

УДК 624.21  
UDC 624.21

DOI:10.33744/0365-8171-2024-115.2-233-244

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗРАХУНКУ НЕУСТАЛЕНОГО РУХУ РІДИНИ

THEORETICAL BASES OF CALCULATION OF UNSTEADY FLUID MOTION



*Паровенко Оксана Микитівна*, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: [olenik.lia@gmail.com](mailto:olenik.lia@gmail.com),

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



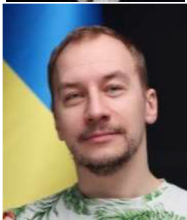
*Медведєв Костянтин Володимирович*, кандидат фізико-математичних наук, доцент, професор кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: [kymedvediev@gmail.com](mailto:kymedvediev@gmail.com)

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



*Євсейчик Юрій Борисович*, кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: [jura\\_ntu@ukr.net](mailto:jura_ntu@ukr.net)

<https://orcid.org/0000-0002-3507-4734>



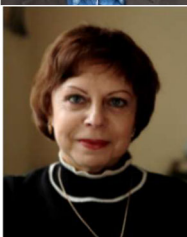
*Корецький Андрій Сергійович*, кандидат технічних наук, доцент кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: [andriy.koretskyi@ntu.edu.ua](mailto:andriy.koretskyi@ntu.edu.ua)

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



*Снитко Валерій Пилипович*, кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: [valeriysnytko49@gmail.com](mailto:valeriysnytko49@gmail.com),

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



*Святищенко Ірина Іванівна*, інженер, Національний транспортний університет, кафедра «Мости, тунелі та гідротехнічні споруди», Київ, Україна, e-mail: [irina.svjatishenko@gmail.com](mailto:irina.svjatishenko@gmail.com),

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

**Анотація.** Важливою складовою для пропускної спроможності зрошувальних каналів є визначення параметрів протікання води. Отже метою проведення дослідження був розгляд умов протікання води, за яких у перерізах зрошувальних каналів і гідротехнічних споруд відбувається неусталений рух. Аналізування цих умов надасть можливість правильно визначити пропускну спроможність таких споруд, що є вкрай важливим для їхнього проектування та ефективного експлуатування.

Основна проблема полягає у відсутності відповідних рекомендацій для врахування неусталеного руху при розрахунках пропускної здатності споруд на зрошувальних каналах. Тоді як для сталого руху такі рекомендації існують.

Таким чином, одним із завдань дослідження є визначення впливу граничних умов на характеристики руху в перерізах споруд під час неусталеного руху. Отримані результати будуть важливими для визначення пропускної здатності гідротехнічних споруд при різних режимах протікання потоку, що є ключовим для їхньої оптимальної роботи.

При реконструкції зрошувальних каналів одним із способів підвищення їхньої пропускної спроможності є збільшення геометричних розмірів. Проте, якщо розміри споруди залишити без змін, вона буде обмежувати русло каналу після його розширення, що спричинятиме утворення підпору біля споруди. Для вирішення питання про реконструкцію зрошувального каналу важливо врахувати, як впливатиме різний ступінь стиснення каналу спорудою на елементи потоку в умовах неусталеного руху. Вивчення цього питання допоможе визначити, спроможність наявної споруди без реконструкції забезпечити пропуск збільшених витрат води за допустимих рівнів після розширення каналу. Проведено низку числових експериментів, що враховують вплив різних показників на пропускну спроможність споруди.

Аналізування реальних умов руху потоку у зрошувальних каналах дозволило належним чином урахувати природу неусталеного руху при роботі зрошувальної системи вцілому. Розгляд зміни витрати води в перегороджувальній споруді, дозволить визначити, як зменшуються коливання витрати по мірі віддалення від споруди. Це явище відоме як розпластування або трансформація, і воно має важливе значення при розрахунках гідравлічних споруд у зрошувальних системах.

**Ключові слова:** неусталений рух, гідротехнічні споруди, зрошувальні канали, числові методи, граничні умови, режими протікання потоку.

**Вступ.** Проблема зрошування та обводнення мільйонів гектарів земель посушливих регіонів півдня України та поліпшення існуючого зрошувального землеробства завжди вважалась пріоритетним завданням сільського господарства. Будівництво систем іригації пов'язано з розширенням господарства та залученням нових сільськогосподарських територій, підвищенням промислового потенціалу, що супроводжується розвитком транспортної інфраструктури. Однак військові дії у південних регіонах України, особливо підрич Каховської ГЕС, поставили питання про відновлення та розбудови системи зрошувальних каналів у післявоєнний час.

