у даній роботі сформулювати загальну рекомендацію, яка полягає у *дослідженні роботи масивів ХвПЕ розглянутих типів*. Тут слід звернути увагу на топологію їх розташування, відстань пристроїв один від одного, їх розміри, гідродинамічну взаємодії тощо (підходи для таких досліджень можна знайти у роботах [79,91,129]).

Щодо окремих рекомендацій покращення характеристик ХвПЕ, які були предметом дослідження у даній дисертаційній роботі, то їх можна сформулювати і перелічити у наступному порядку.

1. З метою підвищення енергетичних показників роботи ХвПЕ доцільно досліджувати та реалізовувати стратегії ідеального налаштування характеристик внутрішньої системи відбору енергії.

2. Для підвищення характеристик коливальної пластини доцільно на її площині передбачити набір смуг. Потік рідини при набіганні на пластину буде змінювати орієнтацію площин смуг і, таким чином, змінювати прозорість і опір пристрою в цілому.

3. Для підвищення енергетичних характеристик ланцюгів плотів доцільно використовувати їх змінну довжину. Така комбінація дозволить пристроям взаємодіяти з хвилями різних частот і, тим самим, сприяти підвищенню їх ефективності.

4. Дослідження сумісної роботи поверхневих та занурених пристроїв, зокре-

ма, поплавця на поверхневому важелі та придонного кесону, ланцюга плотів та зануреної коливальної пластини, дозволить визначити доцільність розміщення та роботи пристроїв в одній просторовій точці.

## Висновки і основні результати до Розділу 5

На основі порівняльних чисельних розрахунків чотирьох типів ХвПЕ – 1) зануреної коливальної пластини, що реагує на горизонтальне поле швидкості у хвилях, 2) придонного кесона, що реагує на зміни хвильового тиску, 3) поверхневого поплавця на важелі та 4) поверхневого ланцюжка плотів, які реагують на коливання вільної поверхні, – можна виділити наступні основні результати і висновки.

1. На прикладі порівняння результатів розрахунку роботи придонного кесону та зануреної коливальної пластини з аналогічними незалежними чисельними розрахунками А. Babarit виявлено залежність їх динамічних та енергетичних показників від врахування нелінійних ефектів при розрахунках гідродинамічних полів морських вітрових хвиль та навантажень на елементи ХвПЕ. Так, показано, що врахування нелінійних ефектів призводить до зниження енергетичних показників пристроїв, зокрема, до 15...60% для кесону та до 90% для коливальної пластини.

2. Для підвищення ефективності роботи пристроїв слід застосовувати стратегії ідеального налаштування інерційних, демпфуючих та жорсткісних характеристик систем відбору енергії.

3. Для схеми поверхневого поплавця на телескопічному важелі встановлено, що перенесення шарнірної опори кріплення важеля з дна акваторії до рівня декількох метрів над рівнем незбуреної рідини дозволяє підвищити у чотири рази енерговідбір коливального поплавця. Крім того, було виявлено зменшення об'ємів чисельних розрахунків навантажень на важіль поплавця, при його перенесенні на поверхню.

4. Проведені розрахунки та аналіз результатів для ланцюгів плотів показали

високу ефективність пристроїв даного типу. Виявлено, що більше ніж у два рази зростає потужність ланцюжка плотів, якщо використовувати змінну довжину плотів уздовж ланцюга.

5. Аналіз короткотермінової статистики для енергетичних показників вітрохвильових режимів та ХвПЕ дозволив сформулювати практичні рекомендації щодо покращення експлуатаційних характеристик ХвПЕ. Так, встановлено, що найбільш енергетично ефективними виявилися занурена коливальна пластина та поверхневі ланцюжки плотів, які забезпечують 15% та 17% відбору енергії хвиль, відповідно, і, тим сами, представляють найбільший інтерес для подальших досліджень.

#### ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове завдання, яке полягає у дослідженні ефективності роботи та енергетичних показників хвильових перетворювачів енергії (ХвПЕ) шляхом застосування нових гідродинамічних моделей для нерегулярних вітрових хвиль і гідродинамічних навантажень, а також чисельних методів розрахунку динаміки коливань елементів ХвПЕ з урахуванням нелінійних ефектів.

На даний час, незаперечним фактом є те, що подальше зростання енергоспоживання у світі не може бути забезпечене на майбутнє тільки існуючими об'ємами нафти, природного газу та вугілля. Зважаючи на це, а також на негативний вплив від їх спалювання на екосистему земної кулі, показано, що розробка та використання альтернативних джерел енергії є актуальною проблемою для людства. Виявлено, що найбільшою є інтенсивність хвильової енергії океанів та морів у порівнянні з іншими джерелами (сонячними променями, вітром тощо) і це робить її більш привабливою для подальшого дослідження та використання країнами, які межують з океанами чи морями, зокрема, і для України. Існуюче на даний час відставання у розробці хвильової енергетики обумовлено головним чином значною агресивністю морського середовища, але це повинно тільки стимулювати зусилля, спрямовані на подолання відповідних труднощів. Дисертаційна робота автора і є певним внеском у розв'язанні проблематики ХвПЕ у частині вивчення їх гідродинамічної взаємодії з вітровими хвилями, що є важливим як для експлуатаційних режимів, так і для режимів виживання у екстремальних хвильових умовах.

#### Головні наукові та практичні результати роботи:

1. Вперше теоретично розроблено та практично реалізовано у вигляді програмного забезпечення нову нелінійну технологію прямого гідродинамічного розрахунку динаміки та енергетичних характеристик ХвПЕ чотирьох базових типів безпосередньо при дії нерегулярних вітрових хвиль у шельфовій зоні моря на часових інтервалах квазістаціонарності хвильових режимів (30...40 хв.), достатніх для подальшого статистичного опрацювання розрахункових даних. Існуючі на даний час технології є у своїй більшості лінійними і ґрунтуються на використанні лінійних гідродинамічних моделей для регулярних хвиль, відповідних хвильових навантажень і реакцій ХвПЕ та спектральних моделей і методів при переході до нерегулярних морських хвиль. Дані моделі суттєво обмежені у врахуванні нелінійних ефектів як у хвильових рухах, так і в динаміці ХвПЕ.

Проектування, вибір місця розташування, підтримання працездатності та забезпечення надійності роботи ХвПЕ в експлуатаційних та особливо екстремальних хвильових умовах неможливе без даних зі статистки вітро-хвильових режимів на українських шельфах Чорного та Азовського морів. Створене у роботі програмне забезпечення дає змогу відтворювати на екрані монітора електронні інтерактивні карти І та II районів вказаних морів, так що для будь-якої точки шельфів за допомогою «drop-down» меню можна отримати сезонні довго термінові статистичні розподіли та їх аналітичні екстраполяції на терміни часу до 100 років для швидкостей та напрямків вітрів, значних висот та середніх періодів хвиль  $(h_s, T_c)$ . Далі для параметрів інтенсивності хвильового режиму  $(h_s,$  $T_c$ ) із заданою забезпеченістю  $Q = 10^{-n}, n = 1, 2, 3, \dots$  можуть бути отримані відповідні спектри, виконана їх дискретизація та розраховані чисельні реалізації нерегулярної хвильової поверхні за часом (30...40 хв.) та по ним отримана стандартна коротко термінова статистика нерегулярних хвиль. Такий інструмент особливо корисний при проведенні серійних та багато варіантних розрахунків з метою отримання оптимальних характеристик ХвПЕ.

2. У рамках вказаної технології удосконалено спектральну техніку для моделювання нерегулярної хвильової поверхні у лінійному наближенні, зокрема використано більш загальний двох піковий шести параметричний спектр Хассельмана, який краще моделює розподіл енергії хвиль у частотній смузі. Також впроваджено нерівномірну рандомізовану дискретизацію спектру, на відміну від звичайної рівномірної, що дало змогу без втрат у точності результатів майже на порядок зменшити кількість елементарних спектральних гармонік (з тисяч до сотень) при чисельних розрахунках нерегулярної хвильової поверхні для заданих хвильових режимів. Для усунення виявлених суттєвих похибок спектральної моделі в гідродинамічних полях тиску та швидкостей у при поверхневому шарі рідини **вперше отримано** новий лінійний розв'язок крайової задачі теорії хвиль на воді із обмеженою глибиною при збереженні граничних умов на вільній поверхні, а не на тихій воді. Даний розв'язок забезпечує коректні розрахунки чисельних значень хвильового тиску та швидкостей у при поверхневому шарі хвильового руху.

3. В нелінійному наближенні для узагальнення хвильових моделей метод півзворотньої задачі, розроблений початково для розрахунку поверхневого поля швидкостей у сильно нелінійних пакетах хвиль на глибокій воді, у роботі було **узагальнено** на загальний випадок нерегулярних хвиль з довільним спектром у шельфовій зоні з обмеженою глибиною моря. Це дало змогу трансформувати граничні умови на хвильовій поверхні до алгебраїчних рівнянь відносно проекцій  $v_{wx}$ ,  $v_{wz}$  і розрахувати поверхневі швидкості через характеристики хвильової поверхні. Остання у свою чергу була насичена кратними рівноважними гармоніками із зсувами фаз, щоб отримати загострені та укручені хвильові профілі, характерні для вітрових хвиль. Для подальшого розрахунку полів швидкості і тиску з глибиною було використано інтегральну формулу Коші і інтеграл Коші-Лагранжа.

Розроблені моделі нерегулярних вітрових хвиль можуть бути використані також у розрахунках за часом нелінійних та нерегулярних динамічних реакцій суден (хитавиця, слемінг, хвильова вібрація) та засобів океанотехніки у штормових умовах (особливо в режимах виживання).

4. Вперше лінійну теорію М. Д. Хаскінда для гідродинамічних навантажень на регулярних хвилях було **узагальнено** шляхом урахування нелінійних ефектів на миттєвій зволоженій поверхні елементів ХвПЕ та врахуванням нерегулярності за часом у хвильових рухах та динаміці коливань ХвПЕ у штормі. Проблему частотної залежності гідродинамічних характеристик – коефіцієнтів прилучених мас та демпфування контурів елементів ХвПЕ було подолано застосуванням асимптотичних рядів за параметрами модуляційних ефектів хвильових рухів і використанням миттєвих значень гідродинамічних характеристик та їх похідних за частотним параметром. Дані узагальнення та вказані у п.п. 2, 3 гідродинамічні моделі вітрових хвиль як раз і створили підгрунття для розробки алгоритму прямого чисельного розрахунку динамічних реакцій ХвПЕ за часом безпосередньо при дії нерегулярних хвиль.

5. Розрахунки динамічних реакцій ХвПЕ при дії нерегулярних хвиль шляхом застосування обчислювальної технології Time Domain Calculations дало змогу вперше отримувати чисельні результати для динамічних реакцій та механічної енергії перетворювачів на інтервалах квазістаціонарності у вигляді часових реалізацій за 30 хв. та визначати на їх основі відповідні коротко термінові статистичні розподіли реакцій без прийняття гіпотез щодо лінійності та статистичної природи хвиль і динаміки коливань перетворювачів. Існуючі спектральні технології дають змогу отримувати ймовірнісні характеристики тільки зі спектрів вихідних процесів без урахування нелінійних ефектів і сукупного аналізу множини вихідних характеристик.

6. Порівняльні та варіантні розрахунки стандартів переміщень та середніх значень потужностей для занурених ХвПЕ – кесона та пластини показали наступне. По-перше, вказані показники роботи ХвПЕ суттєво залежать від характеристик пружності та демпфування внутрішньої системи перетворення отриманої механічної енергії коливань ХвПЕ (гідро-помпи, лінійні генератори типу «магніт-котушка» тощо), які у даній роботі вважалися вільними параметрами. По-друге, порівняння розрахованих даних для обох типів ХвПЕ з даними розрахунків А. Ваbarit загалом виявилися задовільними (із розбіжностями у межах 35%), хоч для окремих хвильових режимів було отримано і більші розбіжності. По-третє, порівняльні розрахунки на нерегулярних хвилях та на еквівалентних регулярних хвилях з амплітудами  $a = \langle a \rangle = 1,25\sqrt{D_w}$  показали, що стандарти переміщень та середні значення потужностей на регулярних хвилях в основному вищі у межах 45...90%. Таким же чином порівняльні розрахунки у нелінійному

та лінійному наближеннях (лінійні хвилі, малі переміщення, інтегрування хвильового тиску для рівноважного стану) також показали, що лінійні оцінки дають завищені результати приблизно до 130%. Таким чином, розрахунки роботи Хв-ПЕ на регулярних хвилях та у лінійному наближенні загалом не можуть дати адекватних оцінок для реальних штормових умов. Нарешті, варіації заглиблення ХвПЕ показали, що збільшення глибини розташування у два рази призводить до зниження показників роботи кесона на один порядок, тоді як пластини усього на 50%.

7. Для поверхневих ХвПЕ – поплавця на важелі та ланцюга плотів виконаний обсяг розрахунків показав наступне. Для поплавця найбільш інтенсивними виявилися кутові коливання важеля, тоді як кутові коливання самого поплавця та телескопічні переміщення важеля були відносно малими. Також заміна підводного розташування важеля на надводне призвело до зростання потужності роботи поплавця у чотири рази, але дана схема потребує монтажу спеціальних опорних конструкцій, здатних вистояти і в екстремальних хвильових умовах. Для ланцюга із трьох плотів різної довжини розрахунки показали, що відносні кутові переміщення плотів, які фактично визначають отриману механічну енергію, знаходяться в межах 0,1 рад. Порівняння потужності ланцюгів з однаковими та різними довжинами плотів показало, що за рахунок підбору довжин плотів можна досягти підвищення потужності роботи ланцюга десь до 3 МВт.

