

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВОДНОГО ГОСПОДАРСТВА ТА
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

ПАНАСЕНКО АННА ВОЛОДИМИРІВНА



УДК 627.51:556.166

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ПРОПУСКУ
ПАВОДКОВИХ ВОД ЧЕРЕЗ СЕРЕДНЬОНАПІРНІ ГІДРОВУЗЛИ
З УРАХУВАННЯМ ХАРАКТЕРИСТИК ПАВОДКОВОЇ ХВИЛІ

05.23.16 – гідравліка та інженерна гідрологія

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Рівне – 2021

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Національному університеті водного господарства та природокористування (НУВГП) 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, доцент
Гнатів Роман Маріянович,
Національний університет «Львівська
політехніка», професор кафедри гідротехніки
та водної інженерії;

кандидат технічних наук,
Томільцева Аліна Іванівна,
Інститут інноваційної освіти Київського
національного університету будівництва та
архітектури, старший науковий співробітник.

Захист відбудеться «14» травня 2021 року о 11⁰⁰ 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. Олекси Новака, 75.

Автореферат розісланий «12» квітня 2021 року.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради,
кандидат технічних наук, доцент



С. В. Сунічук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Негативні наслідки від повеней і паводків можливі на 27% території України, де проживає майже третина населення країни. Найбільшої шкоди від них зазнають гірські та передгірські райони Карпат. Басейн Дністра є гарним прикладом східноєвропейської транскордонної річки, для якої існує нагальна необхідність розробки системи прогнозування повеней, паводків та регулювання стоку.

Сьогодні в Україні здійснюється поступовий перехід від пасивного протипаводкового захисту до активної фази, в основі якої реалізується будівництво протипаводкових об'ємів та водосховищ у складі ГЕС. Завдяки створенню Дністровського водосховища з'явилась можливість зменшення збитків від затоплень прилеглих до річки Дністер територій шляхом регулювання паводків. Для цього у водосховищі передбачено спеціальний протипаводковий об'єм для регулювання, який розташовується в призмі форсування між відмітками нормального підпірного рівня (НПР) – 121,00 м і форсованого підпірного рівня (ФПР) – 125,00 м, об'ємом 570 млн м³. Такий протипаводковий комплекс у періоди проходження високих вод дозволяє зменшити їх вплив за рахунок перерозподілу стоку шляхом акумулювання надлишкових обсягів води у протипаводкових об'ємах для регулювання.

Водночас, методики пропуску паводків та завчасної підготовки водосховищ до прийняття і зарегулювання паводкових та повеневих вод потребують вдосконалення, шляхом створення комп'ютеризованої математичної моделі. Це надасть можливість завчасно прогнозувати поведінку паводкових та повеневих вод, а також здійснювати аналіз різних сценаріїв пропуску їх через гідротехнічні споруди.

Необхідність створення автоматизованих систем пояснюється і тим, що останнім часом зростає потреба у вирішенні численних завдань, пов'язаних із підвищенням ефективності оперативного управління водними ресурсами. Деякі задачі ще не мають математичного формулювання. Це задачі, без яких не можливо створити ефективні системи обліку, проектування, експлуатації водогосподарських систем. Успішне розв'язання цих задач суттєвим чином вплине на ефективність використання водних ресурсів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до одного з пріоритетних напрямків ПрАТ «Укргідроенерго», що пов'язаний із створенням автоматизованої інформаційної системи: «Система планування (прогнозування) та управління водними ресурсами та виробництвом електроенергії на ГЕС та ГАЕС ПрАТ «Укргідроенерго» в умовах функціонування ринку електричної енергії».

Гідродинамічна модель ділянки річки Дністер від гідрологічного посту Заліщики до створу Дністровської ГЕС, реалізована у програмному комплексі MIKE 11, була створена автором під керівництвом фахівців ПрАТ «Укргідропроєкт», (м. Харків) та рекомендована до використання у розрахунках трансформації паводків по Дністровському водосховищу.

Мета і завдання досліджень. Метою роботи є удосконалення методів розрахунку пропуску паводкових вод через середньонапірні гідровузли (на прикладі Дністровського гідровузла) на основі прогнозів приточності води з урахуванням характеристик паводкової хвилі та режиму наповнення водосховища, за допомогою гідродинамічної моделі руху паводкових вод на ділянці річки Дністер від гідрологічного посту Заліщики до Дністровської ГЕС, створеної в програмному комплексі МІКЕ 11.

Досягнення поставленої мети здійснювалось шляхом розв'язання наступних завдань:

- створення математичної моделі руху паводкових вод на ділянці річки Дністер в програмному комплексі МІКЕ 11;
- верифікації створеної математичної моделі руху паводкових вод на ділянці річки Дністер на основі фактичних даних паводку, що мав місце у липні 2008 року;
- аналізу існуючих методик пропуску паводків на основі прогнозів приточності води з урахуванням характеристик паводкової хвилі та режиму наповнення водосховища;
- розробки методики розрахунку пропуску паводків через середньонапірні гідровузли (на прикладі Дністровського гідровузла) на основі прогнозів приточності води, з урахуванням характеристик паводкової хвилі та режиму наповнення водосховища.

Об'єкт дослідження – процес проходження паводку на досліджуваній ділянці р. Дністер та його гідрологічні характеристики.

Предмет дослідження – методика розрахунку пропуску паводкових вод через середньонапірні гідровузли з врахуванням характеристик паводкової хвилі та режиму наповнення водосховищ.

Методи дослідження. Для побудови гідродинамічної моделі та здійснення подальших розрахунків застосовувались методи математичного моделювання гідрологічних параметрів. Дослідження проводились у програмному комплексі МІКЕ 11, який забезпечує можливість розрахунків неусталеного режиму потоку з використанням неявної красно-різницевої схеми розрахунку для різних режимів потоку. В основі розрахунків є розв'язання повних нелінійних рівнянь Сен-Венана для потоків у відкритих розгалужених руслах.

Наукова новизна одержаних результатів:

- вперше враховано вплив характеристик паводкової хвилі на розрахункове значення максимальних скидних витрат, завдяки чому зменшено обсяги максимальних скидних витрат через середньонапірний гідровузол (на прикладі Дністровського гідровузла), а також визначено час добігання паводкової хвилі до створу ГЕС;
- удосконалено «Методику розрахунку пропуску паводкових вод через середньонапірні гідровузли (на прикладі Дністровського гідровузла) на

основі прогнозів приточності води з урахуванням характеристик паводкової хвилі та режиму наповнення водосховища»;

- набуло подальшого розвитку застосування програмного комплексу MIKE 11 для створення математичної моделі руху паводкових вод на досліджуваній ділянці річки Дністер, що базується на рішенні повних нелінійних рівнянь Сен-Венана для потоків у відкритих розгалужених руслах для визначення руху паводкової хвилі по Дністровському водосховищу;
- здійснено верифікацію створеної математичної моделі з використанням даних реального паводку, який відбувся у липні 2008 року.

