

Б. М. ОСТРОВЕРХ, Л. С. ПОТАПЕНКО

ЧИСЕЛЬНА МЕТОДИКА ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ХВИЛЬОВОЇ ЕНЕРГІЇ, ЩО ІНТЕГРОВАНІ ДО БЕРЕГОЗАХИСНИХ СПОРУД

Використання енергії хвиль шляхом перетворення її на електрику залежить від ефективності перетворювачів хвильової енергії, які, на жаль, піддаються негативному впливу морських факторів. Багато конструктивних недоліків установок можуть бути усунуті на етапі конструювання та випробування перетворювачів шляхом використання чисельних моделей приладів на основі застосування гідродинамічної теорії поширення та взаємодії хвиль із морськими спорудами. Тут розглянуто використання можливостей сучасних обчислювальних методів гідродинаміки для визначення впливу деяких конструктивних факторів перетворювачів хвильової енергії. Результати чисельних досліджень показали, що за умови розташування у хвильовому потоці зануреного хвилелому та встановленого на гребні перетворювача, відбувається зміна швидкостей течії та тиску у камері перетворювача, що впливає на ефективність механізму відбору енергії. Додаткові переваги виникають внаслідок впровадження комплексної споруди з функціями захисту берегових споруд та електропостачання. Отримані результати розрахунків візуально надали якісний показник впливу конструктивних факторів перетворювача типу осцилюючої водяного стовпа. Додаткові висновки можна отримати шляхом обробки чисельних результатів. В результаті проведення чисельних експериментів з допомогою комп'ютерної системи CFD REEF3D запропоновано заходи щодо вибору параметрів перетворювачів на основі математичного моделювання конкретних конструкцій. Продовження досліджень, які пов'язані з визначенням механізмів трансформації хвильової енергії у взаємодії з елементами захисту берегів для підвищення ефективності перетворювачів за рахунок розташування на більш глибокій воді, проводяться на обчислювальній та лабораторній базі ІГМ.

Ключові слова: потужність морських та океанічних хвиль, прилади конвертації енергії хвиль, чисельні моделі, хвилеломи, конструктивні недоліки установок, гідродинамічна теорія поширення хвиль, осцилююча водяного стовпа.

Б. Н. ОСТРОВЕРХ, Л. С. ПОТАПЕНКО

ЧИСЛЕННАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ВОЛНОВОЙ ЭНЕРГИИ, ИНТЕГРИРОВАННЫХ В БЕРЕГОЗАЩИТНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

Использование энергии волн путём преобразования её в электричество зависит от эффективности преобразователей волновой энергии, которые, к сожалению, поддаются негативному влиянию морских факторов. Много конструктивных недостатков установок могут быть устранены на этапе конструирования и испытания преобразователей путём использования численных моделей приборов на основе применения гидродинамической теории распространения и взаимодействия волн с морскими сооружениями. Здесь рассмотрено использование возможностей современных вычислительных методов гидродинамики для определения влияния некоторых конструктивных факторов преобразователей волновой энергии. Результаты численных исследований показали, что при условии расположения в волновом потоке погружённого волнореза и установленного на гребне преобразователя происходит изменение скоростей течения и давления в камере преобразователя, что влияет на эффективность механизма отбора энергии. Дополнительные преимущества возникают вследствие внедрения комплексного сооружения с функциями защиты береговых сооружений и электроснабжения. Полученные результаты расчётов визуально предоставили качественный показатель влияния конструктивных факторов преобразователя типа осциллирующей водяного столба. Дополнительные выводы можно получить путём обработки численных результатов. В результате проведения численных экспериментов при помощи компьютерной системы CFD REEF3D предложены мероприятия по выбору параметров преобразователей на основе математического моделирования конкретных конструкций. Продолжение исследований, связанных с определением механизмов трансформации волновой энергии во взаимодействии с элементами защиты берегов для повышения эффективности преобразователей за счёт расположения на более глубокой воде, проводится на вычислительной и лабораторной базе ИГМ.

Ключевые слова: мощность морских и океанических волн, приборы конвертации энергии волн, численные модели, волнорезы, конструктивные недостатки установок, гидродинамическая теория распространения волн, осциллирующая водяного столба.

B. M. OSTROVERKH, L. S. POTAPENKO

NUMERICAL METHOD FOR ASSESSING EFFICIENCY OF WAVE ENERGY CONVERTOR INTEGRATED INTO COASTAL PROTECTION STRUCTURES

The use of wave energy by converting it into electricity depends on the efficiency of wave energy converters, which are negatively affected by marine factors. Many design flaws can be eliminated at the stage of design and testing of devices by using its numerical models based on the application of the hydrodynamic theory of propagation and interaction of waves with marine structures. The use of the modern computational methods of hydrodynamics to determine the influence of some design factors of wave energy converters incorporated into a submerged breakwater is considered in the paper. The results of numerical studies showed that if a submerged breakwater is located in the wave stream and with a transducer installed on its crest, there is a change in flow velocities and pressure in the transducer chamber, which affects the efficiency of energy extraction. Additional advantages arise as a result of the introduction of a complex structure with coastal protection and power supply functions. The obtained calculation results visualize the qualitative indicator of the influence of the design factors of the converter. Additional conclusions can be obtained by processing the numerical results. As a result of numerical experiments conducted with using REEF3D CFD computer system, the measures for selecting the parameters of the converters were proposed based on mathematical modeling of specific structures. The research related to the determination of the mechanisms of wave energy transformation when interacting with coastal protection elements focused on increasing the efficiency of the convertor by locating in deeper water, which includes detailed testing, investigations and improvement of various types of constructions, is carried out on the computing and laboratory base of Institute of Hydromechanics.

