

УДК 624.21
UDC 624.21

DOI:10.33744/0365-8171-2025-118.2-184-193

**РОЗРАХУНОК НЕУСТАЛЕНОГО РУХУ НА ОСНОВІ ЧИСЛОВОГО МЕТОДУ
РОЗВ'ЯЗУВАННЯ РІВНЯНЬ СЕН-ВЕНАНА**

**CALCULATION OF UNSTEADY MOTION BASED ON THE NUMERICAL METHOD OF
SOLVING SAINT-VENANT EQUATIONS**



Паровенко Оксана Микитівна, кандидат технічних наук, , доцент, доцент кафедри мостів, тунелі та гідротехнічних споруд Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: olenik.lia@gmail.com,

<https://orcid.org/0000-0001-8872-8415>.



Медведєв Костянтин Володимирович, кандидат фізико-математичних наук, доцент, професор кафедри мостів, тунелі та гідротехнічних споруд Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: kvmedvediev@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-0704-7093>



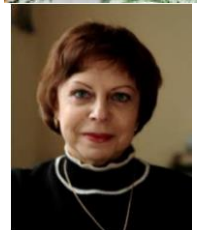
Снитко Валерій Пилипович, кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри “Мости, тунелі та гідротехнічні споруди”, Національний транспортний університет Київ, Україна,, e-mail: valeriysnytko49@gmail.com,

<https://orcid.org/0009-0003-0325-7899>



Корецький Андрій Сергійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: andriy.koretskyi@ntu.edu.ua,

<https://orcid.org/0000-0003-0307-0306>



Святишенко Ірина Іванівна, інженер, Національний транспортний університет, кафедра «Мости, тунелі та гідротехнічні споруди». e-mail: irina.svjatishenko@gmail.com,

<https://orcid.org/0000-0002-8905-0826>.

Анотація. У статті розглянуто задачу моделювання неусталеного руху води в руслових системах на основі числового розв'язування рівнянь Сен-Венана, які є фундаментальними у випадку, коли описується динаміка відкритих потоків. Метою роботи є підвищення точності та обчислювальної стійкості прогнозування гідравлічних процесів у природних та штучних руслах за допомогою

удосконаленої числової схеми розрахунку, що поєднує простоту реалізації з гарантованою збіжністю. У дослідженні реалізовано дискретизацію рівнянь неперервності руху з використанням явної різницевої схеми, адаптованої до умов змінної глибини, а також нерівномірного русла та локальних перепадів, які часто виникають у реальних гідравлічних системах. Особливу увагу приділено стабілізації розрахунків із застосуванням умов Куранта та оптимального вибору кроків сітки.

Проведені розрахунки представлено у вигляді порівняння розподілів рівня води та витрати у характерні моменти часу, що дало змогу оцінити динаміку фронту хвилі та підтвердити адекватність математичної моделі. Наведені результати демонструють, що запропонований числовий підхід забезпечує достатню точність навіть за наявності різких змін руслових умов, а отримані профілі глибин та швидкостей добре узгоджуються з аналітичними оцінками та фізичною суттю процесу. Крім того, показано можливість використання розробленої методики для побудови оперативних інженерних прогнозів, зокрема для оцінювання хвиль прориву, паводкових хвиль та інших нестационарних гідравлічних явищ.

Результати роботи може бути застосовано для розрахунків гідротехнічних споруд, моделювання паводкових ситуацій, оптимізації водогосподарських систем та у навчальному процесі при викладанні дисциплін з гідравліки та гідрологічного моделювання. Запропонований числовий метод є ефективним інструментом для вирішення широкого спектра практичних задач, пов'язаних з аналізуванням неусталеного руху води, та може бути основою для подальшого удосконалення моделей, включно з урахуванням турбулентності, руслових деформацій і багатовимірних ефектів.

Ключові слова: неусталений рух; рівняння Сен-Венана; числове моделювання; скінченно-різницева схема; метод прогонки; зрешувальні канали; пропускна здатність; гідравлічні розрахунки; попуски через споруди; нестационарний потік.

