МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВОДНОГО ГОСПОДАРСТВА ТА ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

M

КОРНІЙЧУК ВОЛОДИМИР ІВАНОВИЧ

УДК 532.532.2

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ГІДРАВЛІЧНОГО РОЗРАХУНКУ ВОДОЗЛИВІВ З ТОНКОЮ СТІНКОЮ НА ОСНОВІ ЗАКОНІВ ЗБЕРЕЖЕННЯ ЕНЕРГІЇ ТА КІЛЬКОСТІ РУХУ

05.23.16 – Гідравліка та інженерна гідрологія

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Рівне – 2019

Дисертацією є рукопис

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

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор Хлапук Микола Миколайович, Національний університет водного господарства та природокористування, директор Навчально-наукового інституту водного господарства та природооблаштування
 Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор Чернюк Володимир Васильович,

Національний університет "Львівська політехніка", завідувач кафедри гідравліки і сантехніки;

кандидат технічних наук, доцент Дупляк Олена Віталіївна, Київський національний університет будівництва і архітектури, доцент кафедри водопостачання та водовідведення

Захист відбудеться "<u>23</u>" <u>травня</u> 2019 р. о _____ 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: м. Рівне, вул. Олекси Новака, 75.

Автореферат розісланий "<u>22</u>" <u>квітня</u> 2019 року

Учений секретар спеціалізованої вченої ради, к.т.н., доцент

A

В.П. Востріков

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Гідротехнічні споруди призначенні для використання водних ресурсів, боротьби та попередження шкідливої дії водної стихії. За їх допомогою можна безпосередньо керувати водотоками і водоймами у відповідності з вимогами користувачів. При проектуванні гідротехнічних споруд доводиться часто проводити гідравлічні розрахунки водозливів, особливо у випадку водозливів з вертикальною тонкою стінкою. Вони широко застосовуються у водогосподарській і меліоративній практиках, гідротехнічних лабораторіях, де необхідна висока точність визначення витрати води. Водночас, вони є одним з найпростіших видів мірних засобів.

Актуальність теми. На даний час, не зважаючи на великий об'єм виконаних теоретичних та експериментальних досліджень, задача розрахунку водозливів, в більшості випадків, зводиться лише до визначення його пропускної здатності, шляхом введення в рівняння водозливу емпіричних коефіцієнтів витрати, що отримані при досліджені експериментальних моделей водозливів малих розмірів при зміні діючих факторів в незначному діапазоні. При цьому, не враховано масштабний ефект переходу від моделей водозливів, для яких отримані емпіричні коефіцієнти, до реальних споруд. Розраховані за різними залежностями витрати, для одних і тих самих умов, можуть значно відрізнятись між собою.

Не зважаючи на прийняті, перевіренні методики розрахунку гідротехнічних споруд, аварії на гідротехнічних об'єктах продовжують траплятись, що призводить до катастрофічних наслідків. Тому удосконалення методик гідравлічного розрахунку таких споруд актуальне та потребує врахування допущенних недоліків. Виникає необхідність в розробці математичної моделі, яка б використавши нові теоретичні підходи, що ґрунтуються на законах збереження енергії та кількості руху, врахувала б існуючі недоліки при виборі емпіричного коефіцієнту витрати водозливу та дала б можливість за діючими факторами визначити, не тільки його пропускну здатність, а й основні параметри потоку в межах водозливу. Розроблена математична модель дозволить удосконалити методику гідравлічного розрахунку гідротехнічних споруд.

Зв'язок роботи з науковими програмами. Робота виконана згідно з пріоритетними напрямками розвитку науки і техніки, визначеними в Законі України від 26 листопада 2015 року № 848-VIII «Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки» напрямку «раціональне природокористування». Роботу виконано згідно з планом держбюджетної НДР на тему: «Вдосконалити конструкції гідротехнічних споруд і методи їх розрахунку» (номер державної реєстрації – 0112U007223), в якій автор брав участь як співвиконавець.

Мета і задачі досліджень. Метою дисертаційних досліджень є удосконалення методів гідравлічного розрахунку водозливів з тонкою стінкою на основі законів збереження енергії та кількості руху.

Для реалізації поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

– виконати аналіз сучасного стану методів гідравлічного розрахунку водозливів з тонкою стінкою, визначити основні діючі фактори;

встановити теоретичні залежності для визначення граничних умов рівняння збереження енергії, а саме: енергії потоку над кромкою водозливу та втрат напору в межах водозливу і на їх основі отримати рівняння збереження енергії потоку для водозливу з тонкою стінкою;

 встановити теоретичні залежності для визначення граничних умов рівняння кількості руху, а саме: силу тиску в створі водозливної стінки, силу опору стисненню потоку і на їх основі отримати рівняння кількості руху для водозливу з тонкою стінкою;

– експериментально дослідити вплив основних діючих факторів на граничні умови рівнянь збереження енергії та кількості руху потоку й перевірити адекватність отриманих теоретичних залежностей для їх визначення;

– розробити математичну модель руху потоку в межах водозливу на основі законів збереження енергії та кількості руху та, використовуючи її, удосконалити методи гідравлічного розрахунку водозливів з тонкою стінкою.

Об'єкт досліджень: рух потоку в межах водозливу з тонкою стінкою.

Предмет досліджень: методи гідравлічного розрахунку водозливів з тонкою стінкою.

Методи досліджень. Застосовувались методи математичного й фізичного моделювання гідравлічних параметрів потоку в межах водозливу з тонкою стінкою з використанням математичного планування експерименту. Гідравлічні параметри потоку визначали за допомогою стандартних апробованих методик. Використано методи статистичної обробки отриманих експериментальних результатів для підтвердження адекватності запропонованих математичних моделей руху потоку в межах водозливу.

Наукова новизна отриманих результатів.

– вперше розроблено математичну модель руху потоку в межах водозливу з тонкою стінкою, яка ґрунтується на основі законів збереження енергії та кількості руху потоку і експериментально доведено її адекватність;

– вперше отримано залежності для визначення енергії потоку в перерізі над кромкою водозливу та втрат напору в межах водозливу, які є граничними умовами рівняння збереження енергії потоку для водозливу з тонкою стінкою;

 вперше отримано залежності для визначення граничних умов рівняння кількості руху потоку: сили п'єзометричного тиску в створі водозливної стінки і силу опору стисненню потоку, що дало можливість отримати рівняння кількості руху потоку в межах водозливу з тонкою стінкою;

– доведено можливість використання законів збереження енергії і кількості руху та отриманої математичної моделі руху потоку в межах водозливу з тонкою стінкою для удосконалення методів його гідравлічного розрахунку.