Key words: sea and oceanic waves power, wave energy conversion devices, numerical models, breakwater, structural flows of installations, hydrodynamic theory of wave propagation, water column oscillations.

Вступ. Частина енергії сонця, що потрапляє до поверхні Землі, витрачається до її нагрівання, на випаровування води, утворення вітрів, які конвертуються, у свою чергу, в утворення хвиль на поверхні води, причому зі збільшенням її щільності. Ідея використання енергії вітрових хвиль виникла досить давно, але після оволодіння приладами електроенергії та вічної її нестачі, ця адаптація стала дорогим, але необхідним заходом, що дасть

можливість інтегрувати *перетворювачі хвильової енергії (ПХвЕ)* в електромережу, зокрема, у гаванях, для нових *гідротехнічних споруд та громадських будівель* вздовж узбережжя. Така практика дасть екологічну енергію у важко доступних регіонах морів та океанів, сприятиме зменшенню парникового ефекту. Наприклад, з ПХвЕ, що встановлені безпосередньо на судах та швартовах, вироблена енергія може бути безпосередньо використана для споживання енергії в районах портів та зменшити забруднення акваторій, живлячи пришвартовані судна зеленою енергією. Вже нині деякі судна використовують свої ПХвЕ для виробництва електроенергії на борту, навіть якщо вони пришвартовані на рейді. Інтеграція ПХвЕ у портових спорудах надасть змісту новій концепції – «гавань з нульовим забрудненням» [1, 2, 3].

Перетворювачі потоку хвильової енергії стають неконкурентоспроможними за вартістю порівняно з іншими методами екологічного виробництва енергії, такими як вітрові турбіни, сонячні панелі, через значно більшу агресивність морських хвиль щодо споруд та механізмів ПХвЕ [1]. Виникають також вагомні негативні чинники при експлуатації морських пристроїв для відбору енергії, які суттєво впливають на їх безпеку, тривалість та

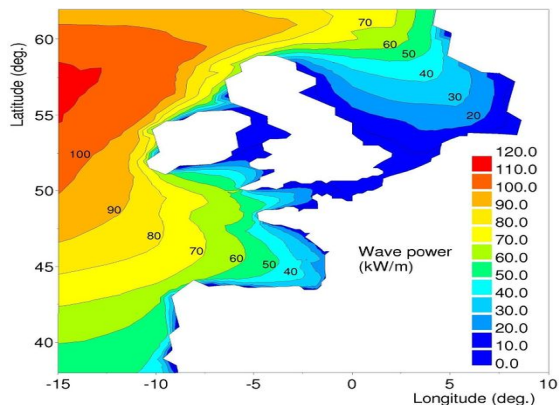


Рис. 1 – Усереднені за часом значення потужності хвильової енергії вздовж узбережжя Західної Європи.

ефективність роботи. Витрати наразі є важливим вузьким місцем для широкомасштабного використання хвильової енергії. Значна частина витрат пов'язана з фізичними структурами, в яких розміщені перетворювачі хвильової енергії; це стосується, зокрема, перетворення енергії хвилі за допомогою *осцилюючого водяного стовпа (ОБС-OWC WEC)* або за допомогою перекриття хвилі. Таким чином, поєднання цих методів перетворення енергії хвилі з прибережними спорудами, такими як хвилеломи або перегородки, може призвести до значної економії коштів. Залежність усередненої у часі потужності енергії хвиль вздовж узбережжя Західної Європи за відстані до лінії берега показана на рис. 1. Прибережні споруди, як правило, розташовані не там, де інтенсивність хвиль найвища, але, як очікується, менший вихід енергії буде більш ніж компенсований нижчими витратами на будівництво в більшості випадків океанів (як видно на рис. 1 від 40 до

70 градусів) [2]. Більш детальні значення потужності хвиль можна отримати в атласах. За даними цифрових карт побудована *діаграма потужності вітрових та океанічних хвиль* вздовж берегів континентів (рис. 2), яка свідчить про такі самі властивості.

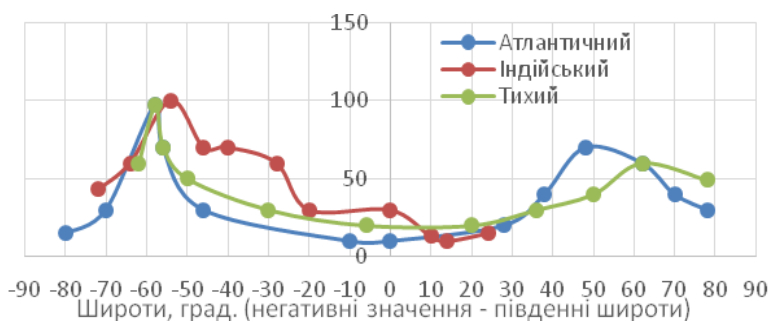


Рис. 2 – Діаграми хвильової енергії (кВт/м).