8. З погляду перспективи подальших напрямків досліджень, аналіз існуючого стану розробок ХвПЕ та накопичений у роботі досвід розрахунків показав, що підвищення ефективності роботи ХвПЕ та відповідно й здешевлення електроенергії можливі за наступними напрямками:

a) розташування ХвПЕ кластерами з десятками перетворювачів, наприклад, які працюють на спільну мережу подачі робочої рідини на береговий енергоблок, та розміщення їх таким чином, щоб своїми хвильовими збуреннями вони підсилювали роботу сусідніх перетворювачів;

б) розробка та проектування комбінованих типів ХвПЕ, які б своїми робочими елементами реагували одночасно на усі поля у хвилях (тиску, швидкості та вільної поверхні), наприклад, елемент кесон реагує на поле тиску, приєднані коливальні пластини – на поля швидкостей горизонтального та вертикального потоків у хвилях, а поверхневі елементи – на коливання вільної поверхні;

в) розробка та проектування **адаптивних типів ХвПЕ**, які у поточному режимі роботи, в залежності від надходження інформації з датчиків контролю параметрів збуджуючих хвиль (характерні довжини та висоти), могли б автоматично змінювати параметри інерції, демпфування та жорсткості для налаштування на резонансні режими коливань; наприклад, змінні довжини плотів у ланцюгу, змінна прозорість поля пластини, змінна жорсткість та демпфування у кесоні тощо.

Достовірність теоретичних і прикладних результатів, висновків дисертаційної роботи ґрунтується на коректній постановці задач, використанні адекватних фізико-математичних моделей механіки рідини та твердого тіла, задовільним узгодженням результатів чисельних розрахунків з незалежними експериментальними даними, а також з результатами розрахунків інших авторів.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1. Басин А. М. Качка судов [Текст] / А. М. Басин. М. : Транспорт, 1969. 278 с.
- Белоцерковский О. М. Численное моделирование в механике сплошных сред [Текст] / Олег Михайлович Белоцерковский. — М. : Физматлит, 1994. — 448 с. — ISBN: 5-02-014986-1.
- Бишоп Р. Гидроупругость судов: Пер. с англ. [Текст] / Р. Бишоп, У. Прайс. Л. : Судостроение, 1983. — 420 с.
- Блинцов В. С. Основные направления повышения энергетической эффективности волновых электростанций [Текст] / В. С. Блинцов, Нгуен Тхань Хай // Сборник научных трудов НУК. — 2010. — Т. 435, № 6. — С. 122–130.
- Бородай И. К. Качка судна на морском волнении [Текст] / И. К. Бородай,
   Ю. А. Нецветаев. Л. : Судостроение, 1969. 432 с.
- Бреббиа К. Динамика морских сооружений:Пер. с англ. [Текст] / К. Бреббиа, С. Уокер. Л. : Судостроение, 1983. 232 с.
- Бреббия К. Методы граничных элементов: Пер. с англ. [Текст] / К. Бреббия, Ж. Теллес, Л. Вроубел. — М. : Мир, 1987. — 524 с.
- Ветер и волны в океанах и морях: Справочные данные. Регистр СССР [Текст]. — Л. : Транспорт, 1974. — 359 с.
- Внешние силы, действующие на плавучие сооружения и суда для освоения Мирового океана: Зарубежный опыт судостроения [Текст] / И. Н. Галахов, О. Е. Литонов, В. М. Шапошников [и др.]; Под ред. И. Н. Галахов. — Л. : ЦНИИ «Румб», 1978. — 86 с.
- Вознесенский А. И. Нормированный энергетический спектр морского волнения [Текст] / А. И. Вознесенский, Ю. А. Нецветаев // Океанология. 1964. — Т. 4, № 5. — С. 788–801.

- 11. Войткунский Я. И. Гидромеханика: Учебник [Текст] / Я. И. Войткунский,
  Ю. И. Фадеев, К. К. Федяевский. Л. : Судостроение, 1982. 456 с.
- Воробьев Ю. Л. Потенциал скоростей при вертикальной качки плоского судна, плавающего без хода на глубокой воде [Текст] / Ю. Л. Воробьев // Вісник ОДМУ: Актуальні проблеми теорії корабля. Проектування суден та їх конструкцій. — 1999. — № 3. — С. 3–19.
- Гантмахер Ф. Р. Лекции по аналитической механике: учеб. пособие для вузов [Текст] / Ф. Р. Гантмахер. — М. : Физматлит, 2003. — 264 с.
- Гор А. Неудобная правда. Глобальное потепление: Как остановить планетарную катастрофу [пер. с англ. А. Калюжного] [Текст] / А. Гор. — С.Пб. : Изд-во Амфора, 2007. — 328 с.
- 15. Гукенхеймер Д. Нелинейные колебания, динамические системы и бифуркации векторных полей [Текст] / Дж. Гукенхеймер, Ф. Холмс. — М.–И. : Институт компьютерных исследований, 2002. — 560 с.
- Гумбель Э. Статистика экстремальных значений [Текст] / Э. Гумбель. М. : Мир, 1965.
- Давидан И. Н. Ветровое волнение как вероятностный гидродинамический процесс [Текст] / И. Н. Давидан, Л. И. Лопатухин, В. А. Рожков. — Л. : Гидрометеоиздат, 1978. — 286 с.
- Добровольский А. Д. Моря СССР [Текст] / А. Д. Добровольский, Б. С. Залогин. М. : Изд-во МГУ, 1982. Т. 2. 192 с.
- Доценко С. Ф. Волны-убийцы в северо-западной части Черного моря [Текст] / С. Ф. Доценко, В. А. Иванов, Ю. А. Побережный // Доповіді Національної академії наук України. — 2009. — № 9. — С. 113–117.
- 20. Дыхта Л. М. К гидродинамической теории качки удлиненного судна [Текст] / Л. М. Дыхта // Труды НКИ: Теория корабля гидромех. — 1978. — № 136. — С. 3–10.
- Екимов В. В. Вероятностные методы в строительной механике корабля [Текст] / В. В. Екимов. — Л. : Судостроение, 1966. — 327 с.

- 22. Захаров В. Е. Форма спектра энергонесущих компонентов водной поверхности в слаботурбулентной теории ветровых волн [Текст] / В. Е. Захаров, М. М. Заславский // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1983. Т. 19, № 3. С. 282–291.
- 23. Звягинцев А. Ю. К методике изучения обрастания морских судов с помощью легководолазной техники [Текст] / А. Ю. Звягинцев, С. Р. Михайлов // Экология обрастания в северо-западной части Тихого океана. Владивосток: ДВНЦ АН СССР. 1980. С. 17–25.
- 24. Зміна клімату 2007: фізична наукова база [Електронний ресурс] // [Державна гідрометеорологічна служба України]. — [S. l. : s. n.], 2007. — URL: http://www.ipcc.ch/pdf/reports-nonUN-translations/ukrainian/report\_ukrainian.pdf (дата звернення: 2011.02.21).
- 25. Комплексный метод граничных элементов в инженерных задачах: Пер. с англ. [Текст] / Теодор II Громадка, Чинту Лей, А. С. Кравчук, Е. Р. Ахунджанов. — М. : Мир, 1990. — 303 с.
- 26. Коняев К. В. Спектральный анализ случайных процессов и полей [Текст] / К. В. Коняев. М. : Наука, 1973. 168 с.
- 27. Корн Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров)
  [Текст] / Г. Корн, Т. Корн. М. : Наука, 1973. 832 с.
- Короткин А. И. Присоединенные массы судна: Справочник [Текст] /
   А. И. Короткин. Л. : Судостроение, 1986. 312 с.
- Короткин Я. И. Прочность корабля [Текст] / Я. И. Короткин, Д. М. Ростовцев, Н. Л. Сиверс. — Л. : Судостроение, 1974. — 431 с.
- Корпачев В. П. Теоретические основы водного транспорта леса: учеб. пособие [Текст] / В. П. Корпачев. М. : Акад. Естествознания, 2009. 237 с. ISBN: 978-5-91327-042-9.
- Кочанов Ю. П. Численные методы строительной механики корабля. Учебник в 2 томах [Текст] / Ю. П. Кочанов. — Н. : НКИ, 1978. — 96 с.
- 32. Кочин Н. Е. Теоретическая гидромеханика, ч.1 [Текст] / Н. Е. Кочин,
  И. А. Кибель, Н. В. Розе. М. : Физматгиз, 1963. 584 с.

- Крылов А. Н. Общая теория качки корабля на волнении [Текст] / А. Н. Крылов // Избранные труды. Серия: Классики науки. — 1958. — С. 7–92.
- 34. Крылов Ю. М. Системы поля ветровых волн [Текст] / Ю. М. Крылов,
  В. В. Кузнецов, С. С. Стрекалов // ДАН СССР. 1973. Т. 208, № 2. С. 958–961.
- 35. Кузнецов А. П. Нелинейные колебания: Учеб. пособие для вузов. [Текст] / А. П. Кузнецов, С. П. Кузнецов, Н. М. Рыскин. — М. : Издательство физикоматематической литературы, 2002. — 292 с.
- 36. Линьков А. М. Комплексный метод граничных интегральных уравнений теории упругости [Текст] / А. М. Линьков. — С.Пб. : Наука, 1999. — 382 с. — 51 ил.
- Луговский В. В. Динамика моря [Текст] / В. В. Луговский. Л. : Судостроение, 1976. — 201 с.
- 38. Манжиров А. В. Методы решения интегральных уравнений: Справочник [Текст] / А. В. Манжиров, А. Д. Полянин. — М. : Факториал, 1999. — 272 с.
- Маркушевич А. И. Краткий курс теории аналитических функций [Текст] /
   А. И. Маркушевич. М. : Наука, 1978. 453 с.
- 40. Некрасов А. И. Точная теория волн установившегося вида на поверхности тяжелой жидкости, Собр.соч., т. I [Текст] / А. И. Некрасов. — М. : Физматгиз, 1961. — С. 358–439.
- 41. Некрасов В. А. Вероятностные задачи мореходности судов [Текст] /
  В. А. Некрасов. Л. : Судостроение, 1978. 303 с.
- 42. Овсянкін В. В. Хвильова електростанція з гідравлічною трансмісією овсянкіна [Текст]. — Патент на корисну модель N 107856 : зареєстровано в Державному реєстрі патентів України 25.02.2015. — 2015.
- 43. Овсянкін В. В. Хвильова електростанція в.овсянкіна [Текст]. Патент на корисну модель N 93495 : зареєстровано в Державному реєстрі патентів України 25.02.2011. — 2011.
- 44. Орлов А. И. Организационно-экономическое моделирование : учебник : в 3 ч. Ч. 2: Экспертные оценки. [Текст] / А. И. Орлов. — М. : Изд-во МГТУ им.

Н.Э. Баумана, 2011. — 486 с.

- 45. Осадчий С. Д. Перспективы развития волновой энергетики [Текст] / С. Д. Осадчий, А. В. Савченко // Гідроенергетика України. 2012. № 1. С. 19–20.
- 46. Осадчук О. В. Занурена хвильова електростанція Осадчука О.В., Савченка В.А. [Текст]. — Патент на корисну модель N 95525 : зареєстровано в Державному реєстрі патентів України 10.08.2011. — 2011.
- 47. МГЭИК, 2007: Изменение климата, 2007 г: Обобщающий доклад [Текст] : Отчет / МГЭИК ; рук. А. Райзингер ; исполн.: Р. К. Пачаури [и др.]. — Женева, Швейцария. — 104 с.
- 48. Пирсон В. Д. Ветровые волны [Текст] / В. Дж. Пирсон, М. С. Лонге-Хиггинс, О. М. Филлипс. — М. : Изд-во иностр. лит., 1962. — 441 с.
- 49. Проблемы на пути развития мировой энергетики. Всесторонний обзор прогнозов развития общемировой системы производства и потребления нефти и природного газа на период до 2030 г [Текст] : Отчет ; рук. Л. Р. Реймонд ; исполн.: Э. Гулд, Дж. Дж. Хэмр, Д. Дж. О'Райли, Д. Х. Ерджин. — Вашингтон : Нацинальный совет по нефти, 2007. — 41 с.
- 50. Ремез Ю. В. Качка корабля [Текст] / Ю. В. Ремез. Л. : Судостроение, 1983. 328 с.
- 51. Росс Д. Энергия волн. Первая книга о революции в технике [Текст] / Дэвид Росс. — Л. : Гидрометеоиздат, 1981. — 112 с. — Пер. с англ.
- 52. Роуч П. Вычислительная гидродинамика [Текст] / П. Роуч. М. : Мир, 1976. 618 с.
- 53. Сагдеев Ю. А. Введение в метод конечных элементов: метод. пособие [Текст] / Ю. А. Сагдеев, С. П. Копысов, А. К. Новиков. — И. : Изд-во «Удмуртский университет», 2011. — 44 с.
- 54. Сердюченко А. М. Гідродинаміка гранично крутих хвиль [Текст] /
   А. М. Сердюченко // Доповіді НАН України. 2001. № 8. С. 35–41.
- 55. Сердюченко А. М. Нелінійні задачі гідродинаміки вітрових хвиль та суден в умова морського хвилювання [Текст] : Дис. на здобуття ступ. доктора

фіз.мат. наук : 01.02.05 / Анатолій Миколайович Сердюченко ; Інститут гідромеханіки НАНУ. — К. : [s. n.], 2004. — 444 с.