Практичне значення одержаних результатів. Удосконалений метод гідравлічного розрахунку водозливів використано при розробці методики розрахунку водозливів з тонкою стінкою. Розроблену методику використано для оцінки проектного рішення виконаного ПАТ «Укрводпроект» щодо гідравлічних параметрів водозливної греблі ГЕС Сендже в районі населеного пункту Сендже на р. Велє в континентальній частині Республіки Екваторіальна Гвінея. На основі проведених експериментальних досліджень в лабораторії кафедри гідротехнічного будівництва та гідравліки встановлено, що проектна конструкція має занижену пропускну здатність. На основі запропонованої методики гідравлічного розрахунку водозливів розроблено проектне рішення, яке забезпечує пропускну здатність водозливної греблі шляхом пониження відмітки її порогу.

Розроблену методику розрахунку водозливів з тонкою стінкою передано до

Державного підприємства «Проектно-вишукувальний інститут «Рівнедіпроводгосп» для подальшого використання при проектуванні гідротехнічних споруд.

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати досліджень отримано автором самостійно, зокрема:

 на основі законів збереження енергії та кількості руху потоку розроблено математичну модель руху потоку в межах водозливу з тонкою стінкою;

виконано теоретичні та експериментальні дослідження впливу основних діючих факторів на втрати напору в межах водозливу, розподіл та силу п'єзометричного тиску в створі водозливу, силу опору стисненню потоку;

– проведено статистичну обробку експериментальних даних та доведено адекватність отриманих рівнянь;

- удосконалено методи гідравлічного розрахунку водозливів з тонкою стінкою.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідали та обговорювали на таких конференціях: на міжнародній науковопрактичній конференції «Роль мелиорации водного хозяйства в инновационном развитии АПК» (Москва, 2012 р.); на всеукраїнській науковій конференції «Сучасні проблеми математичного моделювання та обчислювальних методів» (Рівне 2013 р.); на міжнародній науково-практичній конференції «Вдосконалення гідротехнічних систем» (Херсон, 25-26 травня 2017 р); на міжнародній науково-технічних систем» (Херсон, 25-26 травня 2017 р); на міжнародній науково-технічній конференції «Гідротехнічне і транспортне будівництво» (Одеса, 1 червня 2017 р); на XVIth International Scientific Conference Košice-Lviv-Rzeszów "Current Issues of Civil and Environmental Engineering Košice-Lviv-Rzeszów" (6-8 September 2017, Kosice, Slovakia); на науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу НУВГП з 2009 по 2018 рр.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 14 наукових праць, з них 7 статей у фахових виданнях України, три статті в іноземних періодичних виданнях, одна публікація в матеріалах іноземних конференцій та двоє тез доповідей.

Структура та об'єм дисертаційної роботи. Робота складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 128 найменувань на 9 сторінках. Загальний обсяг роботи становить 155 сторінок, який включає 21 таблицю та 52 рисунки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформульовано мету та завдання роботи, об'єкт і предмет досліджень, наведено основні положення, які лягли в основу наукових досліджень, показано наукову новизну роботи, визначено практичну цінність результатів та особистий внесок здобувача.

У **першому розділі** виконано огляд літературних джерел, присвячених питанням класифікації та області застосування водозливів, дослідженню пропускної здатності водозливів з тонкою стінкою і визначенню основних діючих факторів, що впливають на його гідравлічні параметри.

Розробкою теорії руху потоку через водозливи в різні часи займались видатні вітчизняні та закордонні вчені: Смислов В. В., Березінський О. Р., Павловський М. М., Сухомел Г. Й., Пікалов Ф. І., Модзалевський А. І., Чертоусов М. Д., Кумін Д. І., Офіцеров А. С., Роуз Х. (Rouse Hunter), Бос М. Г. (Bos M. G.), Хагер Г. В. (Hager H. W.), Герші Р. В (Herschy R. W.), В. Кригер (W. P. Creager) та ін. Дослідження пропускної здатності водозливів з тонкою стінкою розпочалися ще на початку XIX ст. з експериментів М. Кастеля (М. Castel), Ф. Д'Обюссона (F. D'Aubuisson), М. Понселе та М. Лесброса (М. Poncelet and V. Lesbros). Ґрунтовні експериментальні дослідження, які й досі використовуються в практиці розрахунків та проектування проведенні Г. Базеном (Н. Bazin). Також, заслуговують уваги роботи М. Еглі (М. Hegly), Д. Френсіса (James B. Francis), А. Фтелі та Ф. Стерна (А. Fteley and F. Stearns), Г. Кінга (H. W. King), Кіндсвотера – Картера (Kindsvater – Carter), T. Ребока (T. Rehbock), P. P. Чугаева, К. Кандасвамі (К. Kandaswamy), Г. Роуз (H. Rouse), К. Сваммі (К. Swamee), Х. Афзалімер (H. Afzalimehr).

Основною характеристикою пропускної здатності водозливу, що використовується при його розрахунку, є коефіцієнт витрати m_0 . Виконаний порівняно короткий аналіз залежностей для визначення коефіцієнта m_0 вказав на значне розходження результатів, обрахованих за різними залежностями, що свідчить про недостатню вивченість даного питання. Приведений на рис. 1 графік зміни коефіцієнта витрати водозливу залежно від співвідношення діючих факторів: напору H та висоти водозливної стінки c_s , підрахований за залежностями, які найбільш зустрічаються в практиці, є яскравим тому прикладом. Для порівняння, автором додатково наведено на цьому рисунку графік, розрахований за власною удосконаленою методикою (позиція 17).



8 – Кіндсвотера – Картера; 9 – Т. Ребока; 10 – ТШІА;11 – Інституту м. Тулузи;
12 – Р. Чугаева;13 – К. Кандасвамі, Г. Роуза; 14 – К. Сваммі; 15 – Х. Афзалімера;
16 – С. Багері; 17 – за удосконаленою методикою розрахунку автора

При визначенні зміни енергії потоку та втрат напору в межах водозливу викоритеоретичні експериментальні дослідження С. Багері стано та (S. Bagheri), М. Хайдерпур (M. Heidarpour), О. Кастро-Оргаза (O. Castro-Orgaz), Дж. Гіральдза (J. V. Giraldez) та Л. Аюзо (L. Ayuso). При визначенні розподілу п'єзометричного тиску в створі водозливу використано теоретичні та експериментальні дослідження Н. Раяратнама (N. Rajaratnam), Д. Муралідара (D. Muralidhar), А. Рамамуті (A. Ramamurthy), К. Гонзалеса (C. Gonzalez), Г. А. Амбарцумяна.