Створена гідродинамічна модель в подальшому слугуватиме інструментом для здійснення відповідних розрахунків та пропуску паводків через Дністровський гідровузол різної забезпеченості за рахунок зрізання (зменшення) максимальних витрат через Дністровський гідровузол.

Практичне значення одержаних результатів. Запропонована «Методика розрахунку пропуску паводкових вод через середньонапірні гідровузли (на прикладі Дністровського гідровузла) на основі прогнозів приточності води з урахуванням характеристик паводкової хвилі та режиму наповнення водосховища» визначає рекомендації щодо дій при проходженні паводків різної забезпеченості, та гарантує зменшення максимальних витрат через Дністровський гідровузол шляхом завчасного спрацювання водосховища, та подальшого його наповнення при добіганні паводкової хвилі максимальними витратами до створу Дністровської ГЕС.

Гідродинамічна модель руху паводкових вод на ділянці річки Дністер від гідрологічного посту Заліщики до створу Дністровської ГЕС, створена у програмному комплексі MIKE 11, допоможе вирішувати наступні задачі:

- формувати короткострокові і довгострокові гідрологічні прогнози;
- комплексно аналізувати водозабезпечення у басейні р. Дністер;
- виконувати водноенергетичні розрахунки і розрахунки оптимального виробництва електроенергії;
- розраховувати час добігання води від гідрологічного посту Заліщики до створу Дністровської ГЕС;
- будувати сценарії використання водних ресурсів та здійснювати розрахунки і порівняльний аналіз для умов маловоддя та паводку.

Основні наукові результати та рекомендації дисертаційної роботи застосовуються при прогнозуванні та оптимізації використання гідроресурсів через Дністровський гідровузол з метою планування роботи ГЕС та ГАЕС ПрАТ «Укргідроенерго» на ринку електричної енергії, особливо в паводковий період (Акт про впровадження наукових результатів дисертаційного дослідження від 25 лютого 2021 р.).

Особистий внесок здобувача. Результати наукового дослідження, викладені в дисертації, отримані автором особисто. З наукових праць, що

опубліковані у співавторстві, в дисертації використано тільки ті ідеї та положення, які є результатом особистої роботи та становлять індивідуальний внесок автора.

Автором виконано аналіз літературних джерел щодо розрахунків неусталеного руху паводкової хвилі по водосховищу, розглянуто існуючі методи та методики для чисельних розрахунків цього явища. Опрацьована одна з найбільш використовуваних методик для розрахунків неусталених режимів потоку з використанням неявно краєво-різницевої схеми та для різних режимів потоку, що базується на двовимірному рівнянні Сен-Венана.

Були розроблені рекомендації щодо існуючої схеми пропуску паводку через Дністровський гідровузлу у вигляді запропонованої автором «Методики розрахунку пропуску паводкових вод через середньонапірні гідровузли (на прикладі Дністровського гідровузла) на основі прогнозів приточності води з урахуванням характеристик паводкової хвилі та режиму наповнення водосховища». Методика відпрацьована автором у створеній гідродинамічній моделі руху паводкових вод на ділянці річки Дністер (від гідрологічного посту Заліщики до Дністровського гідровузла) у програмному комплексі МІКЕ 11, та буде використовуватися як основний інструмент для розрахунків неусталених режимів потоку з використанням неявно краєво-різницевої схеми.

Проведено верифікацію створеної гідродинамічної моделі на основі фактичних даних паводку, який відбувся у липні 2008 році, та підтверджено її відповідність реальним процесам, що відбувалися у басейні р. Дністер на досліджуваній ділянці.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на таких конференціях: Міжнародна науково-технічна конференція «ПАТ Укргідропроект», м. Харків, 2013 р., Конкурс молодих спеціалістів в ЗАП «Сибірський енергетичний науково-технічний центр», РФ, м. Новосибірськ, 2013 р., Студентська науково-технічна конференція секції «Гідроенергетики та гідравлічних машин НУВГП», 2014 р., 14-а Міжнародна науково-технічна конференція «Ресурси природних вод Карпатського регіону», м. Львів, 2015 р., VII Міжнародна науково-технічна конференція гідроенергетиків «Стійкий розвиток гідроенергетики, як основа мобільності і маневреності ОЕС України», Київ, 2015 р., Водний форум. «Актуальні проблеми використання та охорони водних ресурсів і перспективи розвитку водного господарства», НУВГП, Рівне – 2015 р., Научно-техническая конференция «Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии» ВНИИГ, г. Санкт-Петербург – 2015 г., Науково-технічна конференція на кафедрі ГЕ, ТЕ та ГМ, Рівне – 2016 р., 15-а Міжнародна науково-технічна конференція «Ресурси природних вод Карпатського регіону», м. Львів, 2016 р., X-а Міжнародна науково-практична конференція «Нетрадиційні поновлювальні джерела енергії як альтернатива первинним джерелам енергії в регіоні», м. Львів, 2019 р., VII науково-практична конференція «Сучасний стан та перспективи розвитку, аналіз і керування електроенергетичними системами.

Новітні досягнення у проведенні тренажерної підготовки оперативно-диспетчерського персоналу», смт Славське Львівської області, 2020 р., Позачергове засідання науково-технічної ради (НТР) ПрАТ «Укргідропроєкт» від 24 лютого 2021 р., м. Харків.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 10 наукових праць, з них 5 статей у фахових виданнях України, 1 стаття входить до науково-метричної бази Scopus та 4 публікації є матеріалами наукових конференцій.

Структура та об'єм дисертаційної роботи. Робота складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи становить 176 сторінок, який включає 25 таблиць і 57 рисунків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету й завдання, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, висвітлено наукову новизну та практичне значення наукових результатів, наведено відомості щодо їх апробації.

У **першому розділі «Огляд літератури з питань дослідження паводків»** виконано огляд джерел, присвячених питанням дослідження паводків та умови його формування. Надано історичну довідку проходження значних (за своїми масштабами) паводків у Карпатському регіоні, їх наслідки. Проведено аналіз методів та систем контролю і прогнозування рівня паводкових вод.

