

УДК 532.593: 551.466

DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.4\(63\).59-68](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.4(63).59-68)

ВЗАЄМОДІЯ ГРАВІТАЦІЙНИХ ХВИЛЬ З ПРИПЛИВНОЮ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЄЮ

В.А. Воскобійник, докт. техн. наук, ст. наук. співр., **В.В. Яковлев**, докт. техн. наук, проф.,
В.В. Хомицький, канд. техн. наук, ст. наук. співр., **А.В. Воскобійник**, канд. техн. наук, ст. наук. співр.,
Л.М. Терещенко, канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співр., **О.А. Воскобійник**, канд. техн. наук.

Інститут гідромеханіки НАН України,
03057, вул. Марії Капніст, 8/4, м. Київ, Україна.

Використання відновлюваних джерел енергії є нагальним та актуальним у життєдіяльності людства в сучасних умовах паливо-енергетичної кризи та забруднення навколишнього середовища. Одним із типів відновлюваних джерел енергії є припливні електростанції, в яких використовується потенційна енергія припливів і відливів. Визначення особливостей взаємодії хвильової течії з конструкціями припливної електростанції та створення умов безаварійної та ефективної роботи таких станцій є, безумовно, актуальною проблемою в сучасній енергетиці. Метою досліджень є визначення впливу гравітаційних хвиль на конструкцію припливної електростанції та розроблення рекомендацій щодо безпечних умов експлуатації припливної електростанції. В роботі проводяться чисельні та експериментальні дослідження взаємодії хвильової течії зі спорудами припливної електростанції та дамбою, яка огорожує закриту акваторію. Для цього використано сучасний апарат теоретичної гідромеханіки, теорії ймовірностей та математичної статистики, створено експериментальний стенд і проведені лабораторні дослідження в хвильовому басейні, де генератор хвиль генерував гравітаційні хвилі заданих параметрів. Проведені візуальні дослідження і визначені інтегральні та спектральні характеристики полів швидкості та тиску. Отримані гідродинамічні характеристики хвильового руху та течій через турбінні тракти електростанції і їх спектральні складові. Визначені поля тиску, навантаження і перекидуючих моментів сил на будівлю станції та встановлені особливості розмиву ґрунту у місці спряження станції та дна водойми. Проведені оцінки характеристик розмиву піщаного ґрунту поблизу припливної електростанції. Розроблені рекомендації щодо безаварійної роботи припливної електростанції та визначені оптимальні товщини піщаної подушки та кам'яної берми, на яких будується станція. Бібл. 20, рис. 5.

Ключові слова: гравітаційна хвиля, відновлювана енергетика, припливна електростанція, чисельне та фізичне моделювання, розмив ґрунту.

INTERACTION OF GRAVITY WAVES WITH TIDAL POWER PLANT

V. Voskoboinick, doctor of technical science, assistant professor, **V. Yakovlev**, doctor of technical science, professor,
V. Khomicky, candidate of technical science, assistant professor, **A. Voskobijnyk**, candidate of technical science, assistant professor,
L. Tereshchenko, candidate of physical and mathematical science, assistant professor,
O. Voskoboinyk, candidate of technical science.

Institute of hydromechanics of the NAS Ukraine,
03057, 8/4, Marii Kapnist Str., Kyiv, Ukraine.

The use of renewable energy sources is urgent and relevant in the life of humanity in the current conditions of fuel and energy crisis and environmental pollution. One type of renewable energy source is tidal power plants, which use the potential energy of tides. Determining the features of the interaction of the wave flow with the designs of the tidal power plant and the creation of conditions for trouble-free and efficient operation of such stations is certainly an urgent problem in modern power engineering. The purpose of the research is to determine the effect of gravitational waves on the design of a tidal power plant and to develop recommendations for safe operating conditions of the tidal power plant. Numerical and experimental studies of the interaction of the wave flow with the structures of the tidal power plant and the dam enclosing the closed water area are conducted in this work. For this purpose, a modern apparatus of theoretical hydromechanics, probability theory and mathematical statistics was used, an experimental stand was created and laboratory studies were conducted in a wave pool, where a wave generator generated gravitational waves of the given parameters. Visual studies have been conducted and the integral and spectral characteristics of velocity and pressure fields have been determined. The hydrodynamic characteristics of wave motion and flows through the turbine tracts of a power plant and their spectral components are obtained. Pressure fields, loads and torque moments on the building of the station have been determined, and features of soil erosion at the junction of the station and the bottom of the reservoir have been established. Sandy soil erosion characteristics near the tidal power plant were evaluated. Recommendations were made regarding the trouble-free operation of the tidal power plant and the optimal thicknesses of the sand cushion and stone berm on which the station was built. Ref. 20, Fig. 5.

Keywords: gravity wave, renewable energy, tidal power, numerical and physical modeling, soil erosion.



V.A. Voskobiynik
V. Voskoboynick

Відомості про автора: Завідувач відділу Гідродинаміки хвильових та руслових потоків Інституту гідромеханіки НАН України, доктор технічних наук, старший науковий співробітник.

Освіта: Вища. Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”. Спеціальність “Інженерна електрофізика”.

Наукова сфера: Поновлювальні джерела енергії, механіка рідини та газу, гідроакустика, керування прирежовим шаром, біомеханіка.

Публікації: більше 300 наукових праць.
ORCID: 0000-0003-2161-6923

Контакти: +38(044)371-65-57

e-mail: vlad.vsk@gmail.com

Author information: Head of the Department of Hydrodynamics of wave and channel flows of the Institute of Hydromechanics of the NAS of Ukraine, Doctor of technical sciences, Associate Professor.

Education: Higher. National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”. Specialty “Engineering electrophysics”.

Research area: Renewable energy sources, fluid and gas mechanics, hydroacoustics, boundary layer control, biomechanics.

Publications: more than 300 scientific papers.