Критичний аналіз наукових праць, вищезазначених авторів, дав змогу зробити оцінку стану повноти вивченості теми досліджень та вимог сьогодення до поставленої мети роботи, що дозволило окреслити задачі досліджень.

На рис. 2 наведено блок-схему передбачених в роботі досліджень з відповідними умовними позначеннями.

У другому розділі описано основні методи досліджень, умови планування та проведення експериментів.

Лабораторні дослідження, на відміну від натурних (в польових умовах), дозволяють виконати експерименти в широкому діапазоні зміни основних діючих факторів водного потоку. Крім цього, точність експерименту в лабораторних умовах значно вища, ніж в натурних. Лабораторні експериментальні гідравлічні дослідження проведено в лабораторії кафедри гідротехнічного будівництва та гідравліки Національного університету водного господарства та природокористування в дзеркальному лотку.

В основу моделювання водозливу покладено розробки І. І. Леві, В. М. Ляхтера, О. М. Прудковського, а умови проведення експериментальних лабораторних досліджень прийнято на основі теорії планування експериментів, розробленої Ю. П. Адлером, О. В. Марковою, Ю. В. Грановським.

Ширина робочої частини ділянки лотка складала 20 см, а довжина – 4,0 м, що забезпечило створення нормальних умов руху потоку в межах водозливу. Висота стінок лотка дорівнювала 1,0 м. В лотку було встановлено вертикальну тонку стінку, виконану із металевої пластини товщиною 5,0 мм з кромкою завтовшки 2,0 мм (рис. 3). Висота водозливної стінки зі сторони верхнього б'єфу змінювалася за рахунок зміни положення дна лотка, згідно з умовами проведення досліджень. Для запобігання утворення вакууму за тонкою стінкою водозливу, з нижнього б'єфу було забезпечено вільне надходження повітря під струмину.

Прийнята конструкція моделі водозливу дала можливість проводити дослідження при числах Рейнольдса в межах від 17954 до 764797, що відповідають квадратичній зоні опору потоку, числах Фруда в перерізі перед водозливною стінкою – від 0,003 до 0,93, що відповідають спокійному режиму потоку і відношенні основних діючих факторів H/c_{e} – від 0,11 до 9,0, що охоплює діапазон роботи водозливів з тонкою стінкою в реальних умовах.

Відліки фізичної поверхні дна, водного потоку та елементів моделей водозливів в прийнятих створах лотка вимірювали за допомогою тастера закріпленого на рухомій каретці лотка. Для визначення розподілу п'єзометричного тиску в створі водозливу, на боковій стінці лотка встановлено п'єзометричні датчики, з'єднані із мікроманометром, по показах якого знімались відліки положення нижнього меніску в п'єзометричних трубках. 1. Аналіз стану теоретичних та експериментальних досліджень руху потоку в межах водозливу. Основні діючі фактори та їх вплив на граничні умови



Рисунок 2 – Блок-схема досліджень:

 \vec{P}_1 – сила тиску в перерізі 1–1, H; E_1 , E_2 – питомі енергії потоку в перерізах 1–1 та 2–2, c_M ; p_e , \vec{P}_e – розподіл та сила тиску в межах струмини над кромкою водозливу, H/c_M^2 , H; p_H , \vec{P}_H – розподіл та сила тиску в межах водозливної стінки, H/c_M^2 , H; \vec{P}_{ζ_X} – сила опору стисненню потоку в межах водозливу, H; h_w – втрати напору в межах водозливу, c_M ; Ke, KH – відповідно коефіцієнти, що входять в математичні моделі розподілу тиску в струмині та в межах водозливної стінки; ζ – коефіцієнт, що враховує внутрішні опори руху рідини в межах водозливу



Рисунок 3 – Схема експериментальної установки:

1 – трубопровід для подачі води в лотік; 2 – засувка для регулювання витрати води;
3 – напірний бак; 4 – решітка для гасіння енергії потоку в напірному баку; 5 – мірний трикутний водозлив; 6 – п'єзометр мірного трикутного водозливу; 7 – дзеркальний лотік; 8 – камера для гасіння енергії падаючого потоку; 9 – решітки для гасіння енергії потоку при вході в дзеркальний лотік; 10 – зливна траншея; 11 – водозлив з тонкою стінкою; 12 – рухома каретка з тастером; 13 – п'єзометри; 14 – мікроманометр; 15 – струна; 16 – дзеркало

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

У третьому розділі представлено математичну модель руху потоку в межах водозливу, що визначає його гідравлічні параметри та вплив на них діючих факторів.

В основу математичної моделі покладено закони збереження енергії та кількості руху потоку. Для запису цих законів прийнято розрахункову схему ділянки непідтопленого водозливу з вертикальною тонкою стінкою в призматичному прямокутному руслі з горизонтальним дном (рис. 4).

Переріз 1–1 прийнято у верхньому б'єфі на достатній відстані від водозливу, де відсутній вплив кривої спаду вільної поверхні і потік можна вважати рівномірним. Глибина потоку в цьому перерізі становить $c_e + H$, де c_e – висота стінки зі сторони верхнього б'єфу, *см*; H – напір на водозлив, *см*. Переріз 2–2 прийнято в створі водозливної стінки, де глибина потоку на порозі водозливу становить h, *см*.

Запропоноване нами рівняння збереження енергії потоку в межах водозливу, що враховує втрати напору h_w при переформуванні рівномірного потоку в перерізі 1–1 до вільної струмини в перерізі 2–2 відносно площини порівняння 0–0 має вид

$$c_{g} + H + \frac{\alpha_{1}q^{2}}{2g(c_{g} + H)^{2}} = c_{g} + \frac{h}{2} + \frac{\alpha_{2}q^{2}}{2gh^{2}} + h_{w},$$
(1)

7

де q – питома витрата потоку на водозливі, cm^2/c ; $c_s + h/2$ – висотне положення осі струмини відносно площини 0–0, cm; $\alpha_2 q^2/(2gh^2)$ – питома кінетична енергія струмини в створі 2–2, cm; α_1 , α_2 – відповідно корективи кінетичної енергії в перерізах 1–1 та 2–2.



