МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВОДНОГО ГОСПОДАРСТВА ТА ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

ПОПЛАВСЬКИЙ ДМИТРО МИХАЙЛОВИЧ

УДК 532.593:532.574

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ КНОЇДАЛЬНИХ ХВИЛЬ З ВРАХУВАННЯМ НЕГІДРОСТАТИКИ У ПОЧАТКОВОМУ ПЕРЕРІЗІ ТА ЗАТУХАННЯ ХВИЛЬ ПО ДОВЖИНІ

05.23.16 − гідравліка та інженерна гідрологія

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Рівне – 2021

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національному університеті водного господарства та природокористування Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Рябенко Олександр Антонович,
Національний університет водного господарства та природокористування,
завідувач кафедри гідроенергетики, теплоенергетики та гідравлічних машин

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Яхно Олег Михайлович,
Національний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
професор кафедри прикладної гідроаеромеханіки та механотроніки;

кандидат технічних наук
Вовк Леся Іванівна,
Національний університет «Львівська політехніка»,
старший викладач кафедри гідротехніки та водної інженерії.

Захист відбудеться «29» квітня 2021 р. о 11.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 47.104.01 Національного університету водного господарства та природокористування за адресою: 33028, м. Рівне, вул. Соборна, 11.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету водного господарства та природокористування за адресою: 33000, м. Рівне, вул. О. Новака, 75.

Автореферат розісланий «23» березня 2021 року

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради,
кандидат технічних наук С. В. Сунічук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Під час експлуатації гідротехнічних та гідроенергетичних об’єктів, при відповідних умовах, виникають кноїдальні хвилі. Такі хвилі впливають на роботу гідротехнічних та гідроенергетичних об’єктів як позитивно так і негативно.

Кноїдальні хвилі утворюються як рухомі або нерухомі хвилі на мілкій воді. Це явище відносяться до білякритичних течій рідини, тому має ряд відмінностей від інших спокійних та бурхливих потоків – негідростатичний розподіл тиску по глибині в більшості перерізів потоку, хвилеподібний характер вільної поверхні, тощо. Наведені особливості унеможливлюють використання класичної теорії плавно- та повільнозмінного руху для описання цього явища.

Кноїдальні хвилі описуються за допомогою загального розв’язку диференціального рівняння Кортевега-де Фріса, який записується з використанням еліптичної функції Якобі амплітуди косинуса *cn(z)*. Диференціальне рівняння Кортевега-де Фріса має універсальний характер, оскільки описує не тільки хвилі на воді, а і самі різноманітні за своєю природою хвильові явища – хвилі в плазмі, атмосфері, надпровідниках, тощо.

В різних галузях науки (гідравліка, гідромеханіка, гідротехніка, математика, фізика, солітоніка тощо) опублікована велика кількість робіт пов’язаних з використанням рівняння Кортевега-де Фріса. Характерно, що робіт пов’язаних безпосередньо з кноїдальними хвилями надзвичайно мало, вони частково неузгоджені між собою та не охоплюють весь комплекс проблем, пов’язаних з розглядом даної тематики. Існуючі методики розрахунку кноїдальних хвиль не досконалі та мають ряд недоліків, серед яких можна відмітити не врахування всіх визначальних факторів, головними з яких є негідростатичний розподіл тиску в початковому перерізі, затухання хвиль по довжині, тощо. Як наслідок, інженерні рішення на стадії проектування, експлуатації чи реконструкції, що пов’язані з утворенням кноїдальних хвиль, досить часто далекі від оптимальних.

Вивченню зазначених питань, розробці математичної моделі розрахунку кноїдальних хвиль з врахуванням негідростатитики в початковому перерізі та затухання хвиль по довжині присвячена дана робота.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційні дослідження було виконано відповідно до кафедральної теми «Удосконалення конструкцій, методів розрахунку і проектування гідроенергетичних об’єктів та гідравлічних машин» (номер державної реєстрації 0110U000822), яка виконувалася на кафедрі гідроенергетики, теплоенергетики та гідравлічних машин Національного університету водного господарства та природокористування.

Мета дисертаційної роботи полягає в удосконалені існуючих методів розрахунку параметрів кноїдальних хвиль з врахуванням негідростатики в початковому перерізі та експоненційного ступеня затухання хвиль по довжині.

Задачі досліджень. Відповідно до поставленої мети дисертаційної роботи постала необхідність вирішення наступних завдань:

- виконати аналіз результатів існуючих теоретичних, лабораторних та натурних досліджень кноїдальних хвиль, виявити переваги та недоліки існуючих математичних методів розрахунку параметрів кноїдальних хвиль;

- уточнити границі існування кноїдальних хвиль, а саме можливість їх утворення при числах Фруда в початковому перерізі менше, рівних та більше одиниці;

- визначити особливості кінематичної та динамічної структур в характерних перерізах явища, що розглядається;

- розробити математичну модель розрахунку профілю вільної поверхні кноїдальних хвиль з врахування негідростатики в початковому перерізі та затухання хвиль по довжині, що базується на розв’язку диференціального рівняння вимушених затухаючих коливань;

- розробити практичні рекомендації щодо використання удосконаленої методики розрахунку параметрів кноїдальних хвиль для уточнення розмірів гідротехнічних та гідроенергетичних споруд під час їх проектуванні та реконструкції.

Об’єкт дослідження. Процес формування та існування нерухомих і рухомих кноїдальних хвиль, що виникають у відкритих руслах з вільною поверхнею рідини.

Предмет дослідження. Геометричні, динамічні і кінематичні характеристики, особливості моделювання та умови існування кноїдальних хвиль.

Методи дослідження. Експериментальні дослідження були проведені з врахуванням викривлення потоку у вертикальній площині в характерних перерізах кноїдальних хвиль під час вивчення їх геометричних, кінематичних та динамічних характеристик. При цьому був використаний метод планування експериментів, а результати лабораторних досліджень були оцінені методами математичної статистики для встановлення достовірності отриманих результатів. Теоретичні дослідження були застосовані під час розробки математичної моделі кноїдальних хвиль з врахуванням негідростатики в початковому перерізі та затухання хвиль по довжині.

Наукова новизна отриманих результатів:

– на основі експериментальних досліджень були уточнені межі існування кноїдальних хвиль, а саме підтверджено існування наведеного явища при числах Фруда $Fr_1 \gtreqless 1$;

– вперше були проведені експериментальні дослідження розподілу гідродинамічного тиску по глибині та були уточнені дані стосовно кінематичної структури кноїдальних хвиль в характерних перерізах по довжині потоку;

– вдосконалено рівняння Рябенка О.А. по визначенню глибини потоку під вершиною першої хвилі кноїдальних хвиль шляхом врахування коефіцієнта просторовості;

– вперше було розроблено математичну модель профілю вільної поверхні кноїдальних хвиль з негідростатичного розподілу тиску в початковому перерізі врахуванням затухання хвиль по довжині з використанням диференціального рівняння вимушених затухаючих коливань.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Уточнено границі існування кноїдальних хвиль, причому чітко показано можливість їх існування при числах Фруда $Fr_1 \gtreqless 1$, що дає змогу враховувати виникнення таких хвиль в процесі проектування різноманітних гідротехнічних та гідроенергетичних споруд.

2. Враховано нерівномірне розподілення глибини потоку під вершиною першої хвилі по ширині досліджуваного русла під час визначенні максимальної глибини, що дозволяє уточнити відмітки верху бокових стінок і бровок каналів, висоти гідротехнічних тунелів, труб, галерей тощо.

3. Проведено аналіз стосовно кінематичної та динамічної структур кноїдальних хвиль в характерних перерізах по довжині потоку дозволять описати вплив наведеного явища на кріплення берегів та дна русла в межах різних типів ГТС та ГЕС.

4. Розроблено математичну модель побудови профілю вільної поверхні кноїдальних хвиль з врахуванням затухання хвиль по довжині та негідростатики в початковому перерізі, що дозволить практично визначати довжину явища, що утворилося, для визначення розмірів бокових стінок і бровок каналів, гідротехнічних тунелів, труб, галерей і встановлення в них типу гідравлічного режиму, призначення конструкції кріплення нижнього б’єфу низьконапірних водоскидів.

Зазначені в дисертації положення, висновки і рекомендації можуть бути використані під час проектування, експлуатації і реконструкції гідротехнічних споруд, під час роботи яких можуть виникати кноїдальні хвилі. Основні розробки та рекомендації дисертаційної роботи використано в діяльності ТОВ «ЕМЗА» (АКТ про впровадження наукових результатів дисертаційного дослідження від 13 липня 2020 р.).

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота виконана особисто автором. До числа основних напрямків роботи, виконаних одноосібно здобувачем, необхідно віднести побудову математичної моделі кноїдальних хвиль з врахуванням негідростатики в початковому перерізі та затухання хвиль по довжині, визначення характерних ознак і умов існування наведеного явища, експериментальне вивчення геометричних, динамічних, кінематичних характеристик кноїдальних хвиль. Всі теоретичні, лабораторні дослідження для просторових умов на експериментальній установці було виконано особисто здобувачем.

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень та основні положення дисертації були оприлюднені та обговорені на наступних конференціях: науково-технічна конференція НУВГП «Сучасні проблеми гідроенергетичного та теплоенергетичного будівництва в Україні» (м. Рівне, 2012-2020 р.), міжнародна конференція «Strategy of Quality in Industry and Education» (м. Варна, Болгарія, 2014), міжнародна інтернет – конференція «Сучасні тенденції розвитку промисловості» (м. Хмельницький, 2014 р.), міжнародна науково-практична конференція «Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелами енергії в регіоні» (м. Львів, 2015 р., 2017 р.), міжнародна науково-практична конференція «Шляхи розвитку гідроенергетики, як основи для збільшення можливостей регулювання потужності генерації в ОЕС та потенціалу відновлювальної енергетики Україна» (м.Київ, 2015 р., 2017 р.), міжнародна наукова конференція «Current Issues of Civil and Environmental Engineering» (м. Кошице, Словаччина, 2017 р.), всеукраїнська науково-практична конференція «Водогосподарсько-енергетичний комплекс України: перспективи та шляхи його розвитку» (м. Рівне, 2018 р.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 19 наукових праць, з них 2 статті входять в науково-метричну базу Scopus, 9 статей у фахових виданнях України, 3 статті в іноземних періодичних виданнях, 5 публікацій є матеріалами наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Робота складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 111 найменувань на 167 сторінках та додатків на 8 сторінках. Загальний обсяг роботи становить 176 сторінок, який включає 36 таблиць та 54 рисунки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформовано мету та основні завдання дисертаційної роботи, визначено об'єкт, предмет і методи досліджень, викладено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів дисертації, а також вказано особистий внесок автора.

У **першому** розділі виконано огляд літературних джерел, присвячених питанням вивчення кноїдальних хвиль, визначення їх основних параметрів та розрахунку профілю вільної поверхні.