Вступ. Неусталений рух води у відкритих руслах є складним та динамічним гідравлічним процесом, який виникає від дії природних або антропогенних факторів, таких як паводки, аварійні скиди, робота гідротехнічних споруд або прориви водосховищ. Опис та прогнозування таких процесів має важливе практичне значення для забезпечення надійності інфраструктури, мінімізації наслідків надзвичайних ситуацій, оптимізації роботи гідровузлів та управління водними ресурсами. У сучасній інженерній практиці ключовим математичним інструментом для моделювання неусталених течій є одновимірні рівняння Сен-Венана, що представляють собою систему гіперболічних диференціальних рівнянь частинних похідних.

Аналітичне розв'язання рівнянь Сен-Венана можливе лише для окремих спрощених випадків, тому для більшості реальних задач застосовують числові методи. Вибір різницевої схеми, її стійкість, точність та збіжність істотно впливають на достовірність отриманих результатів, особливо за умов різких змін витрати чи глибини, коли у потоці формуються хвилі різного характеру - кінематичні, динамічні або гравітаційні. Тому питання вдосконалення числових алгоритмів і порівняння їхньої ефективності залишаються актуальними для гідравлічних розрахунків.

У цій роботі увагу зосереджено на числовому моделюванні неусталеного потоку на основі рівнянь Сен-Венана з використанням різницевої схеми, що забезпечує достатню точність відтворення хвилювих процесів. Проведено аналізування поведінки потоку за імпульсної зміни витрати, визначено характер хвилі, швидкість її поширення та вплив початкових і граничних умов на результати моделювання. Застосована методика дає можливість оцінити придатність вибраного числового підходу для вирішення інженерних задач, пов'язаних із динамікою природних і техногенних водотоків.

Матеріали та методи. У роботі застосовано одновимірні рівняння Сен-Венана, які описують неусталений рух води у відкритих руслах і включають рівняння нерозривності та рівняння імпульсу. Для моделювання неусталених процесів використано різницеву схему, побудовану на апроксимації похідних за простором і часом із дотриманням умов стійкості за критерієм Куранта [1, 2, 3, 4]. Швидкість та глибина потоку розраховувалися на кожному часовому кроці відповідно до прийнятого розрахункового алгоритму, що враховує зміну витрати, ухил русла, гідравлічний радіус та сили опору.

Для числового експерименту було задано характерні параметри русла, включно з ухилом, шириною, коефіцієнтом шорсткості, а також початкові та граничні умови, які відтворюють імпульсну зміну витрати верхньої частини розрахункової ділянки. Розрахунки виконувалися з використанням постійного просторового кроку та змінного або сталого часового кроку, що забезпечує збіжність рішення. Результати моделювання представлено у вигляді графіків розвитку хвилі, зміни глибини та витрати в різні моменти часу, що дозволило проаналізувати характер хвильового руху та порівняти його з теоретичними закономірностями.

Методику було реалізовано засобами комп'ютерного моделювання, що дозволило виконати багаторазове повторення розрахунків при різних вхідних параметрах і оцінити чутливість моделі до зміни умов формування неусталеного потоку. Отримані результати дали можливість визначити ефективність застосованого числового методу для інженерних та наукових задач гідравліки.

Мета роботи. Метою роботи є розроблення та обґрунтування числової методики моделювання неусталеного руху води в відкритих руслах на основі рівнянь Сен-Венана, а також проведення аналізу особливостей формування неусталених хвильових процесів залежно від гідравлічних та геометричних параметрів потоку. Додатковою метою було оцінювання точності та стійкості різницевої схеми, придатності її до практичного застосування в інженерних задачах, зокрема для прогнозування паводків, хвиль прориву та інших динамічних гідравлічних явищ.

Виклад основного матеріалу. Завданням розрахунку неусталеного руху на ділянках зрошувальних каналів, за наявності споруд на них, є визначення основних елементів потоку Q і h залежно від часу та положення створа по довжині русла. Для аналізу впливу досліджуваних чинників на елементи неусталеного потоку, а також для розроблення рекомендацій щодо врахування цих параметрів, було проведено розрахунки на основі числового методу розв'язування рівнянь Сен-Венана.