- 56. Сердюченко А. М. Згин та міцність суден в умовах морського хвилеутворення (Теоретичні основи та методика розрахунків): Навчально-методичний посібник. [Текст] / А. М. Сердюченко. — Миколаїв : НУК, 2009. — 162 с.
- 57. Сердюченко А. М. Навчальний посібник з дисципліни «Математичні моделі та чисельні методи БМК та МПС» [Текст] / А. М. Сердюченко. — Миколаїв : НУК, 2013. — 54 с.
- 58. Сердюченко А. Н. Динамика морских волн и судна в шторме с учетом нелинейных эффектов [Текст] / А. Н. Сердюченко // Гидромеханика. 1998. № 72. С. 112–134.
- 59. Сердюченко А. Н. Обобщенная модель спектрального представления морского нерегулярного волнения [Текст] / А. Н. Сердюченко // Теория и проектирование судна. — 2007. — № 2. — С. 69–82.
- Слободюк В. О. Морська хвильова електростанція [Текст]. Патент на корисну модель N 87365 : зареєстровано в Державному реєстрі патентів України 10.07.2009. — 2009.
- Слободюк В. О. Морська хвильова електростанція [Текст]. Патент на корисну модель N 92993 : зареєстровано в Державному реєстрі патентів України 27.12.2010. — 2010.
- Сретенский Л. Н. Теория волновых движений жидкости [Текст] / Л. Н. Сретенский. М. : Наука, 1977. 815 с.
- Стокер Д. Д. Волны на воде [Текст] / Дж. Дж. Стокер. М. : ИЛ, 1959. 617 с.
- 64. Строительная механика корабля и теория упругости: Учебник для вузов [Текст] / В. А. Постнов, Д. М. Ростовцев, В. П. Суслов, Ю. П. Кочанов. Л. : Судостроение, 1987. Т. 1. 288 с.
- 65. Строительная механика корабля и теория упругости: Учебник для вузов [Текст] / В. А. Постнов, Д. М. Ростовцев, В. П. Суслов, Ю. П. Кочанов. — Л. : Судостроение, 1987. — Т. 2. — 288 с.

- 66. Тарасов С. Обчислювальна гідродинаміка на службі вітроенергетики [Текст] / С. Тарасов, Д. Редчиць, О. Польовий // Світогляд. Нац. акад. наук України, Голов. астрон. обсерваторія НАН України. — 2010. — № 6. — С. 24–28.
- 67. Хаскинд М. Д. Гидродинамическая теория качки корабля [Текст] /
   М. Д. Хаскинд. М. : Наука, 1973. 327 с.
- 68. Холл Д. Современные численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений [Текст] / Дж. Холл, Дж. Уатт. М. : Мир, 1979. 312 с.
- 69. Циолковский К. Э. Волнолом и извлечение энергии из морских волн [Электронный pecypc]. — [Б. м. : б. и.], 1934. — URL: http://www.ras.ru/ ktsiolkovskyarchive/1\_actview.aspx?id=359 (дата обращения: 2011.07.19).
- Черкесов Л. В. Гидродинамика поверхностных и внутренних волн [Текст] / Л. В. Черкесов. К. : Наукова думка, 1976. 363 с.
- 71. Annual report 2008: International Energy Agency Implementing Agreement on Ocean Energy Systems (IEA-OES) [Electronic resource] // [the Executive Committee of the IEA-OES], Ed. by A. Brito-Melo, G. Bhuyan. — [S. l. : s. n.], 2009. — URL: http://www.oceanenergy-systems.org/library/annual\_reports/2008\_annual\_report/ (online; accessed: 2011.07.22).
- 72. Annual Report 2010 Implementing Agreement on Ocean Energy Systems [Electronic resource] // [The Executive Committee of Ocean Energy Systems], Ed. by Dr. A. Brito e Melo, Dr. J. Huckerby. — [S. l. : s. n.], 2011. — URL: http://www.iea-oceans.org/\_fich/6/2010\_Annual\_Report.pdf (online; accessed: 2012.04.29).
- 73. Annual report 2011: Implementing Agreement Ocean Enon ergy Systems [Electronic resource] // [The Executive Committee of Ocean Energy Systems], Ed. by Dr. Brito А. е Melo, Dr. J. Huckerby. -- [S. l. : s. n.], 2011. -- URL: http://www.ocean-energysystems.org/documents/62328\_oes\_annual\_report\_web\_21marv2.pdf/ (online; accessed:

2012.04.29).

- 74. Annual report 2012: Implementing Agreement on Ocean Energy Systems [Electronic resource] // [The Executive Committee of Ocean Energy Systems], Ed. by Dr. A. Brito e Melo, Dr. J. Huckerby. [S. l. : s. n.], 2012. URL: http://www.ocean-energy-systems.org/documents/38361\_oes\_annual\_report\_2012\_web\_.pdf/ (online; accessed: 2013.05.20).
- 75. Annual report 2013: Implementing Agreement on Ocean Energy Systems [Electronic resource] // [The Executive Committee of Ocean Energy Systems], Ed. by A. Brito e Melo, J. L. Villate. — [S. l. : s. n.], 2013. — URL: http://www.ocean-energy-systems.org/documents/62861\_oes\_annual\_report\_2013\_final.pdf/ (online; accessed: 2014.05.12).
- 76. ANSYS. ANSYS Aqwa, Product features [Electronic resource]. [S. l. : s.
  n.], 2014. URL: http://www.ansys.com (online; accessed: 03.03.2014).
- 77. Apache Commons. Commons math: The apache commons mathematics library [Electronic resource]. — [S. l. : s. n.], 2014. — URL: http:// commons.apache.org/proper/commons-math/ (online; accessed: 13.10.2014).
- 78. Aquamarine Power. Oyster wave power technology [Electronic resource]. [S.
  l. : s. n.], 2014. URL: http://www.aquamarinepower.com/technology.aspx (online; accessed: 15.06.2014).
- 79. Baddour E. Energy from waves and tidal currents [Electronic resource]. — [S. l. : s. n.], 2004. — URL: http://www.marinerenewables.ca/wpcontent/uploads/2012/11/Energy-from-Waves-and-Tidal-Currents.pdf (online; accessed: 20.07.2012).
- Bishop R. E. D. Hydrodynamic coefficients of some swaying and rolling cylinders of arbitrary shape [Text] / R. E. D. Bishop, W. G. Price, P. Temarel // Int. Shipbuilding Progress. — 1980. — Vol. 27. — P. 54–65.
- 81. Burns M. The STL format. Standard data format for fabbers. Reprinted from section 6.5 of automated fabrication, Ennex corporation [Electronic resource]. — [S. l. : s. n.], 2013. — URL: http://www.fabbers.com/tech/STL\_Format (online; accessed: 07.08.2013).

- 82. Carter D. J. T. Estimation of wave spectra from wave height and period [Text] / D. J. T. Carter // I. O. S. Report No. 135. — Wormley (England) : Institute Of Oceanographic Sciences, 1982.
- 83. Chung T. J. Transitions and interactions of inviscid/viscous, compressible/incompressible and laminar/turbulent flows [Text] / T. J. Chung // International journal for numerical methods in fluids. — 1999. — Vol. 31, no. 1. — P. 223–246.
- 84. Conceicao C. A. L. The influence of heel on the hydrodynamic coefficients of ship-like sections and a trawler form [Text] / C. A. L. Conceicao, W. G. Price, P. Temarel // International shipbuilding progress. 1984. Vol. 31, no. 355. P. 56–66.
- 85. Corporation O. java.com: Java [Electronic resource]. [S. l. : s. n.], 2013. URL: https://java.com/en/ (online; accessed: 04.06.2013).
- 86. D2.03 Review of Relevant PTO Systems [Text] : Rep. / Marine Renewables Infrastructure Network ; Executor: J. Grimwade, D. Hails, E. Robles [et al.] : 2012.
- 87. Denverpost.com. Photos: Melting Ice Glaciers and Ice Shelves [Text]. — URL: http://blogs.denverpost.com/captured/2009/04/29/melting-ice-glaciersand-ice-shelves/268/ (online; accessed: 2011.05.23).
- 88. European Ocean Energy Association and others. Oceans of energy European Ocean Energy Roadmap 2010-2050 [Electronic resource]. — [S. l. : s. n.], 2010. — URL: http://www.ocean-energy-systems.org/documents /12210\_euoea\_roadmap.pdf/ (online; accessed: 2012.09.22).
- 89. Extreme wave conditions in the Tyrrhenian Sea [Text] / L. Cavaleri,
  P. L. De Filippi, G. F. Grancini [et al.] // Ocean engineering. 1986. —
  Vol. 13, no. 2. P. 157–180.
- 90. Falcão A. F. The development of wave energy utilisation [Text] / A. F. Falcão // 2008 Annual Report, International Energy Agency Implementing Agreement on Ocean Energy Systems (IEA-OES). IEAOES Secretariat, Lisbon. — 2009. — P. 30–36.

- 91. Falnes J. Ocean waves and oscillating systems: linear interactions including wave-energy extraction [Text] / Johannes Falnes. — [S. l.] : Cambridge University Press, 2002. — ISBN: 9780511754630. — Cambridge Books Online. URL: http://dx.doi.org/10.1017/CBO9780511754630.
- 92. Falnes J. HAVBOLGJE-ENERGI [Electronic resource]. [S. l. : s.
  n.], 2005. URL: http://folk.ntnu.no/ falnes/teach/TEP4175bylgje/waveenergy2005-02www.pdf (online; accessed: 04.05.13).
- 93. Falnes J. A review of wave-energy extraction [Text] / Johannes Falnes // Marine Structures. — 2007. — Vol. 20, no. 4. — P. 185–201.
- 94. Fonseca N. Time-domain analysis of large-amplitude vertical ship motions and wave loads [Text] / N. Fonseca, C. Guedes Soares // Journal of Ship Research. — 1998. — Vol. 42, no. 2. — P. 139–152.
- 95. FreeCAD. FreeCAD: An open-source parametric 3D CAD modeler [Electronic resource]. [S. l. : s. n.], 2014. URL: http://www.freecadweb.org/ (online; accessed: 20.01.2014).
- 96. Goda Y. Numerical experiments on wave statistics with spectral simulation [Text] / Y. Goda // Report of Port and Harbor Research Institute. 1970. Vol. 9, no. 3. P. 3–57.
- 97. Hagerman G. A standard economic assessment methodology for renewable ocean energy projects [Text] / G. Hagerman // Proceedings of the Interantional Symposium on Coastal Ocean Space Utilization. — [S. l. : s. n.], 1995. — P. 129–138.
- 98. Hoeven M. V. IEA Statistics. CO<sub>2</sub> Emissions from fuel combustion HIGH-LIGHTS [Electronic resource] // [IEA Publications], IEA. — [S. l. : s. n.], 2011. — URL: http://www.esrl.noaa.gov/gmd/webdata/ccgg/trends/co2\_data\_mlo.pdf (online; accessed: 2012.09.19).
- 99. Holmes B. Tank testing of wave energy conversion systems: marine renewable energy guides [Text] / Brian Holmes. — [S. l.] : European Marine Energy Centre, 2009.
- 100. Holthuijsen L. H. Waves in oceanic and coastal waters [Text] / Leo H. Holthui-

jsen. — [S. l.] : Cambridge University Press, 2007. — ISBN: 9780521129954. — URL: http://dx.doi.org/10.1017/CBO9780511618536.

- 101. Jensen J. J. Bending moments and shear forces in ships sailing in irregular waves [Text] / J. J. Jensen, P. T. Pedersen // Journal of Ship Research. — 1981. — Vol. 25, no. 4. — P. 243–251.
- 102. JFree.org. JFreeChart [Electronic resource]. [S. l. : s. n.], 2014. URL: http://www.jfree.org/jfreechart/ (online; accessed: 21.11.2014).
- 103. Jinshan X. The application of wavelet transform to wave breaking [Text] / Xu Jinshan, Tian Jiwei, Wei Enbo // Acta Mechanica Sinica (English Series). — 1998. — Vol. 14, no. 4. — P. 306–318.
- 104. Journee J. M. J. Theoretical Manual of SEAWAY (for DOS) [Electronic resource] // [DUT-SHL Report 1216a Technical Report by J.M.J. Journee]. —
  [S. l. : s. n.], 2001. URL: http://www.shipmotions.nl/DUT/PapersReports/1216-TheoreticalManualSEAWAY.pdf (online; accessed: 2015.02.20).
- 105. Key world energy statistics (2011) [Electronic resource] // [IEA Publications], IEA. [S. l. : s. n.], 2011. URL: http://www.ocean-energy-systems.org/library/iea\_publications/ iea\_key\_world\_energy\_statistics\_2011\_/ (online; accessed: 2012.09.19).
- 106. Khan J. Potential Opportunities and Differences Associated with Integration of Ocean Wave and Marine Current Energy Plants in Comparison to Wind Energy [Electronic resource] // [A repoprt for the IEA-OES Annex III]. — [S. l. : s. n.], 2009. — URL: http://www.iea-oceans.org/\_fich/6/T0311\_document.pdf (online; accessed: 08.04.2012).
- 107. Kitware. Kitware offers advanced software R&D solutions and services. Find out how we can help with your next ParaView project [Electronic resource]. — [S. l. : s. n.], 2013. — URL: http://www.paraview.org/ (online; accessed: 05.06.2013).
- 108. Kitware. Kitware offers advanced software R&D solutions and services. Find out how we can help with your next VTK project [Text]. — 2013. — URL: http://www.vtk.org/ (online; accessed: 05.06.2013).