Дослідженням кноїдальних хвиль займалися такі вчені, як Д.Й. Кортевег, Г. де Фріс, Г.Х. Келеган, Г.В. Патерсон, Дж. Б. Келлер, М.О. Лаврентьєв, В.В. Смислов, О.О. Турсунов, С.М. Слісський, О.А. Рябенко, Р.Л. Вігель, Дж.П. Фентон, Ф. Серр, А.М. Бінні, Дж.С. Оркней, П.О. Девіс, Г. Ламб, В.Х. Хагер, Р. Рікуа, Х. Ракт-Мадукс, В. Літтман, Й. Іваса, Дж. М. Уільямс, Ю. Цучія, Т. Ясуда, Дж. Уізем, М. Хаятдавуді, Б. Сейферт, Р.Ч. Эртекін, Х. Шансон, О. Кастро-Оргаз, В.Г. Вереземський, Х. Чен та інші. У своїх роботах вказані вчені описують умови існування, випадки утворення кноїдальних хвиль та наводять теоретичні залежності для визначення основних параметрів наведеного явища.

У дисертаційній роботі особливу увагу було приділено існуючим теоретичним методам побудови профілю вільної поверхні кноїдальних хвиль та визначенню їх основних параметрів. Розглядалися наступні методи.

Метод розрахунку кноїдальних хвиль з врахуванням негідростатики в початковому перерізі (О.А. Рябенко) полягає у вираженні характеристик кноїдальних хвиль через параметри потоку в їх початковому перерізі 1 – 1 (рис. 1), в якому потік ввігнутий $(d^2h/dx^2>0)$.

З метою вирішення поставленої задачі було використано рівняння питомої енергії Серра довільного перерізу $E_{пер}=E$ для різкозмінного руху, виведеного стосовно умов плоскої задачі з диференціального рівняння руху Ейлера. За результатами інтегрування наведених диференціальних рівнянь було отримано їх загальний розв'язок у вигляді наступної системи рівнянь (1).

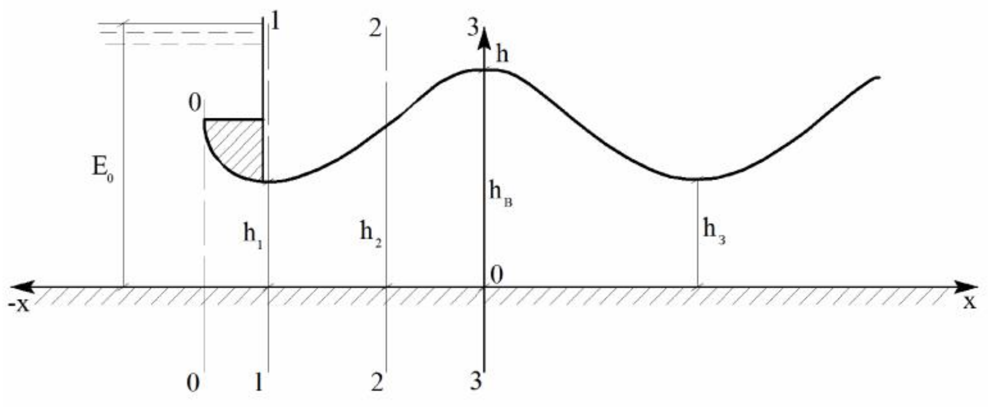


Рисунок 1 – Схема розрахунку кноїдальних хвиль з врахуванням негідростатики в початковому перерізі (О.А. Рябенко)

$$\left.\begin{aligned} &\eta = \frac{h}{h_1} = 1 + \left(\eta_в - 1\right)\cdot cn^2\left(\frac{x}{\Delta}, k\right), \\ &\Delta = 2\cdot h_1\sqrt{\frac{\eta_в \cdot Fr_1}{3\cdot\left(\eta_в^2 - Fr_1\right)}}, \\ &k = \sqrt{\frac{\eta_в\cdot\left(\eta_в - 1\right)}{\eta_в^2 - Fr_1}}, \\ &\eta_B = \frac{1}{2}\cdot\left[\frac{4\cdot s_1 - 1}{3} + Fr_1 + \sqrt{\left(\frac{4\cdot s_1 - 1}{3} + Fr_1\right)^2 - 4\cdot Fr_1}\right]. \end{aligned}\right\}, \qquad (1)$$

де η_1, η_B – відповідно відносні перша спряжена (початкова) та максимальна (під вершиною першої хвилі) глибини, k – модуль еліптичної функції Якобі амплітуди косинуса, Δ – деякий параметр хвилі в методі Рябенка.

Метод коливальних хвиль русла з обмеженою глибиною (Г. Ламб) полягає у видозміні результатів досліджень Д.У. Релея та Ж.В. Буссінеска таким чином, що вони перетворились в теорію коливальних хвиль русла з обмеженою глибиною. Розглядаючи задачу про усталений рух, було отримано наступне рівняння кількості руху:

$$\iint \rho u \cdot dx \cdot dh = -\rho \iint -\frac{\partial \varphi}{dx}\cdot dx \cdot dh - \rho \cdot \varphi_1 \cdot a,, \qquad (2)$$

де φ_1 – відповідає вільній поверхні, h – глибина на відстані x.

Розв’язком наведеного рівняння (2) є рівняння профілю вільної поверхні кноїдальних хвиль, що записується у вигляді:

$$\left.\begin{aligned} &h = h_1 + \left(h_B - h_1\right)\cdot cn^2\left(\frac{x}{\ }, k\right), \\ &= \sqrt{\frac{4\cdot h_B\cdot h_1\cdot l}{3\cdot\left(h_B - l\right)}}, \\ &k = \frac{h_B - h_1}{h_B - l}, \\ &l = \frac{c^2\cdot h_K^2}{g\cdot h_B\cdot h_1}. \end{aligned}\right\}, \qquad (3)$$

де h_1, h_B – перша спряжена (початкова) та максимальна (під вершиною першої хвилі) глибини, k – модуль еліптичної функції Якобі амплітуди косинуса, l, β – деякі параметри хвилі в методі Ламба.

Метод розрахунку параметрів кноїдальних хвиль як періодичних хвиль прогресуючих у воді (Р.Л. Вігель) застосовується у випадку, коли початкова глибина потоку становить менше однієї десятої довжини хвилі.

Рівняння профілю вільної поверхні кноїдальних хвиль записується у вигляді:

$$h = h_1 + H \cdot cn^2 \left[2 \cdot K(k) \cdot \left(\frac{x}{a} \right), k \right], \qquad (4)$$

де H – висота хвилі.

Довжина хвилі знаходиться за залежністю:

$$a = \left(\frac{13 \cdot h_1^3}{3 \cdot H} \right)^{1/2} \cdot k \cdot K(k). \qquad (5)$$

Повний еліптичний інтеграл першого порядку наближено можна визначити за наступною системою рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} & K(k) = \Lambda + \frac{1}{4} \cdot (\Lambda - 1) \cdot k'^2 + \frac{3}{16} \cdot (\Lambda - \frac{7}{16}) \cdot k'^4 + \frac{25}{256} \cdot (\Lambda - \frac{37}{30}) \cdot k'^6 \\ & k' = \sqrt{1 - k^2}, \\ & \Lambda = ln\left(\frac{4}{k} \right). \end{aligned} \right\}, \qquad (6)$$

У графоаналітичному методі з використанням кноїдальних функцій Якобі («Рекомендации для проектирования», під ред. Ф.Г. Гунько), кноїдальні хвилі розглядаються як статичні хвилі, розрахунок яких проводиться з врахуванням наступних припущеннях:

1) рідина вважається ідеальною;

2) горизонтальна складова швидкості u_X за глибиною потоку приймається рівномірно розподіленою, а вертикальна складова u_Y змінюється від нуля на дні до деякої величини на вільній поверхні потоку.

Вільна поверхня кноїдальних хвиль розраховується рівнянням:

$$\text{¦} = \frac{h}{h_1} = 1 + \left(\text{¦}_{в} - 1 \right) \cdot cn^2 \left(\frac{x}{a}, k \right). \qquad (7)$$

Детальний аналіз наукових праць і методів розрахунків параметрів та профілю вільної поверхні кноїдальних хвиль вищеназваних авторів, дав змогу зробити оцінку стану повноти вивченості теми досліджень та вимог сьогодення до поставленої мети роботи, що дозволило окреслити задачі досліджень.

У **другому розділі** описано конструкцію та принцип роботи експериментальної установки для гідравлічного моделювання кноїдальних хвиль (рис. 2), основні методи досліджень, умови планування та проведення експериментів. Експериментальні гідравлічні дослідження з нерухомими хвилями в умовах плоскої задачі проводилися в гідроенергетичній лабораторії кафедри гідроенергетики, теплоенергетики та гідравлічних машин Національного університету водного господарства та природокористування у великому дзеркальному лотоку (прямокутного перерізу) довжиною 19,4 м, шириною 1,0 м, висотою 2,0 м в голові, довжина якої складала 5,37 м, і висотою 1,2 м в дослідній частині довжина якої 9,56 м (рис. 2).

Дно лотока бетонне, з ретельно вирівняною поверхнею, виконане таким чином, що воно має горизонтальне положення по всій довжині. В кінцевій бетонній частині установки, дно має заокруглення, що плавно переходить в металеве дно. Наведена частина, що має довжину 1,1 м, необхідна для зрівноваження потоку перед його виходом в зливний бак.

Із напірного баку насосної станції вода по трубопроводу надходила через голову, проходячи через протарований трикутний мірний водозлив і потрапляла в лоток. Між трикутним водозливом та затвором встановлено заспокоювач потоку. По довжині лотока використовувалися 2 окремі затвори, конфігурацію нижньої частини яких можна було змінювати. В місцях розташування затворів було встановлено планки з донними п’єзометрами. Глибина води в нижньому б’єфі регулюється за допомогою спицевого затвора. Після того, як вода проходить по довжині лотока, вона потрапляє в відвідний резервуар, після якого, по системі трубопроводів поступає в приймальний резервуар насосної станції.