з вертикальною тонкою стінкою

Для визначення втрат напору h_w , які виникають при вертикальному звуженні потоку, внаслідок його стиснення вертикальною стінкою та його переформуванні в струмину, нами прийнято гіпотезу: втрати напору h_w можна оцінити формулою Хайндса (І. Hinds), яка описує втрати напору при раптовому звуженні потоку в каналі

$$h_{w} = \zeta \frac{q^{2}}{2g} \left(\frac{\alpha_{2}}{h^{2}} - \frac{\alpha_{1}}{\left(c_{e} + H\right)^{2}} \right), \tag{2}$$

де ζ – коефіцієнт, що враховує внутрішні опори руху рідини в межах водозливу.

Враховуючи формулу Хайндса (2), запропоноване нами рівняння збереження енергії потоку в межах водозливу (1) прийме вид

$$H + \frac{\alpha_1 q^2}{2g(c_e + H)^2} = \frac{h}{2} + \frac{\alpha_2 q^2}{2gh^2} + \zeta \frac{q^2}{2g} \left(\frac{\alpha_2}{h^2} - \frac{\alpha_1}{(c_e + H)^2}\right).$$
 (3)

Для отримання рівняння кількості руху потоку в межах водозливу умовно виділено ділянку потоку *ABCD* (рис. 4), до якої прикладено сили тиску \vec{P}_1 і \vec{P}_2 , що замінюють дію лівої і правої частин потоку та протидію стінки. При визначенні сил діючих на відсік *ABCD* прийнято наступні умови: - тиск в живому перерізі 1-1 розподіляється за гідростатичним законом;

– розподіл тиску в перерізі 2–2 потребує експериментальних досліджень;

– сила опору стисненню потоку \vec{P}_{ζ} в межах водозливу, що виникає внаслідок вертикального звуження (стиснення) потоку та його переформуванні з рівномірного потоку в струмину потребує експериментальних досліджень;

– сила тяжіння \vec{F}_m та компонента опору стисненню потоку в межах водозливу $\vec{P}_{\zeta y}$ на вісь 0x проектуються в нуль;

– сили тертя на граничних поверхнях потоку в межах відсіку *ABCD* є незначними, тому ними знехтувано.

За проміжок часу dt об'єм рідини ABCD під дією діючих сил переміщується в положення A'B'C'D'. Згідно закону про приріст кількості руху рідини – проекція кількості руху $\Delta(KP)_x$ на вісь 0x, що співпадає з напрямом руху потоку, дорівнює сумі проекцій імпульсів сил $\Sigma(IC)_x$ на цю ж вісь

$$\Delta (KP)_x = \Sigma (IC)_x.$$
⁽⁴⁾

Проекція приросту кількості руху рідини на вісь 0x між перерізами 1–1 та 2–2 визначиться наступним чином

$$\Delta (KP)_{x} = \alpha_{02} \rho bh \frac{q^{2}}{h^{2}} dt - \alpha_{01} \rho b (c_{e} + H) \frac{q^{2}}{(c_{e} + H)^{2}} dt, \qquad (5)$$

а сума проекцій імпульсів всіх прикладених до виділеного об'єму *ABCD* сил на вісь 0*x* згідно з прийнятими припущеннями визначиться за формулою

$$\Sigma (IC)_{x} = \frac{1}{2} \rho g b (c_{e} + H)^{2} dt - P_{2} dt - P_{\zeta x} dt .$$
(6)

Згідно рівнянь (4-6) нами отримано рівняння кількості руху потоку водозливу – основне рівняння водозливу

$$\alpha_{02}\rho bh\frac{q^2}{h^2}dt - \alpha_{01}\rho b(c_s + H)\frac{q^2}{(c_s + H)^2}dt = \frac{1}{2}\rho gb(c_s + H)^2dt - P_2dt - P_{\zeta x}dt,$$

або

$$\alpha_{02} \frac{q^2}{gh} - \alpha_{01} \frac{q^2}{g(c_e + H)} = \frac{1}{2} (c_e + H)^2 - \frac{P_2}{\rho g b} - \frac{P_{\zeta x}}{\rho g b}.$$
(7)

На рис. 5 наведено схему руху потоку в перерізі 2-2. При підході потоку до водозливної стінки він зазнає деформації, внаслідок вертикального стиснення і утворення кривої спаду, що впливають на розподіл п'єзометричного тиску в створі водозливу. За характером його розподілу можна виділити дві складові ділянки: вище кромки водозливу (в струмині) – p_{g} та в межах стінки – p_{μ} .

Струмина, яка виникає на порозі водозливу, має криволінійну опуклу форму. На кожну часточку лінії току струмини діє сила тяжіння та відцентрова сила, яка обумовлена кривизною потоку. Сила тяжіння направлена вертикально вниз і придає часточці прискорення \vec{g} . Відцентрова сила направлена по радіусу від центра кривизни лінії току і придає їй прискорення \vec{j} . Вертикальну компоненту прискорення часточки

потоку з координатою $y - c_{g}$ від дії відцентрової сили позначено через $\vec{j}_{y-c_{g}}$ (рис. 5). Як наслідок, п'єзометричний тиск в межах струмини менший за гідростатичний. Його сила позначена на рис. $5 - \vec{P}_{g}$.



Рисунок 5 – Графіки розподілу п'єзометричного тиску в створі водозливу та схема руху потоку в перерізі 2-2 при $H/c_s = 0.56$

Розподіл п'єзометричного тиску по висоті водозливної стінки обумовлено характером прискореного вертикального руху часточок рідини по лінії току вздовж стінки. На часточку з координатою y діє сила земного тяжіння, яка направлена вертикально вниз і придає їй прискорення \vec{g} та сила від дії напору, яка надає їй прискорений вертикальний рух уверх вздовж вертикальної стінки із прискоренням \vec{j}_y (рис. 5). Внаслідок чого, п'єзометричний тиск в межах водозливної стінки менший за гідростатичний. Його сила позначена на рис. 5 – \vec{P}_{μ} .

Диференціал розподілу тиску по висоті потоку струмини, з врахуванням вищезазначених прискорень має вид

$$dp = \rho \left(-g \pm j_{y}\right) dy.$$
(8)

На основі узагальнення розглянутих та проведених нами досліджень прийнято гіпотези: рівняння, яке враховує характер зміни прискорення j_{y-c_e} по висоті струмини та задовольняє його граничні значення, в залежності від основних діючих факторів: висоти стінки c_e й діючого напору H має вид

$$j_{y-c_{\theta}} = g\left(1 - \left(\frac{y-c_{\theta}}{H}\right)^{R_{\theta}}\right),\tag{9}$$

а зміни прискорення j_v в межах водозливної стінки

$$j_{y} = g \left(\frac{y}{c_{s}}\right)^{R_{H}},\tag{10}$$

де *R*в, *R*н – показники степеня, які враховують граничні умови потоку на водозливі

$$Re = Ke \frac{c_s + h}{c_s + H}, \qquad (11) \qquad \qquad RH = KH \frac{c_s + H}{H - h}, \qquad (12)$$

де Кв, Кн – коефіцієнти пропорційності, які визначаються дослідним шляхом.