Результати раніше проведених досліджень дають змогу оцінити ступінь впливу різних чинників на елементи неусталеного потоку. До таких чинників можна віднести форму русла, коефіцієнт шорсткості та ухил дна (ширину і довжину русла, форму та параметри вихідного графіка попуску, швидкість підходу потоку в прикінцевому перерізі) [5, 6].

Рівняння, що описують неусталений рух, є нелінійними зі змінними коефіцієнтами. Це система диференціальних рівнянь у часткових похідних гіперболічного типу. Такі рівняння не мають аналітичної форми розв'язку. Основними методами розв'язання таких рівнянь є числові [7, 8].

Розрахунок неусталеного руху в природних руслах (за достатньої кількості вихідних даних) з найбільшою точністю можна виконати за допомогою метода неявної скінченно-різницевої схеми, використовуючи метод прогонки.

Метод прогонки має стійкий розрахунковий алгоритм, тобто при округленні значень похибка розв'язку не збільшується. Цей метод складається з прямої та зворотної прогонки.

Пряма прогонка полягає в тому, що ліва гранична умова є початковою і за допомогою скінченно-різницевої схеми отримуємо значення на правій границі, яке порівнюємо з відомими правими граничними умовами. З урахуванням отриманої різниці визначаються нові коефіцієнти для скінченно-різницевої схеми кожної точки всередині області.

Потім процес повторюється в протилежному напрямку - від правої межі до лівої. Визначаються шукані величини Q і h у кожній точці всередині та на лівій границі області за знайденими під час прямої прогонки прогоночними коефіцієнтами, та за визначеними значеннями шуканих величин на правій границі.

Стійкість розрахунку є визначальною при проведенні розрахунку неусталеного руху за неявною скінченно-різницевою схемою методом прогонки. Скінченно-різницева схема називається стійкою, якщо малі похибки, допущені в процесі розв'язування, загасають або залишаються малими при необмеженому збільшенні номера поточного шару. Необхідною умовою стійкості обчислювального процесу є умова, яку представлено у вигляді:

$$\tau < \frac{c}{g\sqrt{\frac{R}{I}}}, \quad (1)$$

де τ - крок за часом;
 R - гідравлічний радіус;
 I - гідравлічний ухил;
 c – швидкість розповсюдження малих збуджень;
 g – прискорення вільного падіння.

У розрахунках, проведених раніше [3, 4], було враховано крок за часом, який приймався в досить широкому діапазоні 0,001 ÷ 120 сек. У подальшому при проведенні розрахунків його величину було прийнято у вигляді:

$$\tau = \frac{Q}{g\omega I}, \quad (2)$$

де ω - площа живого перерізу;
 Q – витрата рідини;
 I – гідравлічний ухил дна русла.

Як видно з проведених розрахунків прийнята величина кроку за часом дала необхідну стійкість обчисленням.

Необхідно також звернути увагу на існування залежності між кроком за часом τ і кроком за довжиною русла Δ , тому що точність розрахунку залежить від відношення Δ/τ . Правильний вибір величини кроку по довжині русла значно впливає на загальний результат і точність розрахунку. Проведений аналіз показав, що збільшення кроку по довжині русла призводить до появи пилкоподібних коливань значень витрат і глибин (Q і h), при цьому відзначається, що діапазон коливань для витрат збільшується, а для глибин зменшується. З огляду на вищенаведене, взаємозв'язок кроку за часом τ і кроку за довжиною Δ має бути в межах $\Delta/\tau = 1 \div 3$.

Як початкові умови було задано рівень води та розподіл витрати по довжині русла на певний момент часу, який було прийнято за початковий період. При цьому для умов неусталеного руху води в зрошувальних каналах прийнято, що в початковий момент часу рух у руслі був сталим і рівномірним. Необхідно відмітити, що залежно від призначення каналу величина початкової глибини буде змінюватися. У зв'язку з цим для кожного нового значення початкової глибини слід визначати величину кроку за часом, а отже, і величину кроку по довжині. Значення Δ і τ , прийняті в розрахунках, наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Значення Δ і τ залежно від початкової глибини h_0

Table 1 – Values of Δ and τ depending on the initial depth h_0

	Початкова глибина, h_0			
	0,1 м	0,5 м	1,0 м	2,0 м
τ , хв.	30	60	120	200
Δ , м	50	100	200	200

Необхідною умовою для розв'язання рівнянь неусталеного руху є визначення початкових умов, тобто слід задати положення рівня води та розподіл витрати по довжині русла на момент часу, який прийнято за початковий. Досвід експлуатування каналів показує, що початкові умови характеризуються відсутністю руху води (горизонтальна поверхня) або частіше наявністю рівномірного руху. Отже, параметри, що характеризують початкові умови, мають бути відомими та залежними від призначення каналу.