ORCID: 0000-0003-2161-6923

Contacts: +38(044)371-65-57

e-mail: vlad.vsk@gmail.com



V.V. Yakovlev
V. Yakovlev

Відомості про автора: Провідний науковий співробітник відділу Гідродинаміки хвильових та руслових потоків Інституту гідромеханіки НАН України, доктор технічних наук, професор.

Освіта: Вища. Київський національний університет імені Тараса Шевченка. Спеціальність “Математик”.

Наукова сфера: Поновлювальні джерела енергії, механіка рідини та газу, хвильова гідродинаміка.

Публікації: більше 200 наукових праць.
ORCID: 0000-0002-3765-5292

Контакти: +38(044)371-65-57

e-mail: vyvak@ukr.net

Author information: Leading Scientist of the Department of Hydrodynamics of wave and channel flows of the Institute of Hydromechanics of the NAS of Ukraine, Doctor of technical sciences, Professor.

Education: Higher. Taras Shevchenko National University of Kyiv. Specialty “Mathematician”.

Research area: Renewable energy sources, fluid and gas mechanics, wave hydrodynamics.

Publications: more than 200 scientific papers.

ORCID: 0000-0002-3765-5292

Contacts: +38(044)371-65-57

e-mail: vyvak@ukr.net



V.V. Homickyi
V. Khoticky

Відомості про автора: Провідний науковий співробітник відділу Прикладної гідромеханіки Інституту гідромеханіки НАН України, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник.

Освіта: Вища. Київський національний університет імені Тараса Шевченка. Спеціальність “Гідролог”.

Наукова сфера: Поновлювальні джерела енергії, механіка рідини та газу, гідротехнічні берегозахисні споруди.

Публікації: більше 200 наукових праць.

ORCID: 0000-0003-0910-2233

Контакти: +38(044)371-65-45

e-mail: homicky@ukr.net

Author information: Leading Scientist of the Department of Applied Hydromechanics of the Institute of Hydromechanics of the NAS of Ukraine, Candidate of technical sciences, Associate Professor.

Education: Higher. Taras Shevchenko National University of Kyiv. Specialty “Hydrologist”.

Research area: Renewable energy sources, fluid and gas mechanics, hydro technical coastal protection structures.

Publications: more than 200 scientific papers.

ORCID: 0000-0003-0910-2233

Contacts: +38(044)371-65-45

e-mail: homicky@ukr.net



A.V. Voskobiynik
A. Voskobijnyk

Відомості про автора: Старший науковий співробітник відділу Гідробіоніки та керування прирежовим шаром Інституту гідромеханіки НАН України, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник.

Освіта: Вища. Київський національний університет імені Тараса Шевченка. Спеціальність “Механіка”.

Наукова сфера: Поновлювальні джерела енергії, механіка рідини та газу, гідроакустика, керування прирежовим шаром.

Публікації: більше 250 наукових праць.

ORCID: 0000-0001-8045-8625

Контакти: +38(044)371-65-57

e-mail: andrew.vsk@gmail.com

Author information: Senior Research of the Department of Hydrobionics and Boundary Layer Control of the Institute of Hydromechanics of the NAS of Ukraine, Candidate of technical sciences, Associate Professor.

Education: Higher. Taras Shevchenko National University of Kyiv. Specialty “Mechanic”.

Research area: Renewable energy sources, fluid and gas mechanics, hydroacoustics, boundary layer control.

Publications: more than 250 scientific papers.

ORCID: 0000-0001-8045-8625

Contacts: +38(044)371-65-57

e-mail: andrew.vsk@gmail.com



Л.М. Терещенко
L. Tereshchenko

Відомості про автора: Старший науковий співробітник відділу Прикладної гідромеханіки Інституту гідромеханіки НАН України, кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник.

Освіта: Вища. Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського". Спеціальність "Прилади неруйнівного контролю для технічної та медичної діагностики".

Наукова сфера: Поновлювальні джерела енергії, механіка рідини та газу, гідротехнічні берегозахисні споруди, біомеханіка.

Публікації: більше 100 наукових праць.

ORCID: 0000-0001-6068-7092

Контакти: +38(044)371-65-45

e-mail: litere70@gmail.com

Author information: Senior Research of the Department of Applied Hydromechanics of the Institute of Hydromechanics of the NAS of Ukraine, Candidate of physical and mathematical sciences, Associate Professor.

Education: Higher. NTUU Igor Sikorsky Kyiv Politechnical Institute. Specialty "Non-destructive testing devices for technical and medical diagnostics".

Research area: Renewable energy sources, fluid and gas mechanics, hydroacoustics, boundary layer control, biomechanics.

Publications: more than 100 scientific papers.

ORCID: 0000-0001-6068-7092

Contacts: +38(044)371-65-45

e-mail: litere70@gmail.com



О.А. Воскобойник
O. Voskoboynuk

Відомості про автора: Старший науковий співробітник відділу Технічної гідромеханіки Інституту гідромеханіки НАН України, кандидат технічних наук.

Освіта: Вища. Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут". Спеціальність "Електромеханік".

Наукова сфера: Поновлювальні джерела енергії, механіка рідини та газу, гідроакустика, керування примежовим шаром, біомеханіка.

Публікації: більше 150 наукових праць.

ORCID: 0000-0001-8114-4433

Контакти: +38(044)371-65-57

e-mail: alexandr.vsk@gmail.com

Author information: Senior Research of the Department of Technical Hydromechanics of the Institute of Hydromechanics of the NAS of Ukraine, Candidate of technical sciences.

Education: Higher. National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Specialty "Electromechanic".

Research area: Renewable energy sources, fluid and gas mechanics, hydroacoustics, boundary layer control, biomechanics.

Publications: more than 150 scientific papers.