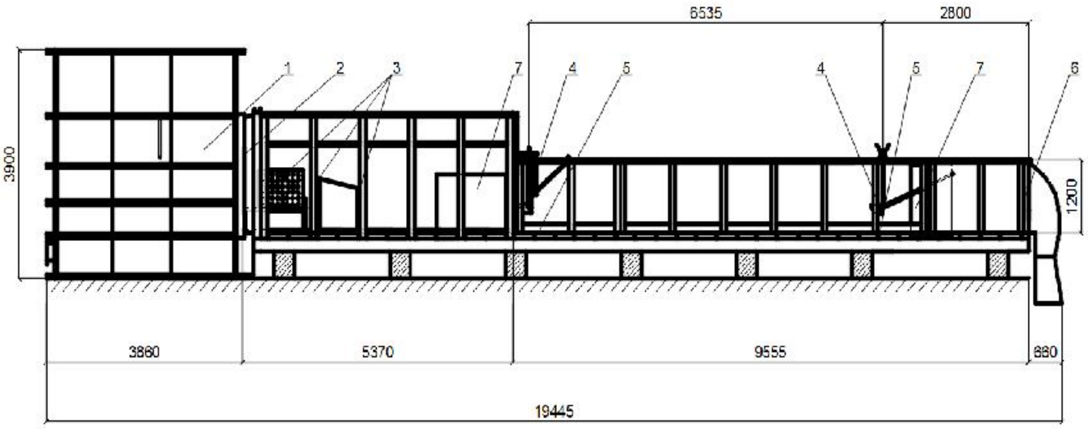


Рисунок 2 – Схема лабораторної установки:
1 – голова лотока, 2 – трикутний водозлив; 3 – заспокоювачі потоку; 4 – затвори;
5 – планка з приймальними отворами п’єзометрів; 6 – спицевий затвор;
7 – п’єзометричний щит

В процесі дослідження було виконано дві серії дослідів. Перша серія дослідів була проведена для дослідження кноїдальних хвиль при положенні робочого затвору (на відстані 5,37 м від голови лотока (рис. 2) та з п’єзометрами у кількості 57 шт. Друга серія дослідів була виконана при положенні робочого затвору (4) (на відстані 11,9 м від голови лотока) та з п’єзометрами у кількості 32 шт. На установці за допомогою системи п’єзометрів, виконаних із скляних трубок, пронумерованих та закріплених на загальних щитах (7), було виконано вимірювання величини п’єзометричного тиску по центру дна, оскільки саме по центру явища донний тиск найбільший. Приймальні отвори п’єзометрів (6) розташовувалися по осі лотока на рівні дна. Діаметр приймальних отворів п’єзометрів – 0,8 мм, відстань між п’єзометрами – 5 см. Приймальні отвори були з’єднані з п’єзометрами за допомогою гумових трубок. Нумерація п’єзометрів на установці була виконана за напрямком течії води.

При виконанні експериментальних досліджень було застосовано математичне планування експерименту, що дало можливість обрати оптимальний об’єм експериментальних робіт і забезпечити статистичні вимоги. Отримані експериментальним шляхом невідомі параметри дали можливість побудувати математичні моделі об’єкта досліджень і довести їх адекватність експериментальним даним.

У **третьому розділі** представлено результати експериментальних та теоретичних досліджень основних параметрів кноїдальних хвиль, а саме: максимальної та другої спряженої глибин, довжини хвиль та профілю вільної поверхні.

Під час експериментальних досліджень було виконано дві серії дослідів з параметрами, наведеними в таблиці 1.

Таблиця 1 – Основні параметри дослідів по вивченню кноїдальних хвиль

Назва явища	Кількість дослідів	Витрата *Q*, л/с	Параметри потоку в початковому перерезі кноїдальних хвиль			
			h_1, см	h_B, см	Fr_1	s_1
Кноїдальні хвилі в спокійному потоці	23	63÷158	8÷18	11,6÷22	0,28÷0,99	1,022÷ 1,087
Кноїдальні хвилі в бурхливому потоці	5	76÷141	8÷12	11,8÷16	1,01÷1,17	1,014÷ 1,078

За результатами експериментальних досліджень були визначені та побудовані профілі вільної поверхні та п’єзометричної лінії кноїдальних хвиль (рис. 3), епюри розподілу швидкостей (рис. 4) та тиску під вершинами та підошвами хвиль (рис. 5).

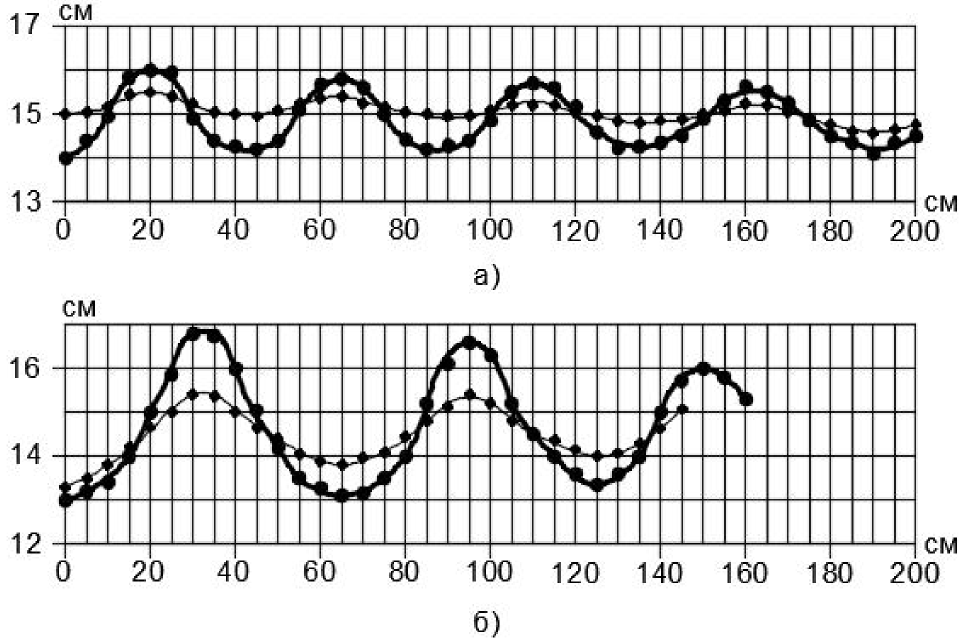
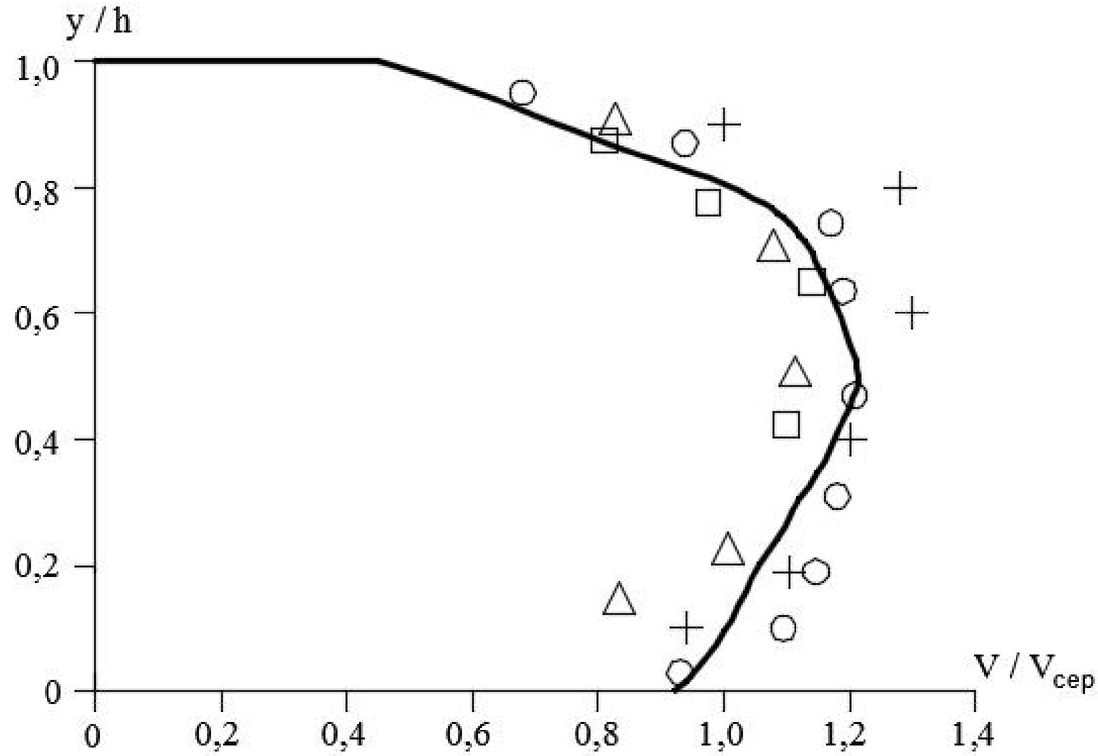
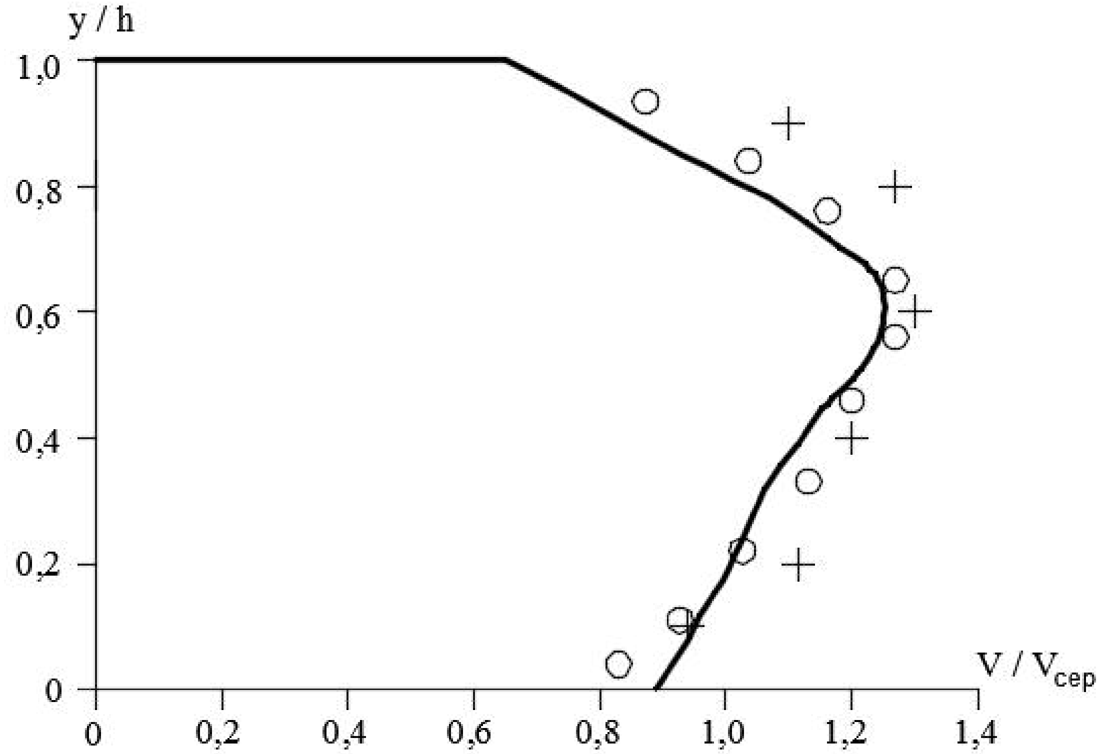


Рисунок 3 – Профілі вільної поверхні та п’єзометричні лінії кноїдальних хвиль:
а) дослід 14-94-1, б) дослід 13-117-2