Під час складання алгоритму для розв'язання поставленої задачі необхідно вирішити питання про вибір форм графіків попусків, які відповідали б найбільш характерним режимам роботи перегороджувальної споруди. Залежно від конструкції цієї споруди визначається умова на лівій межі розглянутої ділянки русла.

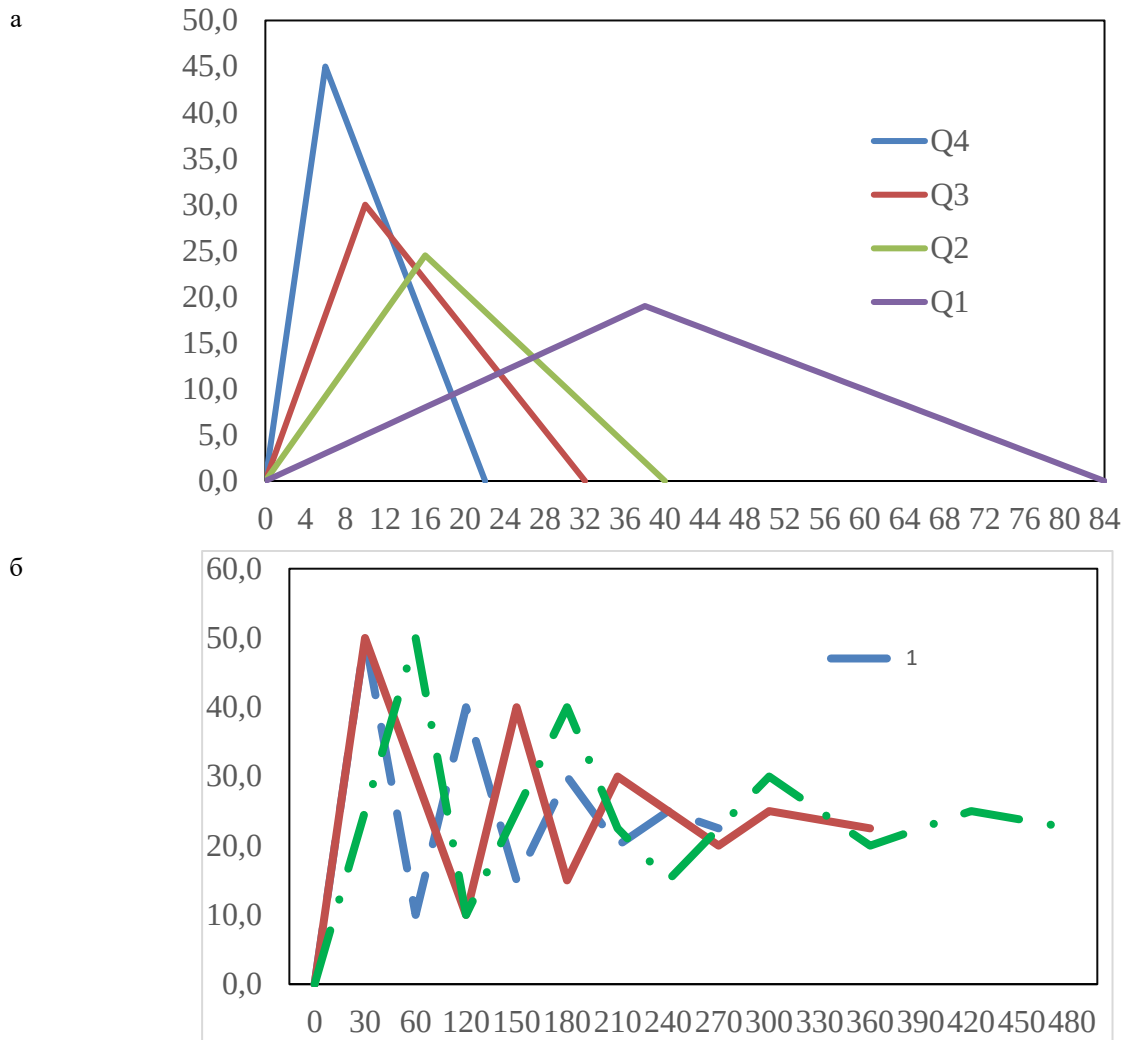


Рисунок 1 – Форми графіків попусків: а – гідрограф трикутної форми;.....
б – багатоінтервальний гідрограф
Figure 1 – Forms of discharge graphs: a – triangular hydrograph;
b – multi-interval hydrograph

Натурні спостереження дали змогу чітко вирішити питання вибору форм графіків попусків для лівої граничної умови. Тобто витрата в перегороджувальній споруді на лівій межі залежить від часу $Q=f(t)$. Побудовані графіки роботи таких споруд показали, що залежність $Q=f(t)$ мають складну форму. Проведення більш детального аналізу показало, що форма отриманих графіків поодиноких попусків, близька до трикутної або трапециїдальної. У подальшому було показано, що можливе спрощення складних за обрисом графіків попусків у простіші - трикутні. Таке спрощення не дає великих розбіжностей у результатах розрахунків. В основних розрахунках було використано трикутну форму

графіків попусків. Слід зазначити, що прийняття трикутної форми графіка попуску як лівої граничної умови, дає змогу проводити розрахунки для найневигідніших режимів експлуатування каналу. Трикутна форма графіка попуску сприяє різкому збільшенню та зменшенню витрати, і за такої форми графіку попуску жодного згладжувального ефекту не буде. У випадку трикутної форми графіку елементи $Q=f(t)$ досягають max і min протягом короткого проміжку часу. Таке різке коливання може бути причиною виникнення негативних явищ у руслі каналу.