У **другому розділі описано «Метод розрахунків неусталеного руху води на основі рівняння Сен-Венана приведеного до конкретної задачі, в результаті аналізу гідрологічних характеристик річки Дністер».**

Методами і проблемою розрахунків неусталеного руху води у відкритих руслах, займалися Сен-Венан, Ж.В. Буссінеск, Е.М. Прейссман, О.Ф. Васильєв, Д.Ж. Гунаратман, Ф.Е. Перкінс, Р.Ю. Шеннон, М.С. Грушевський, Г. В. Железняков, В. П. Рогунович, Ж.А. Кюнж, Ф.М. Холлі, А. Вервет, Д.В. Штеренлихт, В.А. Прокоф'єв, В.В. Беліков, А.Н. Мілітєв, А.М. Прудовський, В.Б. Радіонов, О.А. Рябенко, М.М. Хлапук, О.І. Клапоущак, Л.М. Заміховський, Р. Хоса, Р. Холдар та багато інших вітчизняних і закордонних вчених. Використовуючи результати модельних досліджень, вони намагались з певним наближенням чисельно розв'язати рівняння Сен-Венана.

Основні положення теорії Сен-Венана:

- 1) рівняння застосовуються для русл (рис. 1), поперечні перерізи яких можуть мати довільну форму та змінюватись вздовж осі;
- 2) рівняння містять дві залежні змінні: рівень води у (або глибина h) і витрата Q (або швидкість і глибина);
- 3) задачею розрахунку є визначення залежності основних характеристик руху води в різних створах від часу: $Q=f(t)$; $h=f(t)$.

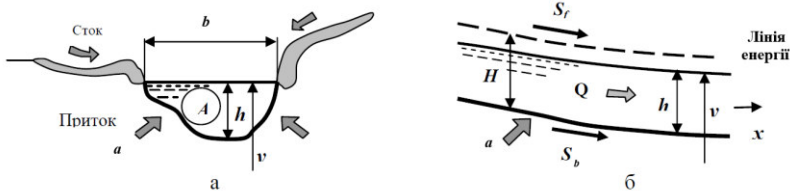


Рисунок 1 – Схема русла річки

a – поперечний переріз річки; b – поздовжній розріз.

Система диференціальних рівнянь Сен-Венана при наявності бокового притоку води у річку Дністер буде мати наступний вигляд:

– рівняння нерозривності:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q, \quad (1)$$

– динамічне рівняння кількості руху:

$$\frac{\partial u}{g \partial t} + \frac{u}{g} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} - S_0 + \frac{u|u|}{C^2 R} + \frac{qu}{gA} = 0, \quad (2)$$

де q – боковий приток; A – площа живого перерізу річки; $\frac{\partial u}{g \partial t}$ – ухил, пов'язаний з зміною швидкості у часі; $\frac{u}{g} \frac{\partial u}{\partial x}$ – зміна швидкості по довжині; $\frac{\partial h}{\partial x}$ – ухил, пов'язаний з зміною глибини по довжині русла; S_0 – ухил dna річки; $\frac{u|u|}{C^2 R}$ – ухил тертя.

На рис. 2 зображено розрахункову схему до рівняння нерозривності.

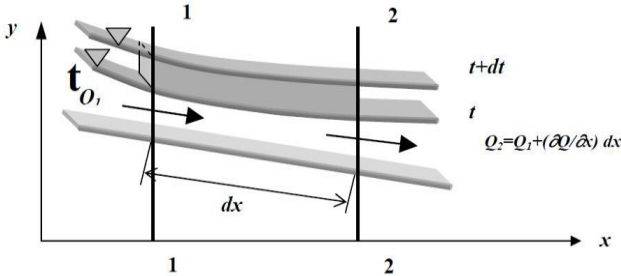


Рисунок 2 – Розрахункова схема до рівняння нерозривності

Витратна характеристика та коефіцієнт шорсткості русла:

$$Q = \varpi C \sqrt{R I}, \quad (3)$$

$$\varpi C \sqrt{R},$$

де C – коефіцієнт Шезі; R – гідравлічний радіус.

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6}, \quad (4)$$

$$R = \frac{A}{P} = \frac{\varpi}{\chi}, \quad (5)$$

де P, χ – змочений периметр; n – коефіцієнт шорсткості; $k_{str} = 1/n$.

Але в нашому випадку форма поперечного перерізу складна і має місце неоднорідна шорсткість по периметру перерізу, тому потік розділяємо на декілька зон з різною шорсткістю (рис. 3).

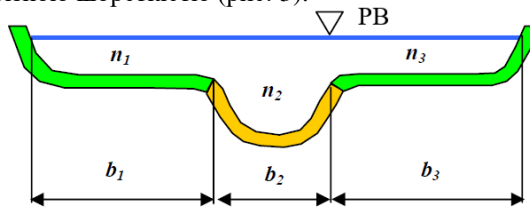


Рисунок 3 – Розрахункова схема до визначення гідравлічних характеристик річкового потоку при наявності заплави

Тоді рівняння для розрахунку опору можна застосовувати окремо до всіх i -х зон:

$$\sum_1 Q_i = Q, \quad (6)$$

або

$$\sum_i K_i \sqrt{S_f} = K \sqrt{S_f}, \quad (7)$$

$$K_i = \sum_i C_i h_i^{3/2} b_i, \quad (8)$$

де b_i – ширина i -ї ділянки.

У третьому розділі «Реалізація розрахунку пропуску паводку через Дністровський гідровузол шляхом моделювання в програмному комплексі МІКЕ 11 в основі неявно краєво-різницевої схеми потоку, що базується на рівнянні Сен-Венана».

Рівняння Сен-Венана є частковими диференціальними рівняннями з двома невідомими змінними x та t . Від них залежить швидкість u , рівень води y , (глибина h) і витрата Q (залежні змінні величини). Таке диференціальне рівняння не має аналітичного рішення.

Основна ідея чисельного розв'язання цих рівнянь була запропонована Курантом, Фрідріхсом і Леві – з використанням теорії краєвих різниць. Вирішення поставленої перед автором задачі здійснювалось у програмному комплексі МІКЕ 11 на основі дискретизації. Дискретизація здійснювалась шляхом заміни похідних краєвими різницями, а також призначення коефіцієнтів при поліномах, що використовувались для інтерполяції між точками, в яких визначались параметри потоку.

При використанні цього методу здійснюється перехід від безперервної області існування рівнянь в площині незалежних змінних (x, t) до дискретної сітки. Тому цей метод і має назву метод краєвих різниць.

В нашому випадку досліджувану ділянку річки Дністер від гідрологічного посту Заліщики до створу Дністровської ГЕС по довжині було розділено на ділянки за допомогою розрахункових точок, а час на інтервальні кроки (рис. 4).

Дискретизовані рівняння вирішуються для кожної точки (поперечного перерізу) з метою отримання залежних змінних величин.