ORCID: 0000-0001-8114-4433

Contacts: +38(044)371-65-57

e-mail: alexandr.vsk@gmail.com

Вступ. Енергія припливів використовувалася людьми здавна шляхом влаштування припливних млинів на узбережжі Англії, Франції, Іспанії, Росії, Канади, США та інших країн. Гравітаційні сили між Місяцем, Сонцем та Землею викликають ритмічне підвищення та опускання океанських вод у всьому світі, що призводить до хвиль припливів. Місяць має вдвічі більшу силу на припливи, ніж Сонце, через своє набагато ближче положення до Землі. Амплітуда або висота хвилі припливу дуже мала у відкритому океані, де вона вимірюється кількома сантиметрами. Але приплив посилюється, коли він досягає континентальних шельфів, доставляючи величезні маси води у вузькі затоки та річки лиманів уздовж берегової лінії, де висота хвилі припливу досягає одиниць і десятків метрів. Всередині цих заток і лиманів накопичуються водні маси та відбувається різкий підйом рівня води (цикл припливів). Приплив починає відступати, коли Місяць продовжує свій шлях навколо Землі далі від океану, зменшуючи свій

гравітаційний вплив на океанічні води (цикл відливів).

Відновлювана потенційна енергія припливів широко використовується для роботи припливних електростанцій, конструкції яких складаються як з будівлі станції, так і з дамб, що огорожують закриті штучні водні акваторії [1-3]. Такі електростанції використовують потенційну енергію вертикального підйому та падіння води. На відміну від цього, в плавучих або інших типах припливних електростанцій використовується кінетична енергія припливних течій або горизонтальних водних потоків, викликаних припливами. В таких припливних електростанціях відсутні закриті водойми.

Під час проектування та будівництва припливних електростанцій значну увагу приділяють вивченню особливостей взаємодії хвильового руху та припливних течій зі спорудами електростанцій, особливо в умовах значного хвилювання моря та підйому водних мас [4-6]. Необхідність оцінки розмиву ґрунту поблизу гідротехнічних споруд великих

поперечних розмірів від течій і хвиль в суворих штормових умовах обумовлена необхідністю забезпечити безаварійну роботу споруд, адже великі розмиви ґрунту призводять до руйнування таких споруд [7, 8]. Для зменшення отворів розмивів використовуються різні методи і засоби, зокрема утворення берм з кам'яної насипки або огорожування будівель тетраподами. Місцеві розмиви дна від хвиль у проникних спорудах, до яких можна віднести будівлю припливної електростанції з дамбою, яка огорожує акваторію, в даний час не достатньо вивчені і теоретичні підходи до вивчення цього процесу ще тільки намічаються. Тому для оцінки можливого розмиву ґрунту під дією хвиль біля будівлі припливної електростанції широко використовуються експериментальні дослідження взаємодії вітрових хвиль з спорудами припливної електростанції [9, 10].

Мета та завдання. Метою досліджень є визначення впливу гравітаційних хвиль на припливну електростанцію та розроблення

рекомендацій щодо безпечних умов експлуатації припливної електростанції.

Згідно до поставленої мети та завдань чисельні дослідження проводилися з метою визначення особливостей взаємодії хвильового поля з припливною електростанцією, яка буде збудована на березі Баренцевого моря поблизу Мурманська, та навантажень, які діють на споруду під впливом хвиль. Чисельні розрахунки побудовані на застосуванні методу сплайн-колокацій у просторі зображення перетворювань Лапласа [11, 12] у вигляді розкладання по базису з нормованих кубічних В-сплайнів. Експериментальні роботи проводилися в хвильовому басейні на полігоні Інституту гідромеханіки НАН України, який розташований на березі Дніпра поблизу Києва (рис. 1а). Для проведення досліджень було створено модель припливної електростанції у масштабі 1:50 (рис. 1б).



а



б

Рис. 1. Хвильовий басейн (а) та модель припливної електростанції (б).

Fig. 1. Wave pool (a) and tidal power model (b).

У відповідності до технічного завдання основним небезпечним напрямком дії хвиль є північно-східний напрямок з 1% забезпеченістю хвильового шторму і характеристиками $h_{1\%}=8$ м; $\bar{\lambda}=96$ м; $\lambda_0=12$; $\bar{\tau}=7,85$ с, $\theta=0^\circ$ та $h_{1\%}=5,78$ м; $\bar{\lambda}=112,8$ м; $\lambda_0=20$; $\bar{\tau}=8,61$ с, де $h_{1\%}$ - висота хвиль, $\bar{\lambda}$ - середня довжина хвиль, $\lambda_0=\bar{\lambda}/h_{1\%}$ - відносна довжина хвиль, $\bar{\tau}$ - середній період хвиль та θ - напрямок хвиль відносно перпендикуляра до мористої поверхні моделі. Досліди проводилися для цих двох хвильових

режимів, яким відповідали хвильові параметри на моделі у відповідності до законів гравітаційної подібності Фруда, а саме: $h_M=0,16$ м; $\bar{\lambda}_M=1,92$ м; $\lambda_0=12$; $\bar{\tau}_M=1,12$ с, $\theta=0^\circ$ та $h_M=0,112$ м; $\bar{\lambda}_M=2,24$ м; $\lambda_0=20$; $\bar{\tau}=1,21$ с. Крім того, досліди проводилися для середнього, мінімального (-0,22 м) та максимального (+4,84 м) припливного рівня моря в акваторії, де планується збудувати припливну електростанцію.

Хвильовий басейн був обладнаний генераторами хвиль щитового типу, які

генерували хвилі заданих параметрів, а досліджувані моделі були відгороджені від зайвої акваторії басейну бар'єрними хвилеводами (рис. 1а). Для отримання достовірної інформації з визначення взаємодії хвиль з досліджуваними моделями хвилеве поле діяло тривалістю близько 5000 хвиль заданих параметрів.