Станом на сьогодні існують багато різних схем регулювання подачі води. За таких умов попуск води в каналах проводиться за багатоінтервальним графіком, що пов'язано з питанням поліпшення експлуатування мережі зрошувальних каналів. Багатоінтервальні графіки попуску забезпечують не лише нормальний режим роботи каналу, а й роботу всіх споруд в аварійних ситуаціях.

Проведені дослідження показують, що багатоінтервальні графіки попуску є оптимальними для непродуктивних скидів води. Подібного роду попуски забезпечують перехід у стаціонарний режим за мінімально короткий проміжок часу. На рисунку 1 наведено прийняті в розрахунках форми графіків попусків. Залежність витрати від часу для будь-якої форми графіка попусків (рисунк 2) представлено у вигляді:

$$Q_t = Q_i + (Q_{i+1} - Q_i) \frac{t - t_i}{\Delta t_{i+1}}, \quad (3)$$

де Q_t - величина витрати на будь-який момент часу t ;

Q_i - величина витрати на кінець інтервалу i ;

Q_{i+1} - величина витрати на кінці інтервалу $i+1$;

t_i - час у хвилинах від початку гідрографа до інтервалу $i+1$;

Δt_{i+1} - час у хвилинах, інтервалу $i+1$.

Аналізування наявних методів визначення пропускної спроможності малих гідротехнічних споруд дає змогу застосувати вищенаведені рекомендації до формули, що визначає пропускну спроможність споруди, розташованої наприкінці ділянки русла, та застосувати залежність, яка визначає умову на правій границі.