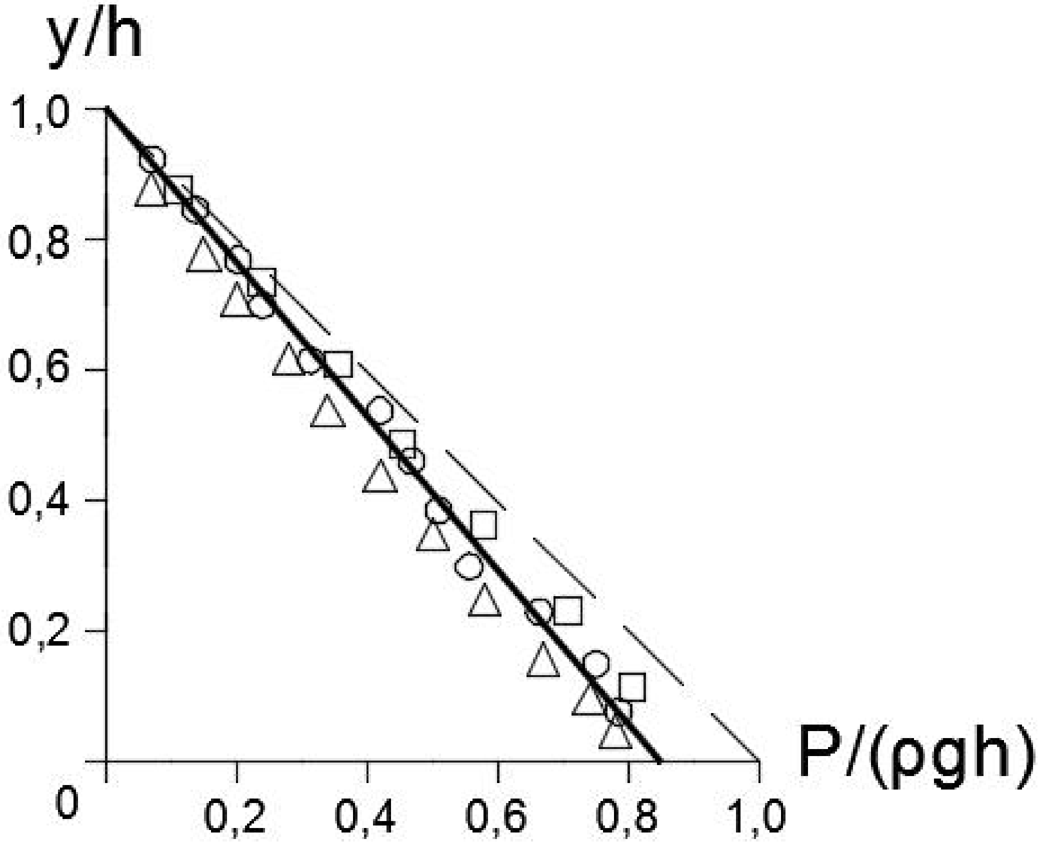


а)

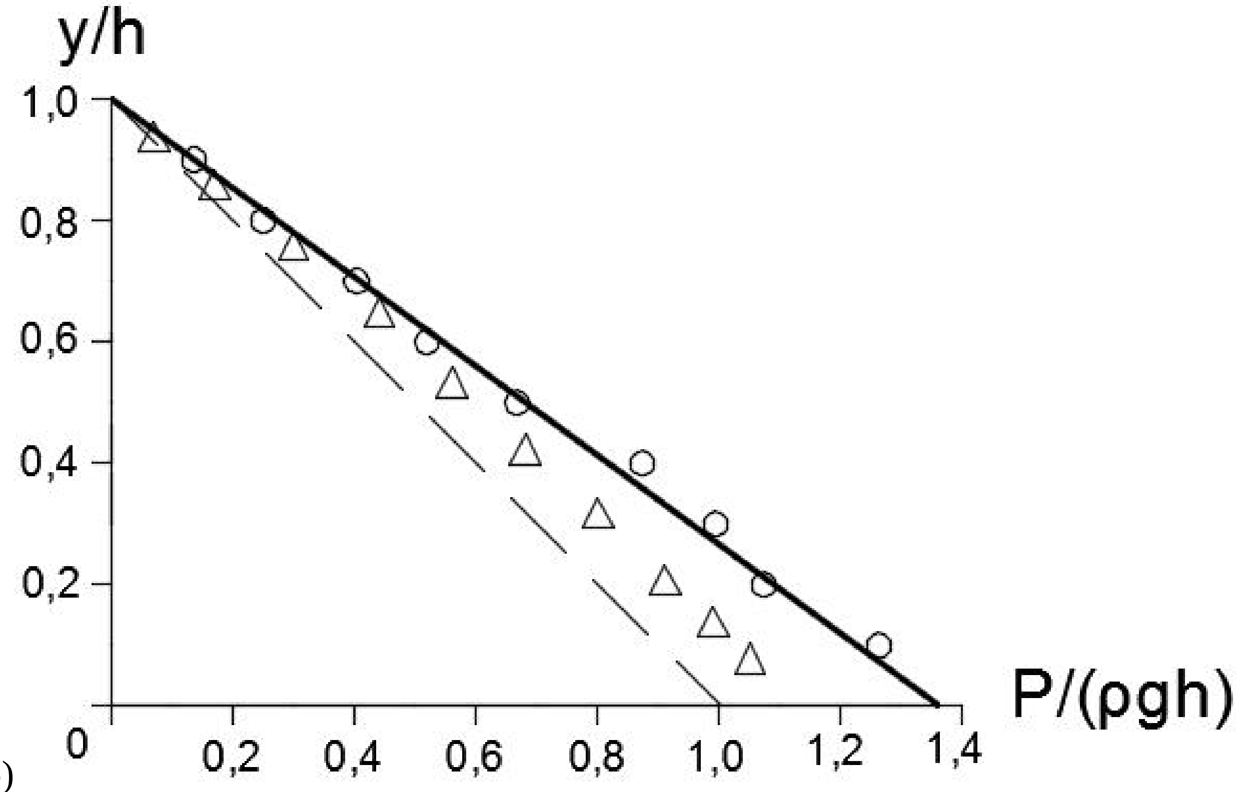


б)

Рисунок 4 – Епюри швидкості в безрозмірних координатах: а) вершина; б) западина; **—** – експериментальна епюра побудована для досліду №16-122-1; ○ – дослідні точки О.А. Рябенка; + – дослідні точки Р.Л. Вігеля; Δ – дослідні точки Д.К. Тейлора; □ – дослідні точки Дж.Р. Морісона і Р.К. Крука



а)



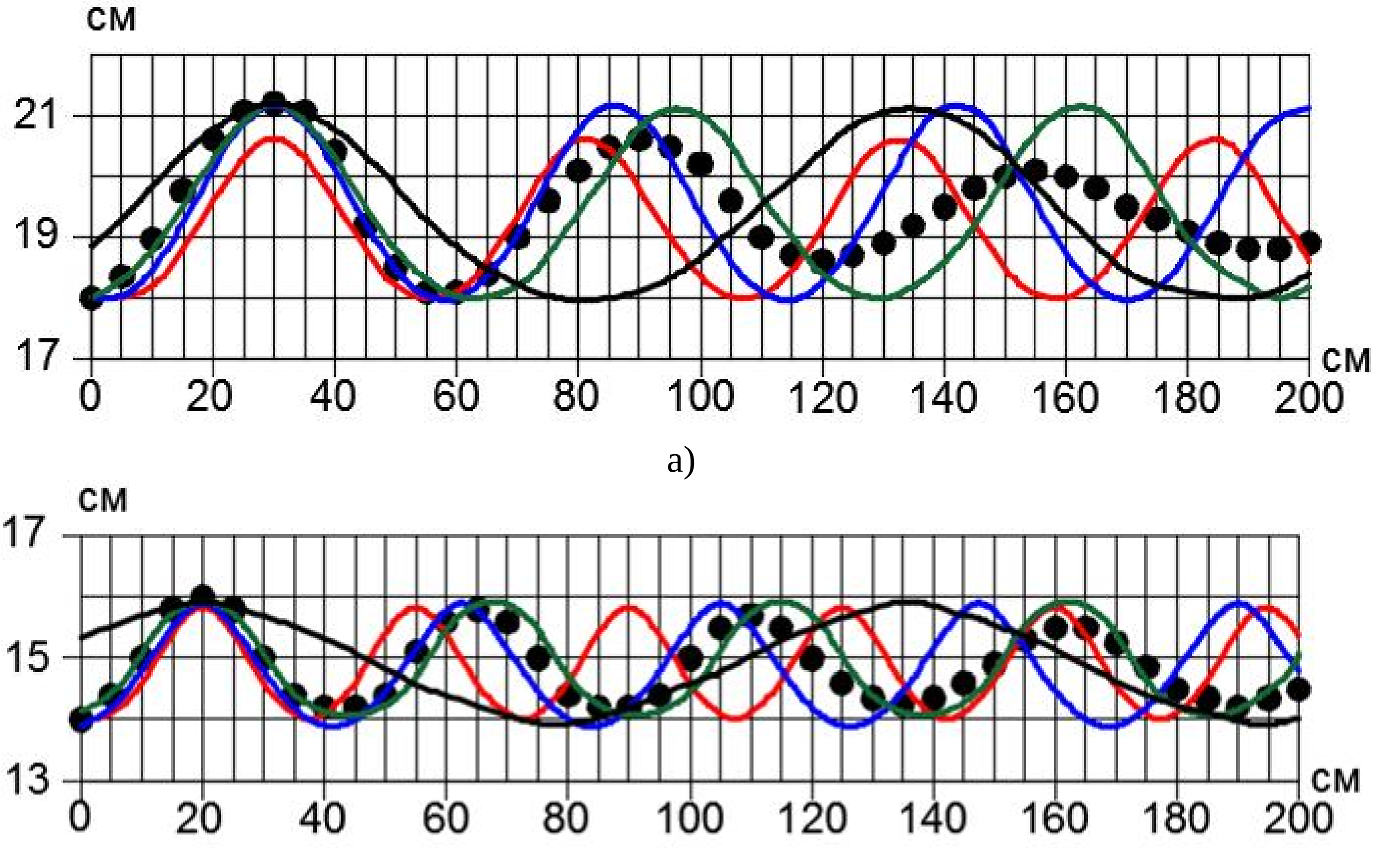
б)

Рисунок 5 – Розподіл гідродинамічного тиску: а) I-а вершина; б) I-а западина; ○ – дослідні точки значень гідродинамічного тиску, побудовані для досліду 9-79-2; — – усереднена епюра гідродинамічного тиску, побудована для досліду 9-79-2; - - - – гідростатичний розподіл тиску; Δ – дослідні точки Х. Шансона та Д.С. Монтеса; □ – дослідні точки А. Хафагі та С.З. Хаммада

У **четвертому розділі** було представлено розраховані криві вільної поверхні кноїдальних хвиль за розглянутими методами та проведено порівняння існуючих залежностей для визначення основних параметрів кноїдальних хвиль.