Для визначення гідродинамічних характеристик хвильового поля та взаємодії його з моделями були застосовані ємнісні сенсори, датчики тиску, акселерометри та анемометри. Застосовувалися групи ємнісних датчиків струнного типу, п'єзорезистивні диференційні датчики повного тиску та п'єзокерамічні датчики пульсацій тиску, п'єзокерамічні акселерометри, плівкові термоанемометри та мікровертушки [13-15]. Електричні сигнали датчиків

підсилювалися, фільтрувалися відповідною апаратурою та поступали на 16-канальні аналогово-цифрові перетворювачі, а згодом на апаратуру реєстрації, обробки та аналізу даних. Обробка та аналіз експериментальних даних проводилася на комп'ютерах з застосуванням стандартних і спеціально розроблених програм і алгоритмів теорії ймовірності та математичної статистики [16-18].

Для проведення візуальних досліджень використовувалися мічені частинки та кольорові фарбники траєкторії руху яких реєструвалися цифровими фотоапаратами і відеокамерами. Відео- та фотоматеріал оброблявся і аналізувався на спеціально створеній комп'ютерній графічній станції, яку було обладнано відповідним програмним забезпеченням.



а



б

Рис. 2. Хвильовий рух (а) та взаємодія хвиль з моделлю припливної електростанції (б).

Fig. 2. Wave motion (a) and wave interaction with tidal power model (b).

Результати досліджень. Чисельні та експериментальні дослідження показали, що під час взаємодії синусоїдальних хвиль, які генерував хвилепродуктор (рис. 2а), з моделлю припливної електростанції утворюється складний нестационарний хвильовий рух. На передній фронтальній поверхні моделі спостерігається складна ударна дія хвиль з перетіканням води через тракти для встановлення гідротурбін у відстійну зону моделі припливної станції. Відбиті хвилі від передньої поверхні моделі та бокових захисних стін відстійної зони взаємодіють з хвилями, що генеруються хвилепродуктором, та утворюють рух у вигляді штормових хвиль [4, 5, 19]. Візуальні дослідження показали, що вздовж передньої поверхні моделі припливної

електростанції спостерігається складний рух рідини з швидкостями, які преважують у вертикальному напрямку (до вільної поверхні каналу та до його дна). У трактах припливної станції рідина рухалася у зворотному поступальному русі з частотою руху хвиль. При цьому швидкість руху води у верхніх рядах моделі були значно вища, ніж у трактах, які було розташовано глибше. Спектр поля швидкості течії води через верхній ряд трактів мав ударний характер з великим числом тональних підйомів і значними рівнями пульсацій швидкості та тиску у високочастотній області спектру.

Форми хвильового руху перед передньою та кормовою (відстійна зона) поверхнями моделі припливної електростанції (на відстані близько

0,25 $\bar{\lambda}_M$) наведені на рис. 3а. З наближенням до досліджуваної моделі синусоїдальна форма хвилі хвилепродуктора змінюється головним чином в області гребня хвилі, наповнюючись високочастотними пульсаціями. Амплітуда

хвильового руху на мористій стороні припливної станції майже на порядок вища, ніж у відстійній камері. При цьому висота хвиль перед моделлю припливної станції стала більше майже на 20% ніж та, яку генерував хвилепродуктор.

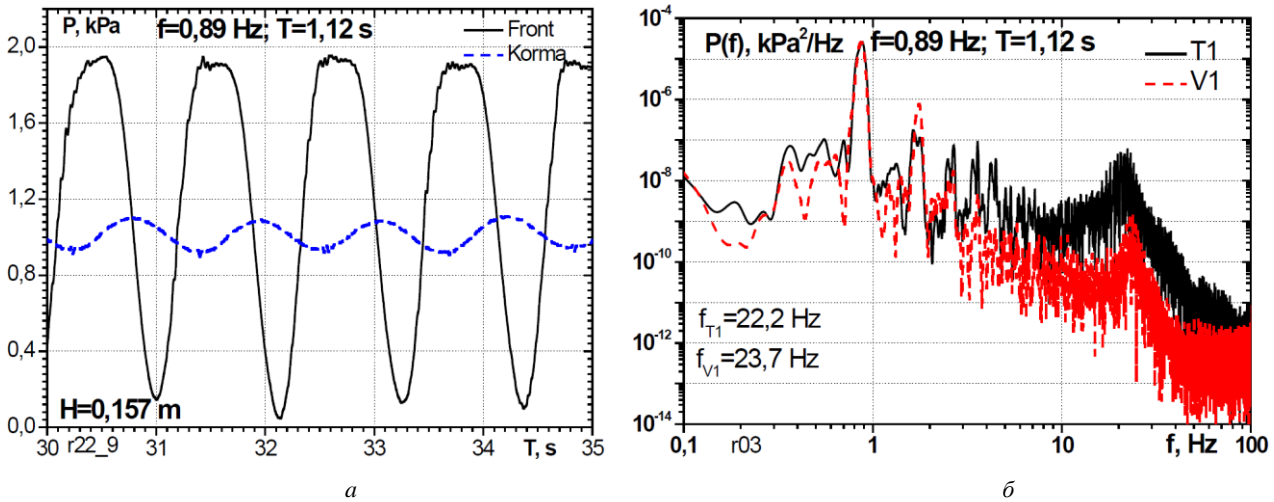


Рис. 3. Форми хвиль (а) та спектри пульсацій тиску (б).

Fig. 3. Wave forms (a) and pressure fluctuation spectra (b).