- 109. Lee C. H. WAMIT® User Manual, Versions 6.3, 6.3 PC, 6.3 S, 6.3 S-PC [Text] / C. H. Lee, J. N. Newman. — [S. l. : s. n.], 2006.
- 110. Lewis F. M. The inertia of the water surrounding a vibrating ship [Text] /
  F. M. Lewis // Trans. SNAME. 1929. Vol. 37. P. 1–20.
- 111. Li Y. A synthesis of numerical methods for modelling wave energy converter point absorbers [Text] / Y. Li, Y.-H. Yu // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2012. — Vol. 16, no. 6. — P. 4352–4364.
- 112. Lopes M. F. P. Experimental Development of Offshore Wave Energy Converters [Text] : Ph. D. thesis / Miguel Filipe Pinho Lopes ; Ph. D. Dissertation, Department of Mechanical Engineering, IST, Universidade Técnica de Lisboa. — [S. l. : s. n.], 2011.
- 113. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP) [Text] : Rep. / Deutches Hydrographisches Institut ; Executor: K. Hasselmann, T. P. Barnett, E. Bouws [et al.] : 1973.
- 114. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP) [Text] : Rep. / Deutches Hydrographisches Institut ; Executor: K. Hasselmann, T. P. Barnett, E. Bouws [et al.] : 1973.
- 115. Mei C. C. Numerical methods in water-wave diffraction and radiation [Text] /
  C. C. Mei // Annual Review of Fluid Mechanics. 1978. Vol. 10, no. 1. —
  P. 393–416.
- 116. Melville W. K. Wave modulation and breakdown [Text] / W. K. Melville // Journal of Fluid Mechanics. — 1983. — Vol. 128. — P. 489–506.
- 117. NetBeans. NetBeans IDE. The Smarter and Faster Way to Code [Electronic resource]. [S. l. : s. n.], 2013. URL: https://netbeans.org/ (online; accessed: 04.06.2013).
- 118. Newman J. N. Applications of slender-body theory in ship hydrodynamics [Text] / J. N. Newman // Annual Review of Fluid Mechanics. — 1970. — Vol. 2, no. 1. — P. 67–94.
- 119. Numerical benchmarking study of a selection of wave energy converters [Text] / Aurélien Babarit, Jorgen Hals, MJ Muliawan [et al.] // Renewable

Energy. — 2012. — Vol. 41. — P. 44–63.

- 120. Ochi M. Hurricane Generated Seas [Text] / M. Ochi. [S. l.] : Elsevier Science, 2003. — Vol. 8 of Elsevier Ocean Engineering Series. — ISBN: 9780080534244.
- 121. Ohle N. Influence of spectral shape on wave parameters and design methods in time domain [Text] / N. Ohle, K.-F. Daemrich, E. Tautenhain // The 5 th International Symposium on Ocean Wave Measurement and Anaylsis, Madrid, CD-ROM, Paper. — No. 150. — [S. l. : s. n.], 2005. — 10 p.
- 122. Pelamis Wave Power. Pelamis wave energy converters [Electronic resource]. —
  [S. l. : s. n.], 2014. URL: http://www.pelamiswave.com/ (online; accessed: 02.06.2014).
- 123. Pierson W. J. A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of SA Kitaigorodskii [Text] / W. J. Pierson, L. Moskowitz // Journal of geophysical research. — 1964. — Vol. 69, no. 24. — P. 5181–5190.
- 124. Price A. A. E. New Perspectives on Wave Energy Converter Control [Text] : A thesis submitted for the degree of doctor of philosophy / A. A. E. Price ; the School of Engineering at The University of Edinburgh. — [S. l. : s. n.], 2009. — 319 p.
- 125. A review of numerical modelling of wave energy converter arrays [Text] / Matt Folley, Aurélien Babarit, Ben Child [et al.] // ASME 2012 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering / American Society of Mechanical Engineers. — [S. l. : s. n.], 2012. — P. 535–545.
- 126. Salvatore J. World Energy Perspective: Cost of Energy Technologies [Text] / J. Salvatore // Bloomberg New Energy Finance. — 2013.
- 127. Serdyuchenko A. N. Nonlinear asymptotical estimations of the short-term probability distributions for steep wind-generated waves [Text] / A. N. Serdyuchenko, T. V. Emeljanova // Електронний вісник НУК. № 1. Миколаїв : Видавництво НУК, 2010. 10 с. URL: http://evn.nuos. edu.ua/article/view/24585/22091.

- 128. Soares C. G. Representation of double-peaked sea wave spectra [Text] / C. G. Soares // Ocean Engineering. — 1984. — Vol. 11, no. 2. — P. 185–207.
- 129. Stratigaki V. Experimental study and numerical modelling of intra-array interactions and extra-array effects of wave energy converter arrays [Text] : Ph. D. thesis / V. Stratigaki ; Ghent University. — Zwijnaarde, Belgium : [s. n.], 2014. — 446 p.
- 130. Su M. Y. Nonlinear wave groups [Text] / M. Y. Su [et al.] // The Sixth International Offshore and Polar Engineering Conference / International Society of Offshore and Polar Engineers. — [S. l. : s. n.], 1996. — P. 158–167.
- 131. Tanaka M. The stability of steep gravity waves [Text] / M. Tanaka // Journal of the physical society of Japan. — 1983. — Vol. 52, no. 9. — P. 3047–3055.
- 132. Trends in Atmospheric Carbon Dioxide [Electronic resource], National Oceanic and Atmospheric Administration. [S. l. : s. n.]. URL: http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/.
- 133. Trinnaman J. Survey of energy resources [Text] / J. Trinnaman, A. Clarke // World Energy Council, London: Elsevier. — 2004.
- 134. Tucker M. J. Waves in ocean engineering [Text] / M. J. Tucker, E. G. Pitt. —
  [S. l.] : Elsevier, 2001. Vol. 5 of Elsevier Ocean Engineering Book Series. —
  550 p.
- 135. Villate J. L. Annual report 2014: Implementing agreement on ocean energy systems [Electronic resource] // [The Executive Committee of Ocean Energy Systems]. [S. l. : s. n.], 2014. URL: http://report2014.ocean-energy-systems.org/documents/OES-Annual-Report-2014/ (online; accessed: 2015.04.17).
- 136. Waveplam. State of the art analysis. A Cautiously Optimistic Review of the Technical Status of Wave Energy Technology [Electronic resource], the Intelligent Energy Europe Programme. — [S. l. : s. n.], 2009. — URL: http://www.waveplam.eu/files/downloads/SoA.pdf.
- 137. WaveStar. Concept Wavestar [Electronic resource]. [S. l. : s. n.], 2015. URL: http://wavestarenergy.com/concept (online; accessed: 15.08.2015).

- 138. Westlake P. C. A new conformal mapping technique for ship sections [Text] /
  P. C. Westlake, P. A. Wilson // International Shipbuilding Progress. —
  2000. Vol. 47, no. 449. P. 5–22.
- 139. Wikipedia. Roger Revelle Wikipedia, the free encyclopedia [Electronic resource]. — [S. l. : s. n.], 2013. — URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Roger\_Revelle.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ АВТОРА

- 1<sup>а</sup>. 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<sup>а</sup>. 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).
- За. 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<sup>а</sup>. 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<sup>a</sup>. Martynovskyi, I. M. Non-linear hydrodynamic modelling of the irregular wind generated water waves [Text] / I. M. Martynovskyi, A. M. Serdjuchenko // Black Sea Scientific Journal of Academic research. — 2016. — Vol. 27, no. 1. — P. 21–26. — (Georgia).
- 6<sup>а</sup>. Мартиновський, І. М. Експертний аналіз перетворювачів хвильової енергії [Текст] / І. М. Мартиновський, А. М. Сердюченко // Вісник ХНТУ. 2012. № 2(45). С. 216–221.
- 7<sup>а</sup>. 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<sup>а</sup>. Сердюченко, А. М. Реалізація паралельних розрахунків характеристик нерегулярних вітрових хвиль [Текст] / А. М. Сердюченко, Мартиновський І. М. // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали 2ї Міжнародної науково-технічної конференції. — Миколаїв : НУК, 2011. — С. 497–501.
- 9<sup>а</sup>. 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<sup>а</sup>. 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<sup>а</sup>. 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<sup>a</sup>. 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<sup>a</sup>. 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. — P. 246.
- 14<sup>а</sup>. Martynovsky, I. М. Математичне моделювання динаміки коливань багато-

ланцюгових плотиків [Текст] / І. М. Martynovsky, А. М. Serdjuchenko // Акустичний Симпозіум «КОНСОНАНС-2013». Збірник праць. — Київ : Інститут Гідромеханіки НАН України, 2015.

- 15<sup>а</sup>. 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 науковометодичної конференції. — Миколаїв : Чорноморський державний університет імені Петра Могили, 2011.
- 16<sup>а</sup>. 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 науковотехнічної конференції з міжнародною участю. — Миколаїв : НУК, 2012. — С. 165–168.
- 17<sup>а</sup>. 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<sup>а</sup>. 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<sup>а</sup>. Мартиновський, І. М. Чисельний аналіз роботи хвильових перетворювачів енергії, які взаємодіють з різними гідродинамічними полями у вітрових хви-

лях [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<sup>а</sup>. 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<sup>а</sup>. Мартиновський, І. М. Динаміка коливань 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<sup>а</sup>. 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.

# Додаток А Додаток до Розділу 1

У даному додатку приведені підсумкові таблиці порівняння характеристик сучасних енергетичних систем, що були складені на основі даних офіційних сайтів компаній виробників та звітів Міжнародного енергетичного агентства. З метою виявлення найбільш перспективних схем пристроїв перетворення енергії для дисертаційного дослідження виконано порівняльний аналіз їх енергетичних характеристик.

## А.1. Порівняння характеристик сучасних ХвПЕ

Таблиця А.1

Вигляд	Представники	Фаза (табл. 1.2)	Спосіб перет- ворення енергії	Розміри
1	2	3	4	5
	Pelamis, за-	IV	Коливання з'єднаних	Довжина –
	вод Pelamis		гідравлічними насосами	180 м; Діа-
	Wave Power,		плотів, призводять до	метр – 4 м;
	Сполучене		дії генератори	Вага — 1300
	королівство			Т
	SDE, компанія	I-II	Коливання поверхнево-	_
	SDE Energy		го важеля, який призво-	
	Ltd., Ізраїль		дить у дію гідравлічні	
			амортизатори, що з'єд-	
			нані з генератором	

### Порівняння загальних характеристик сучасних ХвПЕ

1	2	3	4	5	
	WaveStar,	III-IV,	Поверхневі важелі від	Довжина –	
	WaveStar	масштаб	руху хвиль призводять у	240 м; 20 по-	
	Energy Aps.,	1:2	дію гідравлічні аморти-	плавців – 10	
	Данія		затори, що з'єднані з ге-	м у діаметрі	
			нератором		
	W2 Power,	II-III,	Комбінація вітрових	Трикутна	
	Pelagic Power	масштаб	пристроїв та поверх-	форма зі	
	AS, Норвегія	1:3	невих важелів, що	стороною 90	
			з'єднані гідравлічними	М	
			амортизаторами до		
			генераторів		
	AWS, AWS	III	Плавучі важелі рухаю-	12 ко-	
	Ocean Energy		ться під дією хвиль та	мірок із	
	Ltd., Нідерлан-		призводять у дію гене-	загальним	
	ди		ратори, що з'єднані з	діаметром	
			ними через гідравлічні	60 м	
			амортизатори		
	РІСО, прибере-	V	Зміна тиску повітря у		
	жний пристрій		прибережній камері від		
	на Азорських		хвилеутворення призво-		
	островах, Пор-		дить до обертання пові-		
	тугалія		тряну турбіну		
	OceanEnergy,	III–IV	Осцилюючий стовп води	30х10х10 м;	
	Приватне під-		призводить у дію пові-	вага 400 т	
	приємство,		тряну турбіну у плаву-		
	Ірландія		чій камері		
	OceanLinx,	III–IV	Осцилюючий стовп во-	25х35 м	
	OceanLinx		ди призводить у дію по-		
	сотр., Австра-		вітряну турбіну Деніса-		
	лія		Олда		

# Продовження таблиці А.1

1	2	3	4	5
	PowerBuoy,	III–IV	Обертання зануреного	Довжина –
	компанія		тіла призводить у дію	35 м
	Ocean Power		гідравлічні насоси, що	
	Technologies		обертають генератори	
	Inc., CIIIA			
	Aegir Dynamo,	I–II	Осцилюючий поплавець	9х5х6 м
	Ocean Navitas		передає через вал рухи в	
	Ltd, Сполучене		електричний генератор	
	королівство			
	AquaBouy,	III-IV,	Коливання поплавця	35 м
	Finavera	масштаб	призводять у дію гі-	
	Renewables,	1:2	дравлічний насос, що	
	Канада		обертає генератор	
	WET NZ, KOM-	III-IV,	Вертикальні коливання	17х3.5х1.5 м
	панія WET NZ,	масштаб	пристрою призводять до	
r	Нова Зеландія	1:2	дії гідронасоси, які обер-	
T A			тають генератори. Та-	
			кож у пристрої працю-	
			ють поверхневі важелі,	
			які взаємодіють з гідро-	
			насосами	
	WaveDragon,	IV-V	Захват води у резервуа-	390х220 м
	компанія		ри за рахунок руху по-	
	WaveDragon		верхневих хвиль. Вода	
	Арз., Данія		стікає через гідротурбі-	
			ни, які генерують еле-	
			ктроенергію	