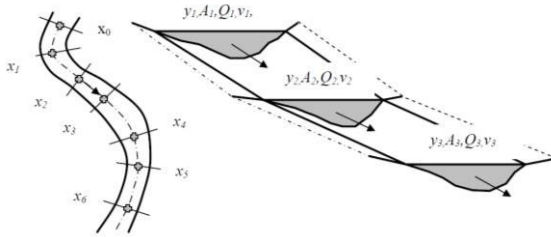


Рисунок 4 – Поперечні перерізи, наведені на плані ділянки річки Дністер та тривимірна картина потоку з параметрами, що розраховуються у залежності від глибини h : A – площа поперечного перерізу; Q – витрата води; v – швидкість потоку

В програмному комплексі МІКЕ 11 застосована схема Еббота-Іонеску. В цій схемі є дві залежні змінні, наприклад витрата Q і глибина h , які визначаються у різних точках сітки (рис. 5–рис. 6). Рівняння потоку мають вигляд:

$$b_{st} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q, \quad (9)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{Q|Q|}{K^2} = 0, \quad (10)$$

де b_{st} – ширина зони акумуляції; A – площа живого перерізу річки; $\frac{Q|Q|}{K^2}$ – ухил тертя; K – модуль витрати (пропускна спроможність русла).

Ця схема неявна: для розрахункових точок існує N невідомих (Q_{n+1} і h_{n+1}) і $N-2$ рівнянь. Дві граничні умови замикають систему і задаються у вигляді $Q(t)$ і $h(t)$ у точках Q і h відповідно.

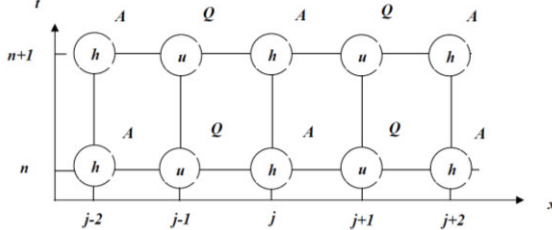


Рисунок 5 – Розрахункова сітка в методі Еббота-Іонеску

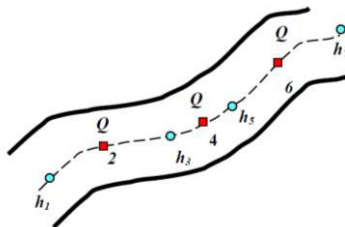


Рисунок 6 – Ділянка русла з сіткою розрахунків

У четвертому розділі «Вихідні дані для розрахунку неусталеного руху паводкової хвилі по Дністровському водосховищу. Верифікація моделі» описано гідрологічні характеристики річки Дністер на досліджуваній ділянці та проведено верифікацію моделі паводком 2008 року.

Постановка задачі. Необхідність моделювання неусталеного руху паводкових вод у річкових системах пов'язана із низкою завдань, які висуває практика водогосподарського будівництва та управління водними ресурсами. Особливе значення має прогноз виникнення повеней, основними характеристиками яких є максимальні рівні та витрати води.

Раніше розрахунки трансформації паводків по Дністровському водосховищу виконувались по статичним ємностям, які не враховували гідравлічних умов проходження паводкової хвилі по водосховищу. В такому випадку гідравлічні процеси зведені до простих балансових розрахунків притоку і скиду.

Враховуючи важливість висновків з подібних розрахунків, автором було проведено розрахунок неусталеного руху паводкової хвилі по Дністровському водосховищі за допомогою програми MIKE 11 в основі неявної краєво-різницевої схеми потоку, що базується на двовимірному рівнянні Сен-Венана, яке наведено вище.

Вихідні дані. Максимальні витрати води в р. Дністер спостерігались щорічно в період весняної повені від танення снігу, а в інші періоди року – від злив. Зливові максимальні витрати зазвичай більші снігових. Найбільший максимум за весь період з 1881 по 2020 рік був дощового походження. Паводок з максимальними витратами близько 7000–8000 м³/с спостерігався на початку вересня 1941 року. Після створення Дністровського водосховища спостерігалися значні паводки у 1998 та 2008 роках.

Дощові паводки характеризуються інтенсивними змінами ходу стоку. Тривалість підйому складає зазвичай 20–30 годин, спад відбувається на протязі більш тривалого періоду. Збільшення витрат під час підйому досягає 1000–1500 м³/с за 12 годин при передпаводкових витратах 100–200 м³/с.

Основною зоною формування дощових паводків в басейні Дністра є водозбори його правих притоків, розташовані на схилах Карпат (Стрий, Свіча, Ломниця, Бистриця). Зона підвищеного стоку простягається майже паралельно головній річці на відстані 70–90 км від неї. З верхів'я Дністра і його правобережних притоків надходить близько 75–85% річного стоку, а в період літніх паводків – до 90–95% місячного стоку Дністра. На рис. 7 показана схема басейну річки Дністер.

Площа водозбору р. Дністер – 72100 км², довжина річки – 1362 км. До створу Дністровської ГЕС водозбірна площа становить 40500 км² або 56,2% загальної площі, довжина річки – 678 км.

Середньобагаторічна сума опадів за рік складає 596 мм, з неї 435 мм або 73% припадає на теплий період (квітень – жовтень).

Основні морфометричні характеристики та проектні рівні водосховища показано в табл. 2.

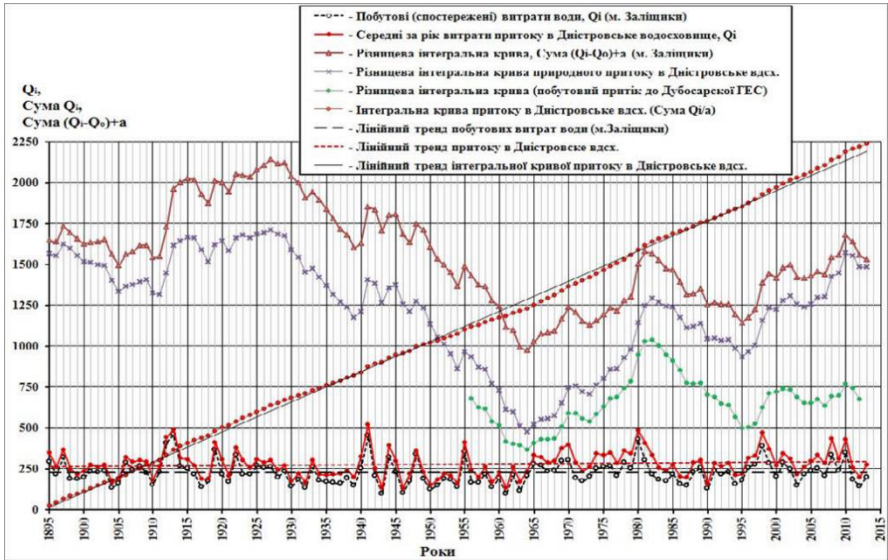


Рисунок 8 – Хронологічний хід річного стоку р. Дністер

Таблиця 1 – Розрахункові значення річного стоку р. Дністер в розрахункових створах та на водогосподарських ділянках