лося багатьма дослідниками, зокрема *В. Воскобойником* [4].

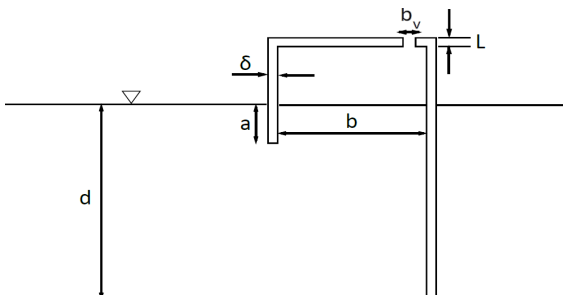


Рис. 3 – Конфігурація приладу ПХвЕ типу ОБС з позначенням геометричних параметрів, що впливають на ефективність відбору енергії хвиль.

Оригінальна та ефективна конструкція комплексного використання нещодавно запропонована українськими винахідниками – батьком та сином – *Михайлами Литовченками* [5] та знайшла визнання за кордоном. Запропонована конструкція являє собою систему плавучих роторів ковшового типу на загальному валу, що дає змогу миттєво перетворювати енергію хвилі на обертання робочого механізму (РТО – power take-off – засіб відбору потужності), та виконує роль хвилерізів, тобто – захищає берег від ерозії. До того ж пристрій ефективно виробляє електроенергію, з допомогою якої очищує та опріснює морську воду до якості питної води. Для впровадження власного винаходу організовано *стан Energy Absorbing Breakwater*, який сполучає в собі ви-

робництво, випробування та впровадження. На існуючій *лабораторній базі ІГМ* можуть бути проведені детальні випробування, дослідження та удосконалення конструкцій різного типу, в тому числі і запропонованих винахідниками.

Постановка задачі, програма та методика досліджень. Чисельне моделювання не вимагає проводити масштабування реальних розмірів конструкції та, в основному, проводиться в натурних розмірах. Виключення відбувається за необхідності порівнювати результати лабораторних (фізичних) та математичних моделей. Передбачено використання можливостей *сучасних обчислювальних методів гідродинаміки* для визначення впливу деяких конструктивних факторів перетворювачів хвильової енергії з тих, що показані на рис. 3. На прикладі ПХВЕ типу ОВС, який інкорпоровано на гребні затопленого хвилелому (рис. 4). Визначається вплив розташування ПХВЕ на гребні хвилелому та висоти хвилі.

Результати досліджень. Математична модель течії базується на тривимірних рівняннях Нав'є – Стокса та рівнянні Пуассона для тиску, які розв'язуються на основі *скінчено-різницевого методу* з допомогою чисельного модуля комп'ютерної гідродинаміки *REEF3D Fluid*. У межах цього модуля використовується код *відкритого доступу CFD (Computational Fluid Dynamics)* для вирішення проблем потоку різнофазних рідин за допомогою рівняння Нав'є – Стокса, *осередненого за Рейнольдсом* [6]:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + v_t) \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] + g_i; \quad (2)$$

де U – швидкість; ρ – щільність рідини; P – тиск; v – кінематична в'язкість; v_t – турбулентна в'язкість; g – прискорення сили тяжіння; $i = 1, 2, 3$.

Розв'язання рівнянь виконується у рамках *чисельного методу скінчених об'ємів* за різними схемами, вибір яких виконується з допомогою *функціоналів*. REEF3D здатний надати допомогу у моделюванні поширення хвилі з широкого спектру теорій, використовуючи обидва, ударний і поршневий, підходи до генерації хвиль. Сюди входять лінійні хвилі, *хвилі Стокса другого порядку*, *хвилі Стокса n'ятого порядку*, кноідальні хвилі, усамітнені хвилі (солітони), нерегулярні, сфокусовані хвилі та використання теорії утворення хвиль для моделювання генераторів хвиль.

Для обчислення v_t модель турбулентності з двома рівняннями на основі турбулентної кінетичної енергії k використовується *гіпотеза Буссінеска* та її питома швидкість дисипації ω згідно формули:

$$v_t = \frac{k}{\omega}. \quad (3)$$

У комплексі REEF3D:CFD зазвичай застосовується модель турбулентності з двома рівняннями $k - \omega$ [6] для реалізації явища в просторі та часі. Для апроксимації потоку примежового шару враховуються функціонали умов на границях (стінці) для врахування можливого перевищення турбулентності у сильно напружених течіях за межами прикордонного шару введено обмежувач для v_t [6]:

$$v_t = \min \left(\frac{k}{\omega'} \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{k}{|S|} \right). \quad (4)$$

Особлива увага приділяється правильному моделюванню турбулентності поблизу вільної поверхні, оскільки турбулентні масштаби довжини у воді зменшуються поблизу неї. *Стандартні моделі двофазної турбулентності RANS* не враховують це, що може призвести до збільшення ω і затухаючих флуктуацій нормально до поверхні внаслідок перерозподілу на паралельні флуктуації. Крім того, стандартне замикання турбулентності RANS неправильно прогнозує максимальну інтенсивність турбулентності на вільній поверхні, оскільки середня швидкість деформації S може бути великою, особливо поблизу межі розділу між водою та повітрям [6]. Більш реалістичного представлення впливу вільної поверхні на турбулентність можна досягти шляхом заміни вихідного рівняння для ω в околицях поверхні на емпіричну формулу [6, 2]:

$$\omega_s = \frac{c_\mu^{-0.25}}{\kappa} k^{0.5} \left(\frac{1}{y'} + \frac{1}{y^*} \right), \quad (5)$$