Спектральні густини потужності хвильового тиску на обтічній мористій поверхні моделі припливної електростанції (Т1) та перед нею (V1) представлені на рис. 3б. На цьому рисунку наведені спектральні дані хвильового руху з характеристиками $h_M=0,16$ м; $\bar{\lambda}_M=1,92$ м; $\lambda_0=12$; $\bar{\tau}_M=1,12$ с, $\theta=0^\circ$. Результати досліджень показують, що в спектрах домінують пульсації тиску на домінуючій частоті (частота генерації хвиль $f=0,89$ Гц) та її гармоніках, а також в діапазоні частот $f=(22-24)$ Гц. Останній діапазон частот обумовлений процесами взаємодії хвильового руху з поверхнею моделі припливної електростанції та порушенням хвиль під час цієї взаємодії. Ця відносно високочастотна область спектру тиску генерується дрібномасштабними вихровими структурами, які виникають під час порушення хвиль, їх взаємодії між собою та обтічною поверхнею моделі припливної електростанції. Спектральні рівні високо-

частотних пульсацій тиску на поверхні моделі майже на порядок вищі, ніж перед самою моделлю на відстані $0,25 \bar{\lambda}_M$ (рис. 3б).

Чисельне та фізичне моделювання дозволило визначити гідродинамічні навантаження на модель припливної електростанції, яку встановлено на піщану подушку та кам'яну берму, під час дії хвильового руху з різними параметрами хвиль та рівнем моря, обумовленим дією припливної течії. Так, на рис. 4 представлені результати розрахунку хвильового тиску на фронтальну частину припливної електростанції під дією хвиль з параметрами $h_{1\%}=8$ м; $\bar{\lambda}=96$ м; $\lambda_0=12$; $\bar{\tau}=7,85$ с, $\theta=0^\circ$. Розрахунки проведені для мінімального рівня моря ($z=-0,22$ м), середнього рівня ($z=0$) та максимального рівня моря ($z=5$ м) та у момент підходу гребня хвилі до обтічної поверхні припливної електростанції.

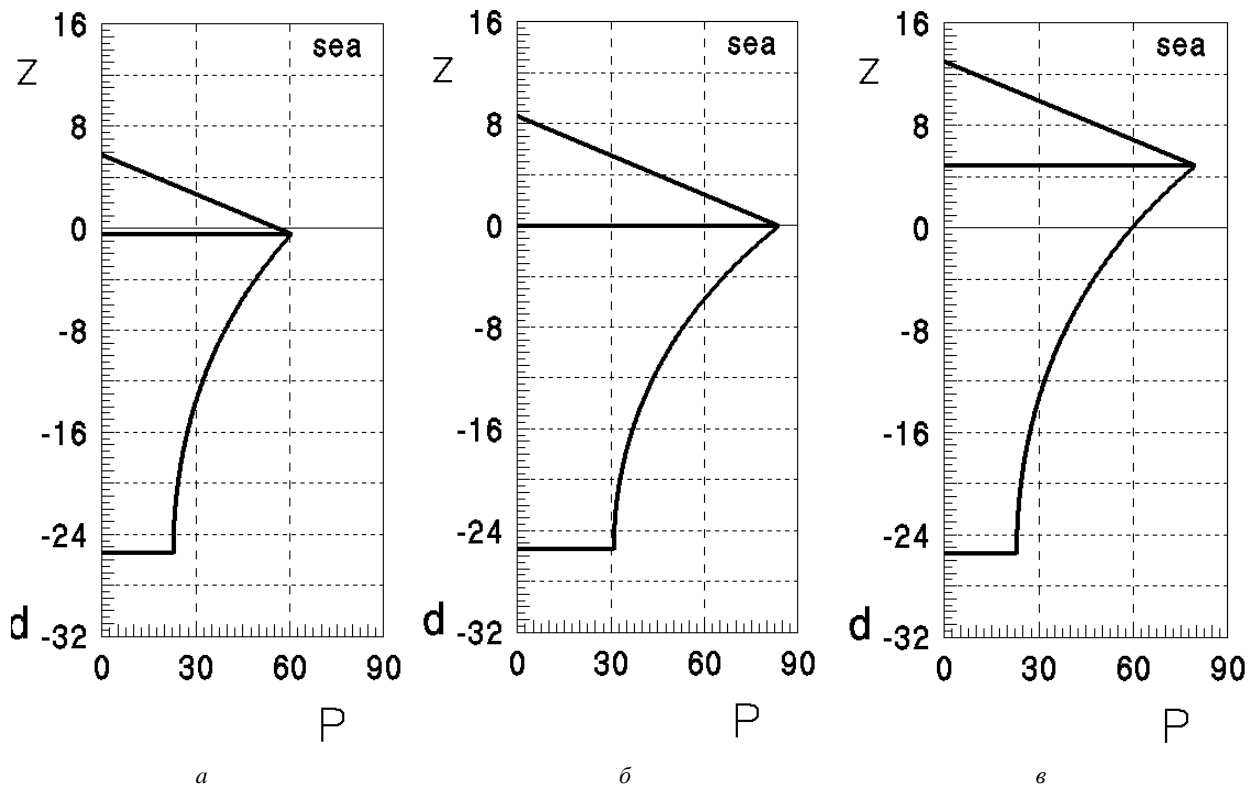


Рис. 4. Епюри тиску на передній поверхні моделі для мінімального (а), середнього (б) та максимального (в) рівнів води.

Fig. 4. Pressure bars on the model front for minimum (a), medium (b) and maximum (c) water levels.

Результати досліджень показали, що найбільший гідродинамічний тиск спостерігався на рівні моря та поступово зменшувався зі збільшенням глибини вздовж поверхні припливної електростанції. Результати експериментальних досліджень показали, що максимуми рівнів гідродинамічного тиску на (10-15) % вищі, ніж чисельні розрахунки і максимуми тиску спостерігалися на (5-10) % вище від рівня води, ніж у розрахунках. Ця різниця обумовлена значною нестационарністю хвильового руху, а відповідно і поля тиску та швидкості, яка породжувалася взаємодією хвиль між собою, обтічною поверхнею моделі припливної електростанції та у трактах, де розташовувалися припливні турбіни.