Враховуючи рівняння (9-12) розподіл п'єзометричного тиску по висоті струмини та в межах водозливної стінки визначяться за відповідними рівняннями

$$p_{g} = \left(\frac{y-c_{g}}{H}\right)^{R_{g}} \rho g(c_{g}+h-y), \quad (13) \qquad p_{H} = \left(1-\left(\frac{y}{c_{g}}\right)^{R_{H}}\right) \rho g(c_{g}+H-y). \quad (14)$$

Сили тиску в перерізі 2-2 в межах струмини P_{e} і водозливної стінки P_{H} визначяться відповідними об'ємами епюр п'єзометричного тиску

$$P_{g} = \rho g b \int_{c_{g}}^{c_{g}+h} \left(\frac{y-c_{g}}{H}\right)^{Rg} \left(c_{g}+h-y\right) dy, \qquad P_{H} = \rho g b \int_{0}^{c_{g}} \left(1-\left(\frac{y}{c_{g}}\right)^{RH}\right) \left(c_{g}+H-y\right) dy.$$

Після інтегрування відповідно отримаємо

$$P_{g} = \left(\frac{1}{Rg^{2} + 3Rg + 2}\right) \left(\frac{h}{H}\right)^{Rg} \rho g b h^{2}, \quad (15) \qquad P_{H} = \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{RH^{2} + 3RH + 2} + \frac{RH}{RH + 1}\frac{H}{c_{g}}\right) \rho g b c_{g}^{2}. \quad (16)$$

Нами прийнято гіпотезу: компонента P_{ζ_x} сили опору стисненню потоку, що протидіє та створює опір його руху, пропорційна втратам напору та перепаду рівнів води в межах водозливу

$$P_{\zeta_x} = \frac{1}{\alpha_{02}} h_w (H - h) \rho g b , \qquad (17)$$

або з урахуванням втрат напору h_w за формулою Хайндса

$$P_{\zeta_{x}} = \zeta \frac{q^{2}(H-h)}{2\alpha_{02}g} \left(\frac{\alpha_{2}}{h^{2}} - \frac{\alpha_{1}}{(c_{e}+H)^{2}} \right) \rho g b.$$
(18)

Рівняння збереження енергії потоку (3) та кількості руху в межах водозливу (7) утворюють пропоновану нами математичну модель руху потоку в межах водозливу

$$q^{2} = \frac{2g}{(1+\zeta)} \left(H - \frac{h}{2} \right) \left/ \left(\frac{\alpha_{2}}{h^{2}} - \frac{\alpha_{1}}{(c_{e} + H)^{2}} \right) \right|_{q^{2}} = g \left(\frac{1}{2} (c_{e} + H)^{2} - \frac{P_{2}}{\rho g b} \right) \left/ \left(\frac{\alpha_{02}}{h} - \frac{\alpha_{01}}{(c_{e} + H)} + \frac{\zeta (H - h)}{2\alpha_{02}} \left(\frac{\alpha_{2}}{h^{2}} - \frac{\alpha_{1}}{(c_{e} + H)^{2}} \right) \right) \right|_{q^{2}} \right\}.$$
(19)

У четвертому розділі представлено результати експериментальних досліджень, що доводять достовірність прийнятих гіпотез впливу основних діючих факторів на гідравлічні параметри водозливу та оцінено значення коефіцієнтів ζ , *Кв* та *Кн*, що входять до математичної моделі руху потоку в межах водозливу. Умови проведення експериментальних досліджень представлено в табл. 1.

Фактори		Рівні варіювання									Інтерроп
натуральний	кодований	-1	-0,75	-0,5	-0,25	0	0,25	0,5	0,75	1	варіювання
вид	вид										1
C_{θ}, CM	X_1	5				25				45	20
Н, см	X_2	5	10	15	20	25	30	35	40	45	5
Порядок виконання до- слідів X ₂ для кожного X ₁		7	21	1	2	26	15	27	5	22	
		12	3	13	18	9	20	25	14	19	—
		8	6	10	16	11	23	24	17	4	

Таблиця 1 – Умови проведення експериментальних досліджень

Отримані експериментальні точки осереднених втрат напору апроксимовано графіками, розрахованими за рівнянням (2) (рис. 6, *a*), що підтвердило, з ймовірністю 95%, достовірність прийнятої нами гіпотези про втрати напору в межах водозливу і адекватність застосування формули Хайндса для оцінки їх величини при прийнятому коефіцієнті, що враховує внутрішні опори руху рідини, $\zeta = 1,35$.

На основі аналізу графіків впливу діючих факторів на втрати напору $h_w = f(H, c_e)$ наведених на рис. 6, *а* видно, що втрати напору зростають при збільшенні діючого напору і не залежать від висоти водозливної стінки.

На рис. 6, б наведено осереднені експериментальні точки втрат напору у відносних координатах, які адекватно апроксимовано, для різної висоти стінки, універсальним графіком $h_w/E_1 = f(H/c_s)$, розрахованим за формулою Хайндса. При відношенні $0 < H/c_s \le 2$ відносні втрати різко збільшуються, а при $H/c_s > 5$ вони не змінюються.



12

Отримані експериментальні точки п'єзометричних напорів по висоті струмини апроксимовано графіками, розрахованими за рівнянням (13) (рис. 7, *a*), що підтвердило, з ймовірністю 95%, достовірність прийнятої нами гіпотези про характер зміни вертикальної складової відцентрового прискорення часточки рідини в межах струмини $j_{y-c_{g}}$ (9) і адекватність отриманого рівняння (13), при прийнятому коефіцієнті пропорційності $K_{\theta} = 0,33$.



Аналіз графіків, наведених на рис. 7, *а* показав, що в нижній та верхній точках струмини п'єзометричний тиск рівний атмосферному. Його розподіл по висоті живого перерізу інтенсивно зростає в нижній частині струмини, набуває свого максимального значення при $y \approx 0.25(y - c_s)$ та асимптотично наближається до розподілу за гідростатичним законом, який показано штриховою лінією. При збільшенні діючого напору (висота стінки постійна) глибина на порозі водозливу і величина протидіючого п'єзометричного тиску відповідно зростають, але характер графіків залишається подібним.