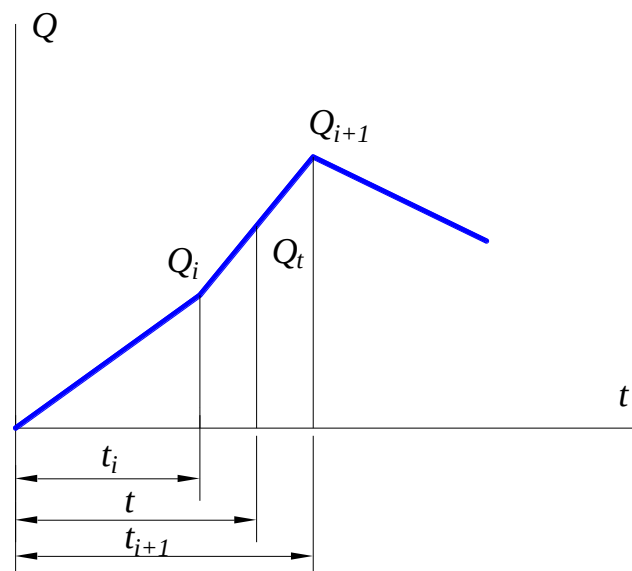


Рисунок 2 – Залежність витрати від часу для будь-якої форми графіка попусків
Figure 2 – Dependence of consumption on time for any shape of the graph of allowances

На правій границі було розглянуто дві форми поперечних перерізів каналів (прямокутний і трапецеїдальний) і дві форми підмостових перерізів (прямокутний і трапецеїдальний). У випадку, коли підмостовий переріз має прямокутну форму, витрата визначалась за формулою:

$$Q = m\sigma_3 kb\sqrt{2g}H_0^{3/2}. \quad (4)$$

Позначимо $F = m\sigma_3 kb\sqrt{2g}$,

тоді, $Q = FH_0^{3/2}$,

де m - коефіцієнт витрати;

σ_3 - коефіцієнт затоплення;

k - коефіцієнт бічного стиснення, що залежить від відношення b/B і типу вхідної грані;

b - ширина підмостового перерізу;

H_0 - гідродинамічний напір перед спорудою.

Для випадку трапецеїдальної форми поперечного перерізу підмостового русла витрата визначалась за формулою:

$$Q = m\sigma_3 k(b + m_{cn} 0,8H_0)\sqrt{2g}H_0^{3/2}. \quad (5)$$

Звідси

$$\frac{dQ}{dh} = 1,5FH_0^{3/2}. \quad (6)$$

У разі, якщо русло та підмостовий переріз мають трапецеїдальну форму, то пропускна здатність споруди визначається за формулою:

$$\begin{aligned} \frac{dQ}{dh} &= \frac{3}{2}H_0^{1/2}Fb_{cn} + \frac{5}{2}H_0^{3/2}F0,8m_{cn} = 1,5H_0^{3/2}Fb_{cn} + 2,5H_0^{3/2}F0,8m_{cn} = \\ &= F(1,5H_0^{3/2}b_{cn} + 2H_0^{3/2}m_{cn}) \end{aligned} \quad (7)$$

Для розв'язання практичних завдань, пов'язаних з експлуатуванням різних видів зрошувальних каналів і роботи гідротехнічних споруд, необхідне проведення розрахунків, які дали б змогу врахувати вплив початкової глибини наповнення на розпластуваність потоку.

Обстеження гідротехнічних споруд показало, що вони можуть перебувати на різній відстані від перегороджувальної споруди. Проведені раніше дослідження [3, 4] дали змогу встановити вплив довжини русла (відстань, на якій розташована гідротехнічна споруда, від перегороджувальної споруди) на характеристики неусталеного руху. У цих дослідженнях використано параметри, які лише частково характеризують зрошувальні канали. В результатах наступного етапу числового експерименту дослідження було враховано вплив відстані, на якій розташовано споруду від початкового перерізу, на характеристики неусталеного потоку. Перегороджувальна споруда приймалась як початковий переріз, який визначав умову на лівій границі ділянки русла.

Гідротехнічна споруда, зазвичай, обмежує потік води в плані, тобто отвір споруди приймається меншим ніж ширина потоку, що в свою чергу викликає підвищення рівня води у верхньому б'єфі, тобто перед спорудою. Але ступінь стиснення каналу спорудою може бути різним, тому постає питання про необхідність визначення, як ступінь стиснення впливає на елементи потоку при нестационарному русі води. Вирішення наведеної проблеми дасть змогу відповісти ще на одне з важливих питань - чи забезпечить наявна споруда без її реконструювання пропуск необхідних витрат води за допустимих рівнів після розширення каналу. З метою отримання більш достовірних результатів при проведенні числового експерименту вихідні дані приймались відповідно до реальних умов. Натурні спостереження роботи перегороджувальних споруд на зрошувальних каналах сприяють правильному вибору параметрів графіків попусків. Значення коефіцієнта шорсткості та ухилу дна каналу мають прийматись на підставі натурних спостережень.