Для відновлення сільського господарства південного регіону України необхідно будувати нові гідротехнічні споруди та реконструювати пошкоджені. Основною метою інженерних проєктів цієї галузі є розроблення нових конструкцій і вдосконалення методів розрахунку, що мають ґрунтуватись на глибокому розумінні фізичних принципів роботи споруд. Від правильного визначення розмірів споруд залежать економічні та експлуатаційні показники. Постає питання про доцільність та необхідність збільшення розмірів споруд у зв'язку з розширенням каналу. Якщо залишити споруду без зміни її розмірів, вона може стати перешкодою для русла каналу після його розширення, що призведе до утворення підпору біля споруди. Тому під час реконструкції зрошувальної мережі необхідно уважно розглядати, як граничні умови впливають на характеристики потоку. Крім того збільшення розмірів споруд призведе до зростання вартості будівництва та неефективного використання матеріалів.

**Виклад основного матеріалу.** Вирішення питання щодо доцільності реконструкції споруди в умовах відновлення каналу потребує врахування умов руху потоку на ділянках, поблизу від споруди.

Тільки проведення такого аналізу дозволить відповісти на питання, чи зможе наявна споруда забезпечити необхідний рівень витрати води після розширення каналу без її реконструкції.

Існуючі методи гідравлічного розрахунку споруд і відкритих русел переважно базуються на припущенні усталеного руху води, за якого приймають максимальний рівень витрати. Проте реальний процес руху потоку води в зрошувальних каналах залежить від фактора часу, тому під час розрахунку таких каналів і споруд необхідно враховувати неусталений рух. Це особливо актуально в контексті загальної тенденції переходу до автоматичного режиму регулювання подачі води в зрошувальних каналах [1].

Було розроблено різноманітні схеми регулювання води в каналі, такі як за нижнім б'єфом, за верхнім б'єфом, змішаного типу, з об'ємами, що перетікають, тощо. Важливо зазначити, що будь-яка з цих схем пов'язана з неусталеним рухом води.

Такий рух води також може бути спричинено змінами витрат або рівнів води в каналах, які відбуваються в результаті автоматичного регулювання або інших факторів.

Отже, при виконанні гідравлічних розрахунків зрошувальних каналів і споруд важливо враховувати неусталений рух води та вибирати відповідну схему регулювання, яка б урахувала цей фактор [2].

Роботи відомих авторів, таких як Сен-Венан, Буссінеск, Масса, Форхгеймер, С.А. Християнович тощо, дали змогу створити гідравлічну теорію неусталеного руху. Основу цієї теорії складають рівняння Сен-Венана (1): рівняння руху (динамічне) та рівняння нерозривності (суцільності). Неусталений рух може бути розглянуто з різною повнотою, проте у випадку одновимірних задач ураховуються лише середні характеристики потоку.

$$i_0 = \frac{dh}{dS} = \frac{\alpha}{2g} \frac{dV^2}{dS} + \frac{\alpha_0}{g} \frac{dV}{dt} + \frac{V^2}{C^2 R}$$
$$\frac{d\omega}{dt} + \frac{dQ}{dS} = 0 \quad (1)$$

де  $i_0$  - ухил дна русла;  
 $h$  - глибина потоку;  
 $S$  - відстань;  
 $\alpha$  - коефіцієнт кінетичної енергії потоку;  
 $\alpha_0$  - коефіцієнт кількості руху;  
 $V$  - середня швидкість потоку;  
 $g$  - прискорення сили тяжіння;  
 $t$  - час;  
 $C$  - швидкісний множник;  
 $R$  - гідравлічний радіус;  
 $Q$  - витрата;  
 $\omega$  - площа живого перерізу.

Розрахунок неусталеного руху у відкритих руслах ускладнюється тим, що потрібно інтегрувати рівняння, для визначення функцій  $Q=f(t,S)$  і  $H=f(t,S)$ , які відповідають цим рівнянням за певних початкових умов. Рівняння Сен-Венана є нелінійними та містять змінні коефіцієнти, що робить знаходження інтегралів у явному вигляді складним завданням. Таким чином, існуючі методи розрахунку неусталеного руху є наближеними, оскільки точний аналітичний розв'язок рідко досяжний.