На рис. 7, δ наведено графіки сили п'єзометричного тиску в межах струмини, що протидіє руху потоку P_e , розрахованої за формулою (15), в залежності від основних діючих факторів. На основі аналізу графіків на рис. 7, δ видно, що сила P_e зростає із збільшенням діючого напору та не залежать від висоти водозливної стінки.

Отримані експериментальні точки п'єзометричних напорів по висоті водозливної стінки апроксимовано графіками, розрахованими за рівнянням (14) (рис. 8, *a*), що підтвердило, з ймовірністю 95%, достовірність прийнятої нами гіпотези про характер зміни прискорення часточки рідини j_y по лінії току вздовж вертикальної водозливної стінки (10) і адекватність отриманого рівняння (14), при прийнятому коефіцієнті пропорційності $K_H = 1,0$.

На рис. 8, б наведено графіки сили п'єзометричного тиску від протидії водозливної стінки P_{μ} розрахованої за формулою (16) в залежності від основних діючих факторів. На основі аналізу цих графіків видно, що величина сили *P_н* зростає із збільшенням діючого напору та висоти водозливної стінки.



Знайдені сили тиску $P_{_{\!B}}$, $P_{_{\!H}}$ є складовими сили P_2 , що входить до рівняння кількості руху потоку в межах водозливу (7) та, відповідно, математичної моделі (19).

Отримані експериментальні точки осереднених сил опору стисненню потоку апроксимовано графіками, розрахованими за рівнянням (18) (рис. 9, *a*), що підтвердило, з ймовірністю 95%, достовірність прийнятої нами гіпотези про компоненту $P_{\zeta x}$ сили опору стисненню потоку в межах водозливу і адекватність отриманого рівняння (18). На основі аналізу графіків $P_{\zeta x} = f(H, c_s)$ (рис. 9, *a*) видно, що сила опору стисненню потоку $P_{\zeta x}$ зростає при збільшенні діючого напору та спадає при зменшенні висоти водозливної стінки.



14

На рис. 9, б наведено експериментальні точки сили $P_{\zeta x}$ у відносних координатах, які адекватно апроксимовано універсальним графіком $P_{\zeta x}/P_1 = f(H/c_e)$ розрахованим за рівнянням (18) і не залежить від висоти водозливної стінки. При збільшенні відношення H/c_e відносна сила опору стисненню потоку $P_{\zeta x}/P_1$ відповідно зростає.

На основі виконаних теоретичних та експериментальних досліджень підтверджено прийняті нами гіпотези. На рис. 10, осереднені експериментальні точки глибини потоку на порозі водозливу h (рис. 10, a) та питомої витрати q (рис. 10, δ) залежно від основних діючих факторів апроксимовано графіками, розрахованими за математичною моделлю (19), що підтвердило, з ймовірністю 95%, її достовірність.



На рис. 10, *а* показано вплив діючих факторів на глибину потоку на порозі водозливу, а на рис. 10, δ – на питому витрату, відповідно. З аналізу графіків видно, що основним фактором, який впливає на глибину потоку на порозі водозливу є напір, а висота стінки практично не впливає на неї. Глибина потоку на водозливі в залежності від напору змінюється лінійно. При збільшені діючого напору питома витрата через водозлив монотонно зростає. При збільшені висоти водозливної стінки питома витрата, за однакових діючих напорах, відповідно, зменшується.

У п'ятому розділі на основі отриманої математичної моделі руху потоку в межах водозливу (19) наведено методику розрахунку гідравлічних параметрів водозливу в залежності від діючих факторів.

Алгоритм розрахунку

1. Визначаємо глибину потоку над порогом водозливу h та питому витрату q шляхом рішення системи рівнянь (19), враховуючи рівняння (15) і (16).

- 2. Визначаємо втрати напору h_w за формулою (2).
- 3. Визначаємо силу опору стисненню потоку P_{ζ_x} за формулою (18).
- 4. Визначаємо силу тиску в межах струмини P_{e} за формулою (15).

5. Визначаємо силу тиску в межах вертикальної стінки Р_н за формулою (16).

6. Визначаємо коефіцієнт витрати водозливу *m*₀

$$m_0 = \frac{q}{\sqrt{2g}H^{3/2}}.$$
 (20)

Результати наукової роботи з розробки методики розрахунку водозливів з тонкою стінкою передано до Державного підприємства «Проектно-вишукувальний інститут «Рівнедіпроводгосп» для подальшого використання при проектуванні гідротехнічних споруд.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. У дисертаційній роботі поставлено і розв'язано науково-практичне завдання, що полягало в удосконаленні методів гідравлічного розрахунку водозливів з тонкою стінкою шляхом розробки математичної моделі руху потоку в межах водозливу, яка ґрунтується на основі законів збереження енергії та кількості руху. Розроблена математична модель дає можливість за заданими діючими факторами визначати основні гідравлічні та гідродинамічні параметри потоку в межах водозливу, необхідних при проектуванні гідротехнічних споруд.

2. На основі виконаних теоретичних та експериментальних досліджень вперше отримано рівняння збереження енергії потоку в межах водозливу з тонкою стінкою яке враховує втрати напору при переформуванні рівномірного потоку, внаслідок наявності водозливної стінки, в струмину.

3. Виконанні теоретичні та експериментальні дослідження дали можливість вперше, на основі рівняння кількості руху, отримати основне рівняння водозливу з тонкою стінкою. Вперше виконано теоретичні дослідження невідомих граничних умов в створі водозливу, прийнято гіпотези на основі яких отримано адекватні математичні моделі розподілу тиску в межах водозливної стінки та струмини.

4. Результати теоретичних та експериментальних досліджень дали можливість скласти математичну модель, яка включає отриманні рівняння збереження енергії та кількості руху потоку в межах водозливу. На відміну від існуючих емпіричних методів розрахунку, які дають можливість визначити лише пропускну здатність водозливу, отримана математична модель розкриває зв'язок основних діючих факторів з гідравлічними та гідродинамічними параметрами потоку, що значно розширює межі використання запропонованої методики розрахунку водозливів та підвищує надійність роботи гідротехнічних споруд.

5. Розроблену методику розрахунку використано для оцінки проектного рішення виконаного ПАТ «Укрводпроект» щодо гідравлічних параметрів водозливної греблі гідроелектростанції Сендже в районі населеного пункту Сендже на р. Велє в континентальній частині Республіки Екваторіальна Гвінея. На основі проведених експериментальних досліджень в лабораторії кафедри гідротехнічного будівництва та гідравліки встановлено, що проектна конструкція має занижену пропускну здатність. На основі запропонованої методики гідравлічного розрахунку водозливів розроблено проектне рішення, яке забезпечує пропускну здатність водозливної греблі шляхом пониження відмітки її порогу.