Натурні спостереження підтвердили проведені раніше теоретичні розрахунки щодо визначення впливу різних чинників на характеристики неусталеного потоку. Аналізування робіт [3, 4] показало, що прийнята методика проведення числового експерименту не дала істотних розбіжностей з дослідними даними та результатами натурних спостережень (5%).

Сучасні вимоги стану експлуатування зрошувальних каналів зумовлюють необхідність переходу на автоматичний режим регулювання подачі води в них через перегороджувальну споруду.

Висновки. Проведене дослідження підтвердило ефективність застосування числового методу розв'язування рівнянь Сен-Венана для моделювання неусталеного руху води в руслах зі складними умовами течії. Використана різницева схема показала високу стійкість та збіжність розрахунків за умови дотримання критерію Куранта та відповідного вибору просторово-часових кроків. Отримані результати моделювання відтворюють характерні особливості динаміки хвильового руху, зокрема формування та поширення фронту хвилі, зміни глибин та швидкостей у часі, що підтверджує адекватність і фізичну достовірність розрахункової моделі. Порівняння профілів витрати та рівнів у різні моменти часу демонструє узгодженість числових даних із відомими теоретичними закономірностями, що свідчить про придатність обраного підходу для інженерних задач.

Розроблена методика може бути використана для прогнозування паводкових явищ, визначення хвиль прориву, аналізу роботи водогосподарських та гідротехнічних споруд, а також для навчальних цілей у курсах, присвячених моделюванню течій відкритих каналів. Запропонований підхід є гнучким і може бути розширений шляхом включення додаткових фізичних факторів, таких як турбулентність, руслові деформації або тривимірні ефекти течії. Таким чином, виконана робота робить внесок у розвиток сучасних методів числового моделювання неусталених потоків і створює підґрунтя для подальших досліджень у сфері гідравліки та гідрологічної безпеки.

Перелік посилань

- 1 ДСТУ Б В.2.4-1-99. Гідротехнічні споруди. Основні положення розрахунку водного потоку.
- 2 Баб'як М. В., Левківський О. М., Никифорчук О. М. Гідравліка: підручник. — Львів: Львівська політехніка, 2017. — 420 с.3 Постанова Кабінету Міністрів України "Про затвердження порядку відновлення зруйнованої інфраструктури" (умовний документ).
- 3 Паровенко О.М., Медведєв К.В., Євсейчик Ю.Б., Корецький А.С., Снитко В.П., Святишенко І.І. Теоретичні основи розрахунку неусталеного руху рідини. /Зб. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. — 2024, вип.115. Частина 2 — с.233-244.
- 4 Паровенко О.М., Снитко В.П., Корецький А.С., Рубльов А.В. Дослідження неусталеного руху рідини відкритих русел. /Зб. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. — 2024, вип.115. Частина 1 — с.89-98. DOI:10.33744/0365-8171-2024-115.1-089-098
- 5 Горбенко В. М. Гідравліка, гідрологія і гідрометрія: навч. посібник. — Київ: КНУБА, 2015. — 368 с.5 International Guidelines for Post-Conflict Infrastructure Reconstruction. (2023). United Nations Development Programme (UNDP). (Приклад міжнародного звіту).
- 6 Косовський П. Ф., Трохимчук В. М. Гідравліка відкритих русел. — Київ: КНУБА, 2012. — 285 с.
- 7 Саблій Л. І. Математичне моделювання процесів у гідротехнічних системах. — Харків: ХНУБА, 2019.
- 8 Никифоров М. Б. Чисельні методи в інженерній практиці: навчальний посібник. — Київ: НАУ, 2018.

CALCULATION OF UNSTEADY MOTION BASED ON THE NUMERICAL METHOD OF SOLVING SAINT-VENANT EQUATIONS

Parovenko Oksana M., Candidate of Technical Science, National Transport University, Department of Bridges and tunnels, hydraulic structures, Associate Professor, e-mail: [olen\[k.lia@gmail.com](mailto:olen[k.lia@gmail.com) +380442807978, <https://orcid.org/0000-0001-8872-8415>.