Основні рівняння неусталеного руху відповідають припущенню про повільні зміни руху рідини. Цей тип неусталеного руху часто називають "довгими хвилями" тому, що кривизна їхніх

миттєвих профілів незначна. У таких хвилях довжина перевищує висоту підйому рівня рідини, що виникає від них, і характеризується поступовими змінами. Під час розв'язання рівнянь Сен-Венана важливо вказати граничні та початкові умови.

Закон зміни в часі витрати води в початковому перерізі визначає ліву граничну умову, тоді як гідравлічний режим у кінцевому перерізі - праву граничну умову. Початкові умови містять положення рівня води та розподіл витрати по довжині на певний момент часу [3].

У разі наявності неусталеного руху води в руслі, максимальна витрата в кінцевому перерізі буде меншою ніж максимальна в початковому перерізі. Встановлена витрата в кінцевому перерізі визначає розрахункові дані для всіх наступних гідравлічних розрахунків, пов'язаних з визначенням характеристик споруди.

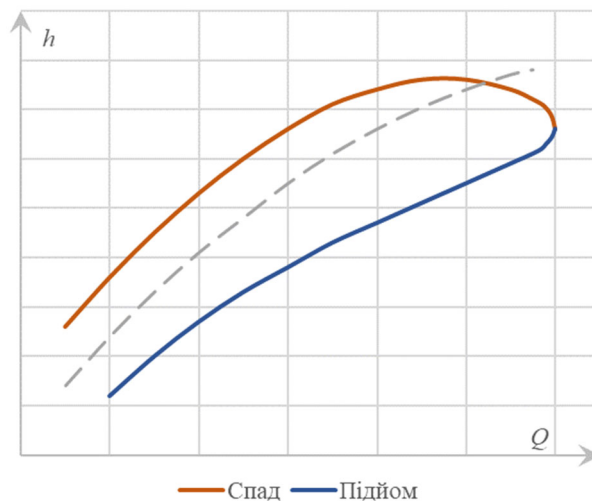
Точні результати регулюючої ємності русла та розпластування хвилі можна отримати шляхом розв'язання рівнянь неусталеного руху.

У відкритих руслах найповніше неусталений рух описується рівняннями Сен-Венана (1), які дозволяють урахувати резервну місткість русла. Розв'язання цих рівнянь за певних початкових і граничних умов дозволяє визначити значення витрати та глибини потоку з урахуванням резервної місткості. Процес руху хвилі в руслі пов'язаний з безперервною зміною витрати, швидкості, глибини та ухилу вільної поверхні потоку залежно від часу в кожному фіксованому створі.

Зв'язок між глибиною потоку і витратою води може бути виражений у вигляді функціональної залежності  $Q=f(H)$ , яку часто називають кривою витрати. У випадку сталого руху ця залежність є однозначною, тобто кожній витраті відповідає певна стала глибина води, і навпаки.

Проте під час неусталеного руху ця однозначність порушується через зміну ухилу вільної поверхні потоку з плином часу в одному і тому ж перерізі. Глибини, необхідні для пропуску певних витрат, у періоди зростання витрат менші, ніж у періоди спаду, що відрізняється від залежності  $Q=f(H)$  у випадку сталого руху. Таким чином, залежність  $Q=f(H)$  у випадку неусталеного руху має форму петлі з гілками підйому і спаду.

Залежність, що має петлеподібний вигляд, показує, що максимуми рівня, витрати та швидкості виникають у різний час під час неусталеного руху. Перший максимум, що відповідає швидкості, спостерігається у точці 1 (рисунк 1), другий максимум - витраті - у точці 2, а третій максимум - глибині - у точці 3.



**Рисунок 1** - Гілки підйому і спаду  
**Figure 1** - Branches of rise and fall

У міру віддалення від початкового створу форма кривої для цього допуску змінюється внаслідок розпластування хвиль. Це призводить до зменшення коливань витрати та скорочення розтягнутості петлі уздовж осей  $H$  і  $Q$ . Крім того, зменшується відхилення петлі від кривої під час сталого руху, що призводить до стиснення петлі до відрізка кривої.

Аналіз рисунку 1 показує необхідність проведення дослідження умов протікання неусталених потоків у перерізах споруд, розташованих на зрошувальних каналах, та визначення розрахункових параметрів потоку в цих перерізах. Що є важливим у процесі проектування нових і реконструювання вже існуючих споруд. Це дозволить розробити практичні рекомендації щодо визначення їхньої пропускної спроможності.

Завданням розрахунку неусталеного руху на ділянках зрошувальних каналів, за наявності споруд на них, є визначення основних елементів потоку  $Q$  і  $h$  залежно від часу і 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 і параметри вихідного графіка попуску, швидкість підходу потоку в кінцевому перерізі).