6. Методику розрахунку водозливів з тонкою стінкою передано до Державного підприємства «Проектно-вишукувальний інститут «Рівнедіпроводгосп» для подальшого використання при проектуванні гідротехнічних споруд.

1. Хлапук М. М. Дослідження пропускної спроможності водозливної греблі ГЕС Сендже на річці Веле в континентальній частині Республіки Екваторіальна Гвінея / М. М. Хлапук, О. В. Безусяк, В. І. Корнійчук, О. А. Ярмолаєв, М. К. Калужний, В. Д. Сидорук. // Гідротехніка: збірник наукових праць. – Рівне, 2014. – Вип. 1(1). – С. 3–11. (Особистий внесок Корнійчука В. І. полягає в проведенні фізичного моделювання та обробці результатів експериментальних досліджень).

2. Хлапук М. М. Удосконалення методу гідравлічного розрахунку пропускної здатності водозливів з тонкою стінкою / М. М. Хлапук, О. В. Безусяк, В. І. Корнійчук. // Вісник НУВГП. Технічні науки: зб. наук. праць. – Рівне, 2015. – Вип. 3(71). Ч. 1. – С. 118–126. (Особистий внесок Корнійчука В. І. полягає в проведенні аналізу залежностей для визначення пропускної здатності водозливів).

3. Корнійчук В. І. Дослідження п'єзометричного тиску в межах вертикальної стінки водозливу з гострою кромкою / В. І. Корнійчук. // Вісник НУВГП. Технічні науки: зб. наук. праць. – Рівне, 2015. – Вип. 3(71). Ч. 1. – С. 127–135.

4. Хлапук М. М. Дослідження п'єзометричного тиску в струмині потоку водозливу з тонкою стінкою / М. М. Хлапук, О. В. Безусяк, **В. І. Корнійчук**. // Вісник НУВГП. Технічні науки: зб. наук. праць. – Рівне, 2015. – Вип. 3(71). Ч. 2. – С. 74–81. (Особистий внесок Корнійчука В. І. полягає в проведенні експериментальних досліджень та обробці результатів).

5. Корнійчук В. І. Дослідження п'єзометричного тиску над порогом водозливу з тонкою стінкою / В. І. Корнійчук // Вісник НУВГП. Технічні науки: зб. наук. праць. – Рівне, 2015. – Вип. 4(72). – С. 121–131.

6. Хлапук М. М. Дослідження зміни питомої енергії потоку в межах водозливу з тонкою стінкою / М. М. Хлапук, **В. І. Корнійчук**. // Вісник НУВГП. Технічні науки: зб. наук. праць. – Рівне, 2016. – Вип. 3(75). – С. 82–90. (Особистий внесок Корнійчука В. І. полягає в проведенні теоретичних та експериментальних досліджень питомої енергії потоку в межах водозливу).

7. Хлапук М. М. Дослідження сили опору стисненню потоку в межах досконалого водозливу з тонкою стінкою / М. М. Хлапук, **В. І. Корнійчук**, О. В. Безусяк. // Вісник НУВГП. Технічні науки: зб. наук. праць. – Рівне, 2017. – Вип. 1(77). – С. 3–11. (Особистий внесок Корнійчука В. І. полягає в проведенні теоретичних та експериментальних досліджень сили опору стисненню потоку в межах водозливу).

8. Корнійчук В. І. Дослідження втрат напору в межах водозливу з тонкою стінкою / В. І. Корнійчук, М. М. Хлапук, О. В. Безусяк. // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури: збірник наукових праць. – Одеса, 2017. – Вип. 66. – С. 148–154. (Особистий внесок Корнійчука В. І. полягає в проведенні теоретичних та експериментальних досліджень втрат напору в межах водозливу).

9. Khlapuk M.M. Sharp-crested weirs formula improvement / Khlapuk M.M., Bezusyak A.V., **Korniichuk V.I.** // ZESZYTY NAUKOWE Inżynieria Lądowa I Wodna W Kształtowaniu Środowiska. – Kalisz, Poland, 2017 – Nr. 16, pp. 9–18. (Особистий внесок Корнійчука В. І. полягає в систематизації методів гідравлічного розрахунку водозливів з тонкою стінкою).

10. Korniichuk V. I. Discharge coefficient of a rectangular sharp-crested weir / Korniichuk V. I., Yasinska L. R. // J Austria-science. – Innsbruck, Austria, 2018. –

Vol. 12(1), pp. 29–35. (Особистий внесок Корнійчука В. І. полягає в проведенні теоретичних досліджень значень коефіцієнтів витрати водозливу з тонкою стінкою).

11. V. Korniichuk Sharp-crested weir head losses investigation / V. Korniichuk, M. Khlapuk, O. Bezusyak, L. Yasinska // J Civil Engineering, Environment And Architecture. – Rzeszow University of Technology, 2018. – JCEEA, t. XXXV, z. 65(1/18), pp. 27–34, DOI:10.7862/rb.2018.3. (Особистий внесок Корнійчука В. І. полягає в розробці матриці проведення експериментальних досліджень).

АНОТАЦІЯ

Корнійчук В. І. Удосконалення методів гідравлічного розрахунку водозливів з тонкою стінкою на основі законів збереження енергії та кількості руху. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.16 — гідравліка та інженерна гідрологія. — Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне, 2019.

Робота присвячена удосконаленню методів гідравлічного розрахунку водозливів з тонкою стінкою шляхом розробки математичної моделі руху потоку в його межах, яка ґрунтується на основі законів збереження енергії та кількості руху потоку. Для складання даної математичної моделі, на основі виконаних теоретичних та експериментальних досліджень, вперше, запропоновано аналітичні залежності для визначення втрат напору в межах водозливу, розподілу та сили п'єзометричного тиску в створі водозливу та сили опору стисненню потоку. Ці залежності дали можливість отримати рівняння збереження енергії і зміни кількості руху потоку, і в результаті, скласти математичну модель руху потоку в межах водозливу з тонкою стінкою яку використано при удосконаленні методики гідравлічного розрахунку водозливів.