з $c_\mu = 0,07$ і $k = 0,4$. Емпірично встановлено, що фактичне походження турбулентного масштабу довжини y^* становить $0,07$ середньої глибини води [7]; y' – відстань від найближчої стіни. Таким чином, забезпечується плавний перехід від значення вільної поверхні до граничного значення ω .

Для багатьох *симуляційних сценаріїв* моделювання турбулентності RANS є дуже актуальним, оскільки для просторових і часових масштабів, які зустрічаються в програмах у морському та гідротехнічному будівництві,

LES (моделювання великих вихорів) є або неможливим, або необов'язковим. REEF3D має кілька моделей турбулентності RANS на вибір, а саме: моделі турбулентності *Lauder and Spalding* $k-\varepsilon$ і $k-\omega$ (Wilcox). З досвіду багатьох користувачів та через перехідну складну природу потоків, на яких часто зосереджуються дослідники, метод $k-\omega$ показав, що в цих випадках дає найбільш надійні та точні результати для реальних шорстких конструкцій, дотичних до потоку. Компоненти *напруж Рейнольдса* в рівняннях RANS замінюються апроксимацією Буссінеска:

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_t \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij}, \quad (6)$$

де

$$\nu_t = c_\mu \frac{k}{\omega}. \quad (7)$$

Тут k та вихрову в'язкість ν_t знаходять шляхом чисельного вирішення таких рівнянь переносу:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \beta_k k \omega; \quad (8)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + u_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \frac{\omega}{k} \alpha P_k - \beta \omega^2. \quad (9)$$

Вільну поверхню, що є результатом взаємодії двох фаз – повітря та води – в процесі поширення хвиль, отримують за допомогою методу встановлення рівня. У цьому методі набір нульового рівня функції відстані зі знаком $\varphi(x; t)$, який називається функцією встановлення рівня, представляє межу між водою та повітрям. Для решти ділянок областей функція встановлення рівня представляє найближчу відстань точки від межі розділу, а знак розрізняє дві рідини на межі розділу. Функція встановлення рівня визначається як:

$$\varphi(\vec{x}, t) \begin{cases} > 0 \text{ if } \vec{x} \in \text{phase 1;} \\ = 0 \text{ if } \vec{x} \in \Gamma; \\ < 0 \text{ if } \vec{x} \in \text{phase 2.} \end{cases} \quad (10)$$

Для більшості областей, у яких використовується REEF3D, потік моделюється як двофазна система. За допомогою методу захоплення рівня наборів інтерфейсів *Osher and Sethian* (1988 р.) складні інтерфейси рухомих рідин можна моделювати на фіксованій Ейлеровій сітці. Межа розділу між рідинами визначається як нульовий контур функції заданого рівня. Поза межами інтерфейсу функція встановлення рівня є функцією відстані зі знаком. Це призводить до визначення функцій рівня в просторі та часі на основі транспортного рівняння:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} = 0. \quad (11)$$

Гіперболічність цього рівняння зумовлює необхідність використання консервативних числових схем. Функцію встановлення рівня необхідно регулярно повторно ініціалізувати, щоб зберегти її властивість знакової відстані. Властивості матеріалу двох фаз визначаються для всієї області відповідно до *континуальної моделі поверхневих сил*. Властивості визначаються в будь-якому місці області як:

$$\rho_i = \rho_w H(\varphi_i) + \rho_a (1 - H(\varphi_i)); \quad (12)$$

$$\nu_i = \nu_w H(\varphi_i) + \nu_a (1 - H(\varphi_i)), \quad (13)$$

де індекс w визначає властивості води, а a – повітря; H – ступінчаста функція Хевісайда:

$$H(\varphi_i) = \begin{cases} 0 & \text{if } \varphi_i < -\epsilon; \\ \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\varphi_i}{\epsilon} + \frac{1}{\pi} \sin \left(\frac{\pi \varphi_i}{\epsilon} \right) \right) & \text{if } |\varphi_i| \leq \epsilon; \\ 1 & \text{if } \varphi_i > \epsilon. \end{cases} \quad (14)$$

Як правило, товщина згладженої межі розділу вибирається рівною з обох сторін межі розділу. Щільність, як правило, визначається безпосередньо на гранях комірки, щоб уникнути помилкових коливань на межі розділу (докладніше в [6]).