Характеристика	Створ Дністр-овської ГЕС	Бокова приточність між Дністровською ГЕС та Дубосарським гідровузлом (ГЕС)	Створ Дубосарської ГЕС	Бокова приточність між Дубосарським гідровузлом і гирлом Дністра	Гирло р. Дністер
1. Площа водозбору, F км ²	40500	13100	53600	18500	72100
2. Середній багаторічний стік:					
- витрата води Q, м ³ /с	278	31,1	309	34,9	344
- об'єм стоку W, км ³	8,77	0,98	9,75	1,10	10,9
3. Розрахунковий стік (км ³) забезпеченістю, P %:					
- 25%	10,4	1,17	11,4	0,95	12,7
- 50%	8,49	0,95	9,50	0,70	10,6
- 75%	6,82	0,75	7,80	0,50	8,68
- 95%	4,86	0,53	5,78	0,28	6,41
- 97%	4,42	0,48	5,33	0,24	5,93

Таблиця 2 – Характерні проектні рівні і морфометричні характеристики
Дністровського водосховища

Показник	Значення показника
1. Склад гідровузла	ГЕС водозливного типу, кам'яно-земляна гребля
2. Регулювання стоку водосховищем	Сезонне з переходом на багаторічне
3. Призначення водосховища	Гідроенергетика, водопостачання, зрошення, захист від паводків
4. Характерні проектні рівні у водосховищі: – нормальний підпірний (НПР); – мертвого об'єму (РМО); – форсований підпірний рівень при пропуску зливого паводку 0,01% забезпеченості (ФПР).	121,00 102,50 125,00
5. Морфометричні характеристик водосховища	
5.1. Площа дзеркала, км ² : – при НПР; – при РМО.	136 67,9
5.2. Статичний об'єм, млн м ³ : – при ФПР; – при НПР; – при РМО; – протипаводковий об'єм (між ФПР і НПР); – корисний об'єм (між НПР і РМО).	3227 2657 750 570 1907
6. Довжина, км	194 (за фарватером при НПР = 121,0 м)
7. Середня ширина, м	701
8. Глибина, м: – максимальна; – середня.	54 19,5
9. Витрати в проектних умовах	
9.1. Скидні зрегульовані витрати дощових паводків, м ³ /с, забезпеченості: – 0,01%; – 0,1%; – 1%; – 10%	13260 8320 2600 2600
9.2. Максимальні витрати ГЕС, м ³ /с	1970

У Дністровському водосховищі були визначені 58 ділянок від гідрологічного посту Заліщики до створу Дністровської ГЕС загальною довжиною 257,30 км. Профілі поперечних перерізів русла і заплави у розрахункових створах визначались по топографічним картам масштабу 1:25000 – тільки на притоках, а в руслі по зйомках 1982, 1992 і 2014 років.

Граничні умови задаються у вигляді гідрографів притоку і скидів фактичного паводку 24–31 липня 2008 року.

Результати розрахунків. Отримано величини рівнів і витрат води у кожному з 58 розрахункових поперечних перерізів в будь-який момент часу в період 24–31 липня 2008 року. Аналізуючи криву вільної поверхні Дністровського водосховища при проходженні паводку 1%-ї забезпеченості (рис. 9), отриману в результаті розрахунків в програмному комплексі МІКЕ 11, та побудовану по фактичним оперативним даним, можна стверджувати наступне: максимальна розбіжність у рівнях становить 0,05 м у момент максимальних рівнів у Дністровському водосховищі біля створу Дністровської ГЕС. Враховуючи той факт, що різниця між НПР та РМО Дністровського водосховища складає 18,50 м, отримана похибка розрахунків (0,27%) свідчить про те, що розрахункова ділянка річки Дністер відтворена досить точно до природніх умов, а створену гідродинамічну модель можна використовувати у подальших розрахунках пропуску паводків різної забезпеченості.

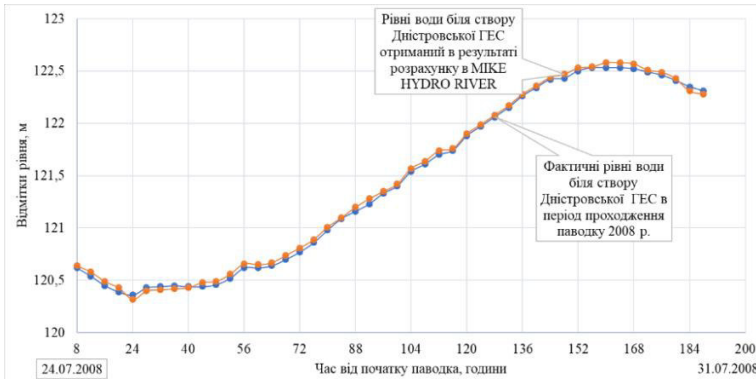


Рисунок 9 – Хід рівнів води (фактичний та отриманий в результаті розрахунку в програмному комплексі МІКЕ 11) у період проходження паводку 24–31 липня 2008 року

У п'ятому розділі «Розрахунки пропуску паводкових вод через середньонапірні гідровузли (на прикладі Дністровського гідровузла) удосконаленою методикою на основі прогнозів приточності води з урахуванням характеристик паводкової хвилі та режиму наповнення водосховища» описано затверджену у проекті Дністровського гідровузла схему регулювання паводків та весняного водопілля без врахування прогнозів та запропоновану автором методику розрахунків пропуску паводків через

середньонапірні гідровузли на основі прогнозів приточності води з урахуванням характеристик паводкової хвилі та режиму наповнення водосховища.

Основною схемою регулювання паводків та весняного водопілля, прийнятою в затвердженому проекті Дністровського гідровузла є схема без врахування прогнозів, яка гарантує зменшення максимальних витрат паводків 1–10% забезпеченості до 2600 м³/с. В цій схемі використовуються інформація про погодинні витрати води у створі гідрологічного посту Заліщики (основний прилив води до Дністровського водосховища). Регулювання стоку здійснюється за такими правилами:

- якщо витрата менше або дорівнює 2600 м³/с, то вона транзитом скидається через гідровузол, рівень води в водосховищі підтримується на позначці, що не перевищує НПР=121,00 м;

- якщо витрата більше 2600 м³/с і протипаводкова ємність ще не заповнена, через Дністровський гідровузол потрібно скидати витрату 2600 м³/с і форсувати рівень води в водосховищі аж до позначки ФПР=125,00 м;

- якщо витрата більше 2600 м³/с і протипаводкова ємність вже заповнена, то вся припливна витрата спрацьовується через Дністровський гідровузол, а рівень води утримується на позначці ФПР=125,00 м.