# Продовження таблиці А.1
1	2	3	4	5
	CETO, Carnegie	III, мас-	Занурені сферичні еле-	10х10 м
	Wave Energy Li-	штаб 1:3	менти у результаті зміни	
	mited Ltd., AB-		тиску осцилюють і при-	
	стралія		зводять у дію гідравлі-	
An and the second s			чні насоси, що переда-	
			ють під тиском рідину	
			до берегових генерато-	
			рів	
	BioWave, Bi-	I–II	Занурені коливальні ва-	
	oPower Systems		желі під дією гідроди-	
	Pty, Ltd., Aв-		намічних полів швидко-	
	стралія		сті часток рідини при-	
			водять у дія гідравлічні	
			насоси, що з'єднані з ге-	
			нераторами	
	Oyster,	III-IV	Занурені коливальні ва-	26х16 м
	Aquamarine		желі під дією гідроди-	
	Power Ltd.,		намічних полів швидко-	
	Сполучене		сті часток рідини при-	
	королівство		водять у дія гідравлічні	
			насоси, що з'єднані з ге-	
			нераторами	
	WaveRoller	III	Занурені коливальні ва-	3,5х4,5х6 м;
			желі під дією гідроди-	вага 20 т
			намічних полів швидко-	
			сті часток рідини при-	
			водять у дія гідравлічні	
			насоси, що з'єднані з ге-	
			нераторами	

# Продовження таблиці А.1

### Таблиця А.2

# Порівняння технічних характеристик сучасних ХвПЕ

Назва	Потужність, кВт	ККД, %	Місце генерації енергії	Місце розташу- вання у шель- фовій зоні	Висота хвиль, мін…макс. м
1	2	3	4	5	6
Pelamis	3x750	25 - 40	У пристрої	10 км від берега	_/_
SDE	40	_	У пристрої	На березі	_/_
WaveStar	30 кВт один по- плавець	_	У пристрої	По прибережній смузі	_/_
W2	9000	_	У пристрої	40 км від берега та >40 м	_/_
Power				глибини	
AWS	2500	25	У пристрої	На глибинах 70150 м	-/6
PICO	30	_	У пристрої	На березі	_/_
OceanEnerg	y2000	_	У пристрої	На глибинах 5075 м	_/_
OceanLinx	1500		У пристрої	На глибині 30 м	_/_
PowerBouy	150/500	30-35	У пристрої	4 км від берега	$1,\!5/7$
ПВЕС	50	_	У пристрої	У відкритих водах, у зоні узбережжя	_/_
Aegir	45	_	У пристрої	На глибині 25 м, на від-	$0,\!3/2,\!5$
Dynamo				стані більше 1 км	
AquaBouy	250	_	У пристрої	На глибинах 75100 м	_/_
WET NZ	20	_	У пристрої	34 км від берега	_/_
WaveDragor	n 24, 26, 48	_	У пристрої	На глибинах 20, 25, 30 м	-/16; 17,5; 19
СЕТО	2000/5000	_	На березі	На глибинах 2050 м, на відстані 300 м від бе- рега	_/_
BioWave	1000	65	У пристрої	На глибинах 4045 м	-/-

1	<b>2</b>	3	4	5	6
Oyster	800	_	На березі	На глибині 15 м, на від-	_/_
				стані 0,5 км від берега	
WaveRoller	15	_	На березі	На глибинах 1020 м	_/_

Продовження таблиці А.2

Таблиця А.3

# Порівняння експлуатаційних характеристик сучасних ХвПЕ

Назва	Занесення піском	Обростання	Період профіла- ктики	Термін експлуа- тації і/або тер- мін відшкодува- ння
1	2	3	4	5
Pelamis	Немає	Не впливає на	За потребую	Відшкодування за
		характеристики		20 місяців
SDE	Можливе незначне	Не впливає на		
	занесення	характеристики		
Wave-	Немає	Фундаменти		
Star				
W2	Фундаменти та ка-	Фундаменти та		
Power	бель	кабель		
AWS	Немає	Плавучі елемен-	По мірі необхідно-	
		ти, які не впли-	сті	
		вають на загаль-		
		ні характеристи-		
		ки		
PICO	Немає	Не впливає на		
		характеристики		
Ocean-	Немає	Не впливає на	Відсутність рухли-	
Energy		характеристики	вих елементів об-	
			умовлює високий	
			термін експлуата-	
			ції без профілакти-	
			ки	

# Продовження таблиці А.3

1	2	3	4	5
Ocean-	Немає	Не впливає на	Відсутність рухли-	
Linx		характеристики	вих елементів об-	
			умовлює високий	
			термін експлуата-	
			ції без профілакти-	
			КИ	
Power-	Замулюються крі-	Обростає корпус		
Bouy	плення установки та	установки		
	кабель живлення			
ПВЕС			Без обслуговуван-	
			ня	
Aegir	Кріплення	Кріплення, ру-	6 місяців	Експлуатація > 20
Dynamo		хливі елементи		років, відшкодува-
				ння декілька років
Aqua-	Замулюються крі-	Обростає корпус		
Bouy	плення пристрою та	пристрою		
	кабель живлення			
WET	Кріплення та кабелі	Занурені елемен-		
NZ		ти пристрою		
Wave-	Попадання сторон-	Захист турбіни		
Dragon	ніх об'єктів в резер-	від обростання		
	вуар			
CETO	Елементи кріплення	Коливальні еле-		
		менти, кріплен-		
		ня, трубопровід		
Bio-	Кріплення, рухливі	Кріплення,		
Wave	елементи	кабель, важелі		
Oyster	Кріплення, рухливі	Кріплення,	На період тестува-	
	елементи	кабель, важелі	ння – постійно	
Wave-	Кріплення, рухливі	Кріплення, ру-		
Roller	елементи	хливі елементи		

Назва	Утилізація	Довколишнє середовище	Автоматика
1	2	3	4
Pelamis	Буксирування до мі-	Використання біорозчинної	Контролююче програм-
	сця утилізації	рідини для гідроприводів	не забезпечення
SDE		Захаращує берегову лінію	
Wave-		Відсутній шкідливий вплив	Датчики контролю по-
Star		на довколишнє середовище	годних умов блокують
			коливальні елементи
W2	Буксирування еле-	Мінімальний вплив на дов-	
Power	ментів на берег	колишнє середовище	
AWS	Буксирування еле-		
	ментів на берег		
PICO			Контроль за допомо-
			гою спеціального про-
			грамного забезпечення
Ocean-			
Energy			
Ocean-	Буксирування до мі-		
Linx	сця демонтажу		
Power-		Екологічно чиста установка,	Спеціальні датчики
Bouy		відсутність шумів, не видно	
		з берега	
ПВЕС		Без викидів, не видно з бе-	Самоналаштовуванні
		рега	датчики до погодних
			умов
Aegir	Кріплення оста-	Не видна з берега, добрий	Блокування рухливих
Dynamo	ються на місці, а	вплив на флору та фауну	елементів та здатність
	установка демонтує-		повного занурення
	ться		
Aqua-			
Bouy			

Порівняння безпекових характеристик сучасних ХвПЕ

1	2	3	4
WET	Демонтаж установ-	Використання екологічно	Керування з берега
NZ	ки та буксирування	безпечних матеріалів	
	до берега		
Wave-	Використання мате-	Мінімальна кількість ру-	
Dragon	ріалів, що підляга-	хливих елементів, що мінімі-	
	ють переробці	зує вплив на довколишнє се-	
		редовище	
CETO		Не видно рухливих елемен-	Самоналаштовуюча си-
		тів, в якості рідини гідрав-	стема дозволяє уникати
		лічних насосів використову-	штормів
		ється вода	
Bio-			Спеціальні датчики
Wave			фіксують екстремальні
			хвилі та автомати-
			чно призводять до
			складання важелів
Oyster		Візуально не помітні	
Wave-		Не помітна, безшумна	
Roller			

### Продовження таблиці А.4

### А.2. Експертний аналіз ХвПЕ

У силу того, що значна кількість попередніх оцінок тих чи інших характеристик ХвПЕ не може бути отримана по причині їх відсутності або високої трудомісткості використання, було застосовано методи експертного налізу. Серед методів експертних оцінок найбільшої популярності отримали колективні методи, зокрема, дельфійський метод [44]. У даній дисертаційній роботі було використано зазначений метод експертних оцінок з метою визначення найбільш перспективних типів ХвПЕ (див. [6<sup>a</sup>]). У рамках зазначеної мети визначено низку питань, що потрібно було вирішити: 1. Першим кроком експертного аналізу є визначення факторі, які є вирішальними при використанні того чи іншого типу пристрою.

2. Сформулювати основне питання таким чином, щоб можна було інтерпретувати його однозначно і дати відповідь у чисельному вигляді. Чисельне значення відповіді визначалось за рейтинговим еквівалентом від найбільш перспективної характеристики перетворювача до найменш перспективної.

3. Побудувати таблицю оцінок (рангів) для кожного типу пристрою та фактору, що впливає на його роботу.

4. Проаналізувати відповіді на узгодженість оцінок, виявити додаткові фактори, які необхідно врахувати, а також ті, що мають максимальну розбіжність із загальною тенденцією оцінок.

5. При необхідності, провести повторне оцінювання та аналіз до отримання узгодженого результату по факторам.

6. Узагальнити результати і виявити рекомендації щодо досліджуваних типів енергетичних пристроїв.

Фактори, які впливають на роботу ХвПЕ та їх відповідні оцінки зведено до табл. А.5.

На етапі математичного опрацювання результатів з табл. А.1–А.4 було визначено кількість груп однакових оцінок  $Q_i$ , призначених для кожного пристрою, та кількість оцінок у кожній групі  $t_{ij}$ , а також для кожного пристрою значення показника

$$T_j = \sum_{q_j}^{Q_j} t_{q_j}^3 - t_{q_j}, \tag{A.1}$$

де i = 1, N; j = 1, M; N - кількість типів пристроїв, що аналізуються; <math>M -кількість факторів, що впливають на їх роботу.

Далі складено табл. А.6 нормованих оцінок. Відповідно до [44], алгоритм нормування складається з наступних кроків:

**Крок 1.** Виписати послідовність цілих чисел: 1, 2, 3, ..., *n*, де *n* — кількість типів пристроїв, що розглядається.

Крок 2. Визначити типи пристроїв, якім виставлено найменшу оцінку.

# Експертні оцінки для різних типів хвильових перетворювачів

вяитьмотаА	10		2	S	3	2	3	S		2
Екологічність	6	S	လ			2	က	လ	S	လ
вяитявліфодП	$\infty$	<del>,</del>	ဂ	Ŋ	Ŋ	ဒ	4	3	<del>,</del>	3
<u>кннэлумв</u> Е	2	1	<del>, -</del>	4	4	1	<del>, -</del>	2	2	1
-йітэовомдіВ кість	9	2	က	н,	<del>, _ 1</del>	4	4	4	2	က
кннѕаушътеоЧ	ы		7	4	4	အ	2	7		7
Місце генерації енергії	4		က	4	4	က	က	က	2	2
атэінжүтоП	3	4	4	3	3	2	<del>,</del>	4	4	Ξ
идімєо <sup>¶</sup>	2	33 S	က	2	4	<del>, _  </del>	4	2	2	H
Спосіб перетво- їїтарня вннэд	1	1	1	က	က	က	3	2	2	က
		юючий стовп води (прибережний)		ені з вертикальною качкою	ені з коливальними важелями	ючі поплавці	юючий стовп води (плавучий)	ивні плавучі	ивні берегові	хневі поплавці

224

**Крок 3.** З послідовності чисел, які були визначені на першому кроці, відібрати стільки найменших чисел, скільки типів пристроїв мають найменшу оцінку. Суму чисел розділити на кількість пристроїв, а самі числа та перелік пристроїв видалити зі списку.

**Крок 4.** Кроки 1, 2 та 3 повторювати до тих пір, поки не буде пронормовано усі типи пристроїв.

Аналогічно нормуються оцінки для інших факторів у вихідній таблиці. Очевидно, що суми стовпчиків у нормованій матриці повинні бути рівні між собою і дорівнювати значенню

$$\sum_{i=1}^{N} d_{ij} = \frac{n+1}{2}n,$$

де  $d_{ij}$  — нормована оцінка i —го типу пристрою, виставлена за j-им фактором; n — кількість типів пристроїв.

Далі для отриманої нормованої матриці визначено суму оцінок  $S_i$ , призначених i-му типу пристрою, за формулою  $S_i = \sum_{j=1}^M d_{ij}$ , де M – число факторів. При цьому припускається, що чим менше величина  $S_i$ , тим більша важливість i-го типу пристрою.

На наступному кроці експертних оцінок визначались середні оцінки типів пристроїв за формулою

$$\langle S \rangle = \frac{\sum_{i=1}^{N} S_i}{N}$$

Середнє значення оцінки дозволяє знайти відхилення  $\beta_i$  сумарних оцінок  $S_i$  від  $\langle S \rangle$ , тобто  $\beta_i = \langle S \rangle - S_i$ . Остаточні результати розрахунків приведені у табл. А.6.

На завершення опрацювання експертних оцінок потрібно було визначити коефіцієнт конкордації (узгодженості оцінок факторів) за формулою

$$K = \frac{12\sum_{i=1}^{N} \beta_i^2}{m^2(n^3 - n) - m\sum_{j=1}^{M} T_j}$$

де  $T_j$  — розраховується за формулою (А.1).

Отримане значення коефіцієнту виявилось вищим за граничне значення K = 0,6, що говорить про достатньо узгоджені оцінки і результати можна прийняти.