Чисельна дискретизація різницевих рівнянь досягається за допомогою *методів кінцевих різниць на прямолінійних сітках*, властивості яких визначаються функціоналами, що вибираються з інструкції до REEF3D 19.05. Зв'язок тиску і швидкості під час вирішення (2) забезпечується вибором розщепленої сітки. Для термінів конвекції застосовано зважену принципово неосциляційну (WENO) схему п'ятого порядку [6], адаптовану до нерівномірних розмірів комірок. У формулі (6) конвекційний член дискретизовано *методом Гамільтона – Якобі* WENO п'ятого порядку точності *Цзяна і Пенга*. Члени дифузії, як правило, дискретизовані за допомогою цен-

тральних кінцевих різниць другого порядку точності. Для визначення вузлового значення тиску застосовується схема Чоріна А. (Chorin A.) [7], як ефективний засіб розв'язування нестисливих рівнянь Нав'є – Стокса. У схемі спочатку обчислюється проміжна швидкість u^* , явно вирішуючи рівняння імпульсу та ігноруючи член градієнта тиску:

$$\frac{u^* - u^n}{\Delta t} = -(u^n \cdot \nabla)u^n + \nu \nabla^2 u^n. \quad (15)$$

На другому кроці алгоритму ми коригуємо проміжну швидкість, щоб отримати остаточне рішення на поточному кроці по часу:

$$u^{n+1} = u^* - \frac{\Delta t}{\rho} \nabla p^{n+1}.$$

Це рівняння можна переписати у вигляді:

$$\frac{u^{n+1} - u^*}{\Delta t} = -\frac{1}{\rho} \nabla p^{n+1}.$$

Цей алгоритм насправді є підходом розщеплення операторів, у якому в'язки сили (на першому напівкроці) і сили тиску (на другому напівкроці) розглядаються окремо. Обчислення правої частини другого півкроку вимагає знання тиску p^{n+1} . Це досягається шляхом взяття дивергенції та вимоги нестисливості:

$$\nabla u^{n+1} = 0,$$

що є умовою дивергенції (нерозривності), таким чином, задача отримання тиску на кожному кроці зводиться до рівняння Пуассона:

$$\nabla^2 p^{n+1} = \frac{\rho}{\Delta t} \nabla u^*. \quad (16)$$

У динаміці рідини метод проекції є ефективним засобом чисельного розв'язування залежних від часу задач потоку нестислої рідини. У лінеаризованій теорії для хвиль малої амплітуди потенціал швидкості можна розглядати як суму ротаційної та дифракційної складової. Перша складова зумовлена коливанням води в OWC, а друга – присутністю твердої структури, на яку падає хвиля. Аналогічно, висхідний потік на поверхні води є суперпозицією ротаційної та дифракційної складової.

Проведено теоретичні дослідження пристроїв OWC, встановлених на вершині хвилерізу, щоб дослідити кількість поглиненої енергії хвилі [2]. Результати отримані в результаті розв'язання двох крайових задач, а саме: задачі дифракції (тіло, закріплене у хвилі, атмосферний тиск усередині OWC) та задачі про радіаційний напір, що діє на внутрішню вільну поверхню OWC [8].

Гідродинамічна ефективність пристрою OWC є мірою енергії хвилі, яка доступна на отворі турбін для перетворення в електричну енергію. Потужність, наявна на турбіні, P_{out} становить середнє за часом добутку тиску в камері p_c та об'ємної витрати повітря через турбіну $q(t)$ за період хвилі, як показано в наступному рівнянні:

$$P_{out} = \frac{1}{T} \int_0^T p_c(t) q(t) dt. \quad (17)$$

У числовій моделі значення тиску в камері є доступним на кожному кроці часу із розв'язку рівняння Пуассона. Об'ємна витрата повітря розраховується як добуток швидкості вільної поверхні w_{fs} та площі поперечного перерізу камери, оскільки в цьому випадку повітря вважається нестисливим:

$$q(t) = w_{fs}(t) l b,$$

де b – розмір пристрою перпендикулярно до фронту хвилі; l – розмір пристрою паралельно фронту хвилі. Цей метод можна використовувати для аналізу поглинання пристроєм потужності від падаючих регулярних хвиль. Потік енергії падаючої хвилі отримано на базі хвильової теорії у вигляді наступного рівняння:

$$P_{in} = \frac{1}{4} \rho g A_0^2 \frac{\omega}{k} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right), \quad (18)$$

де A_0 , ω , k – амплітуда, кутова частота та хвильове число падаючої хвилі відповідно, а d – глибина води. Рівняння (1) визначає потужність хвилі на доступній ширині гребня l , тому потужність хвилі в повітряному отворі пристрою визначається множенням добутку (2) на ширину пристрою l .

Таким чином, гідродинамічний ККД приладу η розраховується як відношення потужності, доступної на отворі турбіни, до потужності на гирлі пристрою:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in} l}. \quad (19)$$

Перетворимо рівняння (17), щоб показати, як різниця фаз між тиском в камері p_c і вертикальною швидкістю вільної поверхні w_{fs} впливає на потужність пристрою. Для цього, враховуючи, що в разі гармонічного на-

ближення коливань модулі тиску та швидкості вільної поверхні є постійними величинами, отримаємо:

$$\frac{1}{T} \int_0^T p_c(t) q(t) dt = |p_c| |w_{fs}| bl \frac{1}{T} \int_0^T \cos(\omega t) \cos(\omega t + \Delta\theta) dt, \quad \Delta\theta = \frac{2\pi}{T} \Delta t,$$

де $\Delta\theta$ – різниця фаз між $p_c(t)$ та $w_{fs}(t)$; b – розмір пристрою перпендикулярно фронту хвилі; l – розмір пристрою паралельно фронту хвилі. Враховуючи, що

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \cos(\omega t) \cos(\omega t + \Delta\theta) d\theta = \cos(\Delta\theta) \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \cos^2(\omega t) d\theta = \frac{1}{2} \cos(\Delta\theta)$$

отримаємо формулу потужності пристрою:

$$P_{out} = \frac{1}{2} |p_c| |w_{fs}| bl \cos(\Delta\theta). \quad (20)$$

Різниця фаз визначається за результатами порівняння зсуву $\Delta\theta$ графіків тиску та швидкості.