Порівняння теоретичних профілів вільної поверхні кноїдальних хвиль з експериментальними показало, що спостерігається незбіжність відносно положення гребенів та западин (окрім першого гребня). Невідповідність теоретичних з експериментальними профілями показує необхідність створення нового алгоритму розрахунку профілю вільної поверхні кноїдальних хвиль, що базується на залежностях наведених вище методів. Тому для отримання достовірних результатів необхідно враховувати можливе відхилення від гідростатики в початковому перерізі та затухання хвиль по довжині.

Порівняння профілів вільної поверхні кноїдальних хвиль показано на рис. 6.



а)

б)

Рисунок 6 – Порівняння теоретичних та експериментальних профілів вільної поверхні: а) дослід 18-145-1; б) дослід 14-93-1; ○ – дослідні точки профілю вільної поверхні; — – метод О.А. Рябенка; — – метод Р.Л. Вігеля; — – метод Г. Ламба; — – метод Ф.Г. Гунька

Рівняння профілю вільної поверхні кноїдальних хвиль записуються за допомогою еліптичної функції Якобі амплітуди косинуса *cn(z)*, та має наступний загальний вигляд:

$$h = f(h_1, h_B) \cdot cn(z(x), k), \tag{7}$$

де $f(h_1,h_B)$ – деяка функція, $z(x)$ – змінна величина.

В авторефераті наведені рівняння профілю вільної поверхні кноїдальних хвиль О.А. Рябенка (1), Г. Ламба (3), Р.Л. Вігеля(4), та Ф.Г. Гунька (7). Провівши аналіз наведених залежностей було встановлено, що рівняння Вігеля (4), з математичної точки зору, має найбільш правильну форму запису. Дане рівняння профілю вільної поверхні має складові, які можливо чітко виразити та які мають математичний або фізичний зміст.

Для визначення довжини першої хвилі кноїдальних було використано наступні залежності:

- формула Р.Л. Вігеля (5);
- формула Дж. Кенеді

$$\lambda = 2\pi \cdot Fr_1 \cdot h_1 . \quad (9)$$

- формули Х. Шансона:

$$\lambda = \frac{1{,}79}{\left(1 - Fr_2\right)^{0.614}} \cdot h_2 , \quad (10)$$

$$\lambda = 11{,}1 \cdot Fr_2^{\,2} \cdot h_2 , \quad (11)$$

де Fr_2 – число Фруда у перерізі з другою спряженою глибиною.

- формула О.О. Турсунова:

$$\lambda = 3{,}3 \cdot h_2 . \quad (12)$$

Співставлення результатів експериментальних даних автора та інших вчених з даними теоретичних розрахунків за наведеними залежностями показані в таблиці 2.

Таблиця 2 – Результати розрахунку теоретичної довжини кноїдальних хвиль

№ з/п	Шифр дослідів	Число Фруда Fr_1	Дослідні значення	Теоретичні значення				
			λ, м	λ, м (5)	λ, м (8)	λ, м (9)	λ, м (10)	λ, м (11)
1	12-69-1	0,2779	0,35	0,424	0,209	0,269	0,076	0,422
2	15-102-1	0,3134	0,45	0,440	0,295	0,347	0,109	0,538
3	14-94-1	0,3248	0,43	0,527	0,286	0,326	0,111	0,502
4	18-142-1	0,3539	0,62	0,585	0,400	0,425	0,175	0,637
5	18-145-1	0,3670	0,60	0,596	0,415	0,432	0,172	0,650
6	18-155-1	0,4189	0,60	0,695	0,474	0,448	0,208	0,660
7	13-117-2	0,6326	0,65	0,329	0,516	0,378	0,337	0,479
8	12-111-2	0,7224	0,65	0,455	0,544	0,372	0,376	0,449
9	10-100-2(1)	1,014	0,67	0,465	0,637	0,355	0,393	0,409
10	12-141-2	1,173	0,70	0,507	0,884	0,611	0,911	0,455

Проаналізувавши значення розбіжностей теоретичних та дослідних значень можна зробити висновок, що в подальших розрахунках визначення довжини хвилі буде проводитися за рівнянням О.О. Турсунова (12).

Ряд авторів наводять розрахункові залежності повного еліптичного інтегралу першого порядку *K(k)* (у випадку попереднього розрахунку модуля еліптичної функції Якобі *k*), серед яких можна виділити наступні:

1) формула Дж. Фентона:

$$K(k)=\frac{2}{\left(1+k^{1/4}\right)^2}\cdot ln\frac{2\cdot\left(1-k^{1/4}\right)}{\left(1-k^{1/4}\right)}. \qquad (13)$$

2) формула І.С. Градштейна та І.М. Рижика:

$$K(k)=\frac{\pi}{2}\cdot\left\{1+\left(\frac{1}{2}\right)^2\cdot k^2+\left(\frac{1\cdot 3}{2\cdot 4}\right)^2\cdot k^4+...+\left(\frac{(2\cdot n-1)!!}{2^n\cdot n!}\right)^2\cdot k^{2n}\right\}. \qquad (14)$$

3) формула Р.Л. Вігель (6).

Проаналізувавши наведені залежності було встановлено, що відносні похибки отриманих результатів не перевищували 15%. Залежність, що має найменше значення відносної похибки – це рівняння Дж. Фентона (13), тому його було прийнято в подальших розрахунках.

На відміну від гармонічних коливань, затухаючі коливання обумовлені дією сили опору руху. Тобто, у реальних системах із тертям (опором руху) з часом обов’язково відбувається втрата енергії коливань. Оскільки амплітуда коливань пропорційна квадратному кореню з їх енергії, реальні коливання в дійсності відбуваються із все меншою амплітудою.

Диференціальне рівняння вимушених затухаючих коливань записується у вигляді:

$$\frac{d^2y}{dt^2}+\frac{b}{m}\cdot\frac{dy}{dt}+\frac{k}{m}\cdot y=0, \qquad (15)$$

де *y* – відхилення від нульового рівноважного положення; *t* – час; *b* – амплітуда відхилень; *m* – маса; *k* – величина протилежна вектору швидкості.

Розв’язок диференціального рівняння (15) записується у наступній формі:

$$y=A_0\cdot e^{-\beta t}\cdot sin(\omega\cdot t+\varphi_0), \qquad (16)$$

де $A_0\cdot e^{-\beta t}$ – експоненційна амплітуда згасаючих коливань; A_0 – стала, що має сенс початкової амплітуди коливань при $t=0$; $\beta=b/(2m)$ – параметр, що характеризує затухання коливань; $\omega=\sqrt{\omega_0^2-\beta^2}$ – циклічна частота затухаючих коливань, відмінна від частоти ω_0 відповідних вільних коливань; φ_0 – деяке зсув фази.

Головна ідея пропонованої математичної моделі полягає у вираженні характеристик кноїдальних хвиль через параметри потоку в їх початковому перерізі 1-1 (рис. 1), в якому потік може бути або ввігнутим $(d^2h/dx^2>0)$, або паралельноструминним $(d^2h/dx^2=0)$. Але при цьому, розглядаючи дане явище, як систему затухаючих вимушених коливань, за початок відліку було прийнято переріз 2-2, що відповідає другій спряженій глибині h_2. Також при проведені серії попередніх лабораторних досліджень було встановлено, що у перерізах проведених через екстремальні точки з максимальною глибиною розподіл тиску по глибині виявляється близьким до параболічного закону. Цю особливість необхідно враховувати при побудові профілю вільної поверхні через використання еліптичної функції Якобі амплітуди косинуса $cn(z,k)$, при умові отримання кінцевих значень $cn(z,k)=[-1…1]$, а не в квадратній формі запису $cn^2(z,k)=[0…1]$. Провівши ряд спрощень і наближень, рівняння профілю вільної поверхні кноїдальних хвиль отримало наступний вигляд:

$$h = h_2 + \left\{ \left(h_B - h_2\right) \cdot e^{-\psi \cdot x} \cdot cn\left[4 \cdot K(k) \cdot \left(\frac{x}{\varphi \cdot \lambda} \right), k \right] \right\}, \qquad (17)$$

де *ψ* та *φ* – відповідно степінь затухання глибин потоку та довжин хвиль.

У відповідності з наведеним рівнянням (17) необхідно було виразити два степені затухання хвиль *ψ* та *φ* емпіричними залежностями. При цьому потрібно провести аналіз параметрів, що впливають на наведені величини. Такий аналіз базувався на отриманих результатах лабораторних досліджень з врахуванням особливостей розв’язку диференціального рівняння затухаючих вимушених коливань (16).

Під час розгляду залежності (16) було встановлено, що степінь затухання глибин потоку *ψ* кноїдальних хвиль доцільно описувати експоненційною функцією $e^{-\psi x}$. Експоненційний степінь затухання кноїдальних хвиль – параметр, що залежить від ряду величин $\psi = f(h_1, h_2, h_B, h_3, s_1, Fr_1, x)$. Наведений параметр доцільно визначати як усереднене значення експоненційних степенів затухання глибин під вершинами і западинами по відношенню до другої спряженої глибини h_2 (рис. 7).

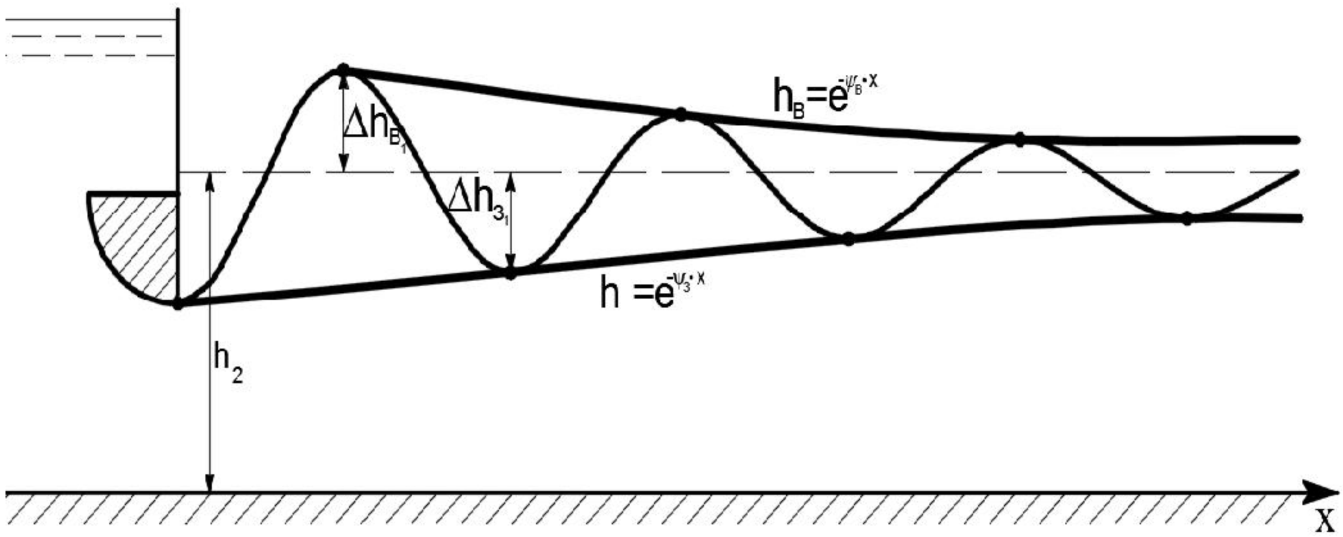


Рисунок 7 – Визначення експоненційних степенів затухання глибин під вершинами і западинами по відношенню до другої спряженої глибини h_2

Результати розрахунків показано в таблиці 3.