Найбільші зсувні напруги будівля припливної електростанції відчувала під час дії північного або північно-східного напрямку вітру і хвиль. Оцінка хвильового гідродинамічного зважування для трьох рівнів моря показала, що

величина хвильового навантаження, яке діяло на дно будови станції, невелика і складала приблизно 400 кН. Завдяки цьому навантаженню перекидаючий момент сил на 4% збільшив момент від горизонтальної сили.

Форма і глибина розмивів, які утворюються завдяки вихровим і струменевим течіям поблизу місця спряження будівлі та дна і потокам, які перетікають через турбінні тракты, залежить від багатьох чинників, зокрема, від форми споруди, чисел Рейнольдса та Фруда, складу та зернистості ґрунту і багатьох інших параметрів [8, 9, 20]. Чисельні та фізичні дослідження оцінили форму та величини розмивів перед припливною електростанцією, результати яких наведено на рис. 5. Тут приведені форми розмивів, які виникали перед будівлею припливної електростанції, що знаходилася на дрібнозернистій піщаній основі (рис. 5а) та великозернистому піску (рис. 5б).

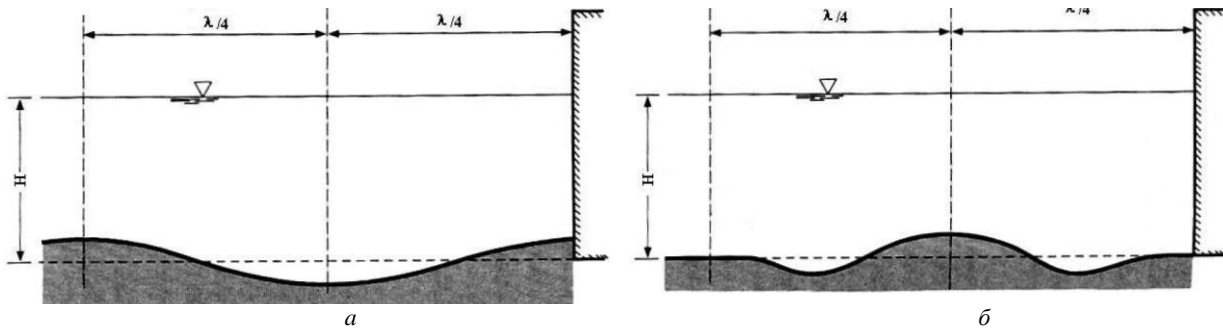


Рис. 5. Розмив дрібнозернистого піску (а) та великозернистого піску перед моделлю (б).

Fig. 5. Scour of the fine-grained sand (a) and coarse-grained sand before model (b).

Результати досліджень показали, що піщана насипна подушка, яка складена з дрібнозернистого піску $d_{50}=(0,3-1)$ мм, мала форму деформацію у вигляді хвилі з максимумом розмиву на відстані $0,25\lambda$, тобто на відстані близько (40-50) м, рахуючи від вертикальної стінки споруди. Крім того, у безпосередній близькості до припливної електростанції спостерігався намив дрібнозернистого піску (рис. 5а). Для великозернистого піску $d_{50}=(2-3)$ мм форма деформації ґрунту близька до двох хвиль з максимумом розмивів на відстані близько $0,125\lambda$ та $0,375\lambda$ (рис. 5б). При цьому найбільший намив піску спостерігався на відстані $0,25\lambda$ від припливної електростанції, а у безпосередній близькості до стінки споруди піщаний ґрунт залишався майже непорушним. Таким чином, в умовах досліджуваних параметрів хвиль, глибин та рівнів моря поблизу споруди припливної електростанції не спостерігалось значних розмивів поблизу її фронтальної стінки як з дрібнозернистою піщаною подушкою, так і з великозернистим піском. Максимальна глибина воронки розмиву не перевищувала 2,3 м при фронтальному підході хвиль. Таким чином, товщина подушки під будівлею припливної електростанції з запасом повинна складати приблизно (2,5-3) м. Товщина кам'яної берми на схилі подушки можна залишити як намічено в проекті (1-1,5) м.

Висновки. Враховуючи результати чисельного та фізичного моделювання взаємодії хвильового руху з конструкцією припливної електростанції можна зробити наступні висновки:

1. Виконано розрахунки та отримано експериментальні результати з визначення максимального накопичування хвиль на будівлю

припливної електростанції в районі турбінних трактів і мористої стінки будівлі для параметрів хвиль 1% забезпеченості, можливих 1 раз в 100 років. Чисельне моделювання показало, що максимальне накопичування хвиль мало місце для північно-східного напрямку вітру при максимальному рівні моря.

2. Установлено, що в результаті взаємодії гравітаційних хвиль з конструкцією припливної електростанції хвилеве поле набуває суттєво нестационарний характер. На передній фронтальній поверхні моделі спостерігається складна ударна дія хвиль з перетіканням води через тракти для встановлення гідротурбін у відстійну зону моделі припливної станції. Відбиті хвилі від передньої поверхні моделі та бокових захисних стін відстійної зони взаємодіють з хвилями, що генеруються хвилепродуктором, та утворюють рух у вигляді штовханини хвиль.

3. Визначено, що в спектрах домінують пульсації тиску на домінуючій частоті (частота генерації хвиль $f=0.89$ Гц) та її гармоніках, а також в діапазоні частот $f=(22-24)$ Гц. Спектральні рівні високочастотних пульсацій тиску на поверхні моделі майже на порядок вищі, ніж перед самою моделлю на відстані $0,25\bar{\lambda}$ м. Спектр поля швидкості течії води через верхній ряд трактів мав ударний характер з великим числом тональних підйомів і значними рівнями пульсацій швидкості та тиску у високочастотній області спектру.

4. Показано, що найбільший гідродинамічний тиск спостерігався на рівні моря та поступово зменшувався зі збільшенням глибини вздовж поверхні припливної електростанції. Найбільші зсувні напруження будівля припливної електростанції відчувала під час дії північного або північно-східного напрямку вітру і хвиль.