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 цих рівнянь є числові.

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

Метод прогонки має стійкий обчислювальний алгоритм, тобто під час округлення помилки похибки розв'язку не збільшуються. Цей метод складається з прямого прогону та зворотнього прогону.

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 області та на лівій границі за знайденими під час прямого прогону прогоночними коефіцієнтами та обчисленими значеннями шуканих величин на правій границі.

Проводячи розрахунки неусталеного руху за неявною скінченно-різницевою схемою методом прогонки, необхідно зупинитися на понятті стійкості. 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:

$$\tau < \frac{c}{g\sqrt{I}}, \quad (2)$$

де  $\tau$  - крок за часом;

$R$  - гідравлічний радіус;

$I$  - гідравлічний ухил;

$c$  - швидкість розповсюдження малих збуджень;

$g$  - прискорення вільного падіння.

У проведених розрахунках урахувували крок за часом, який приймали в досить широкому діапазоні від 0,001 сек. до 120 сек. Під час проведення розрахунків величина кроку за часом була прийнята у вигляді:

$$\tau = \frac{Q}{g\omega I}, \quad (3)$$

$\omega$  - площа живого перерізу.

Як показали подальші розрахунки прийнята величина кроку за часом дала необхідну стійкість обчисленням.

Необхідно також звернути увагу на існування залежності між кроком за часом  $\tau$  і кроком за довжиною русла  $\Delta$ , тому що точність розрахунку залежить від відношення  $\Delta/\tau$ . Правильний вибір величини кроку по довжині русла значно впливає на обчислення 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  $\tau$  і кроку за довжиною  $\Delta$  має бути в межах  $\Delta/\tau = 1 \div 3$ .

Як початкові умови задавали рівень води і розподіл витрати по довжині русла в 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 сталий рівномірний. Необхідно зазначити, що залежно від призначення каналу величина початкової глибини буде змінюватися. У зв'язку з цим для кожного нового значення початкової глибини слід визначити величину кроку за часом, а отже, і величину кроку по довжині. Значення  $\Delta$  і  $\tau$ , прийняті в розрахунках, наведено в таблиці 1.

**Таблиця 1** - Значення  $\Delta$  і  $\tau$  залежно від початкової глибини  $h_0$

**Table 1** - Values of  $\Delta$  and  $\tau$  depending on the initial depth  $h_0$

	Початкова глибина, $h_0$			
	0,1 м	0,5 м	1,0 м	2,0 м
$\tau$ , хв.	30	60	120	200
$\Delta$ , м	50	100	200	200

Для розв'язання рівнянь неусталеного руху необхідною умовою є визначення початкових умов, тобто слід задати положення рівня води та розподіл витрати за довжиною русла на момент часу, який приймають за початковий. Досвід експлуатації каналів показує, що початкові умови характеризуються відсутністю руху води (горизонтальна поверхня) або частіше наявністю рівномірного руху. Отже, параметри, що характеризують початкові умови, мають бути відомі й залежати 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. Перегороджувальна споруда визначає собою умову на лівій межі розглянутої ділянки русла.

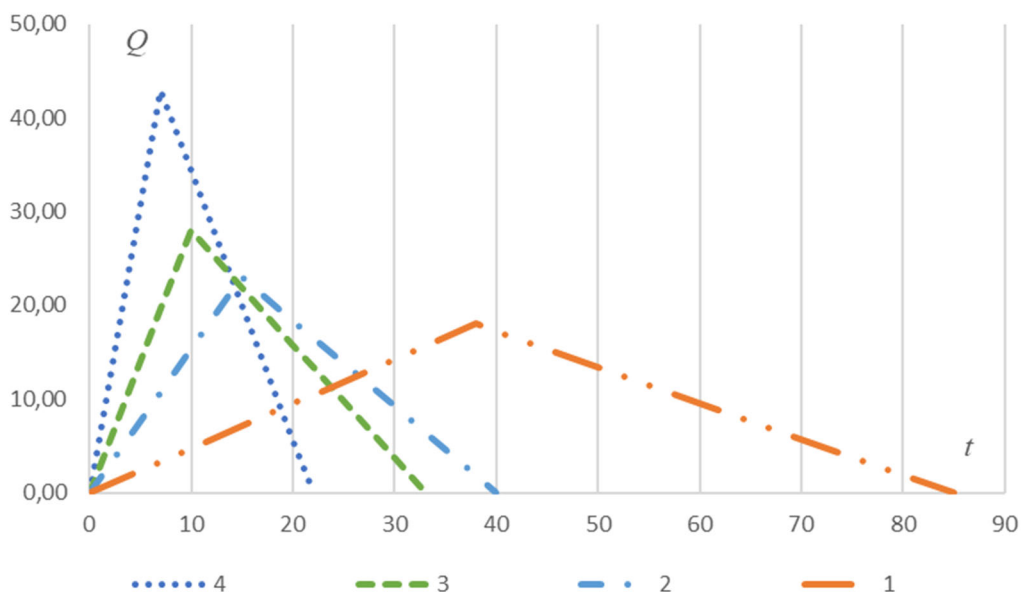
Натурні спостереження дали змогу чітко вирішити питання вибору форм графіків попусків для лівої граничної умови. Тобто витрата в споруді на лівій межі залежить від часу  $Q=f(t)$ . Побудовані графіки роботи таких споруд показали, що залежність  $Q=f(t)$  мають складну форму. Більш детальний аналіз показав, що форма отриманих графіків поодиноких попусків, близька до трикутної або трапецієдальної. У подальшому є можливим схематизувати подібні складні за обрисом графіки