При регулюванні паводків за схемою без використання прогнозів зрізаються максимальні витрати тільки паводків 0,5–10%, причому найбільше всього зрізається паводок 1% забезпеченості – на 2540 м³/с або на 49,4%.

Витрати забезпеченістю менше 0,5% не зрізаються, так як протипаводкова ємність заповнюється ще на підйомі паводку.

Недоліком методики без врахування прогнозів є те, що паводкові витрати забезпеченістю більше 1% або мало зрізаються, або не зрізаються взагалі. Зазначений недолік можна усунути, використовуючи прогнози припливу води.

З цією метою пропонується проводити регулювання паводків у Дністровському водосховищі на основі використання прогнозу витрат води річки Дністер біля гідрологічного поста Заліщики (найближчий гідропост до створу Дністровської ГЕС) добової завчасності.

Методика розрахунку пропуску паводків через середньонапірні гідровузли (на прикладі Дністровського гідровузла) на основі прогнозів приточності води з урахуванням характеристик паводкової хвилі та режиму наповнення водосховища містить наступний алгоритм регулювання паводків:

1. Пропускні витрати через Дністровський гідровузол необхідно назначити виходячи з прогнозу витрат води біля гідрологічного посту Заліщики добової завчасності (фактичні витрати).

2. При прогнозі притоку добової завчасності до 1000 м³/с пропускні витрати встановлюється рівними обсягам притоку:

$$Q_{\text{Зал}}^t \leq 1000,$$

$$Q_{\text{т}}^t = Q_{\text{Зал}}^t,$$

де $Q_{\text{Зал}}^t$ – фактичні витрати у створі гідропосту Заліщики в момент часу t , $\text{м}^3/\text{с}$;
 $Q_{\text{Т}}^t$ – витрати через турбіни Дністровської ГЕС в момент часу t , $\text{м}^3/\text{с}$.

3. Якщо по прогнозу біля гідрологічного посту Заліщики очікується через добу витрата менше $2600 \text{ м}^3/\text{с}$, то через турбіни Дністровської ГЕС спрацьовуються обсяги води витратами $1960 \text{ м}^3/\text{с}$.

$$Q_{\text{Зал}}^t < 2600,$$

$$Q_{\text{Т}}^t = 1960.$$

4. Якщо за прогнозу біля гідрологічного посту Заліщики через добу очікується більше $2600 \text{ м}^3/\text{с}$, але менше $7200 \text{ м}^3/\text{с}$ (при похибці прогнозу $+40\%$ від 1% витрати $5140 \text{ м}^3/\text{с}$), тоді спрацьовується $2600 \text{ м}^3/\text{с}$.

$$2600 \leq Q_{\text{Зал}}^t < 7200,$$

$$Q_{\text{Т}}^t + Q_{\text{вод}}^t = 2600,$$

де $Q_{\text{вод}}^t$ – витрата через водоскиди, $\text{м}^3/\text{с}$.

5. Якщо за прогнозу біля гідрологічного поста Заліщики через добу очікується витрата більше $7200 \text{ м}^3/\text{с}$, то необхідно відкривати водоскидні отвори (2 години на відкриття одного прогону), а також збільшити скидні витрати. При цьому скидні витрати не повинні перевищувати $10500 \text{ м}^3/\text{с}$.

$$Q_{\text{Зал}}^t \geq 7200,$$

$$Q_{\text{Т}}^t + Q_{\text{вод}}^t \leq 10500.$$

Режим роботи гідровузла за вищезазначеною методикою призначається і коригується по мірі надходження прогнозів на підставі оперативно виконаних розрахунків трансформації паводку по Дністровському водосховищі, створеній в програмному комплексі МІКЕ 11 розрахунковій гідродинамічній моделі руху паводкових вод на досліджуваній ділянці річки Дністер.

У розрахунку було враховано той факт, що прогноз надходить у період паводку не рідше, ніж 3 рази на добу (через кожні 8 годин).

Після проходження паводку рівень води в водосховищі спрацьовується до позначки НПР= $121,00 \text{ м}$.

Для перевірки запропонованої методики пропуску паводків з використанням прогнозів були виконані розрахунки трансформації паводків $0,01\%$ забезпеченості.

Головною умовою є те, що водосховище до початок паводку було заповнене до позначки НПР= $121,00 \text{ м}$.

В результаті розрахунку пропуску паводку через Дністровський гідровузел $0,01\%$ забезпеченості (максимальною витратою $13260 \text{ м}^3/\text{с}$ біля гідрологічного посту Заліщики) на основі прогнозів приточності води з урахуванням характеристик паводкової хвилі та режиму наповнення водосховища по запропонованій автором методиці були розраховані величини рівнів і витрат води в кожному з 58 розрахункових поперечних перерізів. Аналізуючи зміну кривої вільної поверхні Дністровського водосховища при проходженні паводку $0,01\%$ забезпеченості (рис. 10), можна стверджувати, що в період підйому паводку в хвостовій частині водосховища накопичуються значні об'єми води, які поступово просуваються до греблі. Тому в цей період

часу на ділянці, прилеглій до греблі, відбувається зниження рівня води, не дивлячись на те, що скидні витрати менше приточних.

Найнижча позначка рівня води у водосховищі біля греблі відповідно до розрахунків складає 115,75 м та припадає на той інтервал часу (52 години), коли приточна витрата на підйомі паводку досягла величини 11400 м³/с, а скидна – 8150 м³/с. В момент, коли біля Заліщиків проходила максимальна витрата паводку, рівна 13260 м³/с, а скидна витрата була рівна 9800 м³/с, рівень води біля греблі був все ще нижче нормального підпірного рівня (121,00 м).

На самому спаді паводку, не зважаючи на те, що скидні витрати перевищують приточні, відбувався підйом рівнів води біля греблі. Це підвищення рівня пояснюється переміщенням динамічних об'ємів, що накопичувалися в період підйому паводка з хвостової частини на пригребельну ділянку водосховища. Найвищий рівень форсування досягнув позначки 122,60 м в момент, коли витрата води біля гідрологічного посту Заліщики була рівною 10300 м³/с, а скидна – 10500 м³/с.