Проаналізувавши отримані результати було встановлено, що емпірично степінь затухання глибин кноїдальних хвиль можна записати у вигляді $\psi = \frac{1}{3} \cdot \left(\eta_B^{1/Fr_1} \right)$.

Визначення степеню затухання довжин хвиль *φ* проводилося за допомогою даних лабораторних досліджень, у відповідності з яким наведене затухання можна описати лінійною залежністю. Згідно аналізу даних було встановлено, що параметр *φ* залежить від ряду величин $\varphi = f(\lambda, n, x)$ і може характеризуватися як відносне збільшення довжини хвилі.

Проаналізувавши отримані результати було встановлено, що відносне збільшення довжини хвилі *φ* можна записати у вигляді $\varphi = 1 + 0{,}03 \cdot \left(\frac{x}{\lambda} \right)$.

Таблиця 3 – Результати розрахунків експоненційних степенів затухання глибин по відношенню до другої спряженої глибини h_2

Шифр досліду	Число Фруда, Fr_1	Коеф. негідр. s_1	$\|\psi_B\|$	$\|\psi_З\|$	$\|\psi_{СЕР}\|$
12-69-1	0,2779	1,05	0,641	0,269	0,455
15-102-1	0,3134	1,053	0,747	0,206	0,477
14-94-1	0,3248	1,071	0,972	0,141	0,557
18-142-1	0,3539	1,056	0,580	0,215	0,398
18-145-1	0,3670	1,074	1,014	0,408	0,711
18-155-1	0,4189	1,078	0,526	0,175	0,351
13-117-2	0,6326	1,022	0,370	0,580	0,457
12-111-2	0,7224	1,067	0,132	0,560	0,346
10-100-2(1)	1,014	1,014	0,180	0,540	0,320
12-141-2	1,173	1,058	0,342	0,610	0,476

Відповідно до проведених досліджень, математична модель розрахунку профілю вільної поверхні кноїдальних хвиль з врахуванням негідростатики у початковому перерізі та затухання хвиль по довжині можна записати в наступному вигляді:

$$\left.\begin{aligned}
&h = h_2 + \left\{ \left(h_B - h_2\right) \cdot e^{-\cdot x} \cdot cn\left[4 \cdot K(k) \cdot \left(\frac{x}{¨ \cdot a} \right), k \right] \right\},\\
&h_B = \frac{1}{2} \cdot h_1 \cdot k_{пр} \cdot \left[\frac{4 \cdot s_1 - 1}{3} + Fr_1 + \sqrt{\left(\frac{4 \cdot s_1 - 1}{3} + Fr_1 \right)^2 - 4 \cdot Fr_1} \right],\\
&a = 3{,}3 \cdot h_2,\\
&h_2 = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot h_1 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot s_1 - 1}{3} + 2 \cdot Fr_1} \cdot cos\left\{ \frac{®}{3} - \frac{1}{3} \cdot arccos\left[\frac{3 \cdot \sqrt{3} \cdot \sim_{02} \cdot Fr_1}{\sqrt{\left(\frac{4 \cdot s_1 - 1}{3} + 2 \cdot Fr_1 \right)^3}} \right] \right\},\\
&k = \sqrt{\frac{¦_в \cdot \left(¦_в - 1\right)}{¦_в^2 - Fr_1}},\\
&K(k) = \frac{2}{\left(1 + k^{1/4}\right)^2} \cdot ln \frac{2 \cdot \left(1 - k^{1/4}\right)}{\left(1 - k^{1/4}\right)},\\
&\cdot = \frac{1}{3} \cdot \left(¦_B^{1/Fr_1} \right),\\
&¨ = 1 + 0{,}03 \cdot \left(\frac{x}{a} \right).
\end{aligned}\right\}, \qquad (18)$$

За описаним методом побудови профілю вільної поверхні кноїдальних хвиль з врахуванням негідростатики у початковому перерізі та затухання хвиль по довжині були побудовані теоретичні профілі, які порівнювалися з експериментальними даними (рис. 8).

У **п’ятому розділі** наведено розрахунок параметрів кноїдальних хвиль для натурних умов (табл. 4-5), які формувалися у відвідному каналі Мигійської ГЕС (р. Південний Буг, Миколаївська обл.).

Таблиця 4. Вихідні дані натурних досліджень та розрахунків кноїдальних хвиль, що утворюються в нижньому б’єфі Мигійської ГЕС

№ з/п	Початкова глибина, h_1, м	Кількість працюючих агрегатів	Витрата, Q, м^3/с	Число Фруда в початковому перерізі, Fr_1	Коефіцієнт негідростатичності в початковому перерізі
1	0,8	1	13,3	0,086	1,07
2	0,8	2	26,6	0,344	
3	1,2	2		0,102	
4	0,8	3	39,9	0,773	
5	1,2	3		0,229	

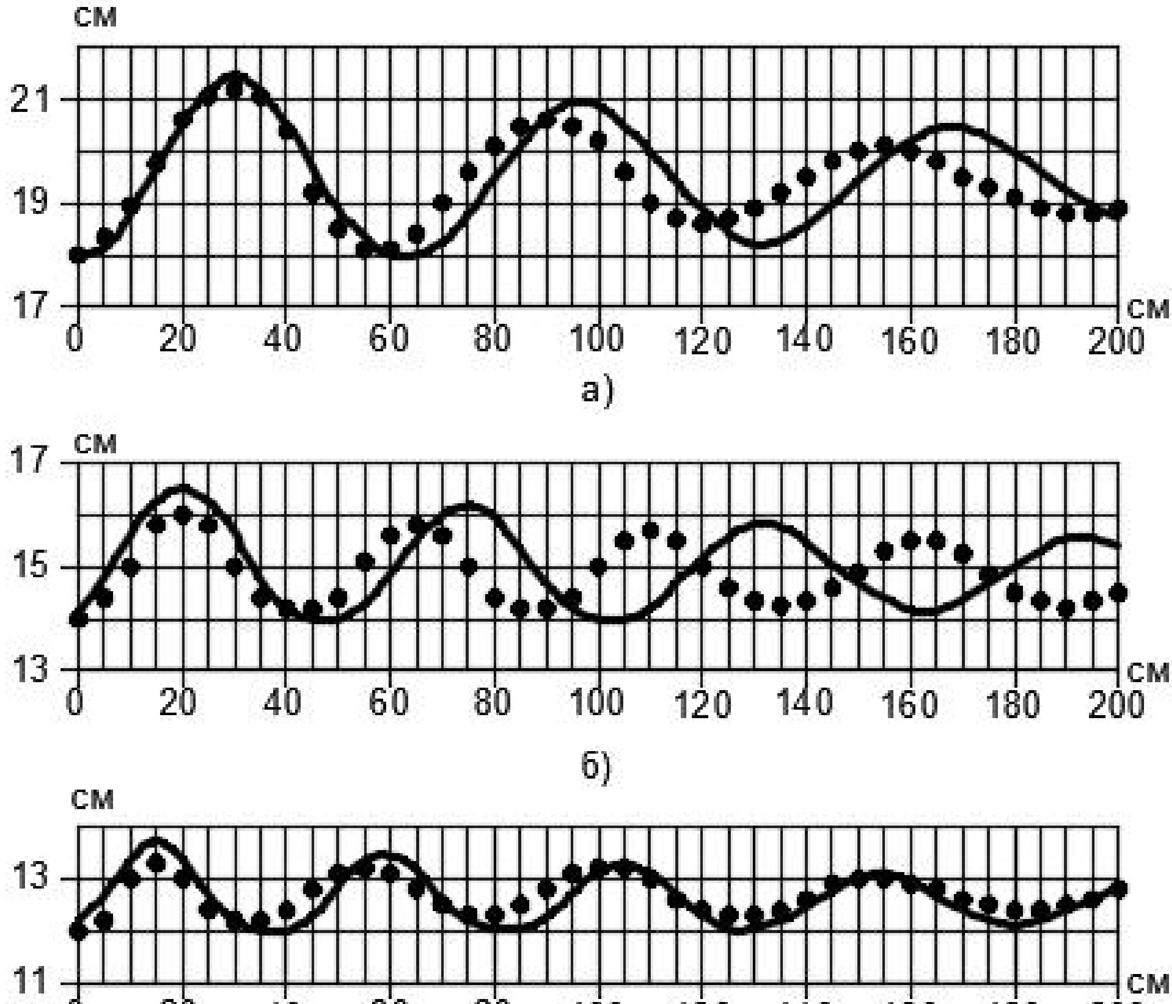


Рисунок 8 – Порівняння теоретичних та експериментальних профілів вільної поверхні: а) дослід 18-145-1; б) дослід 14-93-1; в) дослід 12-69-1; ○ – дослідні точки профілю вільної поверхні; ── – теоретичний профіль побудований за пропонованою математичною моделлю

Відповідно до чисел Фруда в початковому перерізі для отримання кривої вільної поверхні кноїдальних хвиль необхідно застосовувати метод, що враховує негідростатичний розподіл тиску в початковому перерізі та побудувати профіль вільної поверхні кноїдальних хвиль за системою рівнянь (18).

Таблиця 5. Дані натурних досліджень кноїдальних хвиль, що утворюються в нижньому б’єфі Мигійської ГЕС (в см)

№ з/п \ Відстань від початкового перерізу h_1, см	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900
1	80	90	92	83	90	84	84	86	-	-
2	80	92	97	83	86	91	84	84	-	-
3	120	132	140	135	123	128	130	125	123	123

Результати теоретичного розрахунку та натурного спостереження параметрів явища наведено в таблиці 6.