попусків у простіші, трикутні. Така схематизація не дає великих розбіжностей у результатах розрахунків. В основних розрахунках було використано трикутну форму графіків попусків. Необхідно зазначити, що прийняття трикутної форми графіка попуску як лівої граничної умови, дає змогу проводити розрахунки для найневигодніших режимів експлуатації каналу. Трикутна форма графіка попуску сприяє різкому збільшенню і зменшенню витрати, і за такої форми графіку попуску жодного згладжувального ефекту не буде. У такому випадку елементи  $Q=f(t)$  досягають  $max$  і  $min$  протягом короткого проміжку часу, і це різке колювання може бути причиною виникнення негативних явищ у руслі каналу.

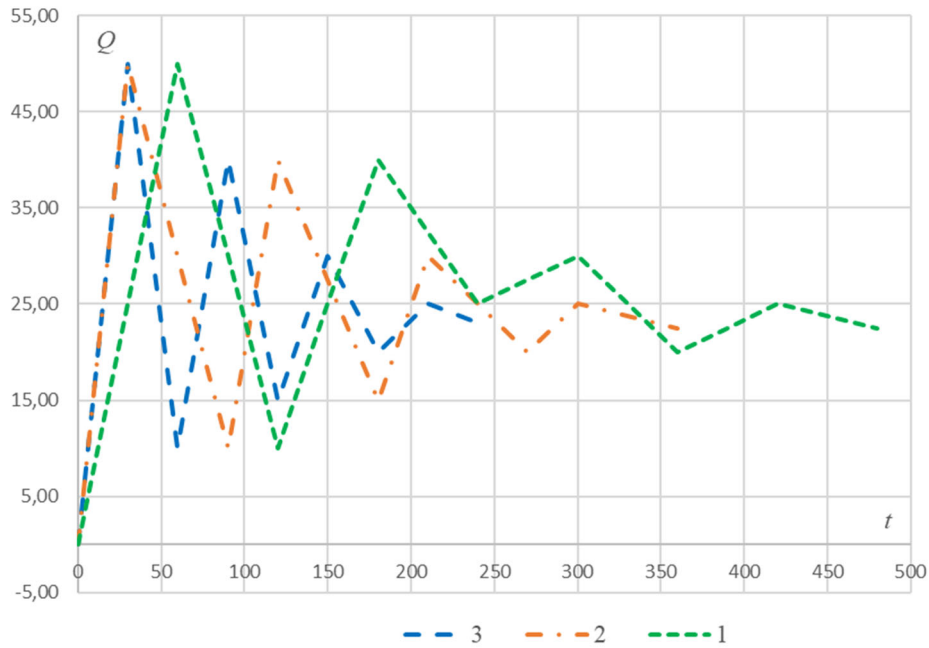
Сучасні вимоги стану експлуатації зрошувальних каналів зумовлюють необхідність переходу на автоматичний режим регулювання подачі води в них через перегороджувальну споруду.

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

Проведені дослідження показують, що багатоінтервальні графіки попуску є оптимальними в питанні непродуктивних скидів води. Подібного роду попуски забезпечують перехід на стаціонарний режим у мінімально короткий час. На рисунках 2 і 3 представлено прийняті в розрахунках форми графіків попусків.