Чисельна оцінка впливу інтегрування ПХВЕ ОВС у берегозахисну споруду хвилелому (рис. 4) виконується чисельним експериментом, який дає можливість оцінити вплив кожного фактору конструкції.

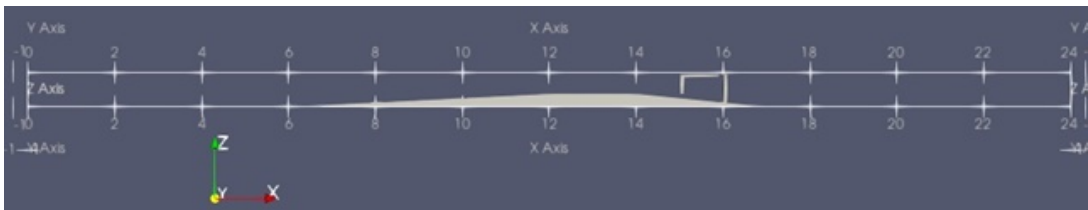


Рис. 4 – Вигляд розташування хвилелому у дослідній частині хвильового лотка.

Для розрахунку гідродинамічних характеристик перетворювача застосовувалася чисельна модель REEF3D-Flow [2] з блоками вихідних даних параметрів математичного моделювання та конструктивних розмірів та граничних умов. Обробка та візуалізація результатів розрахунків виконується системою постпроцесорного аналізу. Проведені чисельні розрахунки використані для якісної та кількісної оцінки та верифікації заданих характеристик хвилювання, взаємодії фаз рідина – повітря, а також додаткові розрахункові дані. На рис. 5 показано результат візуалізації хвильового стану на гребні хвилелому з розташованим на підвітряному схилі ПХВЕ.

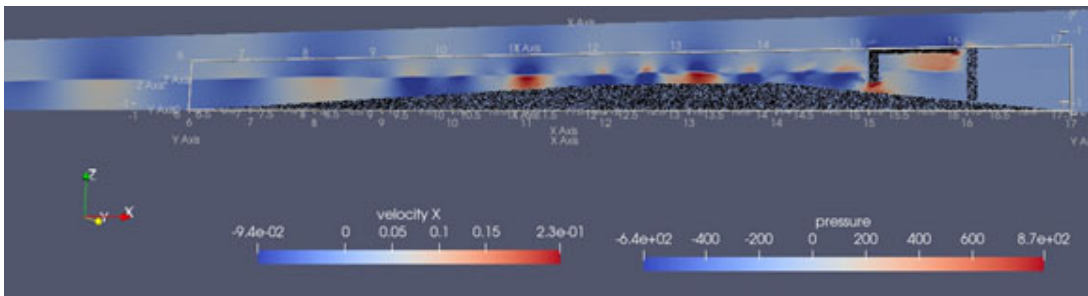


Рис. 5 – Хвилелом з камерою ПХВЕ за гребнем у момент $t = 20$ с стиснення повітря у камері.

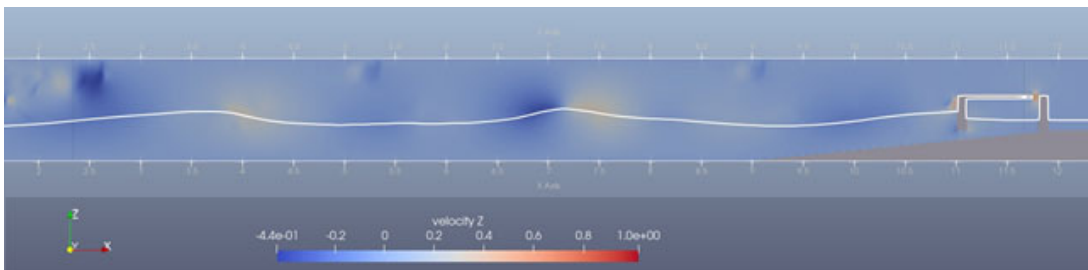


Рис. 6 – Детальний вигляд хвилелому з камерою ОКВ на передньому укосі з $t = 0.01$, у момент $t = 23.5$ с набігання гребня хвилі (висота хвилі $H = 0.02$ м, довжина $\lambda = 3.7$ м).

Інтенсивне руйнування хвилі на гребні хвилелому не сприяє утворенню суттєвого тиску в камері пристрою. Порівняння чисельних результатів, які представлені на рис. 7 – 8, наглядно показує переваги запропонованих змін в конструктивних параметрах шляхом розміщення камери пристрою на навітряному схилі з більшою

крутизною та більшим вхідним отвором.