Таблиця А.6

Результати експертного аналізу для різних типів хвильових перетворювачів

	1	2	3	4	5	9	2	8	6	10	$S_i$	$\beta_i$	Рейтинг
Осцилюючий стовп води (прибережний)	1,5	6,5	7,5	н,	1,5	3,5	3	1,5	8,5	1,5	36	14	7
Плоти	1,5	6,5	7,5	5,5	4,5	5,5	က	4,5	5,5	4	48	2	IJ
Занурені з вертикальною качкою	2	4	4,5	8,5	8,5	1,5	8,5	8,5	1,5	7,5	60	-10	$\infty$
Занурені з коливальними важелями	2	8,5	4,5	8,5	8,5	1,5	8,5	8,5	1,5	7,5	64, 5	-14,5	6
Плаваючи поплавки	2	1,5	က	5,5	2	$\infty$	က	4,5	က	4	46,5	3,5	4
Осцилюючий стовп води (плаваючий)	2	8,5	1,5	5,5	4,5	$\infty$	က	2	5,5	7,5	58	ŝ	7
Переливні плаваючі	3,5	4	7,5	5,5	4,5	$\infty$	6,5	4,5	5,5	7,5	57	2-	9
Переливні берегові	3,5	4	7,5	2,5	1,5	3,5	6,5	1,5	8,5	1,5	40,5	9,5	S
Поверхневі поплавки	7	1,5	1,5	2,5	4,5	5,5	3	4,5	5,5	4	39,5	10,5	2
$Q_{j}$	3	4	က	က	က	4	3	က	က	က			
$t_{1j}$	2	2	2	2	2	2	5	2	2	2			
$t_{2j}$	2	က	2	4	4	2	2	4	4	က			
$t_{3j}$	5	2	4	2	2	2	2	2	2	4			
$t_{4j}$		2				က							
$T_j$	132	42	72	72	72	42	132	72	72	90			

# Додаток Б Додаток до Розділу 2

У даному додатку приведені результати, що отримані у роботах [6,55,138], а також використані та реалізовані у даній дисертаційній роботі при розрахунку навантажень на елементи ХвПЕ з метою визначення їх динаміки руху.

### Б.1. Техніка багатопараметричного конформного відображення

У випадках, коли рівняння граничного контуру шпангоута у декартових або полярних координатах є складними, доцільно перейти до криволінійних координат, в яких рівняння граничного контуру мало б значно простіший вигляд. Такий перехід може бути здійснений за допомогою конформних відображень контуру шпангоута, як це представлено на рисунку Б.1. У фізичній площині z вісь x, що направлена вправо, суміщена з рівнем незбуреної вільної поверхні рідини. Вісь *у*, від якої у протилежному напрямі ходу годинникової стрілки відлічується кут  $\phi$ , направлена вертикально униз. Довільний контур перерізу  $\Omega$  визначається точками P, де перша точка  $P_1$  знаходиться на додатній вісі x, а решта розподілені по контуру у напрямі ходу годинникової стрілки. У параметричній площині початок координат суміщується з центром одиничного кола та має горизонтальну вісь  $\xi$ направлену вправо та вертикальну вісь  $\eta$  направлену донизу. Кут  $\theta$  відлічується від додатньої вісі  $\eta$  у напрямі протилежному ходу годинникової стрілки. Використовуючи техніку конформного відображення  $z = f(\zeta)$ , потрібно точки  $(1; \theta_p)$ у параметричній площині  $\zeta$  відобразити на точки  $(x_p; y_p)$  у фізичній площині z. Вдалий вибір функціональної залежності  $z = f(\zeta)$  дозволить суттєво спростити рівняння граничних контурів і тим самим спростити розв'язок гідродинамічної задачі.

Розглянемо стисло суть метода, детальна реалізація якого представлена у роботах [39, 50, 55, 84, 138]. При розрахунку обтікання пласких контурів функціо-



Рис. Б.1. Схема конформного відображення контуру шпангоута

нальну залежність шукають у вигляді:

$$z = x + iy = f(\zeta) = ire^{-i\phi}.$$
(B.1)

Функція  $f(\zeta)$  є регулярною в області площини шпангоута та відображає контур одиничного кола у площині  $\zeta$  на фізичний контур у вигляді ряду Лорана  $z = \sum_{n=-1}^{\infty} c_n \zeta^{-n}$ , де  $c_n$  – постійні комплексні коефіцієнти, визначення яких і є головною проблемою. На практиці даний ряд обмежується верхньою межею Nі загальне число невідомих коефіцієнтів стає рівним 2N + 3. Кожна точка, що визначає контур і не належить ватерлінії (y > 0), дає два рівняння. Відповідно задача має розв'язок, якщо кількість точок  $P \ge 2N + 3$ . Тоді залежність, яка реалізує конформне відображення контуру одиничного кола на контур шпангоута, що є симетричним відносно миттєвої хвильової ватерлінії, отримає наступний вигляд:

$$z = \sum_{n=-1}^{2N+1} a_n \zeta^{-n},$$
 (B.2)

де для кола  $\zeta = \rho(\cos \theta + i \sin \theta); i = \sqrt{-1}; \theta \in [-\pi/2; \pi/2]$  – кутова координата на одиничному колі нижньої півплощини з радіусом  $\rho = 1$ . Для дійсної та уявної частини z = x + iy далі будемо мати такі залежності:

$$x_{p} = a \sin \theta_{p} + \sum_{n=0}^{N} (-1)^{n} \left[ a_{2n} \cos 2n\theta_{p} + a_{2n+1} \sin(2n+1)\theta_{p} \right] \\ y_{p} = a \cos \theta_{p} + \sum_{n=0}^{N} (-1)^{n} \left[ a_{2n} \sin 2n\theta_{p} - a_{2n+1} \cos(2n+1)\theta_{p} \right] \end{cases},$$
(B.3)

де  $a = a_{-1}$  та  $\{a_n\}, n = 0, 1, 2, ..., 2N + 1$  – невідомі коефіцієнти відображення;  $\theta_p$  – кут у параметричній площині  $\zeta$ , який відповідає точці  $(x_p; y_p)$  у фізичній площині z; p = 1 ... P. Для подальшого викладення зручно буде записати систему (Б.3) у матричному вигляді

$$MA = V, \tag{B.4}$$

де матриця M має розмірність 2P(2N+3) та складається з елементів

$$M = \begin{pmatrix} \sin \theta_1 & 1 & \dots & (-1)^N \cos 2N\theta_1 & (-1)^N \sin(2N+1)\theta_1 \\ \sin \theta_2 & 1 & \dots & (-1)^N \cos 2N\theta_2 & (-1)^N \sin(2N+1)\theta_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sin \theta_P & 1 & \dots & (-1)^N \cos 2N\theta_P & (-1)^N \sin(2N+1)\theta_P \\ \cos \theta_1 & 0 & \dots & (-1)^N \sin 2N\theta_1 & -(-1)^N \cos(2N+1)\theta_1 \\ \cos \theta_2 & 0 & \dots & (-1)^N \sin 2N\theta_2 & -(-1)^N \cos(2N+1)\theta_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \cos \theta_P & 0 & \dots & (-1)^N \sin 2N\theta_P & -(-1)^N \cos(2N+1)\theta_P \end{pmatrix}.$$
 (B.5)

Компоненти векторів коефіцієнтів A та точок контуру V представлені нижче

$$A = \{a; a_0; a_1; \dots; a_{2N}; a_{2N+1}\}, V = \{x_1; x_2; \dots; x_P; y_1; y_2; \dots; y_P\}$$
(B.6)

Рівняння, що представлені у (Б.3), є нелінійними і не можуть бути розв'язані аналітично, тому необхідно побудувати рішення з використанням ітераційних схем. Застосуємо алгоритм, який було описано у статті Westlake (2000) [138]. Реалізація даного алгоритму полягає у наступному.

На першому кроці запишемо відображення Льюіса [110]

$$z = x + iy = a\zeta + a_1\zeta^{-1} + a_3\zeta^{-3}, \tag{B.7}$$

в якому коефіцієнти  $a, a_1$  і  $a_3$  визначаються через залежності

$$a = (b+t)/2 - a_3,$$
  

$$a_1 = (b-t)/2,$$
  

$$a_3 = 0.25 \left[ \sqrt{|(b+t)^2 + 8(bt - \frac{4S}{\pi})|} - (b+t) \right],$$
  
(B.8)

де *b* та *t*, відповідно, півширина та осадка контуру; *S* – площа зануреної частини контура. Звернемо увагу, що відображення можливе при виконанні наступних умов [138,110]

$$\frac{3\pi}{32}(2-\lambda) \leqslant \sigma \leqslant \frac{3\pi}{32}(3+\frac{1}{4\lambda}), \lambda < 1, 
\frac{3\pi}{32}(2-\frac{1}{\lambda}) \leqslant \sigma \leqslant \frac{3\pi}{32}(3+\frac{\lambda}{4}), \lambda \ge 1,$$
(B.9)

де  $\sigma = \frac{S}{2bT}, \lambda = \frac{b}{t}.$ 

За відомими точками, які належать ватерлінії  $(x_1; 0)$  та  $(x_P; 0)$ , складаємо умови

$$x_1(\theta_1 = \pi/2) = b_r,$$
  

$$x_P(\theta_P = -\pi/2) = -b_l,$$
(B.10)

де  $b_r$  та  $b_l$ , відповідно, півширина правого та лівого бортів. За відомими двома точками у площині z та відповідними їм кутами у параметричній площині  $\zeta$ визначаємо коефіцієнти a,  $a_1$  та  $a_3$  для лівого та правого бортів. Отримані значення початкових коефіцієнтів усереднюються. Якщо підставити умови (Б.10) у систему рівнянь (Б.3) при N = 0, то можна отримати значення коефіцієнту  $a_0 = (b_r - b_l)/2$ . Коефіцієнти a,  $a_0$ ,  $a_1$  та  $a_3$  утворюють базис для ітераційної схеми [138], яка представлена нижче.

Крок 1. Нараховується набір точок по контуру півкола з радіусом  $\rho = 1$ , при цьому кожній точці ставиться у відповідність кут  $\theta_i$   $(i = 1 \dots K, K \approx (1 \dots 3) \cdot 10^3)$ на інтервалі від  $\pi/2$  до  $-\pi/2$ .

Крок 2. Застосовується поточний набір коефіцієнтів (спочатку це базис ітераційної схеми  $a, a_0, a_1$  та  $a_3$ ) для конформного відображення точок з параметричної площини  $\zeta$  у фізичну площину z.

Крок 3. По відображеним точкам  $(x_i; y_i)$  площини z розраховуємо загальну довжину контура  $l_{1K}$ . Потім для кожної *i*-ої точки визначаємо відношення  $l_{1i}/l_{1K}$ , де  $l_{1i}$  – довжина від 1 точки до точки i  $(l_{11}/l_{1K} = 0, l_{1K}/l_{1K} = 1)$ .

Отримані відношення відображеного контура  $l_{1i}/l_{1K}$  завжди ставляться у табличну відповідність кутам  $\theta_i$  нарахованим на першому кроці ітераційної схеми. Це дозволить побудувати інтерполяційну функцію  $\theta_p = f(l_{1p}/l_{1P})$ , яка буде визначати значення відповідних кутів для реального контура. **Крок 4.** По точкам реального контура  $(x_p; y_p)$  площини z розраховуємо загальну довжину контура  $l_{1P}$ . Потім для кожної p-ої точки визначаємо відношення  $l_{1p}/l_{1P}$ , де  $l_{1p}$  – довжина від 1 точки до точки p.

**Крок 5.** Використовуючи інтерполяційну функцію, яку було отримано на 3 кроці даної ітераційної схеми, визначаємо кути  $\theta_p$  по значенням відношень  $l_{1p}/l_{1P}$ . Дані кути відповідають кожній точці реального контура.

Крок 6. Отримані значення кутів дозволяють лінеаризувати нелінійну систему (Б.3) та отримати невідомі значення коефіцієнтів  $a_n$  (для першої ітерації це  $a, a_0, a_1, a_3$  та  $a_2$ ). Для цього розраховуємо компоненти матриць M та V системи (Б.4) за формулами (Б.5) та (Б.6), відповідно. Як зазначалось раніше, матриця M в системі (Б.4) має розмірність 2P(2N + 3), тому для спрощення розв'язку перемножимо ліву і праву частини (Б.4) на транспоновану матрицю  $M^T$ 

$$M^T M A = M^T V. (B.11)$$

В результаті отримаємо матрицю  $M^T M$  розмірністю  $(2N+3)^2$ , що дозволяє тепер розв'язати систему рівнянь за допомогою методу оберненої матриці.

Крок 7. Після розв'язку системи з попереднього кроку, вектор A містить коефіцієнти конформного відображення  $a_n$ . На першому кроці при N = 1 знаходимо значення  $a_2$ , а потім збільшуємо значення N на одиницю та, повторюючи з 2 кроку, розраховуємо послідовно значення пари коефіцієнтів  $a_{2N}$  та  $a_{2N+1}$ , і т.д. доки відображений контур не буде відповідати реальному або значення N не досягне верхньої границі.

На завершення викладення методу конформного відображення [138], зазначимо, що однією з переваг даного алгоритму є застосування, на 3 та 4 кроках ітераційної схеми, методу визначення кутів по інтерполяційній функції  $\theta = f(l_{1p}/l_{1P})$ . Цей підхід робить залежність кутів від довжин монотонною та дозволяє відобразити контури реальних перерізів шпангоутів будь–якої складності з досить прийнятним результатом.

# Б.2. Розрахунок гідродинамічних коефіцієнтів поверхневих елементів ХвПЕ

Для розрахунку гідродинамічних коефіцієнтів у даній дисертаційній роботі було обрано метод Урсела (див. [55,80,84]) у поєднанні з багато параметричним конформним відображенням одиничного колового контура на реальний поперечний контур ХвПЕ. У методі Урсела використовуються система пульсуючих гідродинамічних особливостей (джерело, диполь та мультиполя), яка розташовується у центрі кола параметричної площини.