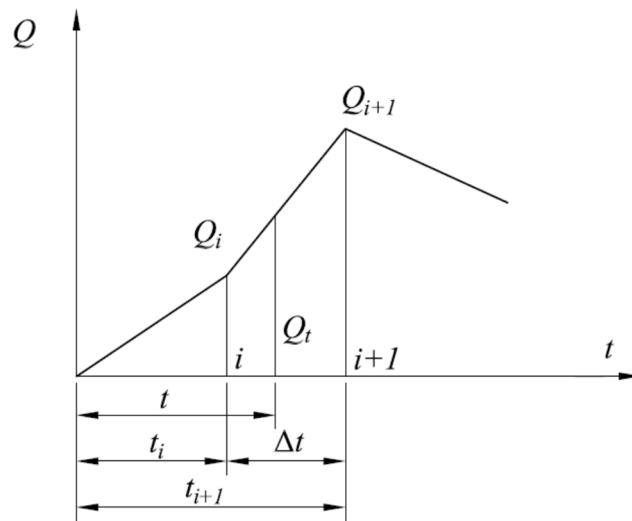


**Рисунок 2** – Графік попусків  
**Figure 2** - Release schedule



**Рисунок 3** – Графік попусків  
**Figure 3** - Release schedule

Залежність витрати від часу для будь-якої форми графіка попусків представлено на рисунку 4:



**Рисунок 4** - Залежність витрати від часу  
**Figure 4** - Dependence of consumption on time

Графік залежності витрати від часу для будь-якої форми графіка попусків розраховано за формулою:

$$Q_t = Q_i + (Q_{i+1} + Q_i) \frac{t - t_i}{\Delta t_{i+1}}, \quad (4)$$



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  $i+1$ ;  
 $\Delta t_{i+1}$  - час у хвилинах, інтервалу  $i+1$ .

Для розв'язання задач щодо умов на правій границі було розглянуто дві форми поперечних перерізів каналів (прямокутний і трапецеїдальний) і дві форми підмостових перерізів (прямокутний і трапецеїдальний) [4]. У випадку, коли підмостовий переріз мав прямокутну форму, витрата визначалась за формулою:

$$Q = m\sigma_3 kb\sqrt{2g}H_0^{3/2}. \quad (5)$$

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

тоді,  $Q = FH_0^{3/2}$ ,

де  $m$  - коефіцієнт витрати;  
 $\sigma_3$  - коефіцієнт затоплення;  
 $k$  - коефіцієнт бічного стиснення, що залежить від відношення  $b/B$ ;  
 $b$  - ширина підмостового перерізу;  
 $B$  - ширина русла каналу;  
 $H_0$  - гідродинамічний напір перед спорудою.

Звідси  $\frac{dQ}{dh} = 1,5FH_0^{3/2}$ .

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

$$Q = m\sigma_3 k (b + m_{cn} 0,8H) \sqrt{2g} H_0^{3/2}, \quad (6)$$

де  $m_{cn}$  - коефіцієнт витрати споруди.

У разі трапецеїдальної форми русла та підмостового перерізу пропускну здатність споруди визначаємо за формулою:

$$\begin{aligned} \frac{dQ}{dh} &= \frac{3}{2} H^{1/2} F b_{cn} + \frac{5}{2} H^{3/2} F 0,8 m_{cn} = 1,5 H^{3/2} F b_{cn} + 2,5 H^{3/2} F 0,8 m_{cn} = \\ &= F (1,5 H^{3/2} b_{cn} + 2 H^{3/2} m_{cn}) \end{aligned}, \quad (7)$$

де  $H$  - гідродинамічний напір у перерізі споруди;  
 $b_{cn}$  - ширина підмостового русла споруди.

У загальному випадку коефіцієнти закладання укосів підмостового перерізу та русла каналу не дорівнюють один одному, що й ураховано в рівнянні (7).

Для розв'язання практичних завдань, пов'язаних з експлуатацією різних видів зрошувальних каналів і роботи гідротехнічних споруд, необхідно провести розрахунки, які дали б змогу врахувати вплив початкової глибини наповнення на розпластуваність потоку.

Обстеження гідротехнічних споруд показали, що вони можуть перебувати на різній відстані від перегороджувальної споруди. Проведені раніше дослідження дають змогу встановити вплив довжини русла (відстань, на якій розташована гідротехнічна споруда, від перегороджувальної споруди) на характеристики неусталеного руху. Але дослідження охоплюють лише параметри, що не повною мірою може бути віднесено до зрошувальних каналів. Наступний етап числового експерименту доповнює результати досліджень з визначення впливу відстані, на якій розташована споруда від початкового перерізу, на характеристики неусталеного потоку. Під початковим перерізом слід розуміти споруду, що перегороджує і визначає умову на лівій границі ділянки русла, що розглядається.