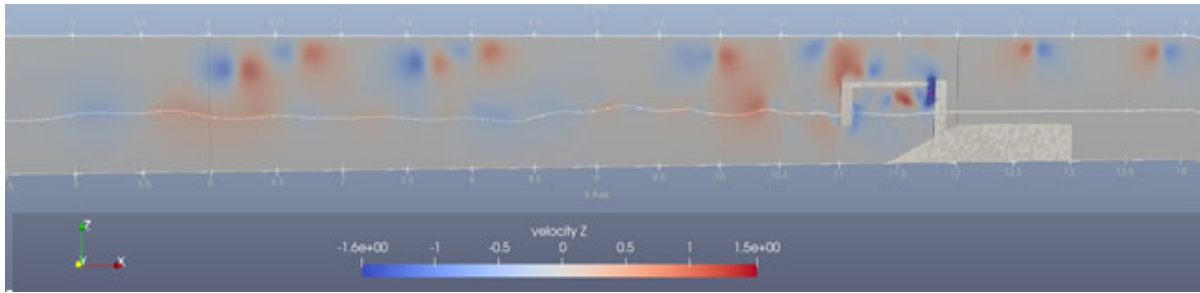


Рис. 7 – Хвилелом з камерою на передньому укосі $m = 0.5$ у момент $t = 16$ с максимального розрядження (всмоктування) повітря із зовні через отвір камери (висота хвилі $H = 0.12$ м, довжина $\lambda = 3.7$ м).

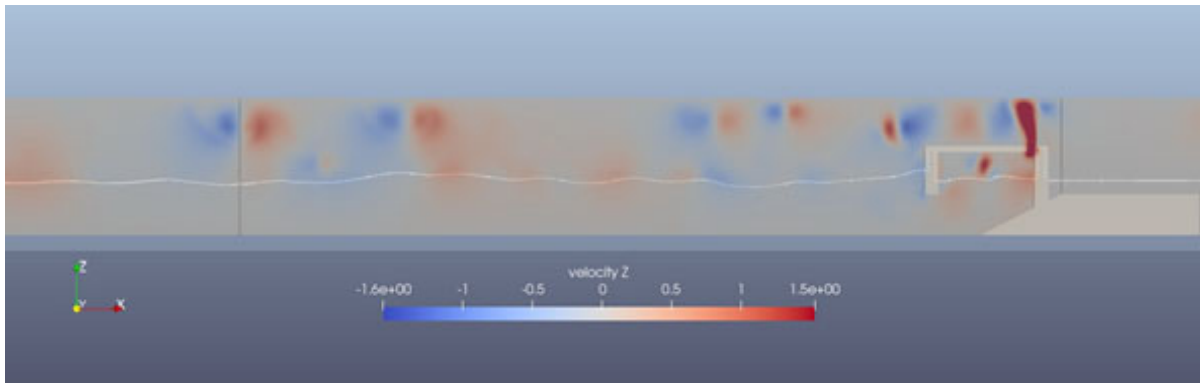


Рис. 8 – Хвилелом з камерою на передньому укосі $m = 0.5$ у момент $t = 19$ с максимального стиснення повітря у камері.

Перспективи подальших досліджень. Автори вважають перспективними запропоновані заходи вибору параметрів ПХвЕ типу ОВС на основі математичного моделювання конкретних конструкцій та продовження досліджень, які пов'язані з визначенням механізмів трансформації хвильової енергії та підвищенням ефективності установок отримання екологічно чистої енергії.

Висновки. Результати досліджень показали, що за умови розташування у хвильовому потоці зануреного хвилелому та встановлення на гребні ПХвЕ, відбувається зміна швидкостей течії та тиску у камері перетворювача, що впливає на ефективність відбору енергії. Додаткові переваги виникають внаслідок впровадження комплексної споруди з берегозахисною та електропостачальною функціями. Отримані результати розрахунків візуально надали якісний показник впливу факторів конструктивного виконання ПХвЕ. Додаткові висновки можна отримати шляхом обробки чисельних результатів. В результаті проведення чисельних експериментів отримані також результати загального характеру:

- проведена апробація комп'ютерної системи CFD REEF3D;
- запропоновані заходи вибору параметрів ПХвЕ типу ОВС на основі математичного моделювання конкретних конструкцій та продовження досліджень, які пов'язані з визначенням механізмів трансформації хвильової енергії у взаємодії з елементами захисту берегів для підвищення ефективності ПХвЕ за рахунок розташування на більш глибокій воді;
- на обчислювальній та лабораторній базі ІГМ можуть бути проведені випробування, дослідження та удосконалення конструкцій різного типу.

Список літератури

1. Thorpe T. W. A brief review of wave energy. ETSU-R120. Report to UK Department of Trade and Industry. – UK, 1999. – 350 p.
2. Mei Ch. Hydrodynamic principles of wave power extraction // Phil. Trans. R. Soc. (A). – 2012. – № 370. – P. 208 – 234. doi: 10.1098/rsta.2011.0178.
3. Martynovsky I. M., Serdjuchenko A. M. Hydrodynamic modelling of irregular wind generated waves on the finite depth water including nonlinear effects // Dynamical system modelling and stability investigation : XVI International Conference: Modelling and stability : Abstracts of conf. Reports, Kiev, Ukraine, 29 – 31 May, 2013. – Kiev : Taras Shevchenko National University of Kyiv, 2013. – p. 246.
4. Хоміцький В.В., Островерх Б.М., Ткаченко В.А., Воскобійник В.А., Терещенко Л.М. Удосконалення захисної огорожувальної дамби морського підхідного каналу Дунай – Чорне море // Екологічна безпека та природокористування. – 2020. – vol. 35(3). – P. 57 – 77. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2020.3.57-77>.