Відповідно до роботи Хаскінда [67] розрахунок гідродинамічних коефіцієнтів можна виконати за формулою

$$\mu_{jk} - \frac{i_t}{\sigma_{\kappa}} \lambda_{jk} = -\rho \int_{(\Omega)} \phi_j \frac{\partial \phi_k}{\partial n} dS, j, k = 2, 3, 4,$$
(B.12)

де  $\varphi_j$  – одиничні гармонічні потенціали, j = 2, 3, 4 – відповідно горизонтальні, вертикальні та кутові коливання контуру;  $\sigma_{\kappa}$  – частота хитавиці контура;  $\Omega$  – зволожений контур перерізу та n – нормаль до контура.

Для задовільнення граничних умов і розрахунку гідродинамічних коефіцієнтів зручно ввести до розгляду функції току  $\psi_j$  з умовами на контурі  $\partial \psi_j / \partial S = \partial \varphi_j / \partial n = c_j$  і оперувати далі комплексними потенціалами  $\chi_j = \varphi_j + i \psi_j$ , j = 2, 3, 4, де  $i = \sqrt{-1}$  – уявна одиниця у площині перерізу. Тоді граничні умови для функції току можна проінтегрувати уздовж контуру і ми отримаємо згідно [55]

$$\Delta(\psi_{j}) = \psi_{j}(\theta) - \psi_{j}(-\pi/2) = \Delta c_{j}; \ j = 2, 3, 4; \ \theta \in [-\pi/2; \pi/2];$$
  

$$\Delta c_{2} = y(\theta); \ \Delta c_{3} = -[x(\theta) - x(-\pi/2)]; \ y(\pm \pi/2) \equiv 0;$$
  

$$\Delta c_{4} = -\frac{1}{2} \left[ x^{2}(\theta) + y^{2}(\theta) - x^{2}(-\pi/2) \right],$$
  
(B.13)

де x, y – горизонтальна та вертикальна координати на фізичному контурі, а  $\theta$  – кутова координата на одиничному контурі (див. формули (Б.3)).

Згідно методу Урсела[55,80,84], комплексні потенціали  $\chi_j$  задаються далі у вигляді суперпозиції комплексних потенціалів гідродинамічних особливостей: джерела  $\chi_{03}$ , диполя  $\chi_{0\{2,4\}}$  та мультиполів  $\chi_{mj}, \, m \geqslant 1$ 

$$\boldsymbol{\chi}_{j}(\boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\theta}) = \sum_{m=0}^{M} b_{mj} \boldsymbol{\chi}_{mj}(\boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\theta}); \ j = 2, 3, 4; \ M \ge 1,$$
(B.14)

де  $b_{mj} = b_{mj}^R + i_t b_{mj}^I$  – невідомі комплексні коефіцієнти, які потрібно визначити;  $\chi_{mj} = \varphi_{mj} + i \psi_{mj}, \ \varphi_{mj} = \varphi_{mj}^R + i_t \varphi_{mj}^I, \ \psi_{mj} = \psi_{mj}^R + i_t \psi_{mj}^I$  – комплексні потенціали гідродинамічних особливостей. Приведемо далі залежності для потенціалів гідродинамічних особливостей, які добре відомі і їх можна знайти у роботах [55, 104]. У дійсному вигляді маємо залежності:

– джерело

– диполь

де було позначено  $E_1^c = \gamma + \ln r + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{r^n \cos n\beta}{nn!}, E_1^s = \beta + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{r^n \sin n\beta}{nn!} - \pi$ , а також  $r = x\sqrt{x^2 + y^2}, \beta = \arctan \frac{x}{y}, \gamma = 0,57721567;$  – мультиполь

де *а* та  $a_{2n}$ ,  $a_{2n+1}$  – коефіцієнти конформного відображення; M – число мультиполів, N – порядок конформного відображення.

Для визначення коефіцієнтів (Б.14) потрібно задовольнити граничні умови на контурі шпангоута у точках коллокацій  $\theta_p$  і після застосування методу найменших квадратів отримаємо систему алгебраїчних рівнянь [55]

$$[\Sigma_{mn}]_j \cdot \{b_m\}_j = \{D_n\}_j, \qquad (B.18)$$

де шукані коефіцієнти та права частина мають структуру

$$\{b_m\}_j = \{b_0^R, b_0^I, b_k^R, b_k^I\}_j; \{D_n\}_j = \{D_0^R, D_0^I, D_k^R, D_k^I\}_j;$$
  
m, n = 1, 2, ... K + 2; j = 2, 3, 4; k = 1, 2, ..., K,   
(B.19)

а блочна матриця коефіцієнтів  $[\Sigma_{mn}]_j$  дорівнює:

$$[\Sigma_{mn}]_{j} = \begin{bmatrix} \Sigma_{00}^{R} & -\Sigma_{00}^{I} & \vdots & \{\Sigma_{k0}^{R}\}^{T} & \{-\Sigma_{k0}^{I}\}^{T} \\ \Sigma_{00}^{I} & \Sigma_{00}^{R} & \vdots & \{\Sigma_{k0}^{I}\}^{T} & \{\Sigma_{k0}^{R}\}^{T} \\ \cdots & \cdots & \vdots & \cdots \\ \{\Sigma_{0s}^{R}\} & \{-\Sigma_{0s}^{I}\} & \vdots & [\Sigma_{ks}^{R}] & [0] \\ \{\Sigma_{0s}^{I}\} & \{\Sigma_{0s}^{R}\} & \vdots & [0] & [\Sigma_{ks}^{R}] \end{bmatrix}_{j}$$
(B.20)

де  $k, s = 1, 2, \ldots, K$  і позначено  $\{\ldots\}$ – вектор стовпчик;  $\{\ldots\}^T$ – вектор рядок;  $[\ldots]$ – квадратна матриця; K– максимальний порядок мультиполів.

Елементи матриці та правої частини розраховуються за формулами [55]

$$\Sigma_{mn}^{R} = 0.5 \sum_{p=1}^{P-1} (\tilde{\theta}_{p+1} - \tilde{\theta}_{p}) \left[ \gamma_{mn}^{R} (\tilde{\theta}_{p}) + \gamma_{mn}^{R} (\tilde{\theta}_{p+1}) \right];$$

$$D_{n}^{R} j_{j} = 0.5 \sum_{p=1}^{P-1} (\tilde{\theta}_{p+1} - \tilde{\theta}_{p}) \left[ \delta_{n}^{R} j_{j}^{R} (\tilde{\theta}_{p}) + \delta_{n}^{R} j_{j}^{R} (\tilde{\theta}_{p+1}) \right];$$
(B.21)

де P – число точок колокації і також

$$\begin{split} \gamma_{00}^{R} &= \begin{cases} \Delta(\psi_{0}^{R})^{2} - \Delta(\psi_{0}^{I})^{2}; & \gamma_{0m}^{R} \\ 2\Delta(\psi_{0}^{I}) \cdot \Delta(\psi_{0}^{R}); & \gamma_{0m}^{R} = \begin{cases} \Delta(\psi_{m}^{R})\Delta(\psi_{0}^{R}); \\ \Delta(\psi_{m}^{R})\Delta(\psi_{0}^{I}); & \gamma_{mn}^{I} \equiv 0; \\ \delta_{n}^{R} \\ j = \Delta\left(\psi_{n}^{R}\right)^{j} \\ j = \Delta\left(\psi_{n}^{R}\right)^{j} \\ j \\ j = 2, 3; & \nu_{j} = 2 \text{ при } j = 4; \\ \Delta(\psi_{j}) = \psi_{j}(\tilde{\theta}) - \psi_{j}(-1); & \tilde{\theta} = 2\theta/\pi \in [-1; 1]. \end{split}$$
(B.22)

Остаточно, вирази для гідродинамічних коефіцієнтів, згідно [55], визначаються за формулами

$${}^{\mu}_{\lambda} \}_{jk} = \frac{\pi}{2} \rho d_{jk} \left\{ {}^{\tilde{\mu}}_{\tilde{\lambda}} \right\}_{jk}, \qquad (B.23)$$
$${}^{\tilde{\mu}}_{\tilde{\lambda}} \}_{jk} = \left\{ \left( \mp b_0{}^R{}_j C_0{}^I{}^R \right\}_{jk} + b_0{}^I{}_j C_0{}^I{}^R \right\}_{jk} \right\} \mp \sum_{m=0}^M b_m{}^I{}^R \}_j C_m{}^I \}_{jk} \right\},$$

де *d*<sub>*jk*</sub> – розмірні множники:

$$d_{22} = d^2/4; \quad d_{23} = dB/2; \quad d_{24} = d^3; d_{33} = B^2/4; \quad d_{34} = dB^2/8; \quad d_{44} = d^4,$$
(B.24)

Bта d-ширина та осадка параметричного перерізу елементу ХвПЕ, відповідно, і також

$$C_{k}{}^{R}_{jk} = 0.5 \sum_{p=1}^{P-1} (\tilde{\theta}_{p+1} - \tilde{\theta}_{p}) \left[ \alpha_{k}{}^{R}_{jk} \right]_{jk} (\tilde{\theta}_{p}) + \alpha_{k}{}^{R}_{jk} (\tilde{\theta}_{p+1}) \right];$$
  
$$\alpha_{k}{}^{R}_{jk} = \varphi_{k}{}^{R}_{jk} \hat{d}_{jk} \hat{d}_{jk}^{-1}; \ \hat{d}_{k} = -\frac{\partial d_{k}}{\partial \theta}; \ \hat{d}_{jk} \cdot \mathfrak{E}^{\nu_{jk}}, \ \nu_{jk} = 2 \text{ при } jk = 22, 23, 33; \quad (B.25)$$
  
$$\nu_{jk} = 3 \text{ при } jk = 24, 34; \ \nu_{jk} = 4 \text{ при } jk = 44.$$

### Б.З. Хвильові навантаження на тонкі занурені елементи ХвПЕ

У 1950 році Морісоном та його співробітниками на підставі експериментальних досліджень були отримані залежності для визначення навантажень на вертикальні колони [6], зокрема, пластин. Форми перерізів коливальних пристроїв, для яких можна застосовувати формулу Морісона, представлені на рис. Б.2.



Рис. Б.2. Форми перерізів коливальних пристроїв, які допускається використовувати в обчисленнях формули Морісона

Силу, що діє на одиницю довжини елемента на відстані ξ у заданий момент

часу t, можна представити у вигляді

$$q_n(\xi, t) = F_M + F_A + F_D,$$
 (B.26)

де  $F_M$  — інерційні сили;  $F_A$  — сили Крилова—Фруда;  $F_D$  — інерційно-демпфуючі сили.

Відповідно до [6], складові навантаження розраховуються за наступними формулами

$$F_M = C_M \dot{\mathbf{v}}_r, \ F_A = C_A \mathbf{v}_{nw}^{\cdot}, \ F_D = C_D \mathbf{v}_r |\mathbf{v}_r|, \tag{B.27}$$

де  $C_M$ ,  $C_A$  — сталі компоненти, які обумовлені прилученими масами та зміною градієнта тиску у рухомій рідині відповідно;  $C_D$  — швидкісний коефіцієнт;  $\mathbf{v}_r$  — різниця між швидкістю руху рідини  $\mathbf{v}_{nw}$  відносно пластини, що рухається зі швидкістю  $\mathbf{v}_{nu}$ ,  $\mathbf{v}_r = \mathbf{v}_{nw} - \mathbf{v}_{nu}$ .

Розглянемо структуру компонент  $C_M$ ,  $C_A$ ,  $C_D$ . Величина  $C_M$  визначається формулою  $C_M = c_{\mu} \frac{\rho \pi D^2}{4}$ , де  $c_{\mu}$  — коефіцієнт прилучених мас;  $\rho$  —щільність рідини; D — характерний лінійний розмір елемента енергетичного пристрою. Нижче, на рисунку Б.3, наведено залежність для визначення коефіцієнту прилучених мас





с<sub>µ</sub> контуру прямокутника. Для контуру робочого елемента ХвПЕ, що утворює у перерізі коло або еліпс, значення коефіцієнту приймається c<sub>µ</sub> = 1.

Коефіцієнт  $C_A$  визначити не складно і він дорівнює  $C_A = \rho A$ , де A площа перерізу елемента конструкції. Співвідношення для швидкісного коефіцієнту  $C_D$  має наступний вигляд

 $C_D = \frac{1}{2} c_d \rho D$ , де  $c_d$  — коефіцієнт лобового опору, який визначається, як функція від числа Рейнольдса Re [6]. Як показали дослідження [6,30], число Рейнольдса повинно бути у межах  $6 \cdot (10^3 \dots 10^5)$  і його можна визначити за виразом  $Re = \frac{vD}{v}$ , де v — сумарна швидкість потоку рідини довкола пластини,  $v = \frac{\mu}{\rho}$  — коефіцієнт кінематичної в'язкості,  $\mu$  — в'язкість і  $\rho$  — щільність рідини.





У роботі [30] значення коефіцієнту лобового опору  $c_d$  були визначені експериментально. Було встановлено, що однаково для пластин з перерізом кола або квадрата значення коефіцієнту дорівнює  $c_d = 1.1...1.15$  і воно не залежить від числа Рейнольдса. Для прямокутних пластин величина коефіцієнта опору  $c_d$  залежить від співвідношення розмірів його сторін B/D. Чим ви-

ще периметр пластини при заданій величині її площі, тим вище значення коефіцієнту опору  $c_d$ . На рисунку Б.4 приведено графічне зображення залежності коефіцієнта  $c_d$  від співвідношення довжини короткої сторони *В* прямокутника до його довшої сторони *D*, згідно [30].

Тепер розглянемо розрахунок швидкостей  $v_{nu}$  та  $v_{nw}$ . Формула розрахунку швидкості руху коливальної пластини  $v_{nu} = \xi \dot{\psi}_0$  та її похідна  $\dot{v}_{nu} = \xi \ddot{\psi}_0$ .