Гідротехнічна споруда, зазвичай, обмежує потік у плані, тобто отвір споруди приймається меншим ніж ширина потоку, що викликає підвищення рівня води у верхньому б'єфі, тобто перед спорудою. Але ступінь стиснення каналу спорудою може бути різним, у зв'язку з чим необхідно вирішити питання, як ступінь стиснення впливає на елементи потоку при нестационарному русі води. Це дасть змогу відповісти на одне з важливих питань - чи забезпечить наявна споруда без її реконструкції пропуск необхідних витрат води за допустимих рівнів після розширення каналу. З метою отримання більш достовірних результатів під час проведення числового експерименту вихідні дані було прийнято відповідно до реальних. Натурні спостереження роботи перегороджувальних споруд на зрошувальних каналах дали змогу правильно підійти до питання вибору параметрів графіків попусків. Значення коефіцієнта шорсткості та ухилу дна каналу було прийнято на підставі натурних спостережень та розрахунків [5].

На підставі цих спостережень ширина каналу прийнята такою, що дорівнює 10 м, а коефіцієнт закладення укосів русла  $m = 0$  і  $m = 3$ , ширина каналу -  $b=10$  м.

У результаті розрахунків отримано дані для кожної серії розрахунків. Результати отримано для  $Q$ ,  $h$ ,  $V$  у створі русла, зумовленого обраним кроком за довжиною, і через інтервал часу залежно від кроку за часом. Використовуючи ці дані, побудовано залежності  $Q=f(t)$  і  $H=f(t)$  на кожен момент часу (крок за часом) і  $Q=f(l)$  у будь-якому створі з кроком за довжиною.

**Висновки.** У рамках дослідження було розглянуто умови протікання потоку в перерізах, розташованих поблизу від гідротехнічних споруд на зрошувальних каналах. Слід зауважити, що дослідження проводилося за умови поодиноких попусків (трикутних) та за наявності автоматичного регулювання водоподачі. Ці умови характеризуються багатоінтервальними затухаючими гідрографами.

Методика дослідження ґрунтувалась на проведенні числового експерименту та на його реалізації. В якості методу розрахунку було використано метод прогону за неявною різницевою схемою. Цей метод дозволив ефективно змодельовати процеси руху рідини в умовах неусталеного руху та вивчити їхні характеристики в перерізах споруд.

Проведені натурні спостереження підтвердили раніше виконані теоретичні розрахунки щодо визначення впливу різних чинників на характеристики неусталеного потоку. Аналіз робіт показав, що прийнята методика проведення числового експерименту не показала істотних розбіжностей між дослідними даними та результатами натурних спостережень. Виконані роботи показують, що розбіжність між розрахунковими та досвідченими даними менше ніж 5%.

У подальших етапах числового експерименту планується розширення кола досліджуваних факторів, зокрема вивчення впливу ухилу дна русла на характеристики неусталеного руху в зрошувальних каналах. Також планується розглянути вплив відстані між спорудами на їхню пропускну спроможність, що є ще одним важливим аспектом для розрахунків зрошувальних каналів.

#### **Перелік посилань**

- 1 Ткачук С.Г. Гідравліка, гідрологія, гідрометрія. Київ, «Кафедра», 2013 р., 390 с.
- 2 Гнатів Р.М.Б Тазалова Н.М. Класифікація неусталеного руху рідини. Львів, вид-во Вісн. Нац. ун-ту «Львівська політехніка». –2013. –№ № 758

3 Константинов Ю.М., Гіжа О.А. «Інженерна гідравліка», К, вид-во, дім «Слово», 2006, 432 с.

4 Башкевич І.В., Євсейчик Ю.Б., Медведєв К.В., Паровенко О.М., Святишенко І.І. Вплив ступеня затоплення та стиснення на протікання потоку в отворі гідротехнічної споруди при неусталеному русі рідини/Зб. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – 2022, вип.111 – с.140-148.

5 Євсейчик Ю.Б., Медведєв К.В., Паровенко О.М., Святишенко І.І. Визначення коефіцієнту шорсткості для розрахунку потоку неусталеного руху рідини/Зб. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – 2022, вип.112 – с.163-169.