Оцінка хвильового гідродинамічного зважування для трьох рівнів моря показала, що величина хвильового навантаження, яке діяло на дно будови станції, невелика і складала приблизно 400 кН. Завдяки цьому навантаженню перекидаючий момент сил на 4 % збільшив момент від горизонтальної сили.

5. Результати досліджень показали, що стан укосу насипної піщаної подушки і берми перед будівлею припливної електростанції після продукування розрахункової тривалості дії шторму (5000 хвиль) залишався стабільним і критичних розмивів піщаного ґрунту незалежно від зернистості піску з-під захисного шару берми не спостерігалось. Рекомендовано залишити товщину кам'яної берми на схилі піщаної подушки залишити як намічено у проекті, а саме (1-1,5) м, а сама піщана подушка повинна мати товщину близько (2,5-3) м.

1. *Gross M., Magar V.* Wind-induced currents in the Gulf of California from extreme events and their impact on tidal energy devices. *J. Mar. Sci. Eng.* 2020. № 2(8). Pp. 80-1-22.

2. *Vogel C.R., Taira D.T., Carmo B.S., Assi G.R.S., Willden R.H.J., Meneghini J.R.* Prospects for tidal stream energy in the UK and South America: A review of challenges and opportunities. *Polytechnica.* 2019. № 1-2(2). Pp. 97-109.

3. *Dawn S., Gope S., Das A., Bhowmik D., Koley I.* Tidal energy as emergent energy source: A review. *Proc. Intern. Conf. on Computational Intelligence and IoT (ICCIoT).* Tripura. NITA. 2018. Pp. 340-345.

4. *Кононкова Г.Е., Показеев К.В.* Динамика морских волн. М. Изд. МГУ. 1985. 298 с.

5. *Селезов И.Т., Сидорчук В.Н., Яковлев В.В.* Трансформация волн в прибрежной зоне шельфа. Киев. Наук. думка. 1983. 208 с.

6. *Ткаченко В.А., Яковлев В.В.* Трансформация волн на неоднородностях рельефа донной поверхности с прямолинейными границами. *Гидромеханика.* 1987. Вып. 56. С. 3-6.

7. *Auguste C., Nader J.-R., Marsh P., Cossu R.* Influence of tidal energy converters on sediment dynamics in tidal channel. *Proc. 13th European Wave and Tidal energy Conf.* 1-6 Sept. 2019. Naples. Italy. 2019. Pp. 1508-1-10.

8. *Voskoboynick V.A., Voskoboynick A.V., Areshkovych O.O., Voskoboynik O.A.* Pressure fluctuations on the scour surface before prismatic pier. *Proc. 8th International Conference on Scour and Erosion (ICSE 2016) 12-15 September 2016.* Oxford. UK. 2016. Pp. 905-910.

9. *Xiang Q., Wei K., Qiu F., Yao C., Li Y.* Experimental study of local scour around caissons under unidirectional and tidal currents. *Water.* 2020. 12(3). Pp. 640-1-18.

10. *Иванов В.А., Михинов А.Е.* Прогноз динамики наносов в прибрежной зоне моря (практические рекомендации и примеры расчетов). Севастополь. Изд. МГФИ. 1991. 50 с.

11. *Завьялов Ю.С., Квасов Б.И., Мирошниченко В.Л.* Методы сплайн-функций. М. Наука. 1980. 352 с.

12. *Ткаченко В.А., Яковлев В.В.* Дифракция нестационарной акустической волны на абсолютно жестком цилиндре, окруженном неоднородным слоем. *Акустический журнал.* 1985. № 2(31). С. 255-260.

13. *Voskoboynick V., Voskoboynik O., Voskobijnyk A.* Investigation of wall pressure fluctuation fields using miniature sensors. *Abstracts of IX International Scientific and Practical Conference "Actual Aspects of Development in the context of Globalization".* Florence. Italy. 2020. Pp. 265-269.

14. *Voskoboynick V., Kornev N., Turnow J.* Study of near wall coherent flow structures on dimpled surfaces using unsteady pressure measurements. *Flow Turbulence Combust.* 2013. № 4(90). Pp. 709-722.

15. *Voskoboynick V.A., Turick V.N., Voskoboynik O.A., Voskoboynick A.V., Tereshchenko I.A.* Influence of the deep spherical dimple on the pressure field under the turbulent boundary layer. In: *Hu Z., Petoukhov S., Dychka I., He M.* (eds) *Advances in Computer Science for Engineering and Education. ICCSEEA 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing.* Springer. Cham. 2019. Vol. 754. Pp. 23-32.

16. *Bendat J.S., Piersol A.G.* *Random Data: Analysis and Measurement Procedures,* 4th Edition. N.Y. Wiley. 2010. 640 p.

17. *Vinogradnyi G.P., Voskoboynick V.A., Grinchenko V.T., Makarenkov A.P.* Spectral and correlation characteristics of the turbulent boundary layer on an extended flexible cylinder. *J. Fluid Dyn.* 1989. № 5(24). Pp. 695-700.

18. *Voskoboynick V.A., Makarenkov A.P.* Spectral characteristics of the hydrodynamical noise in a longitudinal flow around a flexible cylinder. *Intern. J. Fluid Mech. Res.* 2004. № 1(31). Pp. 87-100.

19. *Yakovlev V., Voskoboynick V., Khomicky V., Tereshchenko L., Tkachenko V.* Calculation method of wind waves for variable depths of sea area. *Abstracts of the 1st International scientific and practical conference "Innovative Development of Science and Education".* Athens. Greece. 2020. Pp. 153-159.

20. *Sumer B.M., Fredsoe J.* Scour and its protection at breakwaters. *Proc. 5th Intern. Conf. on Coastal and Port Engineering In Developing Countries (COPEDEC V).* Cape Town. 1999. Pp. 254-265.