Розроблену методику використано для оцінки проектного рішення виконаного ПАТ «Укрводпроект» та перевірки гідравлічних параметрів водозливної бетонної греблі гідроелектростанції Сендже в районі населеного пункту Сендже на р. Велє в континентальній частині Республіки Екваторіальна Гвінея. На основі виконаних розрахунків, згідно розробленої методики, запропоновано проектне рішення для забезпечення її пропускної здатності. Запропоновану методику передано до Державного підприємства «Проектно-вишукувальний інститут «Рівнедіпроводгосп» для подальшого використання при проектуванні гідротехнічних споруд.

Ключові слова: водозлив з тонкою стінкою, питома енергія потоку, рівняння кількості руху, втрати напору, розподіл та сила п'єзометричного тиску, закони збереження енергії та кількості руху потоку.

АННОТАЦИЯ

Корнейчук В. И. Усовершенствование методов гидравлического расчета водосливов с тонкой стенкой на основе законов сохранения энергии и количества движения. – 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, 2019.

Работа посвящена совершенствованию методов гидравлического расчета водосливов с тонкой стенкой путем разработки математической модели движения потока в его пределах, основанной на основе законов сохранения удельной энергии и изменения количества движения потока. Для составления данной математической модели, на основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований, впервые предложено аналитические зависимости для определения потерь напора в пределах водослива, распределения и силы пьезометрического давления в створе водослива и силы сопротивления сжатию потока. Эти зависимости позволили получить уравнения сохранения удельной энергии, изменения количества движения потока, и в результате, составить математическую модель движения потока в пределах водослива с тонкой стенкой, которую использовано при совершенствовании методики его гидравлического расчета.

Разработанная методика использована для оценки проектного решения, произведенного ПАО «Укрводпроект» и проверки гидравлических параметров водосливной бетонной плотины гидроэлектростанции Сендже в районе населенного пункта Сендже на р. Вэле. На основе выполненных расчетов, согласно разработанной методики, предложено проектное решение для повышения ее пропускной способности. Предложенную методику передано в Государственное предприятие «Проектноизыскательский институт «Ровногипроводхоз» для дальнейшего использования при проектировании гидротехнических сооружений.

Ключевые слова: водослив с тонкой стенкой, удельная энергия потока, уравнение количества движения, потери напора, распределение и сила пьезометрического давления, законы сохранения энергии и количества движения потока.

ABSTRACT

Korniichuk V. I. Sharp-crested weir hydraulic calculating methods improvement based on energy and momentum conservation principles. – 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, 2019.

At present, in spite of large amount of performed theoretical and experimental studies, the task of the weir calculating in most cases is reduced only to the determination of its discharge capacity, by introducing into its equation empirical discharge constants. These constants are obtained while investigating small-scaled sharp-crested weirs models in short range of operative factors. Herewith, scale effect of the transition from the models of the weirs, for which discharge constants were obtained, to the real structures is not taken into account. Discharges calculated by different dependencies, for the same conditions, can vary considerably among themselves.

Studies conducted by various scientists have shown that existing theories do not reflect with sufficient completeness and accuracy all phenomena typical for sharp-crested weirs, and to obtain more accurate and concrete solutions, it is necessary to obtain a mathematical model that would allow to connect all the operating factors for weir flow task computation.

The thesis is dedicated to the improvement of methods for hydraulic calculation of the sharp-crested weirs by developing a mathematical model of the flow, which is based on the energy and momentum flow conservation principles. To receive these laws, the simplest form of the weir, consisting of a plate set perpendicular to the flow in a rectangular horizon-tal channel with vertical upper edge running the full width of the channel is considered, and two calculated sections are set. First section is located in the channel upstream at a sufficient distance from the weir, where dropping curve doesn't influence the stream line sur-

face and the flow can be suggested as uniform. The pressure in this section is distributed according to the hydrostatic law, and the specific energy of the stream corresponds to an open uniform flow.

The second section is located in the section of the weir. The distribution and the force of the piezometric pressure in this section, which is the boundary condition of the momentum conservation principles, according to our research, consists of two component parts: the upper edge of the weir (in the jet stream) and within the weir plate. We have considered the motion scheme of the flow particles within the stream and within the vertical weir plate and determined the main forces acting on them.

It is determined that the distribution of the piezometric pressure along the nappe depends on the curvilinear character of the flow upwards the weir plate. Each part of the current line forces gravity and the centrifugal forces, which is due to the curvature of the flow. The distribution of piezometric pressure within the weir plate is defined by the accelerated vertical movement of the flow along the vertical plate. Each part of the flow forces gravity and the head action of the flow, which gives it an accelerated upwards movement.

We have accepted a hypothesis about the influence of main operating factors on the change of the vertical component of the centrifugal acceleration of the flow particles within the nappe and the vertical acceleration of the flow particles along the height of the weir plate. These hypotheses were proved on the basis of the experimental researches. On the basis of accepted hypotheses dependences for determining the distribution of the piezometric pressure in the section of the sharp-crested weir were obtained. These dependences satisfy limit values of the piezometric pressure and take into consideration the centrifugal forces within the nappe due to the curvature of the flow and the inertial forces caused by the acceleration of the flow along the vertical current line within the weir plate. The equation for determining the horizontal forces of the piezometric pressure in the nappe and within the weir plate are obtained. They constitute the boundary conditions of the flow in the second section.

The flow moving over sharp-crested weir suffers sudden vertical contraction (compression) and transforms from the uniform flow to the nappe. As the pressure above and under the nappe is atmospheric, we consider it, with some assumptions, as jet stream flow. Hence, flow energy in second section is determined for the jet stream flow.

Within the sharp-crested weir due to sudden vertical contraction of the flow develop weir head losses and a force that counteracts the compression of the flow and resists its movement – flow contraction resistance force, which is the part of flow momentum conservation principle. To determine head losses, we accepted a hypothesis that they can be evaluated with Hind's formula, which describes similar head losses caused by sudden flow contraction in the channel. Also, we accepted a hypothesis that flow contraction resistance force is proportional to head losses. Boss these hypotheses were confirmed by experimental studies.

Obtained unknown components of the energy and momentum flow conservation principles allowed us to introduce a novel mathematical flow model over sharp-crested weir that determines its hydraulic parameters. This mathematical model was attained and used to improve sharp-crested weir hydraulic calculating methods and methodology in whole.

Keywords: sharp-crested weir, specific energy of flow, momentum conservation principle, head losses, distribution and force of piezometric pressure, energy and momentum conservation principles.

Підписано до друку 28.02.2019 р. Формат 60×90¹/₁₆. Ум.-друк. арк. 0,9. Тираж 100 прим. Зам. № 5409.

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.