Таблиця 6. Порівняння дослідних та розрахункових значень параметрів кноїдальних хвиль, що утворюються в нижньому б’єфі Мигійської ГЕС

№ з/п	Глибина під вершиною першої хвилі, h_B, м		Друга спряжена глибина, h_2, м		Довжина хвилі, λ, м	
	Дослідні	Теоретичні	Дослідні	Теоретичні	Дослідні	Теоретичні
1	0,930	0,925	0,830	0,840	2,50	2,77
2	0,970	0,952	0,850	0,853	2,90	2,82
3	1,400	1,390	1,250	1,261	4,30	4,16
4	-	1,047	-	0,900	-	2,97
5	-	1,408	-	1,270	-	4,19

Співставлення теоретичних профілів вільної поверхні кноїдальних хвиль з експериментальними точками зображено на рисунках 9 та 10.

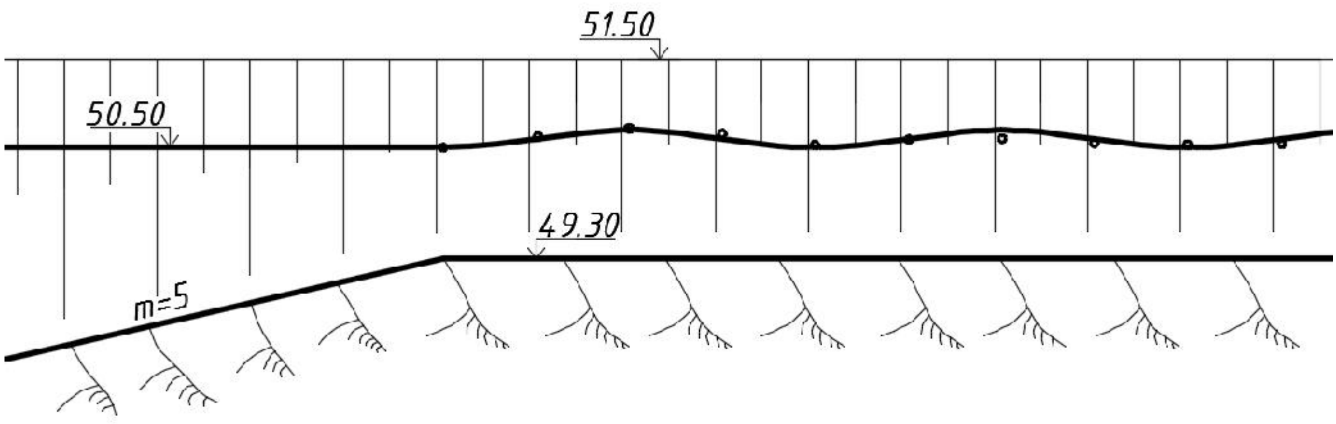


Рисунок 9 – Співставлення експериментальних даних з теоретичним профілем вільної поверхні, побудовано для досліду № 3

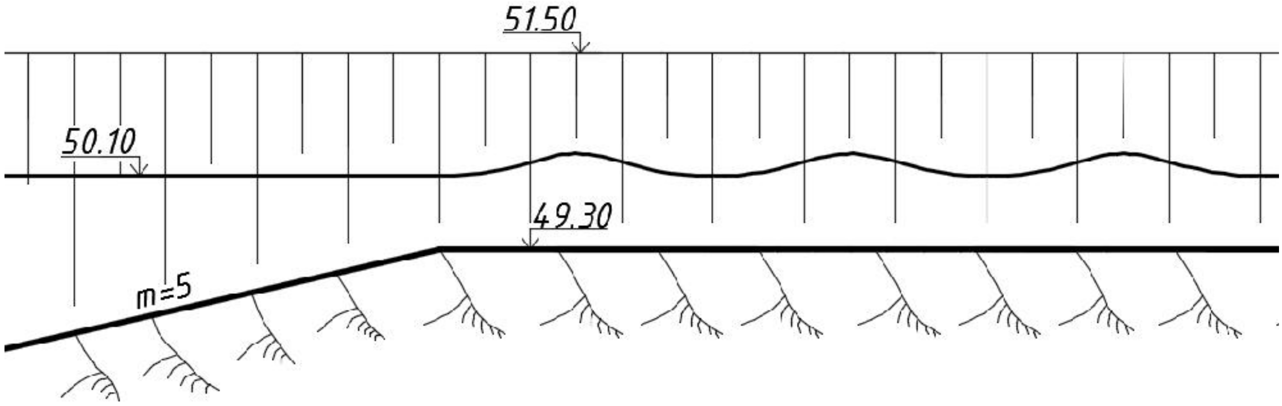


Рисунок 10 – Співставлення експериментальних даних з теоретичним профілем вільної поверхні, побудовано для досліду № 4

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено важливе науково-практичне завдання удосконалення методів розрахунку параметрів та побудови профілю вільної поверхні кноїдальних хвиль з врахуванням негідростатики в початковому перерізі та затухання хвиль по довжині потоку. Ці параметри необхідні для визначення та перевірки необхідного запасу висоти гребеня огороджувальних дамб, безнапірних тунелів та трубопроводів, відміток низу прогінних балок мостів і довжини кріплення в нижньому б’єфі. За результатами проведених досліджень було зроблено наступні висновки.

1. Шляхом порівняння теоретичних та експериментальних досліджень різних авторів було встановлено особливості, границі застосування та недоліки існуючих методів побудови кривих вільної поверхні кноїдальних хвиль. Основним недоліком розглядуваних методів, які запропонували О.О. Рябенко, Р.Л. Вігель, Г. Ламб, Ф.Г. Гунько є те, що вони не враховують затухання хвиль по довжині. В зв’язку з чим результати розрахунків основних параметрів, проведеними за наведеними методами, є заниженими (в межах 25%) в порівнянні з експериментальними даними.

2. На основі проведених експериментальних досліджень та аналізу результатів інших авторів було встановлено, що для визначення основних параметрів кноїдальних хвиль необхідно враховувати негідростатичний розподіл тиску в початковому перерізі та затухання хвиль по довжині цього явища.

3. Відомості щодо існування кноїдальних хвиль, отриманими різними дослідниками, надзвичайно суперечливі. Лабораторні дослідження, що були проведені, дозволили уточнити границі існування кноїдальних хвиль. При цьому було чітко встановлено їх існування при числах Фруда $Fr_1 \gtreqless 1$.

4. Аналіз проведених лабораторних досліджень кінематичної та динамічної структур кноїдальних хвиль в повній мірі підтвердили існуючі твердження та добре узгоджуються з даними, отриманими іншими вченими. Отримані дані дозволили чітко встановити, що в характерних перерізах кноїдальних хвиль присутній негідростатичний розподіл тиску по глибині потоку. При цьому у перерізах, що

відповідають вершинами спостерігаються тиски менші у порівнянні з гідростатичним розподілом, а в перерізах, що відповідають западинам – більші.

5. Дослідним шляхом було визначено значення коефіцієнта просторовості $k_{пр}=1,05$, що враховує нерівномірний розподіл глибини потоку по ширині лотока. Цей коефіцієнт дозволив вдосконалити рівняння Рябенко О.А. по визначенню глибини потоку під вершиною першої хвилі кноїдальних хвиль. Це дозволило підвищити точність розрахунку, так похибка при порівнянні теоретичних та експериментальних значень не перевищувала 10%.

6. На основі теоретичних досліджень та розрахунків було отримане рівняння профілю вільної поверхні кноїдальних хвиль з використанням диференціального рівняння вимушених затухаючих коливань.

7. Використовуючи існуючі методи побудови профілю вільної поверхні кноїдальних хвиль була розроблена математична модель побудови профілю вільної поверхні кноїдальний хвиль з врахуванням негідростатики в початковому перерізі та затухання хвиль по довжині у всьому діапазоні їх існування. Ця модель дозволяє визначити основні параметри явища та довжину, на якій відбувається повне затухання хвиль. Співставлення експериментальних і теоретичних профілів вільної поверхні кноїдальних хвиль показує збіжність результатів.

8. Під час проектування чи реконструкції гідротехнічних і гідроенергетичних об'єктів рекомендується використовувати метод розрахунку параметрів кноїдальних хвиль з врахуванням негідростатики у початковому перерізі та затухання хвиль по довжині.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті, що входять в науково-метричну базу Scopus:

1. O. Riabenko, V. Tymoshchuk, D. Poplavskyi, O. Halych. Methods of Automated Full-scale Measurement of Wave Parameters in Water Reservoirs of Pumped Storage Power Plants. *2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems, ESS 2020.* Proceedings, 2020. p. 154–157. *(Особистий внесок: збір інформації щодо утворення хвиль переміщення в межах роботи різних гідроакумулюючої електростанції)*.

2. Riabenko O., Kliukha O., Halych O., Poplavskyi D. Impact of Undular Jump Characteristics on Erosion of Tailrace Channel. *Proceedings of EcoComfort 2020. Lecture Notes in Civil Engineering.* Springer, Cham., 2020. Vol. 100. p. 362–370. *(Особистий внесок: здійснено теоретичний розрахунок профілів вільної поверхні хвилястого стрибка за пропонованою математичною моделлю та проведено порівняння з експериментальними даними)*.

Статті у наукових фахових виданнях України:

3. Поплавський Д. М. Вибір методів розрахунку параметрів білякритичних течій. *Вісник НУВГП. Технічні науки :* зб. наук. праць. Рівне, 2013. Вип. 2(62). С. 240–247.

4. Поплавський Д. М. Ітераційний метод розрахунку параметрів потоку на гребені водозливу. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»: Теорія і практика будівництва*. Львів, 2013. № 755. С. 316–321.

5. Рябенко О. А., Галич О. О., Поплавський Д. М. Побудова профілів вільної поверхні хвилястого стрибка, усамітненої та кноїдальних хвиль. *Вимірювальна обчислювальна техніка в технологічних процесах*. Хмельницький, 2014. № 2(47). С. 163–166. *(Особистий внесок: здійснено теоретичний розрахунок профілів вільної поверхні усамітненої та кноїдальних хвиль та проведено порівняння з експериментальними даними)*.
6. Рябенко О. А., Галич О. О., Поплавський Д. М. Експериментальні дослідження вільної поверхні білякритичних течій рідини. *Вісник НУВГП. Технічні науки* : зб. наук. праць. Рівне, 2015. Вип. 3(71). С. 94–99. *(Особистий внесок: опис методики проведення та результатів експериментальних досліджень профілю вільної поверхні кноїдальних хвиль в лабораторних умовах)*.
7. Рябенко О. А., Клюха О.О., Галич О. О., Поплавський Д. М. Використання диференціального рівняння затухаючих вимушених коливань при побудові профілю вільної поверхні кноїдальних хвиль. *Гідроенергетика України*. Київ, 2016. № 1–2. С. 55–58. *(Особистий внесок: здійснено теоретичний розрахунок профілів вільної поверхні кноїдальних хвиль за пропонованою математичною моделлю та проведено порівняння з експериментальними даними)*.
8. Рябенко О. А., Клюха О. О., Галич О. О., Тимощук В. С., Поплавський Д. М. Вплив хвильових явищ на роботу гідротехнічних споруд. *Вісник ОДАБА*. Одеса, 2017. Вип. № 66. С. 184–188. *(Особистий внесок: здійснено теоретичний розрахунок профілів вільної поверхні кноїдальних хвиль за пропонованою математичною моделлю та проведено порівняння з експериментальними даними)*.
9. Рябенко О. А., Клюха О. О., Галич О. О., Поплавський Д. М. Математичні моделі розрахунку профілю вільної поверхні хвилястого стрибка з врахуванням втрат енергії та затухання хвиль по довжині. *Гідроенергетика України*. Київ, 2018. № 1–2. С. 16–18. *(Особистий внесок: здійснено теоретичний розрахунок профілів вільної поверхні хвилястого стрибка за пропонованою математичною моделлю та проведено порівняння з експериментальними даними)*.
10. Поплавський Д. М. Розподіл актуальних швидкостей по довжині кноїдальних хвиль. *Вісник НУВГП. Технічні науки* : зб. наук. праць. Рівне, 2018. Вип. 2(82). С. 83–89.
11. Рябенко О. А., Тимощук В. С., Клюха О. О., Галич О. О., Поплавський Д. М. Вплив хвиль переміщення на роботу верхньої водойми Дністровської гідроакумулюючої електростанції. *Проблеми машинобудування*. Харків, 2019. Вип. 3(22). С. 21–25 *(Особистий внесок: збір інформації щодо утворення хвиль переміщення в межах роботи різних гідроакумулюючої електростанції)*.