REFERENCES

1. *Gross M., Magar V.* Wind-induced currents in the Gulf of California from extreme events and their impact on tidal energy devices. *J. Mar. Sci. Eng.* 2020. No. 2(8). Pp. 80-1-22. [in English].

2. *Vogel C.R., Taira D.T., Carmo B.S., Assi G.R.S., Willden R.H.J., Meneghini J.R.* Prospects for tidal stream energy in the UK and South America: A review of challenges and opportunities. *Polytechnica.* 2019. № 1-2(2). Pp. 97-109. [in English].

3. *Dawn S., Gope S., Das A., Bhowmik D., Koley I.* Tidal energy as emergent energy source: A review. *Proc. Intern. Conf. on Computational Intelligence and IoT (ICCIoT).* Tripura. NITA. 2018. Pp. 340-345. [in English].

4. *Kononkova G.E., Pokazeev K.V.* Dinamika morskikh voln. [Dynamics of sea waves]. Moscow. Izd. MGU. 1985. 298 p. [in Russian].
5. *Selezov I.T., Sidorchuk V.N., Yakovlev V.V.* Transformatsiya voln v pribrezhnoi zone shel'fa. [Transformation of waves in the coastal zone of the shelf]. Kyiv. Naukova dumka. 1983. 208 p. [in Russian].
6. *Tkachenko V.A., Yakovlev V.V.* Transformatsiya voln na neodnorodnostyakh rel'efa donnoi poverkhnosti s pryamolineinymi granicami. [Wave transformation on inhomogeneities of the bottom surface relief with rectilinear boundaries]. Hydromekhanika. 1987. Rel. 56. Pp. 3-6 [in Russian].
7. *Auguste C., Nader J.-R., Marsh P., Cossu R.* Influence of tidal energy converters on sediment dynamics in tidal channel. Proc. 13th European Wave and Tidal energy Conf. 1-6 Sept. 2019. Naples. Italy. 2019. Pp. 1508-1-10. [in English].
8. *Voskoboinick V.A., Voskoboinick A.V., Areshkovych O.O., Voskoboinyk O.A.* Pressure fluctuations on the scour surface before prismatic pier. Proc. 8th International Conference on Scour and Erosion (ICSE 2016) 12-15 September 2016. Oxford. UK. 2016. Pp. 905-910.
9. *Xiang Q., Wei K., Qiu F., Yao C., Li Y.* Experimental study of local scour around caissons under unidirectional and tidal currents. Water. 2020. 12(3). Pp. 640-1-18. [in English].
10. *Ivanov V.A., Mikhinov A.E.* Prognoz dinamiki nanosov v pribrezhnoi zone moray (prakticheskie rekomendatsii i primery paschetov) [Forecast of sediment dynamics in the coastal zone of the sea (practical recommendations and calculation examples)]. Sevastopol. Izd. MGFI. 1991. 50 p. [in Russian].
11. *Zav'yalov Yu.S., Kvasov B.I., Miroschnichenko V.L.* Metody splain-funkcii [Spline function methods]. Moscow. Nauka. 1980. 352 p. [in Russian].
12. *Tkachenko V.A., Yakovlev V.V.* Difraktsiya nestacionarnoi akusticheskoi volny na absolutno zhestkom cilindre, okruzhennom neodnorodnym sloem. [Diffraction of an unsteady acoustic wave by an absolutely rigid cylinder surrounded by an inhomogeneous layer]. Acoustical journal. 1985. № 2(31). Pp. 255-260. [in Russian].
13. *Voskoboinick V., Voskoboinyk O., Voskobijnyk A.* Investigation of wall pressure fluctuation fields using miniature sensors. Abstracts of IX International Scientific and Practical Conference "Actual Aspects of Development in the context of Globalization". Florence. Italy. 2020. Pp. 265-269. [in English].
14. *Voskoboinick V., Kornev N., Turnow J.* Study of near wall coherent flow structures on dimpled surfaces using unsteady pressure measurements. Flow Turbulence Combust. 2013. No. 4(90). Pp. 709-722. [in English].
15. *Voskoboinick V.A., Turick V.N., Voskoboinyk O.A., Voskoboinick A.V., Tereshchenko I.A.* Influence of the deep spherical dimple on the pressure field under the turbulent boundary layer. In: Hu Z., Petoukhov S., Dychka I., He M. (eds) Advances in Computer Science for Engineering and Education. ICCSEEA 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing. Springer. Cham. 2019. Vol. 754. Pp. 23-32. [in English].
16. *Bendat J.S., Piersol A.G.* Random Data: Analysis and Measurement Procedures, 4th Edition. N.Y. Wiley. 2010. 640 p. [in English].
17. *Vinogradnyi G.P., Voskoboinick V.A., Grinchenko V.T., Makarenkov A.P.* Spectral and correlation characteristics of the turbulent boundary layer on an extended flexible cylinder. J. Fluid Dyn. 1989. No. 5(24). Pp. 695-700. [in English].
18. *Voskoboinick V.A., Makarenkov A.P.* Spectral characteristics of the hydrodynamical noise in a longitudinal flow around a flexible cylinder. Intern. J. Fluid Mech. Res. 2004. No. 1(31). Pp. 87-100. [in English].
19. *Yakovlev V., Voskoboinick V., Khomicky V., Tereshchenko L., Tkachenko V.* Calculation method of wind waves for variable depths of sea area. Abstracts of the 1st International scientific and practical conference "Innovative Development of Science and Education". Athens. Greece. 2020. Pp. 153-159.
20. *Sumer B.M., Fredsoe J.* Scour and its protection at breakwaters. Proc. 5th Intern. Conf. on Coastal and Port Engineering In Developing Countries (COPEDEC V). Cape Town. 1999. Pp. 254-265.

Стаття надійшла до редакції 16.10.20
Остаточна версія 14.12.20