## RESEARCH OF ASPECTS OF REDUCING ROAD TRAFFIC INJURIES BASED ON ABROAD EXPERIENCE

**Oksana Parovenko**, PhD (Candidate of Technical Science), Associate Professor, Associate Professor of bridges, tunnels and hydraulic structures, Associate Professor, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: [olenik.lia@gmail.com](mailto:olenik.lia@gmail.com), +380442807978, <https://orcid.org/0000-0001-8872-8415>,

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

**Yurii Yevseichyk**, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, National Transport University, Department of Bridges, tunnels and hydraulic structures, Associate Professor, e-mail: [jura\\_ntu@ukr.net](mailto:jura_ntu@ukr.net), +380442807978, <https://orcid.org/0000-0002-3507-4734>

**Andrii Koretsky**, PhD (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](mailto:andriy.koretskyi@ntu.edu.ua) tel.+3800505433772, <https://orcid.org/0000-0003-0307-0306>

**Snytko Valerii**. (Candidate of Technical Science), Associate Professor, Associate Professor of bridges, tunnels and hydraulic structures, Associate Professor, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: [valeriysnytko@ukr.net](mailto:valeriysnytko@ukr.net), тел. +380442807978, <https://orcid.org/0000-0002-9530-4589>

**Sviatyschenko Iryna**, National Transport University, Department of Bridges and tunnels, hydraulic structures, Engineer, e-mail [irina.svjatishenko@gmail.com](mailto:irina.svjatishenko@gmail.com), +380442807978, <https://orcid.org/0000-0002-8905-0826>

**Summary.** An important component for the capacity of irrigation canals is the determination of water flow parameters. Therefore, the purpose of the study was to consider the conditions of water flow under which unsteady motion occurs in the cross-sections of irrigation canals and hydraulic structures. Analyzing these conditions will make it possible to correctly determine the capacity of such structures, which is extremely important for their design and efficient operation.

The main problem is the lack of appropriate recommendations for taking into account unsteady traffic when calculating the capacity of structures on irrigation canals. While such recommendations exist for steady-state traffic.

Thus, one of the objectives of the study is to determine the effect of boundary conditions on the characteristics of movement in cross sections of structures during unsteady flow. The results obtained will be important for determining the capacity of hydraulic structures under different flow regimes, which is key to their optimal operation.

When reconstructing irrigation canals, one of the ways to increase their capacity is to increase their geometric dimensions. However, if the dimensions of the structure are left unchanged, it will restrict the channel after it is widened, causing a backwater near the structure. When deciding on the reconstruction of an irrigation canal, it is important to consider how different degrees of compression of the canal by the structure will affect the flow elements under conditions of unsteady flow. Studying this issue will help determine the ability of the existing structure without reconstruction to ensure the passage of increased water flows at

acceptable levels after the canal expansion. A number of numerical experiments have been conducted that take into account the impact of various indicators on the capacity of the structure.

The analysis of the actual conditions of flow in irrigation canals made it possible to properly take into account the nature of unsteady flow in the operation of the irrigation system as a whole. Consideration of the change in water flow in the barrier structure will allow us to determine how flow fluctuations decrease with distance from the structure. This phenomenon is known as flattening or transformation, and it is important in the design of hydraulic structures in irrigation systems.

**Keywords:** unsteady motion, hydraulic structures, irrigation canals, numerical methods, boundary conditions, flow regimes.

### **References**

- 1 Tkachuk S.G. Hydraulics, hydrology, hydrometry. Kyiv, "Kafedra", 2013, 390 p.
- 2 Hnativ R.M.B Tazalova N.M. Classification of unsteady fluid motion. Lviv, Lviv Polytechnic National University, 2013. -No. 758.
- 3 Konstantinov Y.M., Giza O.A. "Engineering hydraulics", K, publishing house "Slovo", 2006, 432 p.
- 4 Bashkevich I.V., Yevseichyk Y.B., Medvedev K.V., Parovenko O.M., Svyatysenko I.I. Influence of the degree of flooding and compression on the flow in the opening of a hydraulic structure at unsteady fluid movement / Collection of automobile roads and road construction. - 2022, issue 111 - pp. 140-148.
- 5 Yevseichyk Y.B., Medvedev K.V., Parovenko O.M., Svyatysenko I.I. Determination of the roughness coefficient for calculating the flow of unsteady fluid motion / Collection of scientific papers "Automobile roads and road construction" - 2022, issue 112 - pp.163-169.

*Дата надходження до редакції 03.06.2024.*