Нормальну проекцію хвильової швидкості на осі пластини можна знайти за наступними виразами

$$\mathbf{v}_{nw} = \mathbf{v}_{wx} \cos\left(\mathbf{\alpha} + \mathbf{\psi}_0\right) - \mathbf{v}_{wz} \sin\left(\mathbf{\alpha} + \mathbf{\psi}_0\right) \tag{E.28}$$

де  $\mathbf{v}_{wx}, \mathbf{v}_{wz}$  — горизонтальна та вертикальна проекції швидкості часток рідини, що визначаються з розглянутих нами у попередніх підрозділах лінійного та нелінійного наближень.

Для розрахунку сил у (Б.27) потрібно ще розрахувати похідну нормальної проекції швидкості  $\dot{\upsilon}_{nw}$ 

$$\dot{\mathbf{v}}_{nw} = \frac{\partial \mathbf{v}_{nw}}{\partial t} = \dot{\mathbf{v}}_{wx} \cos \alpha_{\mathbf{\psi}_0} - \dot{\mathbf{v}}_{wz} \sin \alpha_{\mathbf{\psi}_0} - \dot{\mathbf{\psi}}_0 \left[ \mathbf{v}_{wx} \sin \alpha_{\mathbf{\psi}_0} + \mathbf{v}_{wz} \cos \alpha_{\mathbf{\psi}_0} \right], \quad (B.29)$$

де  $\alpha_{\psi_0} = \alpha + \psi_0$ . У лінійному наближенні похідна у (Б.29) визначається аналітично, а для нелінійного – чисельно за допомогою кінцевих різниць.

Залишається підставити залежності (Б.27)–(Б.29), що були розглянуті нами для компонент сили  $q_n(\xi, t)$ , у рівняння (Б.26) і ми отримаємо остаточний вираз для визначення сил  $q_n(\boldsymbol{\xi},t)$  за формулою Морісона

$$q_{n}(\boldsymbol{\xi},t) = \left[c_{\mu}\frac{\boldsymbol{\rho}\pi D^{2}}{4} + \boldsymbol{\rho}A\right] \left[\left(\dot{\boldsymbol{\upsilon}}_{wx} - \boldsymbol{\upsilon}_{wz}\dot{\boldsymbol{\psi}}_{0}\right)\cos\boldsymbol{\alpha}_{\boldsymbol{\psi}_{0}} - \left(\dot{\boldsymbol{\upsilon}}_{wz} + \boldsymbol{\upsilon}_{wx}\dot{\boldsymbol{\psi}}_{0}\right)\sin\boldsymbol{\alpha}_{\boldsymbol{\psi}_{0}}\right] - c_{\mu}\frac{\boldsymbol{\rho}\pi D^{2}}{4}\boldsymbol{\xi}\ddot{\boldsymbol{\psi}}_{0} + \frac{c_{d}\boldsymbol{\rho}D}{2}\boldsymbol{\upsilon}_{r}|\boldsymbol{\upsilon}_{r}|; \\ \boldsymbol{\upsilon}_{r} = -\boldsymbol{\upsilon}_{wx}\cos\boldsymbol{\alpha}_{\boldsymbol{\psi}_{0}} + \boldsymbol{\upsilon}_{wz}\sin\boldsymbol{\alpha}_{\boldsymbol{\psi}_{0}} - \boldsymbol{\xi}\dot{\boldsymbol{\psi}}_{0}, \qquad (B.30)$$

де координати точок на пластині, в яких розраховуються навантаження, визначаються через рівності  $x_{\xi} = \xi \sin(\alpha + \psi_0), z_{\xi} = \xi \cos(\alpha + \psi_0).$ 

# Додаток В Додаток до Розділу 3

У даному додатку приводяться основні розв'язки до 3 розділу, які не включені до основного тексту дисертаційної роботи, але потребують уваги при розгляді основного матеріалу.

Лінійний розв'язок крайової задачі з модифікованими граничними умовами. Сформулюємо крайову задачу

$$\nabla^2 \phi_w(x, z, t) = 0, \ z = \zeta_w(x, t); \tag{B.1}$$

$$\left. \frac{\partial \phi_w}{\partial z} \right|_{z=-d} = 0, \ d = const; \tag{B.2}$$

$$\frac{\partial \zeta_w}{\partial t} = \frac{\partial \phi_w}{\partial z}, \ z = \zeta_w; \tag{B.3}$$

$$\zeta_w = -\frac{1}{g} \frac{\partial \phi_w}{\partial t}, \ z = \zeta_w. \tag{B.4}$$

Якщо взяти похідну функції хвильового профілю  $\zeta_w$  за часом та підставити її в (В.3), то отримаємо граничну умову для потенціалу швидкостей  $\phi_w$ 

$$\frac{\partial^2 \phi_w}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi_w}{\partial z} = 0, \ z = \zeta_w.$$
(B.5)

Підставимо потенціал швидкостей  $\phi_w(x, z, t)$  у вигляді добутку  $X(x, t) \cdot Z(z, t)$ у рівняння Лапласа (В.1) та після розділення змінних отримаємо

$$\frac{1}{X}\frac{d^2X}{dx^2} = -\frac{1}{Z}\frac{d^2Z}{dz^2}.$$
 (B.6)

Рівність даного рівняння можлива, якщо його ліва та права частина будуть дорівнювати якісь довільній сталій від'ємній величині  $-k^2$ , що не залежить від часу t. Тоді отримаємо два рівняння

$$\frac{d^2X}{dx^2} + k^2 X = 0; \ \frac{d^2Z}{dz^2} - k^2 Z = 0,$$
(B.7)

які після інтегрування дають наступний розв'язок, що задовольняє рівнянню Лапласа (В.1) та забезпечує періодичність за просторовою координатою x та скінченність потенціалу швидкостей  $\phi$ ,

для 
$$k^2 > 0$$
 
$$\begin{cases} X(x,t) = A_1(t)\cos kx + B_1(t)\sin kx, \\ Z(z,t) = A_2(t)e^{kz} + B_2(t)e^{-kz}, \end{cases}$$
(B.8)

де  $A_1(t), A_2(t), B_1(t), B_2(t)$  — довільні функції за часом t. Тому запишемо потенціал, підставивши розв'язки X та Z у добуток  $\phi_w = X \cdot Z$ 

$$\phi_w(x, z, t) = (A_1(t)\cos kx + B_1(t)\sin kx)(A_2(t)e^{kz} + B_2(t)e^{-kz}).$$
(B.9)

Якщо підставити потенціал (В.9) у граничну умову (В.2), то можна буде визначити функції  $A_2(t)$ ,  $B_2(t)$  через функцію D(t) завдяки наступній рівності  $kA_2(t)e^{kz} - kB_2(t)e^{-kz} = 0$ . Поділимо кожен доданок на 2k (у силу того, що  $k \neq 0$ ), прирівняємо їх функції D(t) та отримаємо вирази для функцій  $A_2$  та  $B_2$ 

$$A_2(t) = \frac{1}{2}De^{kd}; B_2 = \frac{1}{2}De^{-kd}.$$
 (B.10)

Підставимо отримані функції  $A_2$  та  $B_2$  у розв'язок для Z(z,t) та перепишемо вираз для потенціалу (В.9)

$$\phi_w(x, z, t) = [a(t)\cos kx + b(t)\sin kx]\cosh k(z+d), \tag{B.11}$$

де  $a(t) = A_1(t)D(t), b(t) = B_1(t)D(t)$  – довільні функції за часом t.

Щоб знайти невідомі функції a(t) та b(t) скористаємось граничною умовою (В.5) для якої випишемо похідні для потенціалу за часом t та просторовою координатою z

$$\frac{\partial^2 \phi_w}{\partial t^2} = \left[ \frac{d^2 a}{dt^2} \cos kx + \frac{d^2 b}{dt^2} \sin kx \right] \cosh k(z+d);$$
  
$$\frac{\partial \phi_w}{\partial z} = \left[ a \cos kx + b \sin kx \right] k \sinh k(z+d).$$
 (B.12)

Підставивши похідні (В.12) у граничну умову (В.5) на поверхні  $\zeta_w$  та виконавши алгебраїчні перетворення будемо мати наступне рівняння

$$\begin{bmatrix} \frac{d^2a}{dt^2}\cosh k(\zeta_w + d) + a(t)gk\sinh k(\zeta_w + d) \end{bmatrix} \cos kx + \\ + \begin{bmatrix} \frac{d^2b}{dt^2}\cosh k(\zeta_w + d) + b(t)gk\sinh k(\zeta_w + d) \end{bmatrix} \sin kx = 0.$$
(B.13)

Остання нерівність може бути виконана тільки при рівності нулю виразів, що стоять у дужках, тому у результаті простих перетворень отримаємо два рівняння

$$\frac{d^2a}{dt^2} + \sigma^2 a(t) = 0; \ \frac{d^2b}{dt^2} + \sigma^2 b(t) = 0,$$
(B.14)

де позначено  $\sigma^2 = gk \tanh k(\zeta_w + d)$ . Після інтегрування останніх рівнянь маємо розв'язки для функцій a(t) та b(t)

$$a(t) = C_1 \cos(\sigma t + \alpha_1); b(t) = C_2 \cos(\sigma t + \alpha_2), \qquad (B.15)$$

де  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  – константи інтегрування. Для подальшого розв'язку крайової задачі приймемо в (B.15)  $C_1 = C_2 = C$  та  $\alpha_1 = \alpha + \pi/2, \alpha 2 = \alpha + \pi$  і підставимо отриманий вираз в (B.11). Після алгебраїчних перетворень отримаємо наступний вираз для потенціалу швидкостей

$$\phi_w(x, z, t) = -C \cosh k(z+d) \sin \theta(x, t), \ \theta(x, t) = kx + \sigma t + \alpha.$$
(B.16)

Залишається скористатися граничною умовою (В.4) для визначення функції хвильового профілю  $\zeta_w$ . Підставимо вираз потенціалу швидкостей (В.16) у рівняння хвильового профілю (В.4)

$$\zeta_w(x,t) = -\frac{C\sigma}{g}\cosh k(\zeta_w + d)\cos \theta(x,t).$$
(B.17)

Якщо проаналізувати структуру рівняння, що отримано для хвильового профілю, то стає очевидним, що множник перед  $\cos \theta(x, t)$  є не чим іншим, як амплітудою хвиль –  $a_w$ . Тому можна визначити константу інтегрування C, як

$$C = -\frac{a_w g}{\sigma \cosh k(\zeta_w + d)}.$$
 (B.18)

На завершення остаточно запишемо рівняння для визначення потенціалу швидкостей  $\phi_w(x,z,t)$ 

$$\phi_w(x, z, t) = -\frac{a_w g}{\sigma} \frac{\cosh k(z+d)}{\cosh k(\zeta_w+d)} \sin \theta(x, t).$$
(B.19)

### Додаток Г

### Акти впровадження результатів дисертаційної роботи



Про впровадження результатів дисертаційної роботи МАРТИНОВСЬКОГО Івана Михайловича на тему «Розрахункове проектування хвильових перетворювачів енергії за різними принципами її відбору» у навчальний процес

Члени комісії у складі завідувача денним відділенням «Механізація та інформаційні технології» МБК КНУБА Слободчикова В.В., голови циклової комісії напряму 0501 «Інформатика та обчислювальна техніка» Круковської В.О. склали цей акт про те, що в Миколаївському будівельному коледжі КНУБА при виконанні дипломного проектування для студентів спеціальності 5.05010301 «Розробка програмного забезпечення» у зазначеній вище цикловій комісії впроваджено, розроблені Мартиновським І.М., такі результати:

 комплекс обчислювальних програм для аналізу довго термінової статистики вітрових та хвильових режимів на шельфах Чорного та Азовського морів з метою їх використання при розробці студентами програмних модулів географічних інформаційних систем при дипломному проектуванні;

 методичні вказівки для моделювання та розрахунків нерегулярної хвильової поверхні та гідродинамічних полів швидкостей часток рідини та тиску з метою розробки студентами відповідних програмних пакетів моделювання фізичних процесів.

Завідувач відділенням «Механізація та інформаційні технології» 🦟

В.В.Слободчиков/

Голова цк напряму 0501 «Інформатика та ОТ»

*Жа* /В.О.Круковська/

### "ЗАТВЕРДЖУЮ"

Ректор Національного університету



впровадження у навчальний процес результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук Мартиновського Івана Михайловича "Розрахункове проектування хвильових перетворювачів енергії за різними принципами її відбору"

Розроблений автором під час виконання дисертаційної роботи за темою "Розрахункове проектування хвильових перетворювачів енергії за різними принципами її відбору" комплекс обчислювальних програм може бути використаний при проведенні варіантних розрахунків динамічних реакцій, статистичних характеристик, виборі раціональних типів та співвідношень параметрів хвильових перетворювачів енергії в залежності від району їх розташування.

Результати дисертаційного дослідження використовуються на лекційних та лабораторних заняттях при викладанні таких дисциплін: «Корпоративні мережі промислових підприємств», «Моделювання виробничих процесів у суднобудуванні», «Організація комп'ютеризованих інтегрованих виробництв», «Математичне моделювання систем і процесів та методи оптимізації», «Автоматизовані системи моделювання», «Проектування інформаційних систем промислових підприємств», «Технологічна підготовка виробництва».

Теоретичний та практичний матеріал, запропонований автором використовується при підготовці курсових та дипломних робіт зі спеціальностей 8.05010101 – Інформаційні управляючі системи та технології і 8.05010102 – Інформаційні технології проектування.

Директор Навчально-наукового інституту комп'ютерних та інженерно-технологічних наук доктор. техн. наук, професор

К.В. Кошкін