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав:

12. Рябенко А. А., Галич О. А., Поплавский Д. М. Использование дифференциальных уравнений для расчетов профиля свободной поверхности волнистого прыжка. *Гидроинженерия*. Тбилиси, Грузия, 2013. № 1–2(15–16). С. 36–45. *(Особистий внесок: опис лабораторної установки та методики проведення експериментальних досліджень профілю вільної поверхні хвилястого стрибка в лабораторних умовах)*.
13. Riabenko A. A., Cherniuk V. V., Klyuha O. A., Halych O. A., Poplavskiy D. M. Mathematical and hydraulic modeling of undular jump. *Journal of civil engineering*,

environment and architecture. Rzescow, Poland, 2015. t. XXXII, z. 62 (3/II/15). p. 379–391. *(Особистий внесок: аналіз випадків утворення та умов формування хвилястого стрибка під час роботи гідротехнічних споруд)*.
14. Riabenko O., Chernyuk V., Klyuha O., Halych O., Poplavskiy D. Using of near-critical flows‘ theory in practical calculations. *Journal of civi engineering*. Rzescow, Poland, 2018. t. XXXV, z. 65(3/18). Pp. 121–129. *(Особистий внесок: збір інформації щодо існуючих математичних моделей, що описують різні типи білякритичних течій, здійснення розрахунку профілю вільної поверхні кноїдальних хвиль за існуючими методами)*.

Публікації у матеріалах міжнародних науково-технічних конференціях:

15. Ryabenko A. A., Klyuha O. A., Tymoshchuk V. S., Halych O. A., Poplavskiy D. M. Innovative tendencies in work management of energy systems by using HPSPP. *Strategy of Quality in Industry and Education :* X International Conference: proceedings. (Varna, Bulgaria, 6–13 June 2014). Dnepropetrovsk, 2014. Pp.141–150. *(Особистий внесок: збір інформації щодо роботи різних гідроакумулюючої електростанції)*.
16. Поплавський Д. М. Розрахунок профілю вільної поверхні кноїдальних хвиль. *Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелами енергії в регіоні :* матеріали наук.-практ. конф. з міжнар. участю (м. Львів, 2–3 квітня 2015 р.). Львів, 2015. С. 200–204.
17. Рябенко О. А., Галич О. О., Поплавський Д. М. Розрахунки режимів роботи нижнього б'єфу низьконапірних гідроелектростанцій при утворенні хвилястого стрибка. *Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелами енергії в регіоні :* матеріали наук.-практ. конф. з міжнар. участю (м. Львів, 2–3 квітня 2015 р.). Львів, 2015. С. 204–208. *(Особистий внесок: здійснено теоретичний розрахунок профілів вільної поверхні хвилястого стрибка за пропонованою математичною моделлю та проведено порівняння з експериментальними даними)*.
18. Рябенко О. А., Галич О. О., Поплавський Д. М. Розподіл актуальних швидкостей по довжині хвилеподібних білякритичних течій рідини. *Ресурси природних вод карпатського регіону. Проблеми охорони та раціонального використання :* матеріали наук.-практ. конф. з міжнар. участю (м. Львів, 26–27 травня 2016 р.). Львів, 2016 р. С. 208–211. *(Особистий внесок: дослідження розподілу швидкостей під вершинами та підошвами кноїдальних хвиль, побудова епюр розподілу швидкостей по глибині потоку кноїдальних хвиль)*.
19. Рябенко О. А., Клюха О. О., Галич О. О., Поплавський Д. М. Врахування особливостей білякритичних течій при лабораторних дослідженнях. *Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелами енергії в регіоні :* матеріали наук.-практ. конф. з міжнар. участю (м. Львів, 6–7 квітня 2017 р.). Львів, 2017. С. 235–239. *(Особистий внесок: здійснено теоретичний розрахунок профілів вільної поверхні кноїдальних хвиль за пропонованою математичною моделлю та проведено порівняння з експериментальними даними)*.

АНОТАЦІЯ

Поплавський Д. М. Удосконалення методів розрахунку параметрів кноїдальних хвиль з врахуванням негідростатики у початковому перерізі та затухання хвиль по довжині. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.23.16 – Гідравліка та інженерна гідрологія. – Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне, 2021.

В дисертаційній роботі науково обґрунтовано залежності та методи для визначення параметрів і побудови профілю вільної поверхні кноїдальних хвиль. За результатами теоретичних та експериментальних досліджень, було вдосконалено метод розрахунку параметрів кноїдальних хвиль та побудови профілю вільної поверхні з врахуванням негідростатики у початковому перерізі та затухання хвиль по довжині. Використовуючи результати натурних досліджень, розроблено рекомендації щодо розрахунків основних параметрів та кривої вільної поверхні кноїдальних хвиль, що утворюються в натурних режимах роботи відвідного каналу Мигійської ГЕС.

Розроблені рекомендації для методики розрахунку профілю вільної поверхні кноїдальних хвиль з врахуванням негідростатики у початковому перерізі та затухання хвиль по довжині, що дозволяє визначити максимальну та другу спряжену глибини і довжину хвиль наведеного явища. З практичної точки зору це дозволяє більш точно визначити необхідний запас для відмітки гребня гребель, огороджувальних дамб та довжину кріплення русла.

Зазначені в дисертаційній роботі положення та висновки можуть бути використані під час проектування, будівництва, експлуатації та реконструкції гідротехнічних споруд, в межах яких можуть формуватися кноїдальні хвилі, що дозволить підвищити надійність наведених об’єктів.

Ключові слова: кноїдальні хвилі, профіль вільної поверхні, максимальна глибина, експоненційний ступень затухання, негідростатичний розподіл тиску, епюра актуальних швидкостей, число Фруда, друга спряжена глибина.

АННОТАЦИЯ

Поплавский Д. М. Усовершенствование методов расчета параметров кноидальних волн с учетом негидростатики в начальном сечении и затухание волн по длине. – Квалификационная научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.16 – Гидравлика и инженерная гидрология. – Национальный университет водного хозяйства и природопользования, Ровно, 2021.

В диссертационной работе научно обоснованные зависимости и методы для определения параметров и построения профиля свободной поверхности кноидальних волн. В результате теоретических и экспериментальных исследований,

был усовершенствован метод расчета параметров кноидальних волн и построения профиля свободной поверхности с учетом негидростатики в начальном сечении и затухание волн по длине. Используя результаты натурных исследований, разработаны рекомендации по расчетам основных параметров и кривой свободной поверхности кноидальних волн, которые образуются в натурных режимах работы отводящего канала Мигейской ГЭС.

Разработанные рекомендации для методики расчета профиля свободной поверхности кноидальних волн с учетом негидростатики в начальном сечении и затухание волн по длине, позволяет определить максимальную и вторую сопряженную глубины и длины волн явления. С практической точки зрения это позволяет более точно определить необходимый запас для отметки гребня плотин, ограждающих дамб и длину крепления русла.

Указанные в диссертационной работе положения и выводы могут использоваться при проектировании, строительстве, эксплуатации и реконструкции гидротехнических сооружений, в пределах которых могут формироваться кноидальные волны, что позволит повысить надежность перечисленных объектов.

Ключевые слова: кноидальные волны, профиль свободной поверхности, максимальная глубина, экспоненциальная степень затухания, негидростатическое распределение давления, эпюра актуальных скоростей, число Фруда, вторая сопряженная глубина.

ABSTRACT

Poplavskyi D. M. Improvement of the methods for calculating the cnoidal waves parameters with taking into account the non-hydrostatics in the initial section and wave diminishing along the length. – Qualifying scientific work as a manuscript.

Thesis is for competition of a scientific degree of candidate of technical sciences in specialty 05.23.16 – hydraulics and engineering hydrology. – National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, 2021.

Thesis shows improvement of methods for calculating the parameters of the cnoidal waves. In the dissertation work, the theoretical and experimental researches of geometrical, kinematical and dynamical characteristics of cnoidal waves were carried out. It was detailed described the methods of hydraulic simulation of cnoidal waves in laboratory conditions and analyzed the results of experiments. Based on it, the dependencies and methods for determining parameters and calculating the free-surface profile of cnoidal waves were scientifically substantiated.

As a result of theoretical and experimental studies, the method of calculating the parameters and free-surface profile of cnoidal waves with taking into account the non-hydrostatics in the initial section and wave diminishing along the length, was improved. Using the results of field studies, recommendations for calculating the main parameters and free-surface curve of the cnoidal waves in tail race channel of the Migiya hydropower plant were developed.

The developed recommendations for the method of calculating the profile of the free-surface of cnoidal waves with taking into account the non-hydrostatics in the initial section and wave diminishing along the length, allows to determine the maximum and second conjugated depths and wavelengths of the cnoidal waves. From a practical point of view, this allows more accurate determine the required margin for the level of the dam and dikes and length of the channel bank protection.

Mentioned positions and conclusions in the dissertation can be used in the design, construction, operation and reconstruction of hydraulic structures, within which a phenomenon of undular jump can be formed, which will increase their reliability.

Keywords: cnoidal waves, free surface profile, maximum depth, exponential decay, non-hydrostatic pressure distribution, current velocity diagram, Froude number, second conjugate depth.

Підписано до друку 19.03.2021 р. Формат 60×90$^{1}/_{16}$.
Ум.-друк. арк. 0,9. Тираж 100 прим.
Зам. № 5529.

Видавець і виготовлювач
Національний університет
водного господарства та природокористування,
вул. Соборна, 11, м. Рівне, 33028.

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного
реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів
видавничої продукції РВ № 31 від 26.04.2005 р.