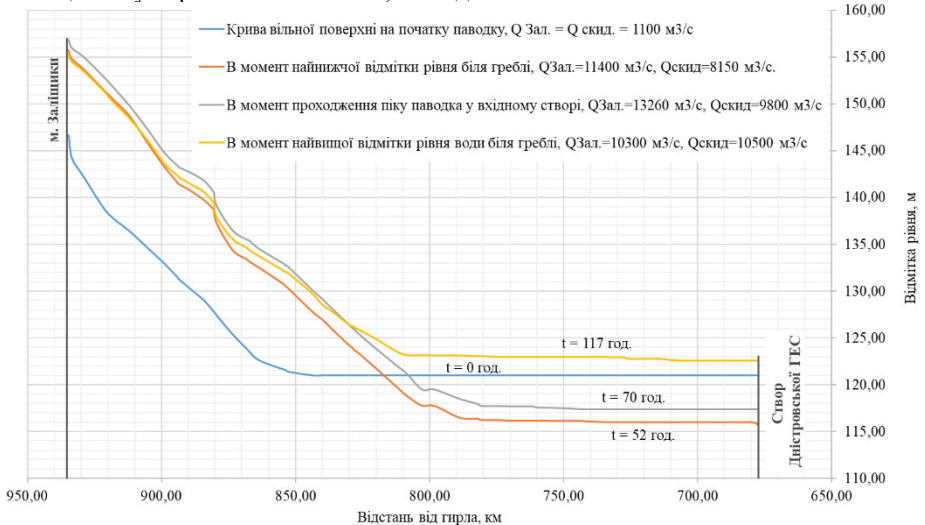


Рисунок 10 – Криві вільної поверхні в Дністровському водосховищі при проходженні паводку 0,01% забезпеченості

На основі запропонованої автором методики регулювання паводків 0,01% забезпеченості в Дністровському водосховищі по даним прогнозів добової завчасності було досліджено 3 можливих випадки:

- прогноз виявився завищеним на +40%;
- прогноз виявився точним 0%;
- прогноз виявився заниженим на –40%.

Таблиця 3 – Результати розрахунків регулювання паводків 0,01% забезпеченості

Паводок забезпеченості	Максимальна приточна витрата в водосховище, м ³ /с	Максимальна скидна витрата (м ³ /с) при похибці прогнозу			Найвищий рівень води в водосховищі біля греблі (м) при похибці прогнозу		
		+40%	±0%	-40%	+40%	±0%	-40%
0,01%	13260	10500	10500	10500	121,80	122,60	123,50

Як видно з табл. 3, найменше форсування рівня води у водосховищі спостерігається при завищеному прогнозі. Це пояснюється тим, що в очікуванні більших витрат, ніж при точному і заниженому прогнозі, на початковій стадії паводків через Дністровський гідровузел скидаються більші витрати, і відповідно, до більш низької позначки було спрацьовано водосховище перед проходженням пікової частини паводків. Але у всіх випадках форсування рівня води у водосховищі, позначка була близька до проектного рівня, який дорівнює 123,00 м, при якій проводились розрахунки гідротехнічних споруд Дністровського гідровузла на стійкість.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Побудована гідродинамічна модель відтворює близькі до реальних умов характеристики досліджуваної ділянки річки Дністер та адекватно описує вплив паводкових вод на підняття рівнів у довільному поперечному перерізі досліджуваної ділянки. Створена модель дає можливість здійснювати розрахунки трансформації стоку та визначити час добігання паводкових вод від вхідного створу до створу гідровузла.

2. Верифікація гідродинамічної моделі здійснена на основі фактичних даних, отриманих при пропуску паводку 2008 року. Результати порівняння фактичних та розрахункових даних свідчать про те, що максимальна розбіжність у рівнях води у водосховищі становить 0,05 м у момент максимальних позначок біля створу Дністровської ГЕС або 0,27%.

3. Проведений аналіз методик пропуску паводків показав, що існуючі методики прогнозування паводків на основі гідрологічних моделей різної складності мають як позитивні так негативні сторони, і потребують вдосконалення шляхом врахування динамічних характеристик паводкової хвилі.

4. Розроблено «Методику розрахунку пропуску паводкових вод через середньонапірні гідровузли (на прикладі Дністровського гідровузла)», яка враховує прогноз приточності води у водосховище на підставі фактичних даних гідрологічних постів, які розташовані вище водосховища. При цьому регулювання паводків за запропонованою автором методикою дозволяє зрізати максимальні витрати паводку 0,01% забезпеченості з 13260 м³/с до 10500 м³/с, а зрізання паводку 1% забезпеченості – з 5140 м³/с до 2600 м³/с. Завдяки цьому рівень форсування в Дністровському водосховищі не перевищує відмітки 123,50 м (при заниженому прогнозі).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Рябенко О. А., Татарінцев О. В., Семенуха А. В. Гідравлічний режим в нижньому б'єфі Каховської ГЕС після будівництва ГЕС-2 при добовому регулюванні потужності. *Вісник НУВГП. Технічні науки* : зб. наук. праць. Рівне, 2015. Вип. 3(71). С. 221–226. *(Особистий внесок: здійснено гідравлічний розрахунок коливання рівнів води в НБ Каховської ГЕС в програмному комплексі MIKE 11 та проведено порівняльний аналіз при роботі ГЕС-1 та ГЕС-1 + ГЕС-2).*

2. Рябенко А. А., Татарінцев А. В., Семенуха А. В. Пропуск паводков через Дністровський гідроузел на основі прогнозів приточності з урахуванням неустановившогося руху паводочної волни по водохранилищу. *Гідроенергетика України*. Київ, 2016. № 1–2. С. 62–66. *(Особистий внесок: здійснено гідравлічний розрахунок пропуску паводку 0,01% забезпеченості в програмному комплексі MIKE 11).*

3. Панасенко А. В. Прогнозування гідроресурсів та планування одноенергетичних режимів каскадів ГЕС та ГАЕС з врахуванням кліматичних змін. Вчені записки *Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Сер. Технічні науки*. 2020. Том 31(70). № 6. Ч. 2. С. 178–181.

4. Панасенко А. В., Сунічук С. В. Пропуск паводків нормативної забезпеченості через Дністровський гідроузел на основі прогнозів приточності. *Вісник НУВГП. Сер. Технічні науки*. Рівне, 2020. Вип. 4(92). С. 3–11. *(Особистий внесок: здійснено гідравлічний розрахунок пропуску паводку нормативних забезпеченостей з врахуванням прогнозу приточності в програмному комплексі MIKE 11).*

5. Панасенко А. В. Удосконалення методів розрахунків пропуску паводкових вод через середньонапірні гідроузли з урахуванням характеристик паводкової хвилі. *Електричне моделювання, Національна академія наук України, Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова*. Київ, 2021. Том 43(2). С. 98–108.