5. Energy Absorbing Breakwater: зелена енергія з водних хвиль. Режим доступу : <https://ucluster.org/blog/2022/07/energy-absorbing-breakwater-zelena-energija-z-vodnyh-hvylyj/>. – Дата звертання : 20.04.2023.
6. Kamath A., Bihs H., Arntsen D. Numerical Modeling of Power Take-Off Damping in an Oscillating Water Column Device // *International Journal of Marine Energy*. – 2015. – vol. 10. – P. 1 – 16. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijome.2015.01.0012015>.
7. Chorin A. Numerical solution of the Navier-Stokes equations // *Mathematics of Computation*. – 1968. – vol. 22. – P. 745 – 762.
8. Languet-Higgins M. S., Stewart R. W. Radiation stresses in water waves : a physical discussion, with application // *Deep-Sea Res.* – 1964. – vol. 11. – P. 529 – 562.

References (transliterated)

1. Thorpe T. W. *A brief review of wave energy. ETSU-R120. Report to UK Department of Trade and Industry*. UK, 1999. 350 p.
2. Mei Ch. Hydrodynamic principles of wave power extraction. *Phil. Trans. R. Soc. (A)*. 2012, no. 370, pp. 208–234. doi: 10.1098/rsta.2011.0178.
3. Martynovsky I. M., Serdjuchenko A. M. Hydrodynamic modelling of irregular wind generated waves on the finite depth water including nonlinear effects. *Dynamical system modelling and stability investigation : XVI International Conference: Modelling and stability : Abstracts of conf. Reports, Kiev, Ukraine, 29 – 31 May, 2013*. Kiev, Taras Shevchenko National University of Kyiv Publ., 2013. p. 246.
4. Khomicky V.V., Ostroverkh B.M., Tkachenko V.A., Voskoboinick V. A., Tereshchenko L.M. Udoskonalennya zachysnoyi ogorodzhuval'noyi damby mors'kogo pidkhidnogo kanalu Dunay – Chorne more [Improvement of protection dam of the marine approach channel Danube-Black Sea]. *Yekologichna bezpeka ta pryrodokorystuvannya* [Environmental safety and natural resources]. 2020, vol. 35(3), pp. 57–77. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2020.3.57-77>.
5. Energy Absorbing Breakwater: zelena enerhiya z vodnykh khvyl'. [Energy Absorbing Breakwater: green energy from water waves]. Available at : <https://ucluster.org/blog/2022/07/energy-absorbing-breakwater-zelena-energija-z-vodnyh-hvylyj/>. Accessed : 20.04.2023.
6. Kamath A., Bihs H., Arntsen D. Numerical Modeling of Power Take-Off Damping in an Oscillating Water Column Device. *International Journal of Marine Energy*. 2015, vol. 10, pp. 1–16. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijome.2015.01.0012015>.
7. Chorin A. Numerical solution of the Navier-Stokes equations. *Mathematics of Computation*. 1968, vol. 22, pp. 745–762.
8. Languet-Higgins M. S., Stewart R. W. Radiation stresses in water waves : a physical discussion, with application. *Deep-Sea Res.* 1964, vol. 11, pp. 529–562.

Надійшла (received) 25.04.2023

Відомості про авторів / Сведения об авторах / Information about authors

Островерх Борис Миколайович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник відділу гідродинаміки хвильових та руслових потоків, Інститут гідромеханіки НАН України, м. Київ; тел.: (044) 371-65-57; e-mail: borys.ostro@gmail.com.

Островерх Борис Николаевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник отдела гидродинамики волновых и русловых потоков, Институт гидромеханики НАН Украины, г. Киев; тел.: (044) 371-65-57; e-mail: borys.ostro@gmail.com.

Ostroverkh Borys Mykolayovych – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Leading Fellow at the Department of Technical Hydromechanics, Institute of Hydromechanics, NAS of Ukraine, Kyiv; tel.: (044) 371-65-57; e-mail: borys.ostro@gmail.com.

Потапенко Людмила Степанівна – провідний інженер-математик, співробітниця відділу гідродинаміки хвильових та руслових потоків, Інститут гідромеханіки НАН України, м. Київ; тел.: (044) 371-65-57; e-mail: potapenko_ls@ukr.net.

Потапенко Людмила Степановна – ведущий инженер-математик, сотрудница отдела гидродинамики волновых и русловых потоков, Институт гидромеханики НАН Украины, г. Киев; тел.: (044) 371-65-57; e-mail: potapenko_ls@ukr.net.

Potapenko Lyudmila Stepanovna – Leading Mathematical Engineer, Fellow at the Department of Technical Hydromechanics, Institute of Hydromechanics, NAS of Ukraine, Kyiv; tel.: (044) 371-65-57; e-mail: potapenko_ls@ukr.net.