Medvediev Kostiantyn V., Candidate of Physics and Mathematics, National Transport University, Department of Bridges and tunnels, hydraulic structures, Professor, e-mail: kvmedvediev@gmail.com, +380442807978, <https://orcid.org/0000-0002-0704-7093>.

Snytko Valerii P., Candidate of Technical Science, Associate Professor, National Transport University, Department of Bridges, tunnels and hydraulic structures, Professor, e-mail: valeriysnytko@ukr.net, тел. +380442807978, Ukraine, 01010, Kyiv, street M. Omelyanovicha-Pavlenka, 1. <https://orcid.org/0000-0002-9530-4589>

Koretsky Andrii S., Candidate of Technical Science, Associate Professor, Associate Professor of bridges, tunnels and hydraulic structures, Associate Professor, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: andriy.koretskyi@ntu.edu.ua tel. +3800505433772, <https://orcid.org/0000-0003-0307-0306>

Sviatyshenko Iryna I., National Transport University, Department of Bridges and tunnels, hydraulic structures, Engineer, e-mail irina.svjatishenko@gmail.com +380442807978, <https://orcid.org/0000-0002-8905-0826>

Summary. The article considers the problem of modeling unsteady water flow in channel systems based on the numerical solution of Saint-Venant equations, which are fundamental in describing the dynamics of open flows. The aim of the work is to improve the accuracy and computational stability of forecasting hydraulic processes in natural and artificial channels using an improved numerical calculation scheme that combines simplicity of implementation with guaranteed convergence. The study implements the discretization of continuity equations using an explicit difference scheme adapted to variable depth conditions, as well as uneven channels and local drops, which often occur in real hydraulic systems. Particular attention is paid to the stabilization of calculations using Courant conditions and the optimal selection of grid steps.

The calculations are presented in the form of a comparison of water level and flow distributions at characteristic moments in time, which made it possible to evaluate the dynamics of the wave front and confirm the adequacy of the mathematical model. The results show that the proposed numerical approach provides sufficient accuracy even in the presence of sharp changes in channel conditions, and the obtained depth and velocity profiles are well consistent with analytical estimates and the physical essence of the process. In addition, the possibility of using the developed methodology for constructing operational engineering forecasts, in particular for assessing breakthrough waves, flood waves, and other non-stationary hydraulic phenomena, is shown.

The results of the work can be used for the calculation of hydraulic structures, modeling of flood situations, optimization of water management systems, and in the educational process when teaching disciplines in hydraulics and hydrological modeling. The proposed numerical method is an effective tool for solving a wide range of practical problems related to the analysis of unsteady water flow and can be the basis for further improvement of models, including taking into account turbulence, channel deformations, and multidimensional effects.

Keywords: unstable flow; Saint-Venant equation; numerical modeling; finite difference scheme; run-in method; irrigation channels; flow capacity; hydraulic calculations; discharge through structures; unsteady flow.

References

- 1 DBN V.2.3-14:2006. Transport structures. Bridges and pipes. Design standards. (or the current version of DBN, if there is a newer one). Kyiv: Ministry of Regional Development and Construction of Ukraine.
- 2 Law of Ukraine “On the Restoration and Development of Infrastructure” (or a similar document, if such a law exists or is planned).
- 3 Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine “On Approval of the Procedure for the Restoration of Destroyed Infrastructure” (conditional document).
- 4 Kovalenko, V. A., & Smirnov, P. G. (2020). Quick-assembly bridge structures in emergency situations. Scientific Bulletin of Construction, 2(3), 45-52.
- 5 International Guidelines for Post-Conflict Infrastructure Reconstruction. (2023). United Nations Development Programme (UNDP).
- 6 Grygorenko, M. V., & Petrenko, O. S. (2018). Bridge crossings: design and construction. Kyiv: Osnova.
- 7 Mabey Bridge Official Website. (URL: www.mabeybridge.com). Section on modular and quick-assembly bridges.
- 8 Materials from the conference “Rebuilding Ukraine: Engineering Solutions and Challenges in Wartime.” (2024). Collection of scientific papers.

Дата надходження до редакції 29.10.2025