Статті у наукових фахових виданнях України, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection або Scopus:

6. Olefir D. O., Panasenko A. V. Methods of forecasting and planning of water resources and redistribution of runoff costs on the example of passing the flood. Методика прогнозування та планування водних ресурсів та перерозподіл стокових витрат. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, No 2(110) (2021): Hydropower. p. 6–12. ISSN 1729-3774. Scopus <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.228561> *(Особистий внесок: здійснено гідравлічний розрахунок пропуску паводкових вод через середньонапірні гідроузли та запропоновано методику пропуску паводків з врахуванням прогнозу приточності).*

Публікації у матеріалах науково-технічних конференцій:

7. Семенуха А. В. Гидравлический режим в нижнем бьефе Каховской ГЭС после строительства ГЭС-2 при суточном регулировании мощности. Доклады и тезисы. *Гидроэнергетика Новые разработки и технологии* : девятая научно-техническая конференция (22–24 октября 2015 г., г. Санкт-Петербург). С. 76.

8. Семенуха А. В. Гідравлічний режим в нижньому б'єфі Каховської ГЕС після розширення (створення ГЕС-2) при добовому регулюванні потужності.

Ресурси природних вод Карпатського регіону (Проблеми охорони та раціонального використання) : 14-а міжнародна науково-практична конференція. Львів, 2015. С. 121–128.

9. Семенуха А. В. Пропуск паводков через Дністровський гідроузел на основі прогнозів приточності с учетом неустановившегося движения паводочной волны по водохранилищу. *Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии*. Издательство АО «ВНИИГ» им. Б.Е. Веденеева, г. Санкт-Петербург, 2016 г. С. 128–133.

10. Панасенко А. В. Пропуск паводків нормативної забезпеченості через Дністровський гідроузел на основі прогнозів приливності. *Ресурси природних вод Карпатського регіону (Проблеми охорони та раціонального використання)* : 15-а міжнародна науково-практична конференція. Львів, 2016. С. 196–199.

АНОТАЦІЯ

Панасенко А. В. Удосконалення методів розрахунку пропуску паводкових вод через середньонапірні гідроузли з урахуванням характеристик паводкової хвилі. – 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, м. Рівне, 2021.

Економічні збитки від повеней та паводків набули катастрофічних значень через зростання кількості та масштабів їх розповсюдження. Існуючі методики пропуску паводків та завчасної підготовки водосховищ до прийняття паводкових вод є неефективними та потребують удосконалення. Тому актуальною була задача розробки методики, яка б усунула зазначені недоліки.

У дисертаційній роботі автором запропоновано методику розрахунків пропуску паводкових вод через середньонапірні гідроузли на основі прогнозів приточності води з урахуванням характеристик паводкової хвилі та режиму наповнення водосховища, яка дає можливість зрізання максимальних витрат через гідроузол шляхом акумулювання паводкових вод у водосховищі.

У програмному комплексі MIKE 11 (Датський інститут, Данія) створено гідродинамічну модель руху паводкових вод на досліджуваній ділянці річки від гідрологічного поста до гідроузла, яка дає змогу визначити рівні води та витрати, що надходять в водосховище у будь-який момент часу у вигляді кривих вільної поверхні при пропуску паводків різної забезпеченості.

Методика розроблена з метою ефективного пропуску паводкових вод та зрізання максимальних витрат у нижній б'єф гідроузла.

Ключові слова: коливання рівнів води, неусталений режим, прогноз, витрата води, водосховище, неявна красво-різницева схема потоку, MIKE 11.

АННОТАЦІЯ

Панасенко А. В. Совершенствование методов расчета пропуску паводковых вод через средненапорные гидроузлы с учетом характеристик паводковой волны. – 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, г. Ровно, 2021.

Экономический ущерб от наводнений и паводков получили

катастрофических значений из-за роста количества и масштабов их распространения. Существующие методики пропуска паводков и заблаговременной подготовки водохранилищ до принятия паводковых вод неэффективны и требуют совершенствования. Поэтому актуальной была задача разработки методики, которая бы устранила указанные недостатки.

В диссертационной работе автором предложена методика расчетов пропуска паводковых вод через средненапорные гидроузлы на основе прогнозов притока воды с учетом характеристик паводковой волны и режима наполнения водохранилища, которая дает возможность срезания максимальных расходов через гидроузел путем аккумуляирования паводковых вод в водохранилище.

В программном комплексе MIKE 11 (Датский институт, Дания) создано гидродинамическую модель движения паводковых вод на исследуемом участке реки от гидрологического поста до гидроузла, которая позволяет определить уровни воды и расходы, поступающих в водохранилище в любой момент времени в виде кривых свободной поверхности при пропуске паводков различной обеспеченности.

Методика разработана с целью эффективного пропуска паводковых вод и срезки максимальных расходов в нижний бьеф гидроузла.

Ключевые слова: колебания уровней воды, неустановившийся режим, прогноз, расход воды, водохранилище, неявная конечно-разностная схема потока, MIKE 11.

ABSTRACT

Panasenko A. V. Improvement of methods for calculating the flow of flood waters through medium-pressure hydraulic units, taking into account the characteristics of the flood wave. – On the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.23.16 – hydraulics and engineering hydrology. – National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, 2021.

Economic losses from floods have become catastrophic due to the growing number and scale of their spread. Existing methods of flood prevention and early preparation of reservoirs for flood acceptance are inefficient and need to be improved. Therefore, the task of developing a methodology that would eliminate these shortcomings was urgent.

In the dissertation the author proposes a method of calculating the flow of flood waters through medium pressure hydropower plants based on water inflow forecasts taking into account the characteristics of the flood wave and the reservoir filling regime, which allows cutting the maximum flow through the reservoir by accumulating flood waters in the reservoir.

The MIKE 11 software package (Danish Institute, Denmark) has created a hydrodynamic model of flood water movement in the studied section of the river from the hydrological station to the hydroelectric power station, which allows to determine water levels and costs entering the reservoir at any time in the form of free curves. surfaces when passing floods of different security.

The technique is designed to effectively pass flood waters and cut the maximum costs in the lower reaches of the hydro.

Keywords: water level fluctuations, unstable regime, forecast, water consumption, reservoir, implicit marginal flow difference scheme, MIKE 11.

Підписано до друку 09.04.2021 р. Формат 60×90/16.
Ум.-друк. арк. 0,9. Тираж 100 прим.
Зам. № 5534.

*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.*